

# 日本海溝陸側斜面における底層流・濁度の変動特性

満澤 巨彦\*<sup>1</sup> 門馬 大和\*<sup>1</sup> 宮本 元行\*<sup>2</sup> 青木 美澄\*<sup>3</sup>  
海宝 由佳\*<sup>1</sup> 堀内 一穂\*<sup>4</sup>

日本海溝陸側斜面における海底直上及び近傍の流れの特性、及び海底堆積物の移動の特性を把握することを目的として、1994年～1995年にかけて、宮古及び八戸沖の海溝陸側斜面において流速計により構成された係留系による観測を実施した。

係留系は、宮古沖の水深5,800mの海底上50mに275日間、八戸沖の水深4,200mの海底直上1mと海底上35mに20日間設置された。これら観測により、以下の結果が得られた。

1) 海溝陸側斜面海底直上においても深層西岸境界流として海溝軸に沿った南南西方向の定常的な流れが存在していることが確かめられた。その平均流速は3-7cm/sec、最大流速は15-20cm/secである。

2) 宮古沖においてはM<sub>2</sub>潮に一致する流速変動が卓越していた。

3) 海底に設置されたビデオカメラにより、海底の堆積物が剥離される様子が捕えられた。海底における濁度は平均0.59ppmで、流れと濁度より1日当たり1m<sup>2</sup>の鉛直断面を通して約3.5kgの堆積物・懸濁物が海溝軸に沿って南南西に移動していることが見積られた。

キーワード：日本海溝、深層西岸境界流、流速計、濁度計

## Variability of Bottom Current and Turbidity on the Japan Trench Inner Slope

Kyohiko MITSUZAWA\*<sup>5</sup> Hiroyasu MOMMA\*<sup>5</sup>  
Motoyuki MIYAMOTO\*<sup>6</sup> Misumi AOKI\*<sup>7</sup>  
Yuka KAIHO\*<sup>5</sup> Kazuho HORIUCHI\*<sup>8</sup>

In the deep sea area of Japan Trench, located about 150km east from northern Honshu, one observes southward flow on the inner slope and the northward flow on the outer slope.

In 1994 and 1995, moorings were deployed at the floor of Japan Trench Inner Slope off

\* 1 海洋科学技術センター深海研究部

\* 2 アジア航測株式会社

\* 3 日本海洋事業株式会社

\* 4 東北大学理学部地圏環境科学科

\* 5 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

\* 6 Asia Air Survey Co., Ltd.

\* 7 Nippon Marine Enterprises, Ltd.

\* 8 Department of Geoenvironmental Science, Faculty of Science, Tohoku University

Miyako and Hachinohe. One mooring deployed for 275 days at depth of about 5,800m and another mooring deployed for 20 days at depth of about 4,200m.

Observations showed :

1) Deep western-boundary current is observed such as SSW-ward flow along the trench axis above the inner slope of Japan Trench; mean speed is 3-7cm/sec and maximum speed is 15-20cm/sec.

2) Current changes depend mainly on the  $M_2$  tide.

3) A video camera equipped in a mooring system shows sediments re-suspended by the bottom current with mean concentrations of sediment 0.59ppm, yielding estimated 3.5kg sediments transport SSWward per square meters per day.

**Key words :** Japan Trench, Deep Western-boundary current, Current meter, Turbidity meter

## 1. はじめに

日本海溝は、北本州の東側約 150km にほぼ南北に連なっており、北は北海道沖で千島・カムチャツカ海溝に、南は房総沖で伊豆・小笠原海溝へと続いている。この海溝域の表層では、本州から離岸した黒潮が北からの親潮と三陸沖で衝突している。また、本州の沿岸域には、津軽海峡を通過した対馬暖流に起源を持つ沿岸流が南下している。この海域については、主には黒潮、親潮の混合現象に関する観測・モデル実験が多く行われている。海溝の深海域における流れの観測についても、近年になっていくつかの報告がなされ、その特性が明らかとなりつつある。

海洋科学技術センターでは、1991 年以来、「ディープ・トウカメラ」及び「しんかい 6500」を用いた深海域の調査が三陸沖の日本海溝を中心に数多く行われており、海底に点在する底棲生物の底層流に対する走流性に着目し、宮古沖の日本海溝の底層流は、海溝軸付近を境に海溝海側斜面において北北東方向への流れが、海溝陸側斜面では南～南南西方向への流れの存在が報告されている（堀内ほか、1993）。また、陸側斜面では、0.2kt を超える強い南向きの流れにより、「しんかい 6500」の海底での移動が困難な時があった、という報告もある。

また、1992-94 年にかけて米国 Naval Research Laboratory のグループによって、常磐沖から房総沖にかけての、深層流の係留観測が実施され、常磐沖の陸側斜面においては、海溝軸に沿った南西方向の平均約 0.3-1.6 cm/sec の深層西岸境界流が観測されている（Hallock *et al.*, 1995）。

しかしながら日本海溝における海底直上・近傍の流れの観測例はほとんどない。このため、海底直上の底層流

の変動特性を調べることを目的として、1994 年 10 月より 9 か月間、宮古沖の陸側斜面に流向流速計の係留系を設置した。

また、1994 年 12 月 28 日に八戸沖で発生した「三陸はるか沖地震」の余震観測の一環として、海溝域の海底直上の底層流及びそれに起因する濁度の変動特性を調べ、震源域における海底の変動現象及び海底環境を把握することを目的とし、流向流速計・濁度計等からなる係留系を海底地震計と共に 1995 年 3 月に約 20 日間設置した。

