

日本海の深海底付近で観測された深層流の特徴

福島繁樹：海洋研究室

小嶋哲哉：海洋汚染調査室

Characteristics of deep current observed near the bottom in the Sea of Japan

Shigeki FUKUSHIMA : Ocean Research Laboratory

Tetsuya KOJIMA : Marine Pollution Research Laboratory

Abstract

The various characteristics of the deep current were shown from the time series observed near the bottom in the Sea of Japan. In particular, two remarkable features were newly recognized. First, variation with two months period was dominated around the Yamato bank. Second, southward current was found throughout a year in the Toyama Seachannel.

Key words : deep current, the Sea of Japan.

1 はじめに

ロシアは、1993年4月に旧ソ連・ロシアによる放射性廃棄物の海洋投棄に関する白書を公表した。これを受け、海上保安庁海洋情報部では、1994年以降、日本海における人工放射性核種の三次元分布及びその動態を把握するため、定期的に海水及び海底土の放射能調査や深層流の測定を行ってきた。2010年6月に深層流の調査については終了した。この間、日本海の中間線より日本側のほぼ全域におよぶ広大な海域で、26測点もの貴重な深層流の観測データが取得できた。

尹(2004)は、これまでの研究により「日本海の深層循環は大きく分けて3つの反時計回りの環流系で構成されている。一つは日本海の水深2,000 m辺りを流れる反時計回りの循環。もう一つは、日本海盆の水深3,300 m辺りを流れる反時計回りの環流。残りは日本海盆東部、対馬海盆、大和海盆内の反時計回りの環流系である。平均流は、海底地形の影響を受け、水深の浅い方を右に見て等深線に沿って流

れ反時計回りの循環流を形成している。」と述べている。当部の観測結果からも日本海の深層には、海底斜面を右に見て流去する反時計回りの平均流が存在し、全般的に海底斜面の近くでは流れが強く、平坦面では弱いということがわかってきた(福島, 2007)。

日本海の表層水は、海流によって外洋水と交換するが、約400 m以深には日本海で独自に生成された固有水が溜まっている。この固有水は、さらにその性質(水温、塩分及び溶存酸素の違い)から約400 mから1,300 mまでを上部固有水、約1,300 mから2,600 mまでを深層水、2,600 m以深を底層水と区分されている(金他, 2002)。通常、深層水中での流れが深層流、底層水中での流れが底層流と呼ばれているが、係留系の設置場所の水深の関係上、観測層が多岐にわたることから、本稿では、便宜上、深層流と呼ぶことにする。

今回、全観測点の観測生データ及び移動平均のステックダイアグラムから、季節変動とは別に海域毎のおおまかな流れの特徴がみえてきたので紹介す

る。

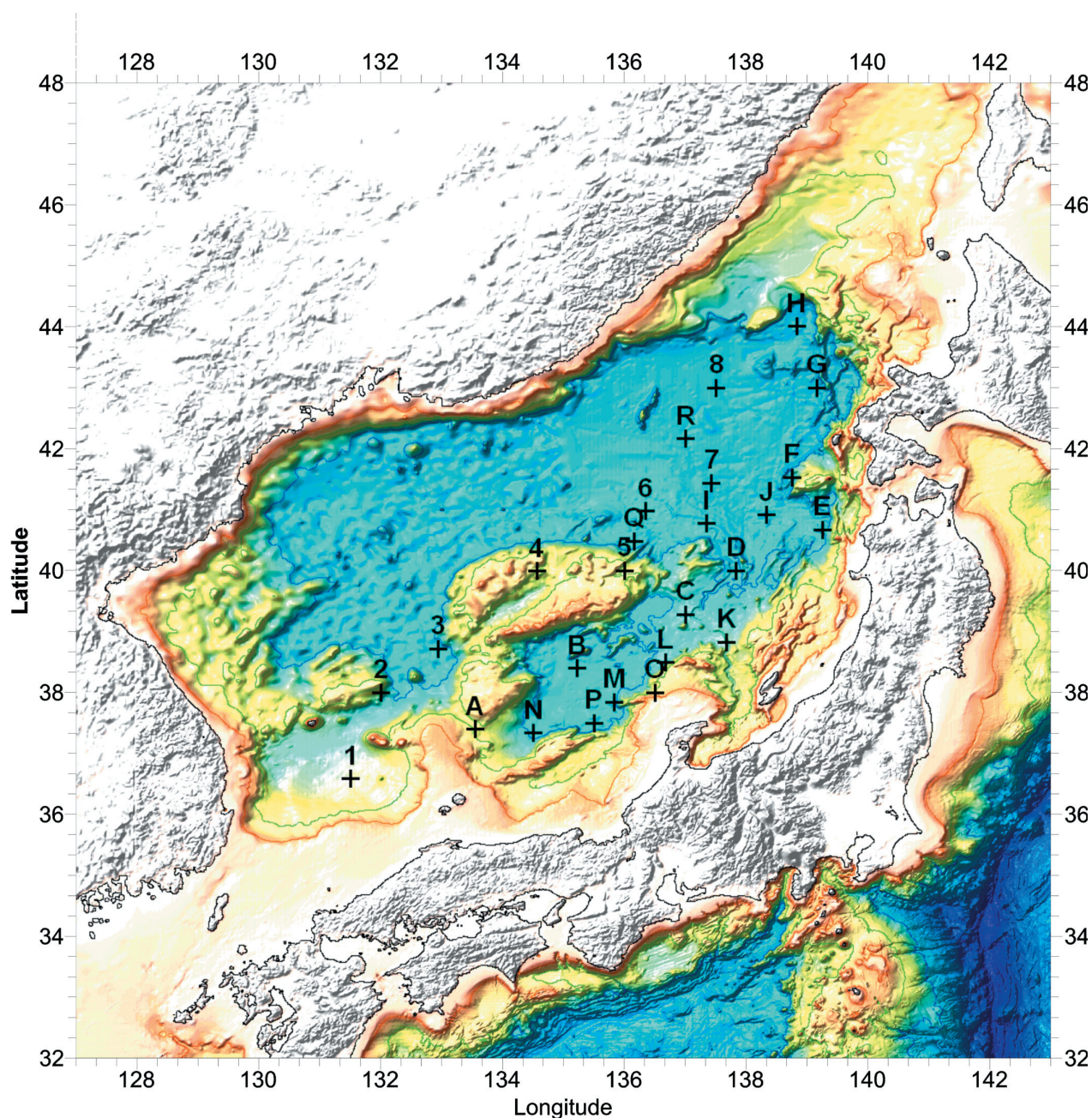
2 観測

2.1 観測海域及び観測期間

観測海域は、日本海の中間線より日本側のほぼ全域にわたり、観測点の総数は、26測点である。海底の凹凸を可視化するために三次元の海底地形図上に観測点を記載した (Fig.1)。この測点図には、日本海固有水の鉛直分布の目安として、400 m, 1,300 m,

2,600mの等深線を記入した。

観測期間は、1994年から2010年までの16年間で、ほとんどの測点で1年未満の観測である。毎年9月頃に大型測量船で係留系を設置し、翌年6月頃に中型測量船で揚収した。ただし、測点8については延べ2カ年間、測点Qについては4カ年間連続して観測した。測点G、測点I及び測点Rで底上100 mの流速計のデータが欠測した (Table 1)。

