

## 直接測流による富山湾の流動

山田 東也<sup>1)</sup>・木谷 浩三<sup>2)</sup>

### Currents Measured with Mooring Systems in Toyama Bay

Haruya YAMADA<sup>1)</sup> and Kouzou KITANI<sup>2)</sup>

#### Abstract

This paper discusses the features of currents measured with mooring systems in Toyama Bay in the Japan Sea from April 10, 1986, to August 31, 1986.

The results are as follows. (1) Mean current velocities in upper layers are greater than those in lower ones. Current directions in the upper layers almost coincide with bathymetric topography. (2) Current velocities in the lower layers are intermittent. (3) Current directions change in a relatively short period of time. (4) The power spectrum of the current velocity shows that the current corresponding to the tidal period is unclear. (5) The pattern of the mean current velocity is a counterclockwise circulation. The result of EOF analysis, however, shows that this pattern changes in a short period of time. (6) At the head of the Bay, the currents sometimes stagnate at upper layers in July.

**Key words:** counterclockwise circulation, EOF analysis, Japan Sea, Mooring system, Toyama Bay

#### 緒 言

富山湾は能登半島の東側に位置し、便宜的に長手崎と富山・新潟県境を結んだ線を湾内外の境界とすると、全表面積約2120km<sup>2</sup>、最大水深1250m、全容積約1280km<sup>3</sup>の日本海最大の外洋性内湾である(奈倉・若林 1984)。大陸棚上はおおむね対馬暖流水におおわれており、湾内の海況は周年その影響下にある(日本水産資源保護協会 1987)。一方、湾中央部には富山舟状海盆と呼ばれるV字型の溪谷が深く入り込んでおり、大陸棚外縁部以深は日本海固有水の影響を直接受けている。それゆえ湾内の海況を考える上では、上層の対馬暖流水と下層の日本海固有水の流動を把握することが重要である。

地衡流近似による流れの場の推定は、水温と塩分の観測が比較的容易であることからよく用いられている。今村ら(1985)は、0~200m鉛直積算平均水温の分布を用いて湾内の平均的な流動パターンを四季別に検討しており、季節によって流れの強さが異なっているものの、能登半島に沿って富山湾に入り、東側から湾外に出ていく反時計回りの循環パターンを示した。内山

---

1994年1月6日受理 日本海区水産研究所業績A第494号

<sup>1)</sup> 〒951 新潟市水道町1丁目5939-22 日本海区水産研究所  
(Japan Sea National Fisheries Research Institute, Suido-cho, Niigata 951, Japan)

<sup>2)</sup> 〒236 横浜市金沢区福浦2-12-4 中央水産研究所  
(National Research Institute of Fisheries Science, Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236, Japan)

(1993)は、流動パターンの季節変化をさらに詳しく把握するために月別に力学的高低図を作成し、全体的な反時計回りの循環パターンに加えて、流動パターンの安定性は5・6月を除いて小さいこと、湾内への海水の流入は5～8月までが活発であること、6～10月の間では表層(20 db 面)と中層(150db 面)の流動パターンが異なることを明らかにした。しかしこれらの研究は、湾内の表層の対馬暖流水の流動に限られており、下層に分布する日本海固有水の流動を明らかにするまでには至っていない。

係留系による直接測流は、観測が大がかりとなるため広範囲にわたっての流れの場の把握は難しいが、地衡流近似からは推定できない下層の流動や観測点での流れの変化の詳細を知ることができる。海上保安庁水路部(1984)は、1981年10～11月にかけて湾内の3ヶ所の10m 深、50 m 深および190m 深について係留系による直接測流を行い、各観測深度で流動のパターンに違いがあること、流動が短期間で変化することを示した。しかし観測期間が約10日間と短く比較的の浅い水深での観測であったことから、より長い期間に渡っての流れの変化や深層の流動については明らかにすることはできなかった。

そこで、1986年4～8月にかけて富山湾内で行った係留系観測結果を用いて、富山湾における流動の周期、深層の流動の実態および湾内の流動パターンについて検討したので報告する。

本文に先立ち、多くのご討議ならびにご校閲をいただいた日本海区水産研究所小川嘉彦海洋環境部長、平井光行海洋動態研究室長に感謝する。

## 資料と方法

本研究では資料として富山湾内の3ヶ所に設置した係留系によって得られた直接測流データを用いた。係留点は湾岸に沿って湾西部に Stn. A、湾奥部に Stn. B、湾東部に Stn. C の3定点を設定した(Fig. 1)。係留系は1986年4月9～10日に設置し、同年8月31日に回収した。この観測では、流動の鉛直構造を把握するために、観測深度を Stn. A では水深130m(A1)、360m(A2)、1010m(A3)に、Stn. B では水深120m(B1)、895m(B2)に、Stn. C では水深140m(C1)、385m(C2)、910m(C3)に設定した(Table 1)。ここではA1、B1とC1を上層、C2を中層、A3とC3を下層における観測とする。観測にはアーンデラー流速計を用い、測定間隔を30分に設定した。係留期間は約145日であるが、B1については塩分記録が、A2についてはすべての記録が測器の不調により得られなかった。またC2は係留期間最後の約5日間のデータが得られなかった。