## 2. 観 測

この海域における底層流の観測は異なる 2 つの係留系により行われた。観測の目的が、長期間の底層流変動の観測、「三陸はるか沖地震」の余震に関連する海底の変動現象の観測と異なるため、係留系の構成及び設置期間が異なっている。係留系は、図 1 に示すように宮古沖及び八戸沖の海溝陸側斜面上に設置された。

長期間の深層流の変動を観測するための係留系は、2 台の流向流速計（Aanderaa Model RCM-8）、ガラス球ブイ及び切離装置付トランスポンダ（Benthos Model 865）より構成される。流速計の係留高度は、海底上約 20m と海底上約 50m である。設置期間は 1994 年 10 月 24 日～1995 年 7 月 26 日で、流速計の測定間隔は 1 時間毎とし、宮古沖日本海溝陸側斜面水深 5,805 m (39°24.85' N, 144°05.29' E) の地点 (Station-A) に設置された。設置は「かいうよう」により、回収は「よこすか」により実施された。残念なことに海底上 20m に係留した流速計が浸水したためデータが得られなかったが、275 日間の海底上 50m (深度 5,755m) の流向流速データが得られた。

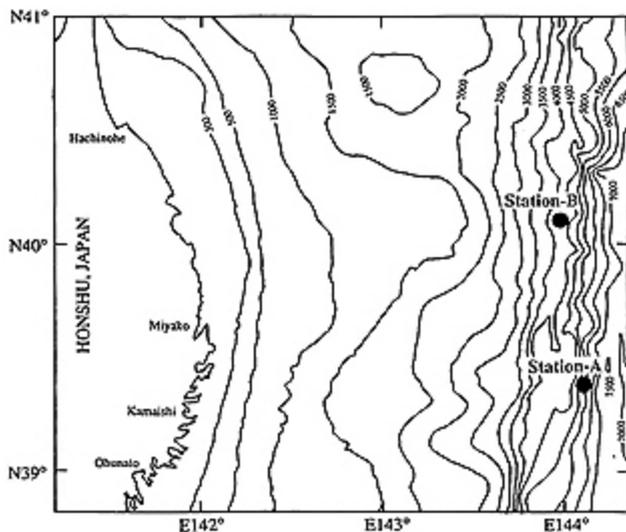


図1 調査海域図及び係留系設置位置  
Fig. 1 Map of Japan Trench Inner Slope and positions of moorings.

「三陸はるか沖地震」の余震に関連する海底変動を観測するための係留系は、海底に着底した状態で計測する海底設置部と、その上方約35mに係留された係留部により構成されている。海底設置部は流向流速計（アレック電子(株)ACM8M）、濁度計（アレック電子(株)MTB16K）、水中8mmビデオカメラ（Sony CCD-V89）、切離装置付トランスポンダ（Benthos Model 865）、水中ライト（Deepsea SL-1010）及び水中バッテリー（Deepsea SB-12/76）が、直径約48mmの鉄製のパイプで組まれた約1,000(W)×1,100(L)×1,500(H)のオープンフレームに組み込まれている。係留部は流向流速計（アレック電子(株)ACM8M）、濁度計（アレック電子(株)MTB16K）及びガラス球ブイからなる。設置期間は、1995年3月4日から3月24日の約20日間で、八戸沖の日本海溝陸側斜面、水深4,220m（40°07.62'N, 143°59.15'E）の地点（Station-B）に設置された。設置及び回収は、日本サルヴェージ(株)所属の「若潮丸」により実施された。この結果、海底直上約1m（深度4,219m）の流向流速、濁度、ビデオ映像が、また、海底上約35m（深度4,185m）の流向流速、濁度、水温の変動が得られた。流向流速、濁度、水温は5分間隔で記録するように、また、ビデオカメラは3時間毎に30秒間録画するように設定した。以後、Station-Bの係留部（海底上35m）で得られたデータをStation-B1、海底設置部（海底上1m）で得られたデータをStation-B2と表わす。

各設置地点における海底の東西断面を図2に示す。

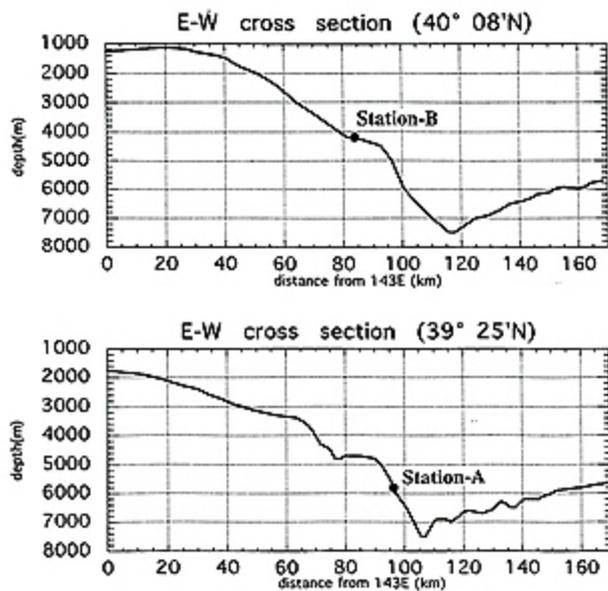


図2 係留点の東西地形断面。143°Eを基準とする  
Fig. 2 Cross section of east to west based on 143°E.