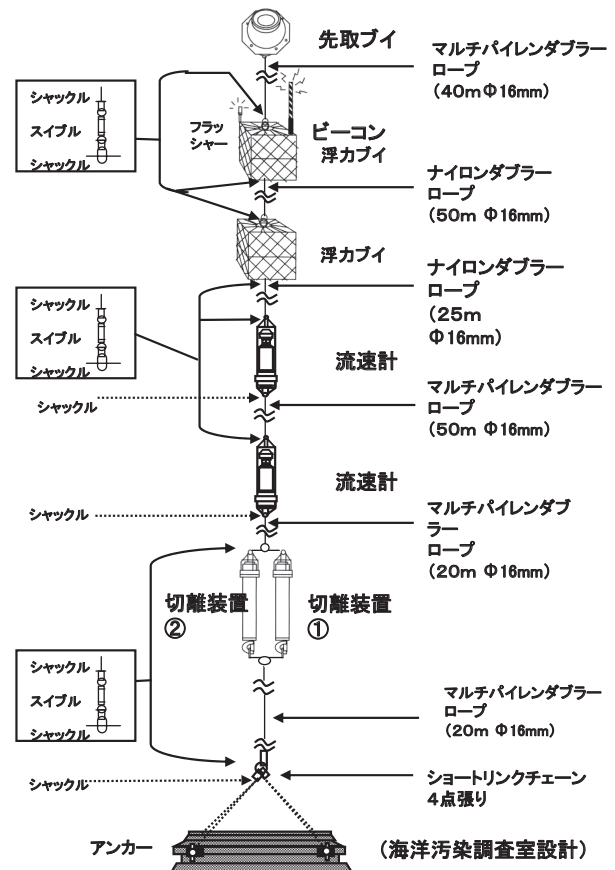


第1図 日本海深層流測点図
Fig. 1 Sites of the mooring in the Sea of Japan

第1表 日本海深層流観測概要一覧

Table 1 List of the mooring sites for the deep currents in the Sea of Japan

測点	位置	水深m	測流深度m	観測期間	解析期間
1	36 -35.3N	2,000	1,950	自:1996.9.5	自:1996.9.7
	131 -30.4E		1,900	至:1997.6.13	至:1997.6.12
2	38 -00.2N	1,680	1,630	自:1996.9.6	自:1996.9.7
	131 -59.8E		1,580	至:1997.6.14	至:1997.6.12
3	38 -43.4N	2,860	2,810	自:1994.9.2	自:1994.9.3
	132 -56.3E		2,760	至:1995.6.7	至:1995.4.12
4	39 -59.8N	1,270	1,220	自:1994.9.3	自:1994.9.4
	134 -34.0E		1,170	至:1995.6.8	至:1995.4.12
5	40 -00.2N	1,340	1,290	自:1995.9.9	自:1995.9.10
	135 -59.8E		1,240	至:1996.6.14	至:1996.4.18
6	40 -59.0N	3,390	3,340	自:1995.9.16	自:1995.9.17
	136 -20.6E		3,290	至:1996.6.15	至:1996.4.20
7	41 -26.7N	3,650	3,600	自:1997.9.12	自:1997.9.14
	137 -25.7E		3,550	至:1998.5.9	至:1998.5.8
8-1	43 -00.3N	3,680	3,630	自:1997.9.13	自:1997.9.14
	137 -30.8E		3,580	至:1998.5.9	至:1998.5.8
8-2	43 -00.4N	3,690	3,640	自:2009.6.4	自:2009.6.5
	137 -30.1E		3,590	至:2010.6.2	至:2010.6.1
A	37 -24.3N	1,356	1,306	自:1998.7.24	自:1998.7.25
	133 -33.2E		1,256	至:1999.5.10	至:1999.5.9
B	38 -24.2N	3,010	2,960	自:1998.7.24	自:1998.7.25
	135 -13.1E		2,910	至:1999.5.11	至:1999.5.9
C	39 -17.3N	2,750	2,700	自:1999.9.1	自:1999.9.2
	136 -59.9E		2,650	至:2000.5.27	至:2000.5.26
D	40 -00.2N	2,700	2,650	自:1999.9.2	自:1999.9.3
	137 -49.8E		2,600	至:2000.5.27	至:2000.5.26
E	40 -40.3N	2,780	2,730	自:2000.8.19	自:2000.8.20
	139 -14.7E		2,680	至:2001.7.1	至:2001.6.30
F	41 -32.1N	2,660	2,610	自:2000.8.19	自:2000.8.20
	138 -44.7E		2,560	至:2001.7.1	至:2001.6.30
G	43 -00.0N	3,570	3,520	自:2001.8.27	自:2001.8.28
	139 -09.5E		3,200	至:2002.6.12	至:2002.4.12
H	44 -00.8N	3,300	3,250	自:2001.8.27	自:2001.8.28
	138 -49.3E		3,200	至:2002.6.12	至:2002.6.11
I	40 -46.6N	3,137	3,087	自:2002.9.9	自:2002.9.10
	137 -20.6E		2,582	至:2003.5.11	至:2003.5.10
J	40 -55.0N	3,422	3,372	自:2002.9.9	自:2002.9.10
	138 -20.0E		3,322	至:2003.5.11	至:2003.5.10
K	38 -49.8N	2,204	2,154	自:2003.7.6	自:2003.7.7
	137 -40.4E		2,104	至:2004.9.2	至:2004.9.1
L	38 -29.6N	2,589	2,539	自:2003.7.6	自:2003.7.7
	136 -40.3E		2,489	至:2004.8.27	至:2004.8.26
M	37 -50.8N	2,682	2,632	自:2004.10.15	自:2004.10.16
	135 -50.0E		2,582	至:2005.6.11	至:2005.6.10
N	37 -20.0N	2,674	2,624	自:2004.10.15	自:2004.10.16
	134 -30.2E		2,574	至:2005.6.12	至:2005.6.11
O	38 -00.0N	1,095	1,045	自:2005.10.17	自:2005.10.19
	136 -29.8E		995	至:2006.6.19	至:2006.6.17
P	37 -30.1N	2,883	2,833	自:2005.10.17	自:2005.10.19
	135 -29.9E		2,783	至:2006.6.19	至:2006.6.17
Q1	40 -29.9N	3,053	3,003	自:2006.8.30	自:2006.8.31
	136 -10.1E		2,953	至:2007.7.2	至:2007.7.1
Q2	40 -29.8N	3,053	3,003	自:2007.7.3	自:2007.7.4
	136 -10.0E		2,953	至:2008.6.21	至:2008.6.20
Q3	40 -27.6N	3,026	2,976	自:2008.6.22	自:2008.6.23
	136 -08.6E		2,926	至:2009.6.1	至:2009.5.31
Q4	40 -30.2N	3,050	3,000	自:2009.6.1	自:2009.6.2
	136 -10.3E		2,950	至:2010.6.5	至:2010.6.4
R	42 -09.9N	3,655	3,605	自:2008.6.20	自:2008.6.21
	137 -00.2E			至:2009.6.3	至:2009.6.2