解析は、各観測点での流れの実態について検討するとともに、流れの変化の卓越周期を検討するためにスペクトル解析を行った。さらに湾内の流動パターンを検討するために、観測全期間を対象にEOF(Empirical Orthogonal Function)解析を行った。アーンデラー流速計は、流向・流速と同時に水温・塩分についても測定することができるが、観測が比較的深層で水温・塩分値がほとんど変化しないことから今回の解析には用いなかった。

## 結 果

係留系によって得られた全観測期間の流速値を Fig. 2 に時系列で示す。流速値は図の上向きを北方向としたスティックダイアグラムで表した。観測深度によって観測値の大きさが大きく違っていることから、図のスケールは各観測深度毎に変えてある。

流速の最大値は、各観測点とも上層で最も大きく、A1で29.3cm/s、B1で37.8cm/s、C1で44.1cm/sを記録した(Table 2)。下層ではA3で10.5cm/s、B2で28.3cm/s、C3で6.8cm/sを

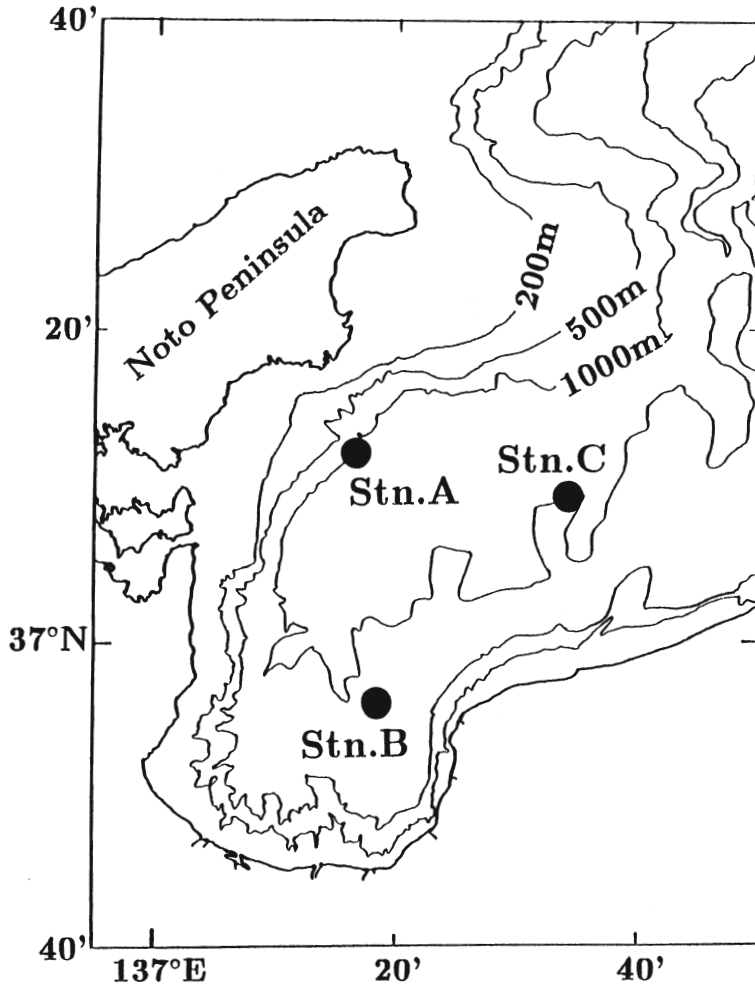


Fig. 1. Bottom topography in and around Toyama Bay. Stn. A, Stn. B and Stn. C show mooring stations.

Table 1. Locations of mooring station and period of current measurement.

Station	Latitude	Longitude	Sea depth (m)	Depth (m)	Period
A1	37°11.4' N	137°16.8' E	1110	130	Apr. 10-Aug. 31, 1986 (144 days)
A2				360	
A3				1010	
B1	36°55.7' N	137°17.6' E	995	120	Apr. 10-Aug. 31, 1986 (144 days)
B2				895	
C1	37°08.8' N	137°34.4' E	1010	140	Apr. 9-Aug. 31, 1986 (145 days)
C2				385	
C3				910	