Station-A（図2の下）は、海溝軸に近い傾斜約7-7.5°の急斜面で、Station-B（図2の上）はその北側約80kmで、陸側斜面のほぼ中間に広がる東西幅約2kmのテラスの中央に位置する。このテラスは、場所によってはやや窪地を形成している。Station-BからAにかけて海溝軸は約10km程西にずれ、海溝軸に近い陸側斜面の勾配が急になっていることがわかる。

### 3. 観測結果

#### 3.1 流向・流速の特性

得られた流れのスティックダイアグラムを図3に、流向・流速の頻度分布を図4に示す。図3によると、各観測点で南向きの流れが卓越しており、北向きの流れがみられるのはまれである。年間の傾向としては、3月（425-455日）ごろ南向きの流れが特に強く、4月から5月（460-515日）にかけて流れが弱まっている。時々、見られる北向きの流れは、南向きに比べ弱い。Station-Aのデータから、Station-Bの係留系は、南向きの流れが卓越している期間に設置されていることがわかる。

図4の頻度分布によると、Station-Aの流向はほぼ海溝陸側斜面に平行な190°~210°の南南西方向成分が卓越しており、200°に顕著なピークが見られる。Station-Aの流速については4cm/secにピークが見られ、全期間の平均流速は3.99cm/secで、最大流速は

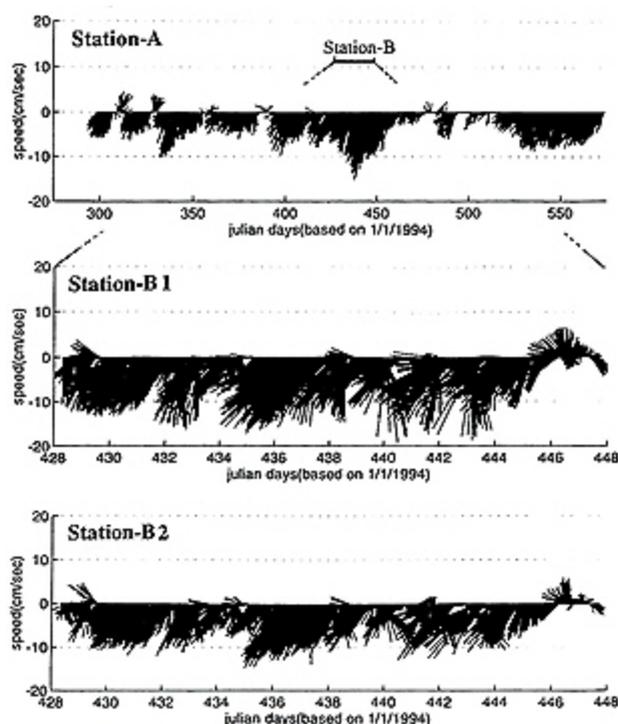


図3 流れのスティックダイアグラム。1994年1月1日を基準とする。Station-A: 1994年10月24日～1995年7月26日、係留深度5,755m。Station-B: 1995年3月4日～1995年3月24日、係留深度4,185m (B1), 4,219m (B2)

Fig. 3 Stick plots of current velocity obtained from Station-A and B. Data of Station-A obtained from 24 October 1994 to 26 July 1995 at a depth of 5,755m. Data of Station-B obtained from 4 March 1995 to 24 March 1995 at depths of 4,185m (B1) and 4,219m (B2).

15.69cm/secであった。図中0cm/secに見られるピークは、流速計 (Aanderaa, RCM-8) の最小測定流速が2.5cm/secであるため、それ以下の微小流速がすべて0になってしまうことによる。

Station-Bの海底上35mではStation-Aとほぼ同様に220°方向が卓越している。流速のピークは8cm/secにみられる。平均流速は、10.21cm/secで、最大流速は、22.26cm/secである。海底直上については210°にピークが見られるが、海底上35mに比べると、130°～160°方向にも若干の卓越が認められる。これは、当初、フレーム等の影響による片寄りの可能性も考えられたが、同じ構成の係留系を用いて実施された駿河トラフ底の底層流観測 (Mitsuzawa *et al.*, 1993) においては、このような片寄りは見られず、装置の特性によるものではないことが裏付けられる。流速のピークは5～7cm/secに見られる。海底直上における平均流速は、7.25cm/