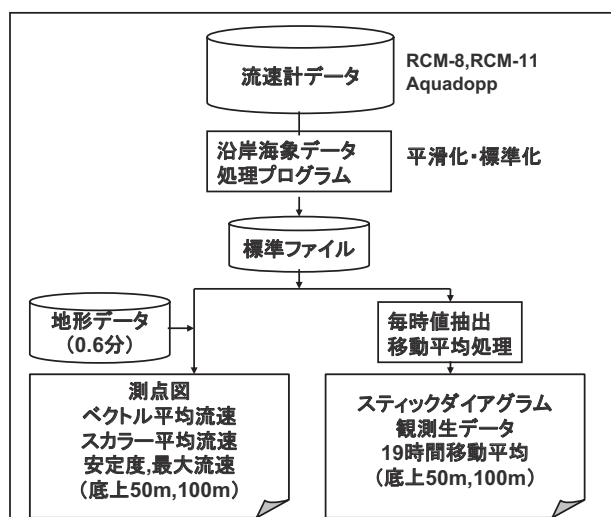
第2図 日本海深層流係留系の構成
Fig. 2 Structure of the mooring system

(重錘)で構成される (Fig.2)。観測層は、底上50 mと底上100 mの2層である。浮体には、浮上時に電波を発信するラジオビーコンが取り付けられている。切り離し装置は、機器の亡失を予防するため並列で構成され、片方が切断されれば両方とも揚収できるようになっている。16年間にもおよぶ長期の観測であったが一度も亡失することなく、全測点で無事に係留系が回収された。

使用した流速計は、1994年から2002年まではアーンデラ流速計RCM-8で、2003年以降はアーンデラ流速計RCM-11を使用した。ただし、測点Q (2007年~2010年)ではNORTEC社製のAquadoppを使用した。RCM-11の性能については、中野、他 (2008)が、詳しく述べている。

2.2 観測方法

深海底付近の流れは、海底からの立ち上げ方式の係留系に接続した流速計により観測した。係留系は、上方から浮体、流速計、切り離し装置、シンカー



第3図 日本海深層流データ処理フロー
Fig. 3 Flowchart for the data processing on the deep current

3 解析

宗田・福島 (1995) が取りまとめた「沿岸海象データ処理プログラム」により、流速計で観測されたデータの標準化処理や平滑化処理を行った (Fig. 3)。既存のプログラムのほとんどが1ヶ月対応であったことから、ソースプログラムの一部を修正した。また、入出力変換プログラムについては、新たに作成した。

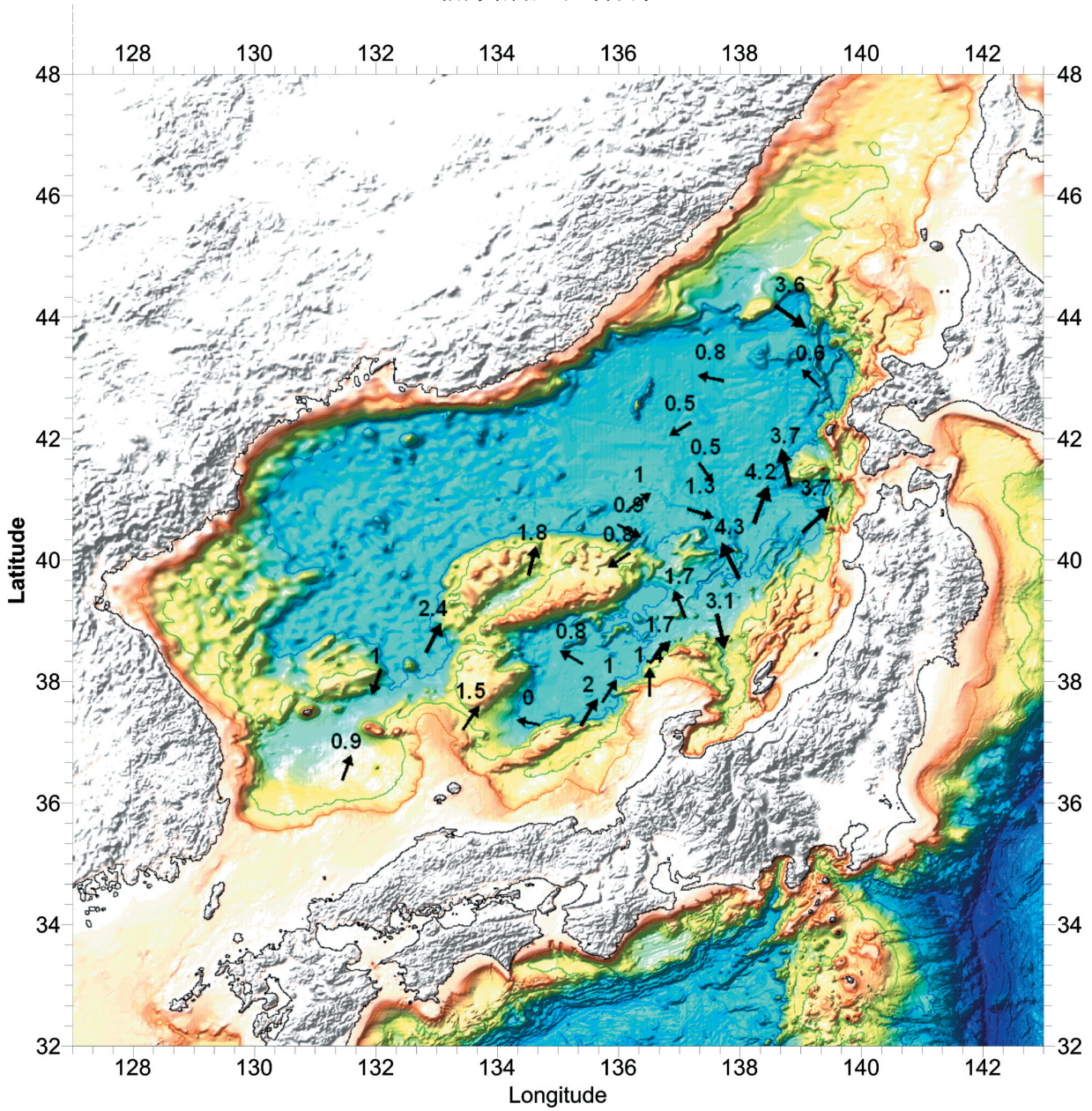
深層流の基本的な統計量であるベクトル平均、スカラー平均、安定度、最大流速等を算出した (Table 2)。安定度とは、ベクトル平均流速とスカラー平均流速との比を百分率で表したものである。1994年から2005年までに観測されたものについては、福島 (2007) が報告している。今回は、それ以降に観測されたデータを既存のデータセットに追加した。また、全測点を記載したベクトル平均流の水平分布図 (底上50 m) も作成した (Fig.4)。

標準ファイルから毎時観測値を抽出し、慣性振動を除去するため移動平均 (19時間) をかけて、観測生データと移動平均のスティックダイアグラムを描画した。

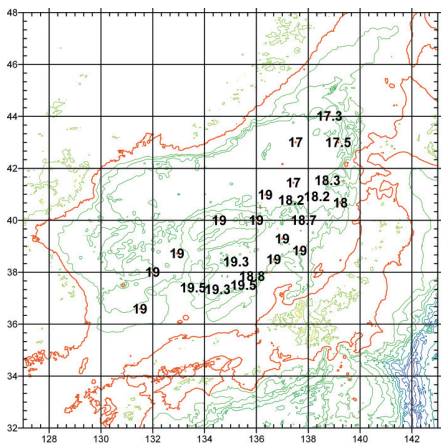
日本海の深層流は、放射能調査報告 (1996~2010) にも記載されているとおり潮汐周期成分が小さく17時間から20時間の短周期成分が卓越していた (Fig. 5)。この周期成分はTakematsu et al. (1999) が詳しく述べているとおり慣性振動と思われる。観測点の緯度における慣性周期を計算すると、観測データから得られた卓越周期と実によく合っていることが確認できた (Fig.6)。