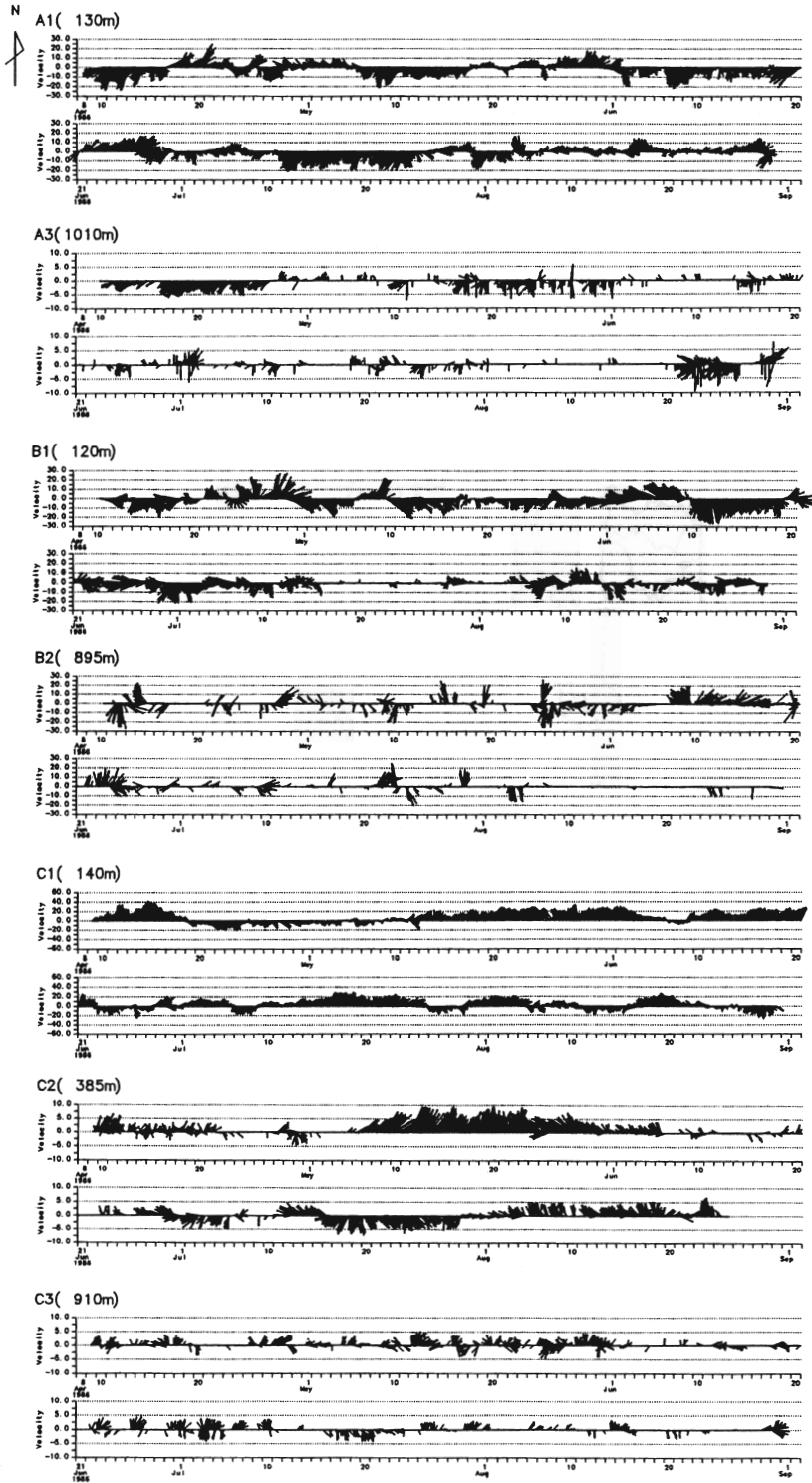


Fig. 2. Time series of current velocity (cm/s) from Apr. 9 to Aug. 31, 1986.