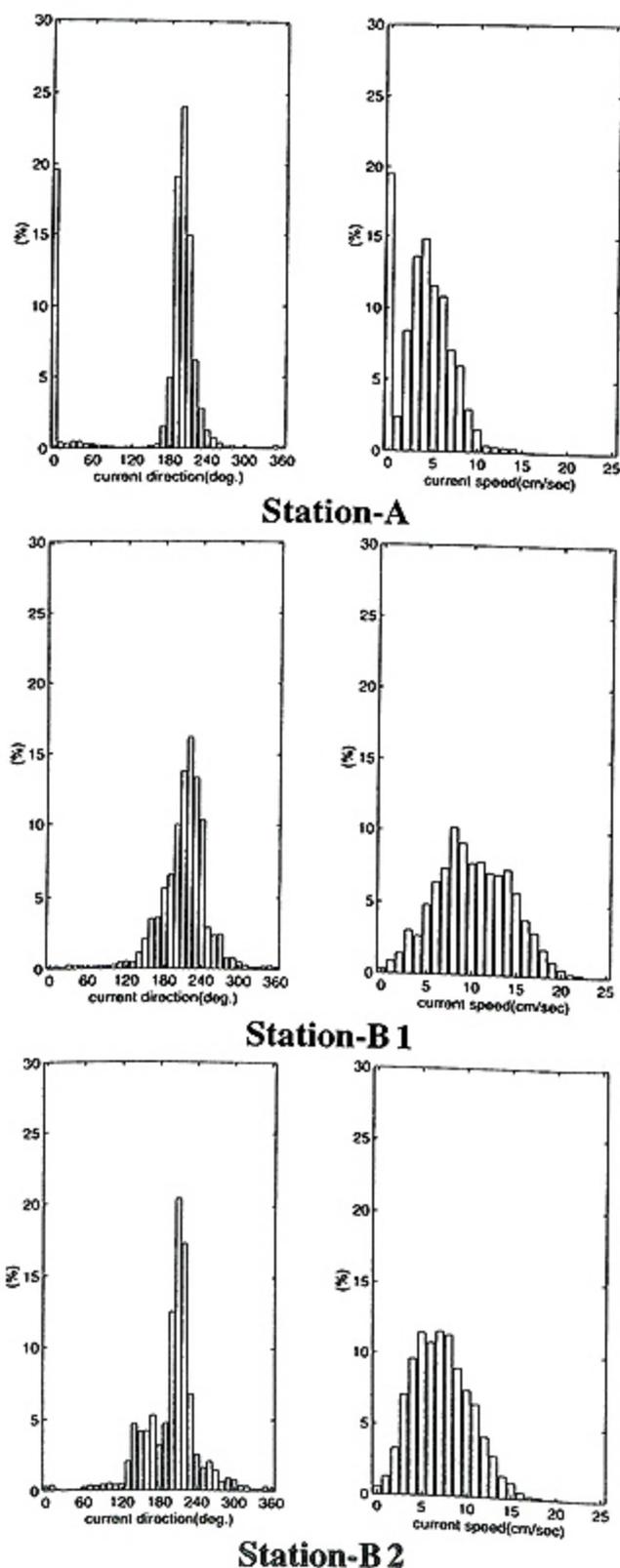


図4 流向・流速の頻度分布

Fig. 4 Histograms of current direction and speed.

sec で、最大流速は、20.69cm/sec である。また、海底上 35m の流速頻度分布が正規分布に近い形状であるのに対し、海底直上では流速の低い方に片寄っている。

### 3. 2 流れの変動エネルギーについて

日周期以上の変動成分を長周期成分、日周期以下の変動成分を短周期成分とし、その変動エネルギーについて調べた。

流速の時間変動  $U(u, v)$  を

$$U = \hat{U} + \bar{U} + U'$$

であらわす。 $U(u, v)$  における  $u$  は東西成分で東向きを正とし、 $v$  は南北成分で北向きを正とする。 $\hat{U}$  は全期間の平均流速、 $\bar{U}$  は 25 時間の移動平均、 $U'$  は 25 時間以下の変動成分を表わす。

$U$  の分散は全変動エネルギー (Variance)、 $\bar{U}$  の分散は 25 時間以上の長周期変動エネルギー (L.P.V.: Low passed variance)、 $U'$  の分散は 25 時間以下の運動エネルギー (H.P.V.: High passed variance) を表わす。また、表中、L.P.V.\*、H.P.V.\* は、それぞれの全変動エ

ネルギーに対する割合を示した値である。

その結果を表 1 に示した。Station-A においては、変動エネルギーは東西成分より南北成分の方が大きいことがわかる。ただ、H.P.V. が L.P.V. に比べ小さいのは、サンプリング間隔が 60 分と長いので、このためサンプリング間隔の異なる Station-B の H.P.V. とは単純に比較することはできない。

### 3. 3 流れの変動周期について

流れの変動周期を調べるために、FFT によるスペクトル解析を行った。図 5 に Station-A において得られた結果を示す。長周期の変動については、東西、南北成分共に約 138 日周期 (图中、 $8.41 \times 10^{-8}$  Hz) にピークが現れているが、その他に卓越した変動周期は認められない。日周期以下の変動周期については、南北成分では 12.42 時間と 23.93 時間に、東西成分については 12.42 時間に顕著なピークが認められる。これは、それぞれ、潮汐による変動周期の  $M_2$  成分、 $K_1$  成分に一致しており、潮汐による変動が顕著であることがわかる。

表 1 Station-A, B における平均流速及び各変動エネルギー  
Table 1 Mean speed and variances of Station-A and B.

	Mean (cm/sec)	Variance (cm/sec) <sup>2</sup>	H.P.V. (cm/sec) <sup>2</sup>	L.P.V. (cm/sec) <sup>2</sup>	H.P.V.*	L.P.V.*
<b>Station-A</b>						
total component	3.99	8.21	1.08	7.43	0.13	0.91
u-component	-1.19	1.20	0.51	0.78	0.42	0.64
v-component	-3.53	9.09	0.99	8.39	0.11	0.92
<b>Station-B1</b>						
total component	10.21	17.24	12.28	10.29	0.71	0.60
u-component	-5.06	21.81	17.69	8.03	0.81	0.37
v-component	-7.44	18.72	14.47	7.61	0.77	0.41
<b>Station-B2</b>						
total component	7.25	10.55	7.82	5.68	0.74	0.54
u-component	-2.53	14.76	13.46	3.84	0.91	0.26
v-component	-5.58	10.90	7.40	5.42	0.68	0.50

H.P.V.: High passed variance of 25 hour.