第2表 日本海深層流の基本統計量 (全測点)
Table 2 Basic statistics for the deep currents in the Sea of Japan

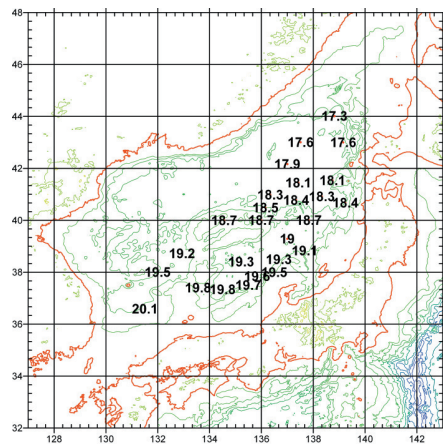
測点	底上50m層							底上100m層						
	北方成分	東方成分	流向	流速cm/s	スカラー平均	安定度%	最大流速	北方成分	東方成分	流向	流速cm/s	スカラー平均	安定度%	最大流速
1	0.878	0.3	19	0.9	3.9	24	14.2	0.78	-0.443	330	0.9	2.8	32	13.6
2	-0.935	-0.325	199	1	1.7	58	11	-0.794	-0.625	218	1	1.9	54	9.8
3	2.149	1.046	26	2.4	3.7	65	17.4	1.663	1.008	31	1.9	3.3	58	18.5
4	1.705	0.412	14	1.8	2.5	71	14.8	1.5	0.457	17	1.6	2.9	55	15.3
5	-0.443	-0.646	236	0.8	1.8	45	13.9	-0.448	-0.372	220	0.6	1.6	37	13.6
6	0.57	0.767	53	1	1.5	65	10.7	0.571	1.79	72	1.9	2.8	67	11.3
7	-0.431	0.313	144	0.5	1.7	31	8.7	0.044	0.079	61	0.1	0.4	21	5.5
8	0.14	-0.74	281	0.8	2	40	11.9	0.181	-0.645	286	0.7	1.7	41	11.3
A	1.224	0.821	34	1.5	4.5	33	18.5	1.192	0.903	37	1.5	4.7	32	17.7
B	0.383	-0.664	300	0.8	2.4	32	14.2	0.915	-0.595	327	1.1	3	36	14.2
C	1.599	-0.661	338	1.7	4.1	42	15.9	1.022	-0.618	329	1.2	3.6	33	15.9
D	3.904	-1.887	334	4.3	5.4	80	17.7	5.003	-0.948	349	5.1	6.4	80	19.7
E	2.532	2.756	47	3.7	4.4	85	29.6	2.602	2.114	39	3.4	4.2	80	29.9
F	3.62	-0.843	347	3.7	4.1	90	16.5	5.237	0.282	3	5.2	5.7	91	15.9
G	0.399	-0.398	315	0.6	0.7	81	9.5							
H	-2.129	2.936	126	3.6	4.5	80	12.7	-1.564	2.821	119	3.2	4.3	76	13.3
I	-0.407	1.207	109	1.3	1.6	79	12.7							
J	3.926	1.415	20	4.2	4.6	91	15.1	3.765	1.171	17	3.9	4.4	90	15.3
K	-3.02	0.674	167	3.1	4.2	74	15	-2.515	0.527	168	2.6	3.7	69	13.8
L	1.208	1.162	44	1.7	3.2	53	14.7	1.098	1.09	45	1.5	3.1	51	15.5
M	0.825	0.546	33	1	3	33	18.5	0.613	0.645	46	0.9	3	29	18.5
N	0.009	-0.046	281	0	2.2	2	8.5	0.028	0.328	85	0.3	2.1	16	7.9
O	1.371	0.011	0	1.4	3	47	15.8	1.008	0.317	17	1.1	2.9	38	14.1
P	1.676	1.064	32	2	2.9	69	10.9	1.976	1.231	32	2.3	3.2	72	11.2
Q	-0.446	0.829	118	0.9	3	30	15.9	-0.583	0.979	121	1.1	3	37	16.5
R	-0.272	-0.429	238	0.5	2.8	18	8.5							



第4図 日本海深層流ベクトル平均（底上50 m）
Fig. 4 Mean vectors at the layer of 50 m above bottom



第5図 各測点の卓越周期（放射能調査報告から）
Fig. 5 Dominant periods at the mooring sites (after the Report of Radioactivity Survey)



第6図 各測点の慣性周期（計算値）
Fig. 6 Calculated inertial periods at all mooring sites

4 結果

全観測点の観測生データ及び移動平均のスティックダイアグラムから、季節変動とは別に様々な流れの特徴がみえてきた。この特徴を明示するため、代表測点の詳細なスティックダイアグラムを掲げた。この図の上段2列は底上50 mの観測生データ（毎時）及び19時間の移動平均をかけたもので、下段2列は底上100 mのものである。横軸は月を表しているが、複数のダイアグラムを1図に記載したため若干のズレが生じている。また、流向は上方が北で、流速は1目盛りが2 cm/sである。

①対馬海盆、日本海盆及び大和海盆の南部にある測点では、概ね1ヶ月周期成分が卓越しているものが多く見られた。対馬海盆の南部にある測点1、日本海盆の南部にある測点6と測点I、大和海盆の南部にある測点Nがこれに該当する。測点Cと測点Gもこれに該当する。山田（1999）は、「大和海盆北東海域での観測（観測深度1,900~2,000 m）によると、その流れは流向流速が短期間で変化しており、その周期は概ね1ヶ月程度が卓越しているように見える。」と述べているが、今回はこの海域とは別の広域で確認された（Fig.7.1）。

②日本海のほぼ中央に位置する大和堆の周辺にある測点では、概ね2ヶ月周期成分が卓越しているものが多く見られた。測点3、測点4及び測点Bがこれに該当する。ただし、大和堆北東部の谷にある測点5は地形の影響を強く受けていることから周期性が弱く、測点Lもこれに該当する（Fig.7.2）。

③富山深海長谷にある測点Kでは、年間を通じて概ねこの海谷を南に流れていた。この流れが、富山湾で有名な春季の湧昇流に繋がっているかどうか注目される場所である。また、測点2や測点Aは、地形の影響を強く受け流速が不安定であった（Fig.7.3）。

④測点Qは、気象の影響を受けやすく、台風や大型低気圧が接近・通過するときに流速が速まっていた（Fig.8.1）。測点Qの観測データを全体的に見てみると、この付近の深海底には、東南東へ約1 cm/sの弱い流れがあるが、安定度も30~40%と低く、観

測年によって若干の差があるものの顕著な季節変動というものは見られなかった。2007年3月下旬には慣性流の振幅が増大していた。この頃の観測生データから、Takematsu et al.（1999）が示している時計回りの慣性振動（18~19時間周期）の流れを確認した（Fig.8.2）。慣性振動は、年間を通じて見られるが季節風が吹き荒れる冬期から春先にかけてその振幅が増大していた。また、7月下旬から8月上旬にかけては、台風5号の接近・通過時期により流速が強まっていた（Fig.8.3~8.4）。さらに、2008年2月下旬には日本海北部を大型低気圧が接近・通過した頃に流速が急に強まり、4年間の観測中で最大流速を記録した（Fig.8.5~8.6）。