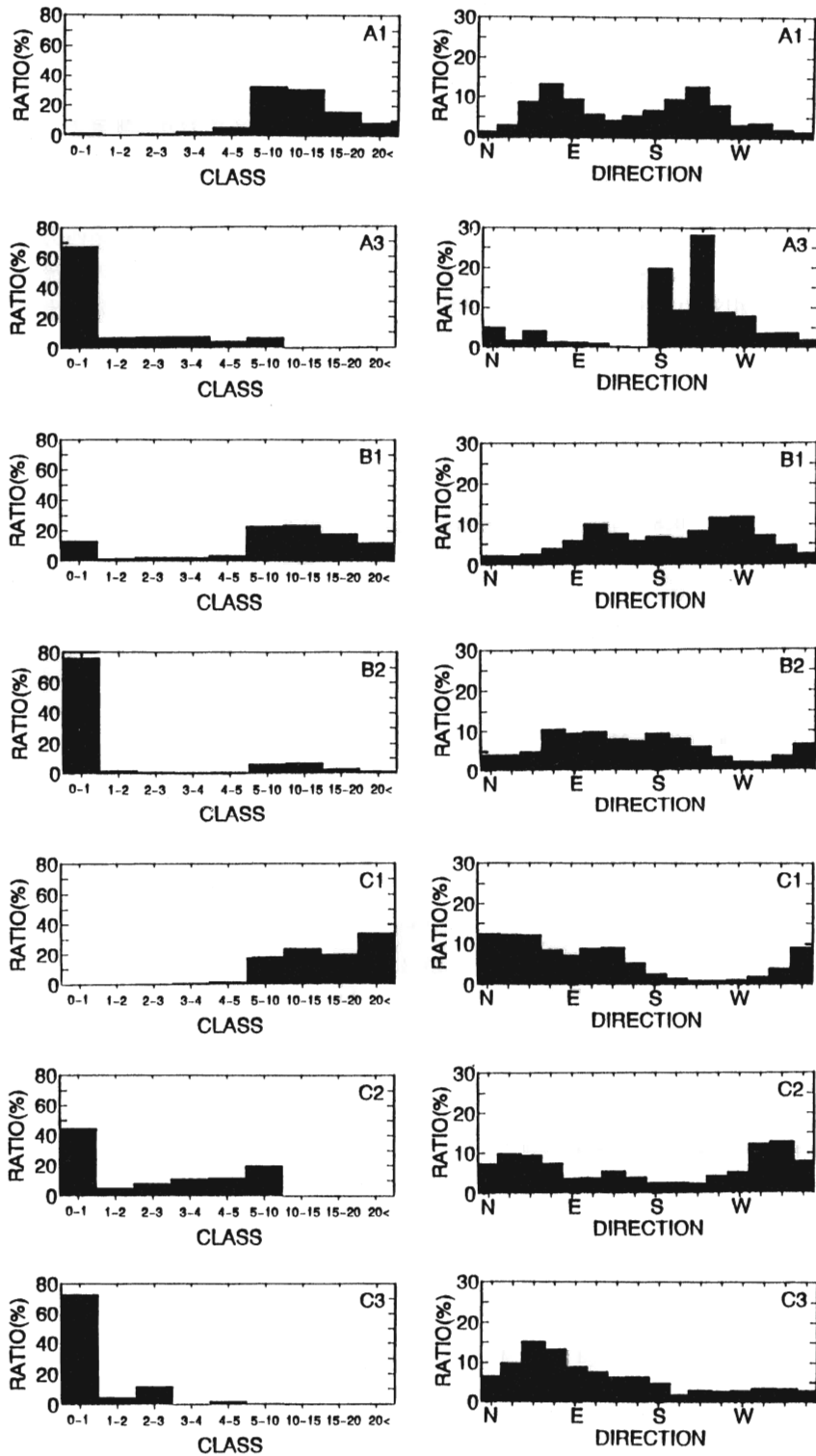


Fig. 3. Velocity and direction of currents measured. Classes are divided into 9 for velocities and 16 for directions shown in Tables 2 and 3.

記録しており、水深 1000m 付近でも数~10cm/s 程度の流れが存在している。上層の A1, B1, C1 における流速値の階級別出現頻度を見ると、5cm/s 以上の流速値が占める割合がそれぞれ全体の約88%, 約76%, 約95%となっており、比較的大きな流れが常に存在する(Table 2, Fig. 3)。一方、中層や下層では1cm/s 以下の流速値が65%以上を占めており、無流となる状態がしばしばあらわれることを示唆している。

流向についてみると、湾西部上層の A1 では、東北東と南西方向の流れがそれぞれ 10% 以上あり、岸に沿った方向の流れが卓越している(Table 3)。下層の A3 では南~南西方向の流れが 60%以上を占めるが、北東方向に流れる割合は上層に比べ低く、下層では湾内に流入する向きに流れる割合が相対的に大きい。一方、湾東部上層の C1 では南南西~東北東に流れる割合が

**Table 2.** Frequency (%), mean and maximum value (cm/s) of current velocities.

Station	Classes of current velocity (cm/s)									Mean	Maximum
	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~10	10~15	10~15	20~		
A1( 130m)	1.7	0.8	1.5	2.9	5.5	32.4	30.6	15.9	8.7	2.6	29.31
A3(1010m)	67.3	7.0	7.3	7.4	4.5	6.4	0.0	0.0	0.0	0.7	10.46
B1( 120m)	13.0	2.0	2.6	2.7	3.7	22.8	23.4	17.8	12.0	3.0	37.81
B2( 895m)	76.6	2.1	1.4	1.1	1.3	6.2	6.7	3.0	1.6	0.6	28.29
C1( 140m)	0.3	0.3	0.6	1.2	2.0	18.2	23.7	19.7	34.0	8.2	44.06
C2( 385m)	44.5	5.0	7.8	11.1	11.6	19.7	0.2	0.0	0.0	1.0	12.42
C3( 910m)	72.8	4.7	11.4	8.3	2.1	0.8	0.0	0.0	0.0	0.3	6.82

**Table 3.** Frequency of current directions (%) and mean direction.

Station	Classes of current directions									Mean
	N	NNE	NE	NEE	E	ESE	SE	SSE		
A1( 130m)	1.6	3.0	8.8	13.3	9.5	5.7	4.3	5.4		
A3(1010m)	5.0	1.8	4.2	1.5	1.4	1.2	0.5	0.4		
B1( 120m)	2.2	2.1	2.5	3.9	5.8	10.1	7.7	5.8		
B2( 895m)	4.2	4.2	4.9	10.4	9.4	9.8	8.0	7.6		
C1( 140m)	12.5	12.3	12.2	8.6	7.3	8.9	9.2	5.4		
C2( 385m)	7.3	9.9	9.5	7.4	3.6	3.7	5.3	3.8		
C3( 910m)	6.6	9.9	15.2	13.3	9.0	7.7	6.4	6.5		
Station	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Mean	
A1( 130m)	6.8	9.6	12.8	8.1	3.3	3.7	2.2	1.7	166.4°	
A3(1010m)	19.9	9.5	28.2	8.9	8.0	3.7	3.8	2.0	224.4°	
B1( 120m)	6.9	6.4	8.4	11.7	11.9	7.3	4.7	2.7	219.3°	
B2( 895m)	9.3	8.1	6.1	3.5	2.1	2.0	3.7	6.7	106.8°	
C1( 140m)	2.7	1.7	1.2	1.2	1.4	2.1	4.1	9.2	40.8°	
C2( 385m)	2.5	2.5	2.3	4.2	5.1	12.2	12.8	7.9	358.8°	
C3( 910m)	4.8	1.9	3.0	2.8	3.0	3.6	3.5	3.0	67.5°	