L.P.V.: Low passed variance of 25 hour.

H.P.V.\*: High passed variance normalized by variance(H.P.V./Variance).

L.P.V.\*: Low passed variance normalized by variance(L.P.V./Variance).

u-component: 東西成分、東向きが正.

v-component: 南北成分、北向きが正.

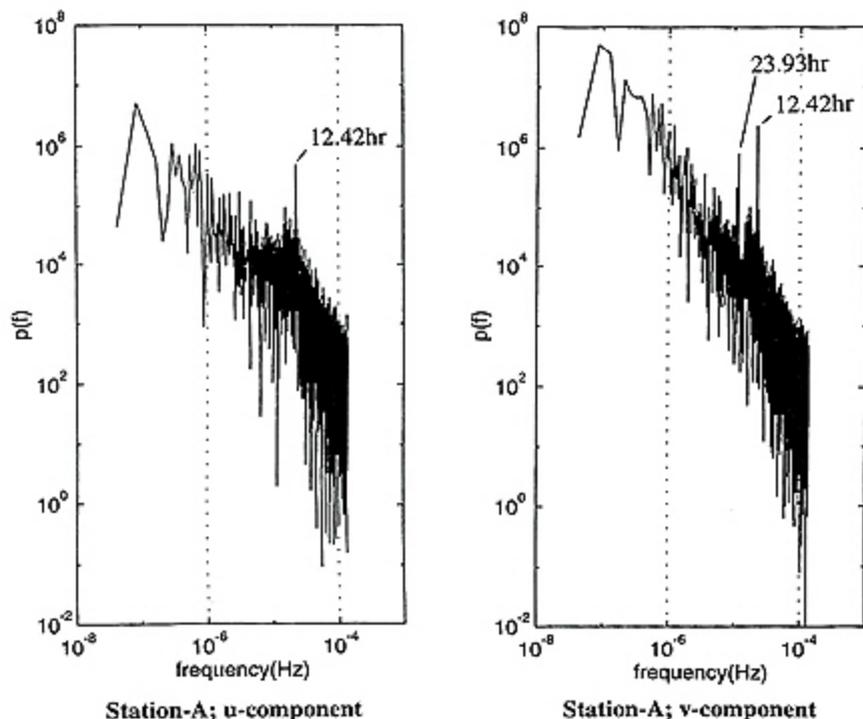


図 5 Station-A における成分流速のスペクトル解析結果  
 Fig. 5 Spectra of u and v components of current at Station-A.

Station-B におけるスペクトルを図 6 に示す。長周期の変動としては、上下層の各成分に 6.3 日周期にピークが認められるが、それより短い周期としては、上層の u 及び下層の各成分で 12.39 時間周期、上層の v 成分で 12.73 時間周期の変動が存在している。これらは、いずれも  $M_2$  潮に起因した変動であると考えられる。

### 3. 4 濁度の変動及び海底堆積物の移動

Station-B において得られた濁度及び流速変動の 2 時間の移動平均を図 7 に示す。係留部における濁度の平均は 0.45 ppm、海底設置部における濁度の平均は 0.59 ppm である。437 日、443 日付近でそれぞれ、濁度の上昇が見られるが、その変化は海底に近い方が大きい。濁度の上昇と海底流速の関係について、定量的な関係は得られなかったが、定性的には海底における流速が約 10 cm/sec を超えると濁度の上昇が見られるようである。海底における流速と濁度の変動の相互相関関数を図 8 に示す。これによると、濁度の変動と流速の変動の間には時間的なずれはほとんど認められない。さらに、ビデオカメラの映像より、この付近の海底の表層は泥で覆われており、濁度の上昇がみられた時には海底の堆積物が流れにより剥離されている様子が捕えられている。このことより、高濁度時に海底近傍を移動する物質は、海底より舞い上がった堆積物であることが確認できた。

濁度と流れのデータより求めた物質の移動量を表 2 に示す。移動する物質のほとんどは、上層下層共、南向き、西向きに移動していることがわかる。海底直上の方が、上層より濁度が高いにもかかわらず、上層の流速が速いため移動量は上層の方がやや高い。全収支より物質の移動は、流れの向きとよく一致しており、ほぼ海溝軸に沿って南南西方向に、1 m<sup>2</sup> 当たりの断面をとおして 1 日当たり、海底付近では 3.19 kg、海底上 35 m では 3.54 kg の移動が見積られる。