⑤日本海盆の東側の海底斜面に近い測点では、安定度が80%以上と高く流向が安定しており、ベクトル平均流速も4~5 cm/sと速かった。測点D、測点E、測点F、測点Jが、これに該当する。測点Hは、日本海盆の北部に位置するがこれも該当する。2001年1月には、測点Eの底上100 mで北北東流の29.9 cm/sを観測した。この流速値は、全観測データ中の最強流速である（Fig.7.4）。

⑥日本海盆の平坦部にある測点7、測点8、測点Rでは、安定度が低く流向が不安定であった（Fig.7.5）。

⑦大和海盆の東側の海底斜面に近い測点M、測点O、測点Pでは、短周期成分が卓越しているものが多く見られた（Fig.7.6）。

5 まとめ

日本海の深層流の時系列データから、季節変動とは別に様々な流れの特徴が見えてきた。

①対馬海盆、日本海盆及び大和海盆の南部海域にある測点では、概ね1ヶ月周期成分が卓越しているものが多く見られた。

②大和堆の周辺にある測点では、概ね2ヶ月周期成分が卓越しているものが多く見られた。

③富山深海長谷にある測点Kでは、年間を通じて概ねこの海谷を南に流れていた。

④大和堆の北東方にある測点Qは、気象の影響を受けやすく、台風や大型低気圧が接近通過するとき

に流速が速まっていた。

⑤日本海盆の東側の海底斜面に近い測点では、安定度が80%以上と高く流向が安定しており流速も速いものが多かった。

⑥日本海盆の平坦部にある測点では、安定度が低く流向が不安定なものが多く見られた。

⑦大和海盆の東側の海底斜面に近い測点では、短周期成分が卓越しているもの多く見られた。

謝 辞

長期間にわたる現場での係留系の投入・揚収作業に従事された海洋汚染調査室の職員、測量船の乗組員、また、観測点の選定や日本海の深層流に関し助言を頂いた九州大学応用力学研究所尹宗煥教授、吉川裕准教授及び千手智晴准教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- デジタル台風, <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>
- 福島繁樹 (2007), 日本海深海底付近の平均流, *海洋情報部技報*, 25, 122-126
- 日々の天気図, 気象庁予報部予報課,
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>
- 海上保安庁海洋情報部 (1996~2010), *放射能調査報告書*, 平成6~20年調査結果
- 金慶烈, 金坵, 姜東鎮, Yuri Nikolaevich Volkov, 尹宗煥, 竹松正樹 (2002), CREAMSで見た変化する東海／日本海, *海の研究*, 11, 3, 419-429
- 宗田幸次, 福島繁樹 (1995), 沿岸海象データ処理プログラム, *水路部技報*, 13, 31-42
- 中野俊也, 石崎廣, 四竈信行 (2008), 長期係留による4種類の流速計観測結果の比較, *気象研究所技術報告*, 55
- 高野健三 (1972), 海洋科学基礎講座2, *海洋物理II*, 第I編, 第1章, 慣性振動, 14-15, 東海大学出版会
- Takematsu, M., Z. Nagano, A.G.Ostrovskii, K. Kim

and Y. Volkov (1999), Direct Measurements of Deep Currents in the Northern Japan Sea, *J.Oceanogr.*, 55, 207-216

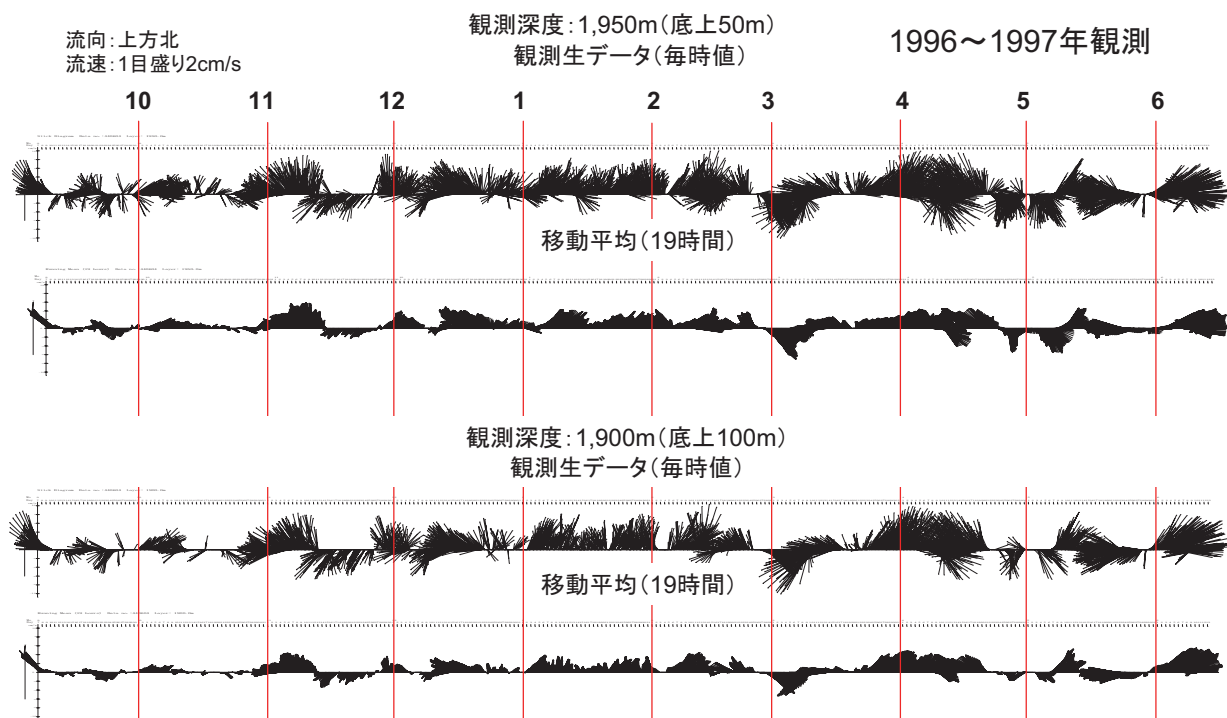
山田東也 (1999), 係留系直接測流結果による日本海固有水の動態, *海と空*, 74, 4, 168-171