55%を越えており、岸に沿って湾外へ流出する割合が大きい。中層の C2 や下層の C3 でも上層とは方向が若干異なるが、北向きに流れる割合が高くなっている。湾奥部では上層の B1 で東西方向に流れる割合が高く、湾岸に沿った流れの存在がうかがえる。下層の B2 では東北東に流れる割合が10%を越える程度で、他の観測点と比べてはっきりとした傾向は得られない。しかし、全体的には岸に直交する東～南方向に流れる割合が高く、他の観測深度とは異なって傾向を示している。

平均流速についても各観測点で上層が最も大きく、A1 で2.6cm/s、B1 で3.0cm/s、C1 で8.2 cm/sとなっている。真北を $0^\circ$ として時計回りに角度を与えた平均流向は、A1 が $166^\circ$ 、C1 が $49^\circ$ で、大きくみると流れが湾岸に沿って湾西部から流入して、湾東部から流出する反時計回りの傾向であるといえる。下層の平均流向についても、Stn. A と Stn. C では上層とほぼ同じ湾岸に沿った反時計回りの傾向を示している。しかし、湾奥部の Stn. B の平均流向は、上層の B1 で $231^\circ$ 、下層の B2 で $107^\circ$ と岸に直交する方向を示している。

次に流れの時間変化について検討する。まず上層について Fig. 2 の時系列を見ると、湾西部上層の A1 では湾内に流入する方向と流出する方向の流れが繰り返し起こっており、いずれの方向についても20日間以上続くことはないが、流出方向の方がその継続時間が長い傾向にある。流速のスケールは流入傾向時と流出傾向時とで差はないが、全体的に8月に入ると流速値が小さくなっている。一方、湾東部の C1 では、流出傾向時の方が流入傾向時より比較的継続時間が長く流速値も大きい。また、C1 における流動の変動周期は観測の前半に比べて後半で短くなっている。湾奥部の B1 でも流れは短時間で変化しているが、7月下旬に流れがほとんどなくなる特徴的な現象がみられる。同時期の A1 と C1 では流れが存在していることから、この時期、湾奥上層の水塊が湾内で停滞していたといえる。中層については湾東部しか観測がないが、上層に比べ流れが間欠的に起こっており、無流となる期間が多く現れている。また、流向について上層と比較すると、5月には上層と同じ流出傾向を示しているものの、7月下旬には上層と反対の流入傾向となっており、観測層が上層の影響を受けて境界層である可能性を示している。下層の流れは、湾西部の A3 で4月にまとまった流入傾向を示しているが、全観測点で観測期間全体を通して間欠的である。

流れの卓越周期について検討するため流速に対してスペクトル解析を行った。流れが湾岸に沿った方向に流れている傾向が見られることから、流れの成分を東西方向と南北方向に分解しても主要方向に分解できるとは限らない。そこでスペクトル解析の方法として、エネルギースペクトルが時計回りと反時計回り成分として得られるロータリースペクトル法を採用した。両成分を足し合わせたトータルスペクトルは、各観測点とも上層で大きく下層で小さい(Fig. 4)。トータルスペクトルの各観測点におけるエネルギーの差は、上層でははっきりしないが、下層では湾奥部の B2 が最も大きく、湾東部中層の C2 とほぼ同じレベルとなっている。エネルギースペクトルのピークは、湾東部の Stn. C でわずかに見られるものの、潮汐周期帯には卓越周期は見られない。

Fig. 2 の流れの時系列からは、流動は短周期で変化し観測する位置や水深によっても流動の特徴は異なることから、湾全体の流動パターンを把握するのは難しい。そこで、観測期間全体を通しての湾内の流動パターンをとらえるために、流速を東西成分( $V_e$ )と南北成分( $V_n$ )に分解し、EOF 解析を行った。

全体変動の18%を占める第1モードは、上層では、Stn. A で北東方向の時、Stn. B で西向き、Stn. C で南西向きと湾内を循環する関係を示した(Table 4, Fig. 5)。上層と下層の流動傾向を比較すると、湾東部の Stn. C では上層から下層までほぼ同じ向きに流れる関係であるのに対し