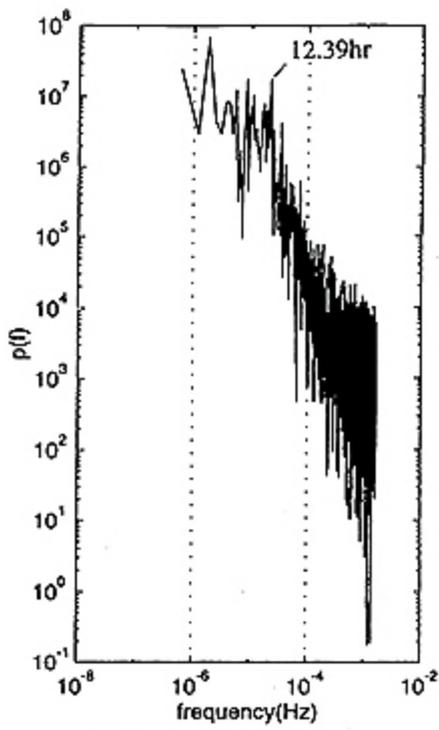
## 4. 考 察

### 4. 1 流れの変動エネルギー

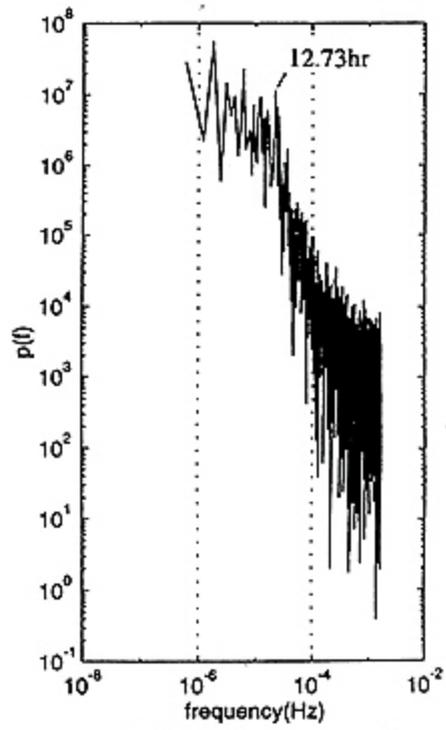
海底直上における流れの変動エネルギーに関して、表 1 より Station-B のデータのどの変動エネルギーを見ても、上層側のデータの値が大きく、海底直上より海底上 35 m の方が乱れが大きいことを示している。これは、海底直上の流れが、海底の摩擦による粘性の効果により、その乱れが抑制されていることを示している。また、すべての変動エネルギーに関して、南北成分より東西成分の変動エネルギーが大きく、東西に大きな変動を伴った南向きの流れであることがわかる。

### 4. 2 濁度分布

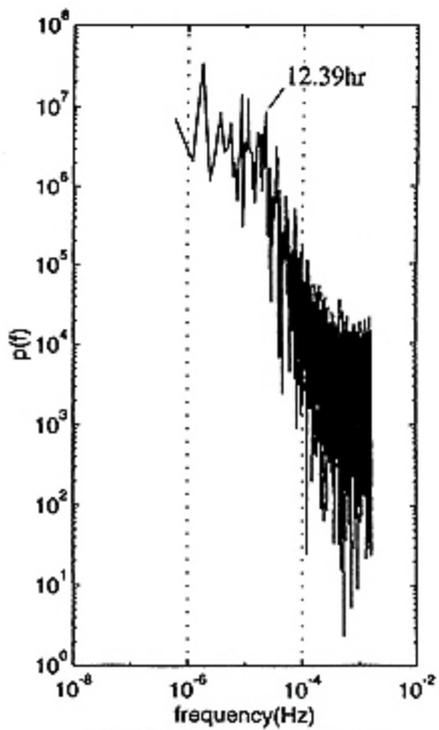
海底における物質の移動についてビデオ画像を見るか



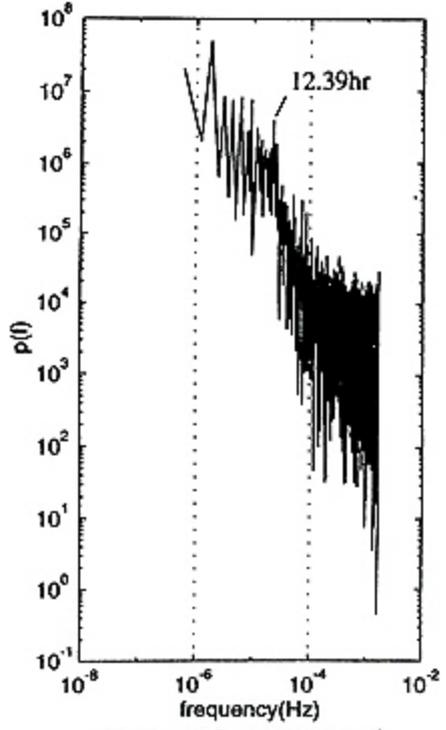
Station-B1; u-component



Station-B1; v-component



Station-B2; u-component



Station-B2; v-component

図 6 Station-B における成分流速のスペクトル解析結果

Fig. 6 Spectra of u and v components of current at Station-B.