尹宗煥 (2004), 日本海の深層水塊と深層循環, 海洋観測システムと海洋研究, 平啓介教授退官記念論文集, *月刊海洋*, 号外36, 60-65

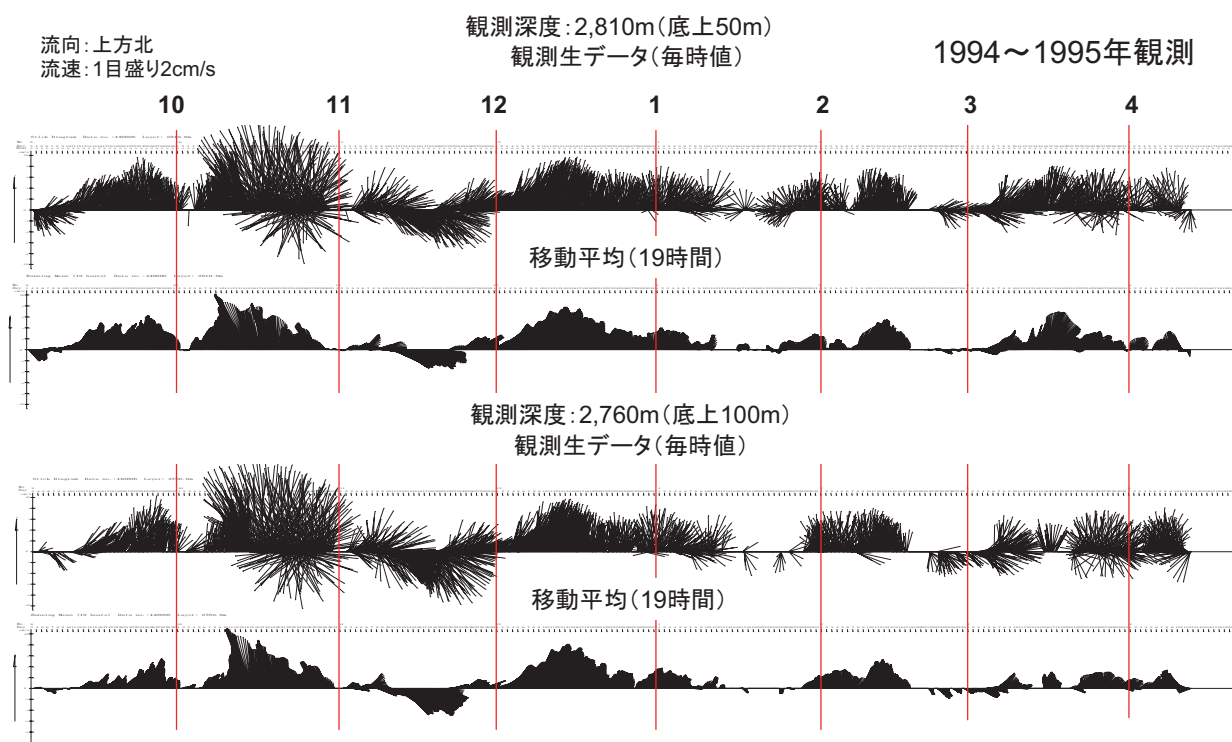
要 旨

日本海の深海底付近で観測された深層流の時系列データから, 季節変動とは別に様々な流れの特徴が見えてきた。この中で特に注目されることは, 新たに二つの特徴的な流れがあることが分かったことである。その一つは, 大和堆周辺の深海底で2ヶ月周期成分が卓越していたこと。二つ目は, 富山深海長谷で年間を通して谷を南に向かう流れが見出されたことである。

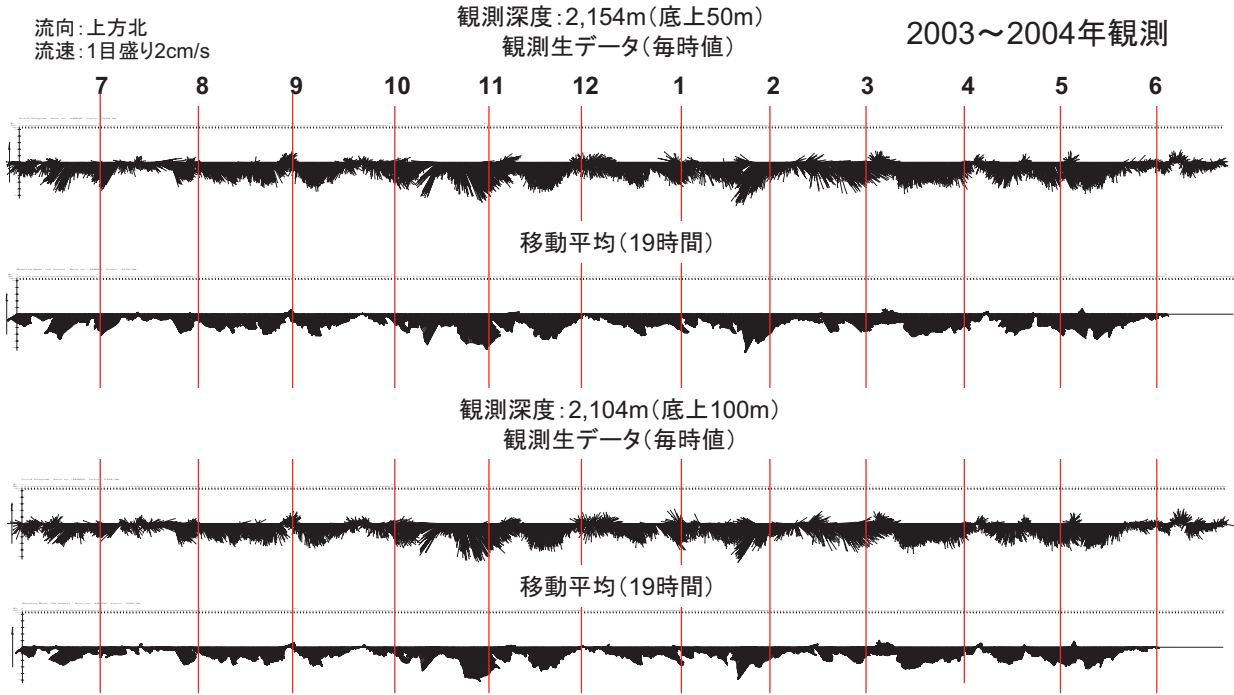
日本海の深海底付近で観測された深層流の特徴



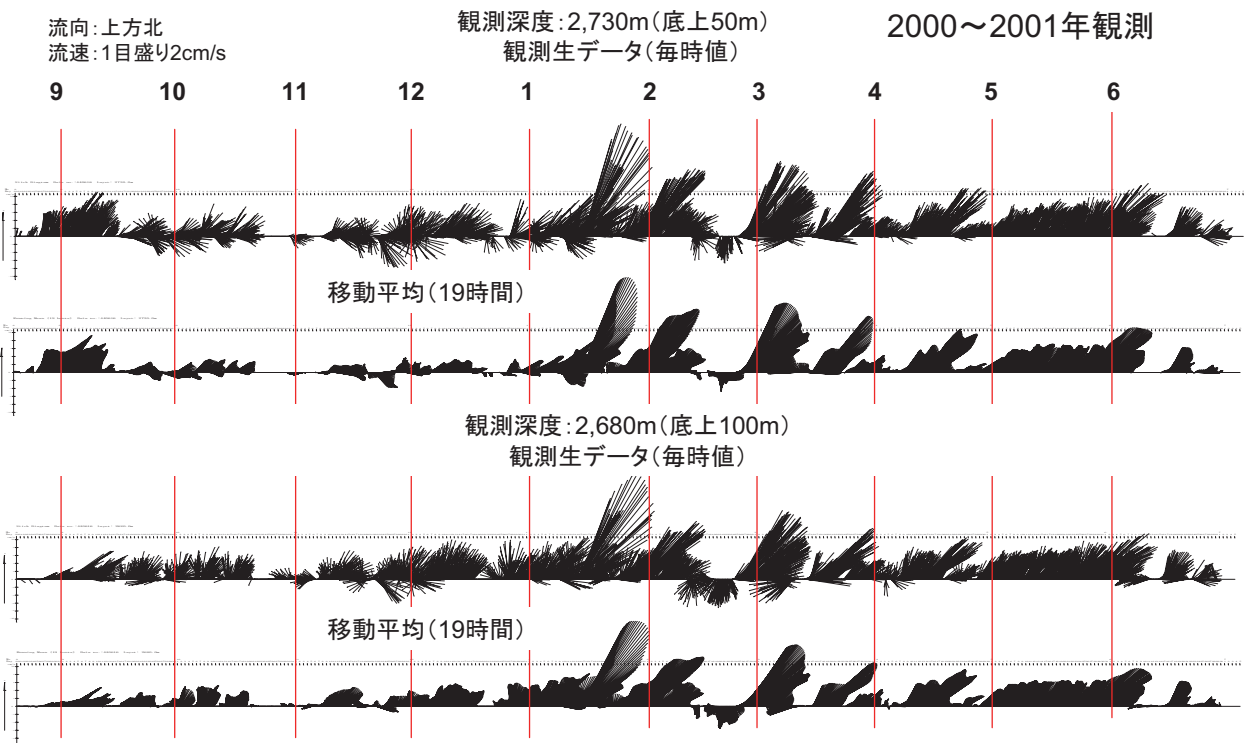
第7.1図 スティックダイアグラム (測点1)
Fig. 7.1 Stick diagram at mooring site No.1