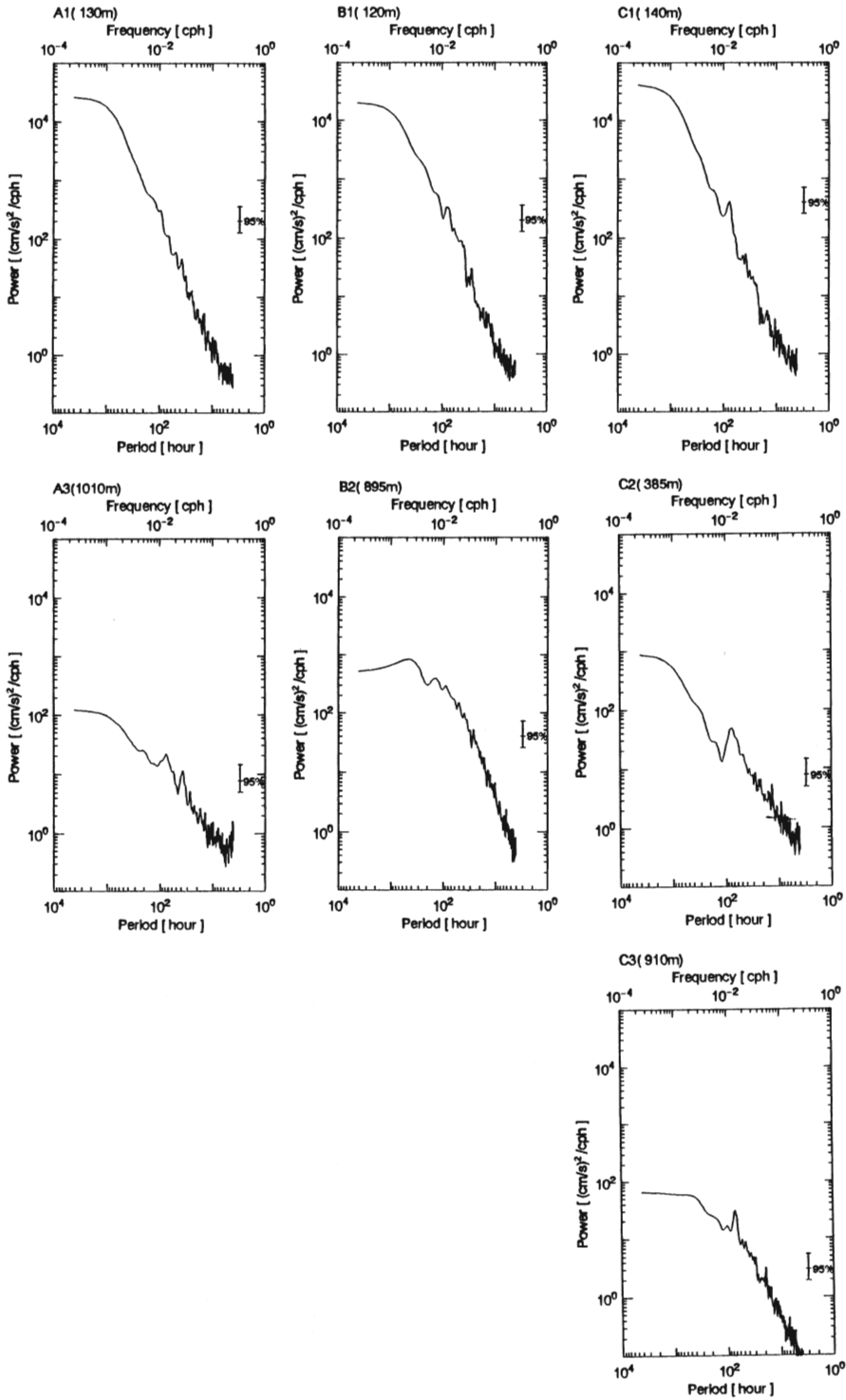


Fig. 4. Total spectrum of current velocity by rotary spectra method. Slide bars show 95% confident limits.



て、湾西部の Stn. A では上層と下層で逆位相となっている。上層では循環流を示すパターンが得られたが、このパターンの時間変化はスコアと呼ばれる時間変動指数によって表される。スコアが正を示す時は、モードで得られた関係が現れていると判断できる。一方、スコアが負を示す時は、モードで得られた関係と逆位相の現象が起こっている。第1モードのスコアは約20日間で周期として正負を繰り返しており、第1モードが示した循環パターンは時間と共に位相を逆転させ起こっている (Fig. 6)。モード値は湾西部より湾東部で大きく、流動スケールは湾東部で大きいといえる。

第2モードは、各観測点の上層と下層で流れの向きが逆位相となるパターンが示された。湾西部の Stn. A と湾東部の Stn. C では、上層が反時計回りの流動傾向の時、下層で時計回りの流動傾向となっている。一方、湾奥部の Stn. B では湾岸に直交する方向にモードが示され、上層で岸向きの流動傾向の時には下層で沖向きの流動傾向となっている。モード値は湾東部の Stn. C と湾西部下層の A3 で大きくなっている。

第3モードでは、湾西部の Stn. A と湾奥部の Stn. B に対して湾東部の Stn. C のモード値が大きくなっていることが特徴としてあげられる。このことは湾西部の Stn. A と湾奥部の Stn. B で比較的流速値が小さくても、湾東部の Stn. C で流速値が大きくなる可能性を示している。

第4モードは全体変動に占める割合は10%以下であり、また、スコア値も観測全体を通して小さいことから、微小変動成分であると考えられる。

## 考 察

富山湾内の3ヶ所で係留系によって得られた流速値を用いて湾内の流れの実態について検討した。その結果、流速は上層で大きく、最大流速値は40cm/sにも達することが明らかとなった。一方、今までほとんど観測例がなかった水深1000mを越える下層でも平均にして数cm/s程度

Table 4. The results of EOF analysis.