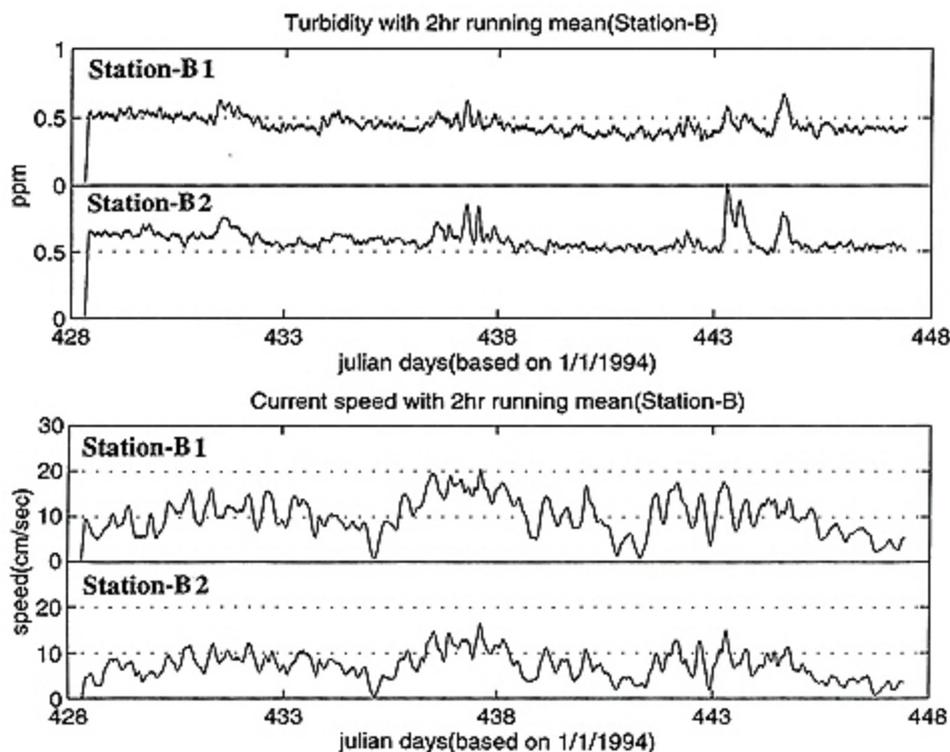


図 7 Station-B における濁度及び流速値の 2 時間移動平均データ  
 Fig. 7 Turbidity and current speed with 2hr running mean at Station-B.

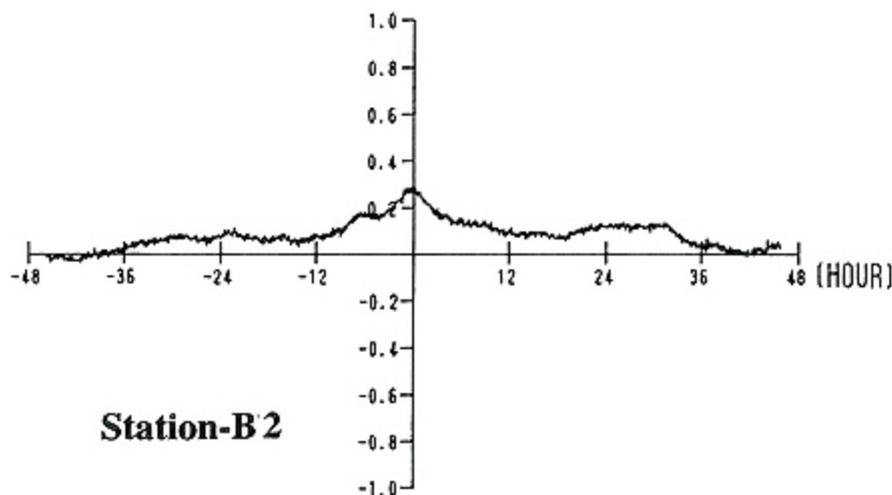


図 8 海底直上 (Station-B) における濁度と流速の相互相関関数  
 Fig. 8 Cross correlation between turbidity and current speed at Station-B2.

ぎり、海底の堆積物が剥離されるのは、流れが 10cm/sec を超えるあたりからで、それにより海底近傍に高濁度層が形成される。

剥離した堆積物の鉛直分布に関しては、

$$C = C_{ref}(y/y_{ref})^{-\alpha}$$

により与えられることが、実験的に確かめられている (Allen, 1985)。

C は、濁度 (濃度)、 $C_{ref}$  はある高さでの濁度、 $y$  は海底からの高さ、 $\alpha$  は係数である。海底上 1 m 及び海底上 35 m における濁度値により  $\alpha$  を求めることができる。

表 2 各成分に直交する単位面積 (1m<sup>2</sup>) を 1 日あたりに通過する堆積物の移動量

Table 2 Transportation weight(kg) of sediment of each component through 1m<sup>2</sup> per day.

	Station-B1における 移動量(kg/day)	Station-B2における 移動量(kg/day)
東向き成分	0.13	0.32
西向き成分	2.12	1.67
北向き成分	0.04	0.05
南向き成分	2.97	2.94
東西収支	西へ1.99	西へ1.35
南北収支	南へ2.93	南へ2.89
全収支	214° 方向へ3.54	205° 方向へ3.19

これにより、定常状態と高濁度状態の濁度の鉛直分布を計算した結果を図 9 に示す。定常状態においては、濁度は海底直上で大きく減少し、海底上 20m 付近からはほぼ一定になる。これに対し高濁度状態では、濁度は海底上 20m 付近までに大きく減少し、40m を超すあたりからはほぼ一定になる。高濁度層の層厚は、実際には流速変動や堆積物の粒径等により変化するものと思われるが、図 9 より 30-50m 程度であると推測される。

#### 4. 3 海溝域における深層流循環

今回の観測で日本海溝の陸側斜面の海底直上においても、深層西岸境界流と見られる流れの存在が確かめられたが、海溝軸を挟んで海側斜面上においては、反対方向の北向きの流れの存在が示唆されている。Hallock ら (1995) は、測流結果を基に、日本海溝を挟んで海側には北向きの流れが、また陸側には南向きの流れが存在し、これが千島・カムチャツカ海溝、アリューシャン海溝とつながる大きな深層流の循環の存在を示唆した。

北大西洋における西岸境界流の存在は、Stommel ら (1960) により示され、はやくからその存在が確かめられている。しかしながら、北大西洋においては、深層境界流の海側における反対方向の流れは認められていない。北太平洋の海溝海側の北向きの流れが、定常的なものであると仮定した場合、この違いは、北太平洋にある海溝の存在という地形的な影響によるものと考えられる。さらに、伊豆・小笠原海溝の北部においても同様の傾向が見られることが、東京大学海洋研究所の観測により報告されている。これら過去の観測より、北太平洋北部から西部にかけてつらなる海溝においては、海溝の陸、あるいは島弧側斜面に沿って反時計周りの深層境界流が存在し、伊豆小笠原海溝さらには、マリアナ海溝を