第7.2図 スティックダイアグラム (測点3)
Fig. 7.2 Stick diagram at mooring site No.3

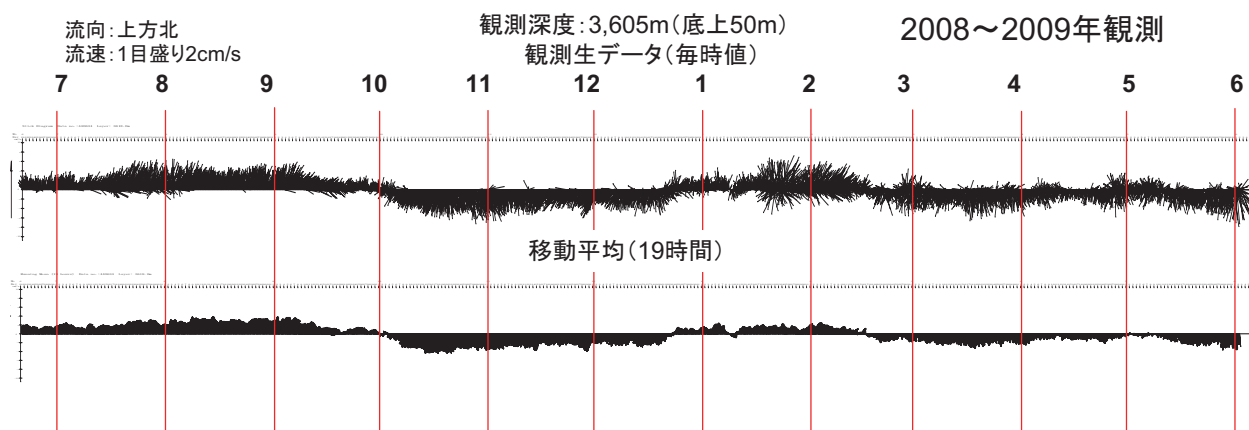


第7.3図 スティックダイアグラム (測点K)
Fig. 7.3 Stick diagram at mooring site K

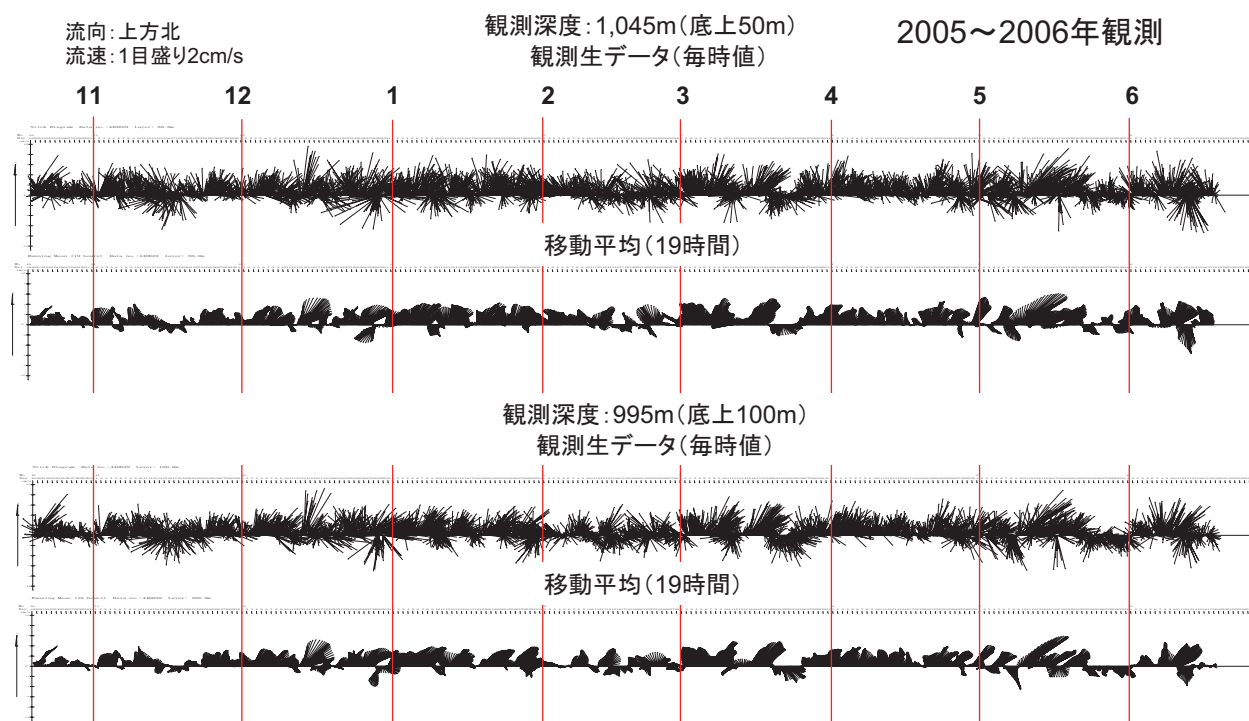


第7.4図 スティックダイアグラム (測点E)
Fig. 7.4 Stick diagram at mooring site E

日本海の深海底付近で観測された深層流の特徴



第7.5図 スティックダイアグラム (測点R)
Fig. 7.5 Stick diagram at mooring site R



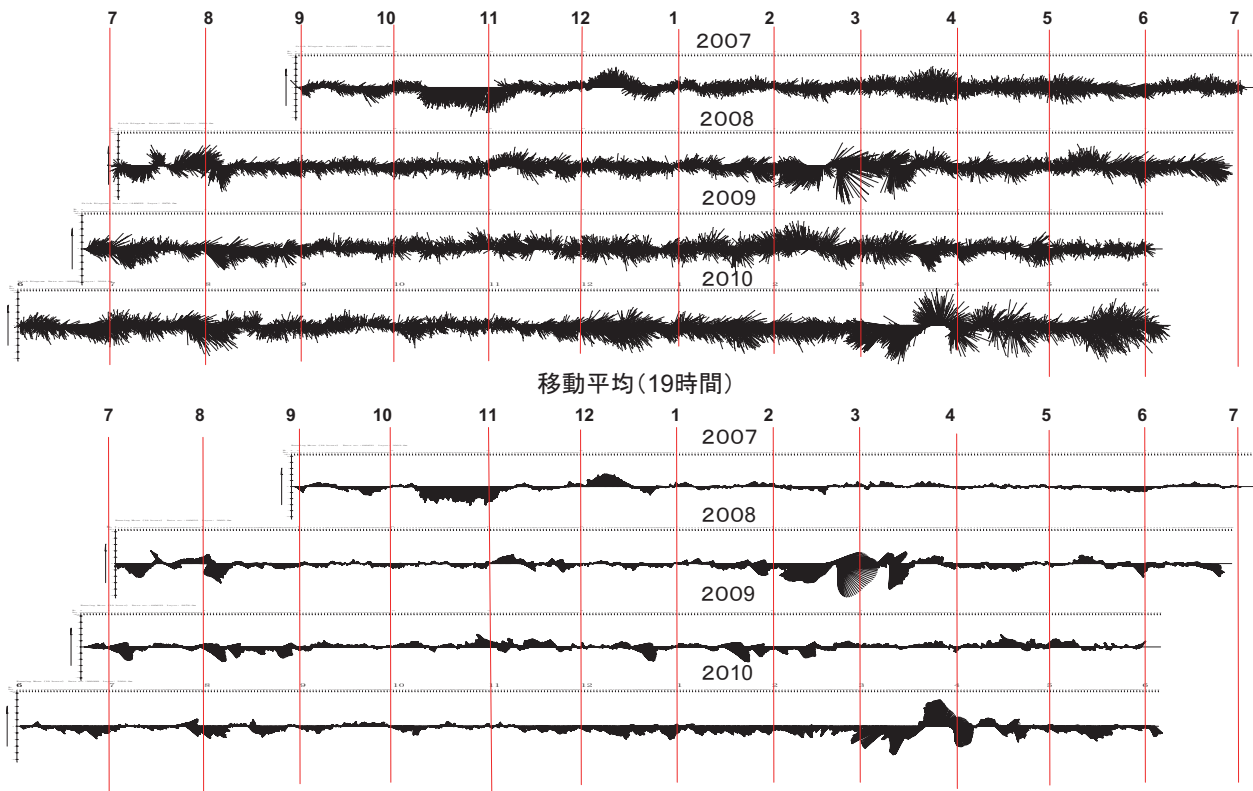
第7.6図 スティックダイアグラム (測点O)
Fig. 7.6 Stick diagram at mooring site O

流向: 上方北
流速: 1目盛り2cm/s

2006～2010年観測

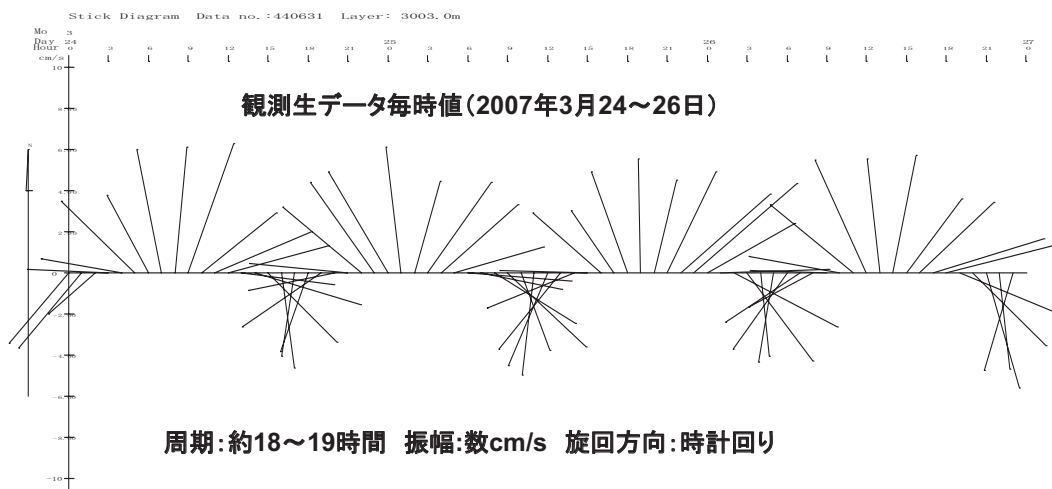
観測生データ(毎時値)

観測深度: 2,980～3,000m(底上50m)



第8.1図 スティックダイアグラム (測点Q)