		Mode I	Mode II	Mode III	Mode IV
Eigen value		2.49	2.05	1.87	1.33
(ratio)		0.18	0.15	0.13	0.09
A1	Ve	0.50	-0.03	-0.22	0.12
(130m)	Vn	0.43	-0.13	-0.07	0.31
A3	Ve	-0.19	0.45	-0.03	0.50
(1010m)	Vn	-0.34	0.39	-0.07	0.41
B1	Ve	-0.36	-0.24	0.16	-0.01
(120m)	Vn	0.02	-0.25	-0.23	0.23
B2	Ve	-0.02	0.04	-0.12	0.17
(895 m)	Vn	-0.15	0.10	-0.09	0.05
C1	Ve	-0.20	-0.12	-0.38	-0.13
(140m)	Vn	-0.06	0.37	0.33	-0.45
C2	Ve	-0.35	-0.40	0.02	0.03
(385m)	Vn	0.04	-0.18	0.59	0.23
C3	Ve	-0.29	-0.37	-0.01	0.14
(910m)	Vn	0.11	-0.14	0.48	0.32

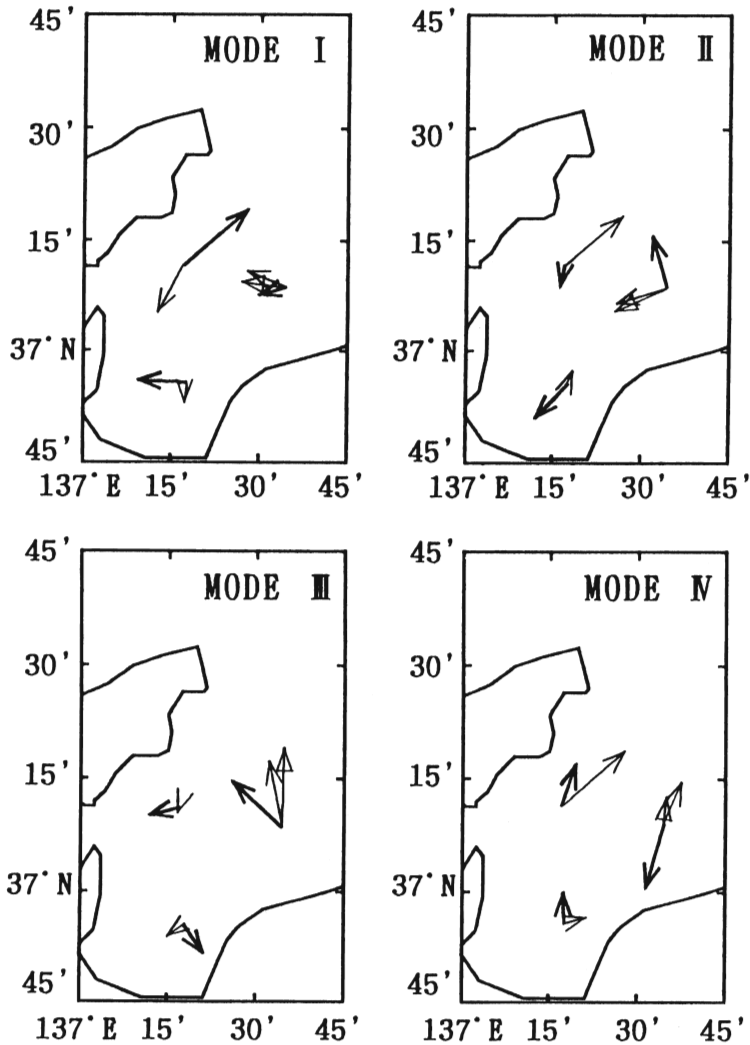


Fig. 5. Modes I, II, III and IV of current pattern by EOF analysis. Thick arrows show upper layers, thin arrows show lower layers and thin arrows with triangle heads show middle layers for results of EOF analysis see Table 4.

の流れが確認された。しかし、中・下層の流れは間欠的であり、定常的に流れが存在しているわけではない。

流れの方向は、上層では岸に沿った方向に卓越しており、平均的には湾北西部から流入し湾東部から流出する反時計回りの循環が見られる。これは今村ら(1985)や内山(1993)が示した結果と同じであり、平均的な流動パターンについては水温・塩分値による流れの推定方法が有効であることを示している。下層では湾西部で流入、湾東部で流出、湾奥部で岸に直交する方向の流れの傾向を示したが、この傾向は上層ほど明瞭ではない。

流動の変動の周期性についてはスペクトル解析によって検討した。流動の変化が周期性を持っていれば、スペクトル解析によってその周期を見積もることができる。流動の起動力が潮

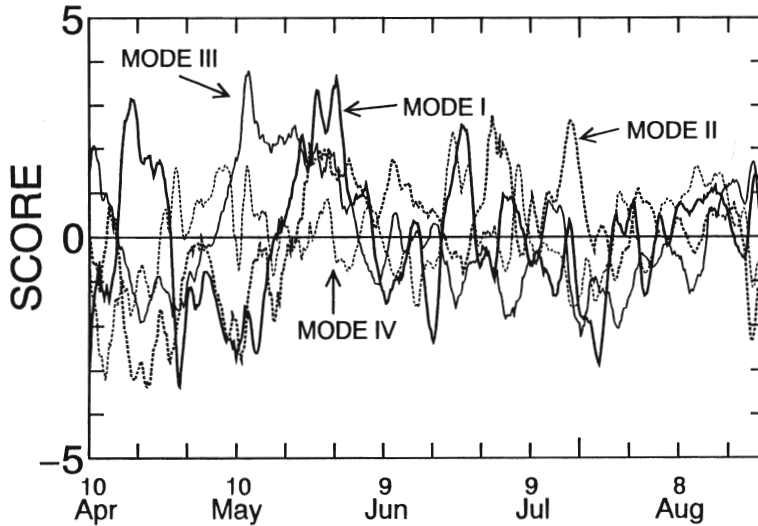


Fig. 6. Time series of score values for Modes I, II, III and IV.