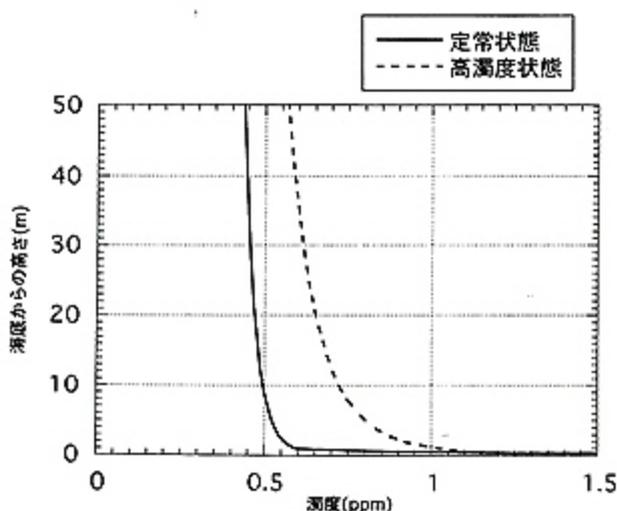


図 9 濁度の鉛直分布

Fig. 9 Vertical distribution of turbidity. Solid line indicates steady state, dotted line indicates high-turbid state.

まで達し、それと同規模の海溝軸を挟んで反対方向の流れが存在しているものと推察される。

#### 5. ま と め

今回の観測結果を以下にまとめる。

(1) 八戸～宮古沖の日本海溝陸側斜面においては、ほぼ定常的に海溝軸に沿った南～南南西の流れが存在し、変動としては、M<sub>2</sub> 潮が卓越しており、長期的な変動は捕えられなかった。

(2) 海底付近の流れの鉛直分布については、海底上 35m の方が、海底直上よりも平均流速が大きく、乱れ強度も高いことが確かめられた。

(3) 流れと濁度の変動より、1m<sup>2</sup>・1日あたり海底直上では 3.19kg、海底上 35m では 3.54kg の物質が海溝軸に沿って南南西向きに移動することが見積られた。

(4) 過去の観測結果及び報告より、北太平洋の海溝周辺においては、海溝陸側あるいは島弧側斜面上には海溝軸に沿った反時計周りの深層境界流が存在し、海溝軸を挟んで海側斜面には反対方向（時計周り）の流れが存在していることが示唆される。

#### 謝 辞

本観測における係留系の設置回収にあたっては、「かしよう」、「よこすか」及び「若潮丸（日本サルヴェージ（株）所属）」の乗組員の皆様大変お世話になった。また、宮古沖の係留系の回収に際し、日本海溝潜航調査首

席研究者の小川勇二郎博士には、調査の合間をぬっての回収を快く承諾してくださいました。また、回収にあたっては、「しんかい 6500」運航チームの皆様並びに、深海研究部の藤倉克則博士に世話になりました。以上の方々に厚く感謝いたします。

なお、八戸沖の観測は、科学技術庁科学技術振興調整費による「平成 6 年三陸はるか沖地震に関する緊急研究」の「海底変動に関する研究」に基づいて実施されたものである。

#### 引用文献

- Allen, J. R. L. (1985) : Principles of Physical Sedimentology. George Allen & Unwin Ltd., London, 272pp.
- Gradie, J. and E. Tedesco (1982) : Low-Frequency Eddy Kinetic Energy Spectrum in the Deep Western North Pacific. *Science*, **216** (25), 1407-1408.
- Hollister, C.D. and I.N. McCave (1984) : Sedimentation under deep-sea storms. *Nature*, **309** (5965), 220-225.
- Hallock, Z.R. and W.J. Teague (1995) : Evidence for a North Pacific Deep Western Boundary Current. NRL-SSC Contribution No. JA7332-95-0049.
- 堀内一穂・門馬大和・満澤巨彦・藤岡換太郎 (1993) :

日本海溝海側斜面におけるナマコと底層流. しんかいシンポジウム報告書, **9**, 41-48.

- Mitsuzawa, K., H. Momma, M. Fukasawa and H. Hotta (1993) : Observation of Deep Sea Current and Change of Bottom Shapes in the Suruga Trough. *Oceans '93 Proceedings*, **3**, 149-154.
- Schmitz, W.J. Jr., P.P. Niiler and C.J. Koblinsky (1987) : Two-Year Moored Instrument Results Along 154°E. *Journal of Geophysical Research*, **92** (C10), 10826-10834.
- Stommel, H. and A.B. Arons (1960) : On the abyssal circulation of the world ocean-I. Stationary planetary flow patterns on a sphere. *Deep-Sea Research*, **6**, 140-154.
- 平 啓介 (1987) : 海溝の底層流の直接測定—海洋物理学の最近の話題. *地学雑誌*, **96**, 15-20.
- Warren, B.A. and W.B. Owens (1985) : Some Preliminary Results Concerning Deep Northern-Boundary Currents in the North Pacific. *Progress in Oceanography*, **14**, 537-551.
- Warren, B.A. and W.B. Owens (1988) : Deep Currents in the Central Subarctic Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, **18**, 529-551.

(原稿受理: 1996 年 7 月 12 日)