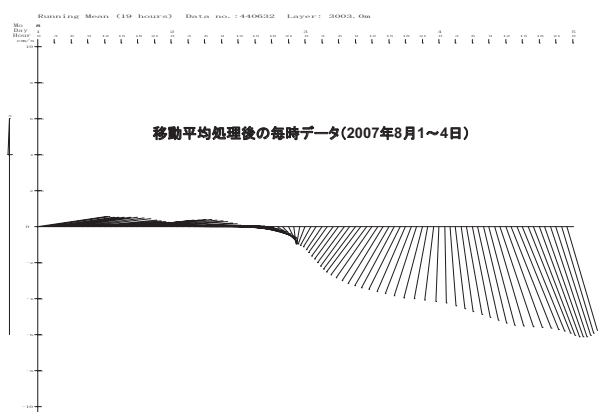
Fig. 8.1 Stick diagram at mooring site Q



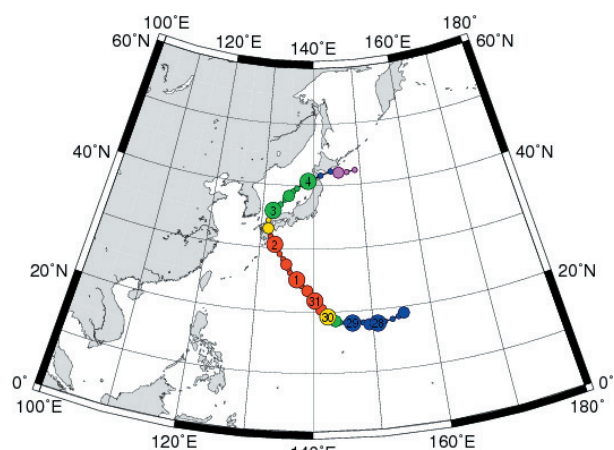
第8.2図 測点Qで観測された慣性振動の流れ

Fig. 8.2 Inertial oscillation observed at mooring site Q

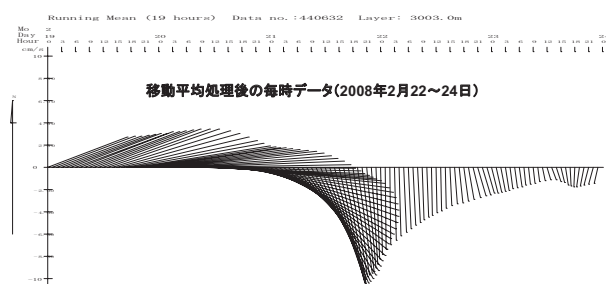
日本海の深海底付近で観測された深層流の特徴



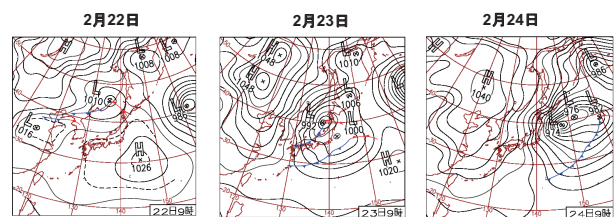
第8.3図 台風200705号通過時の流況 (19時間移動平均)
Fig. 8.3 Deep current (19-hours running mean) during typhoon 200705 passing



第8.4図 台風200705号通過経路
Fig. 8.4 Tracks of Typhoon 200705



第8.5図 大型低気圧通過時の流況 (19時間移動平均)
Fig. 8.5 Deep current (19-hours running mean) during a depression passing



第8.6図 気象庁実況天気図
Fig. 8.6 Weather chart by the Japan Meteorological Agency