汐力によるものであれば、潮汐周期帯にエネルギー Spektral のピークが見られるが、解析の結果からは潮汐周期帯に卓越周期は見られなかった。しかし、実際の流動は流れの大きさや方向性が短時間に变化しており、平均的流動パターンと異なって、湾西部でも流出傾向となる場合や湾東部で流入傾向となる場合も少なくなかった。Spektral 解析の結果からはこれらの变化の要因が潮汐力によるとは考えられない。これらの変動要因として考えられる現象には、湾内の上層に分布する対馬暖流水と下層に分布する日本海固有水の挙動の相互作用があげられるが、湾外で行われている月に一度程度の海洋観測による水温・塩分値からはその関係を明らかにすることは容易ではない。しかし、湾内の流動が短期間で变化して平均的流動パターンと異なる状態となる現象は、海上保安庁水路部(1984)にも示されており、富山湾内において珍しい現象であるといえる。

さらに今回の観測では、湾奥部の Stn. B において上層でも流れがほとんど見られなくなる現象が確認された。これに対して、今回の観測中に湾西部の Stn. A と湾東部の Stn. C の上層で流れが見られなくなる現象は確認されなかった。このことは、湾外から流入した海水が湾奥部に達することなく湾外へ流出している現象の存在を示しており、この時期には湾奥部では海水交換がほとんど起こらないよどんだ状態になっていたと考えられる。この現象が、別の季節にも起こるのか、また毎年起こる現象であるのか今回の観測結果からだけでは判らないが、今後、湾内の海水交換を考える上で重要な現象であるといえる。

流速の時系列からは見ることができない湾内の流動パターンをとらえるために EOF 解析を行った。湾内の流動の代表的傾向と考えることができる第1モードは、上層で湾内を循環する流動パターンとなること、湾西部では上層と下層で流動傾向が逆位相となること、流動パターンは短周期で変化していることを示した。流速値に対する EOF 解析としては海上保安庁水路部(1984)が、同じく富山湾における係留系観測に対して行っている。今回の観測は海上保安庁水路部の観測と観測年や季節が異なっているものの、第1モードの特徴として同じ傾向を示しており、今回得られた結果は、全体変動に占める割合は18%と低いものの、富山湾を代表する流動パターンであるといえる。しかしこのパターンは、同時刻における各観測点の流動現象を見

て導き出された結果であるため、湾内の流動を水塊の移動として考えて流動パターンを検討するためには、各観測点の流動変化に時間差を加えて検討する必要がある。

長期間にわたる係留系観測の結果、今まで考えられてきた表層の平均的な反時計回りの循環パターンに加えて、水深 1000m の下層でも流れが存在することや流れのパターンが水深によって異なること、そのパターンが短時間に変化することが明らかにされた。一方、湾内の流動の変動要因としてその可能性が考えられる湾外の現象を湾内の流動の観測と合わせて同時に把握する必要があること、水塊の移動を考え現象の時間差を考慮した解析を行う必要があることなどいくつかの問題点も明らかになった。さらに、今回の解析では明らかにされなかった冬季における流動について未検討であり、富山湾内の流動実態をさらに詳しく検討するためには、今後これらのことを考慮した直接測流による解析を行う必要がある。

## 要 約

1986年4~8月に富山湾内の3ヶ所で行われた係留系観測による直接測流のデータを用いて同湾内の流動について検討した結果、富山湾内の流動の特徴として以下の結果を得た。(1)湾内で観測された流れの平均流速は上層で大きく下層で小さく、上層の流れはほぼ岸に沿った方向に流れていた。(2)下層の流れは間欠的に起こっていた。(3)観測された流れは、短時間でその大きさや方向を変化させており、上層と下層で異なった方向に流れる現象も確認された。(4)スペクトル解析による流れの変動の周期解析では、卓越周期は見られなかった。(5)流速の平均値による流動の平均パターンも EOF 解析の第 1 モードの流動パターンも共に湾内を循環するパターンとなったが、平均パターンが反時計回りであるのに対して、EOF 解析によるパターンは流れの方向が時間と共に逆転することが示された。(6)湾奥部で、上層でもほとんど流れがなくなるよどみ現象が確認された。

## 文 献

- 今村 明・石森繁樹・川崎賢一 (1985) 富山湾 II 物理. pp990-1000. 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, 東京.
- 海上保安庁水路部 (1984) I-2 海流変動と沿岸流に対する影響調査. 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, 北陸沿岸地域調査成果報告, 日水研, 39-68.
- 奈倉 昇・若林 洋 (1984) II-2-1 富山湾の概況. 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, 北陸沿岸地域調査成果報告, 日水研, 169-182.
- 日本水産資源保護協会 (1987) 2 富山湾の海洋環境特性. 伏木外港建設計画に係る漁業影響調査報告, 日本水産資源保護協会, 6-12.
- 内山 勇 (1993) 富山湾及び周辺海域の平均的流動パターン. 富山県水産試験場研究報告, (4), 11-30.