

内湾域の流動・水質環境に及ぼす成層の影響に関する研究（その2）

佐藤 敏, 吉 宣好 : 海洋研究室

万代康史, 後藤礼介 : 沿岸調査課

加藤弘紀 : 第四管区海上保安本部水路部

Influence of the Density Stratification on the Mass Transport in Coastal Waters

Satoshi Sato, Nobuyoshi Yoshi : Ocean Research Laboratory

Yasushi Mandai, Reisuke Goto : Coastal Surveys and Cartography Division

Hiroki Kato : Hydro. Dept., 4th R.M.S. Hgs

1. はじめに

伊勢湾では富栄養化に伴う赤潮、貧酸素水塊が発生し、生態系に大きな影響を及ぼしている。特に赤潮については、第1表に示すように三重県水産技術センター（1994）の調べでは、ここ10年の平均発生件数は20件を超えており、また、年間日数の約3分の1である120日は伊勢湾のどこかで赤潮を見ることができるといふ状況にある。冷夏であった1993年においても、発生件数こそ13件と例年に比べてやや少ないものの、発生日数、発生延日数ともほぼ例年並みとなっていた。

本研究は、依然として赤潮が頻発しながらもその流況の状況等物理現象についての理解が未だ不足している（宇野木，1985）伊勢湾をモデル海域として、長期間の連続観測等を実施することにより、赤潮や貧酸素水塊の発生に重要な役割を果たす海況変動、特に成層の形成、発達、消滅に伴う海況変動過程が内湾の水質環境に与える影響について解明し、今後の水質改善対策等に資するものである。

前年度の平成4年度には、研究の初年度として、成層の影響を把握するための比較対象データの収集を行うため、密度構造が鉛直にほぼ一様となり密度成層が形成されない冬季において流れ、水温、塩分等の観測を実施したが、平成5年度は、本研究のテ-

マである成層の影響を把握するため、顕著な密度成層が形成される8~10月に水温、塩分等の分布や流れの状況等についての観測を実施し、前年度の観測との比較により、成層の影響について検討することとした。

第1表 伊勢湾における年別赤潮発生件数、日数、延日数。

資料は三重県水産技術センター（1994）による。

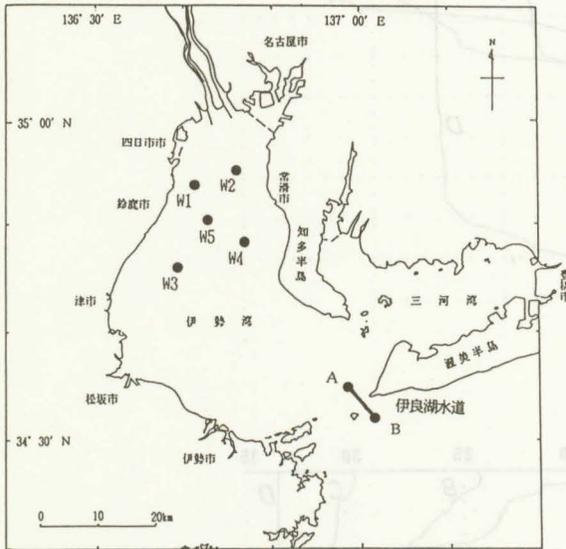
年	赤潮発生件数 (件)	赤潮発生日数 (日)	赤潮発生延日数 (日)
1984	20	103	121
1985	31	87	126
1986	15	98	115
1987	30	121	131
1988	23	109	124
1989	17	203	253
1990	25	149	169
1991	20	104	123
1992	18	107	110
1993	13	119	130
平均	21.2	120.0	140.2

2. 平成5年度の観測の概要

平成5年度の観測については平成4年度と同様に約1カ月の定置測流を1993年9月10日から10月13日にかけて実施した。また、測量船「天洋」でも8月上旬に湾奥部と湾口部を中心に観測を実施した。

定置測流は当初8月から実施することを予定していたが、準備の遅れ等の諸事情により9月開始となったものである。前年度と同様に北部海域を対象とし、第1図及び第2表に示すW1～W5の5点において実施した。観測層については、W1及びW2は海面下1, 3, 7, 15mの4層、残りの3点は海

面下3, 10m及び海底上2mの3層であり、流向流速の他に水温、塩分（電気伝導度）の計測を行った。また、この定置測流期間中、各観測点において水温、塩分、溶存酸素の鉛直分布観測を数度実施した。これらの観測実施状況についてはW2点の海面下1m層が機器の作動不良により、流れについて9月10日～10月1日まで欠測になり、また、航行船舶による事故のため10月7日～9日までW2点の4層全部が欠測になったが、他の観測点は順調に観測が実施された。なお、前年度はW5点を除くW1～W4の4点において海面下1, 3, 7, 15mの4層の観測を実施している。ただし、W1点については500mほど位置がずれている。



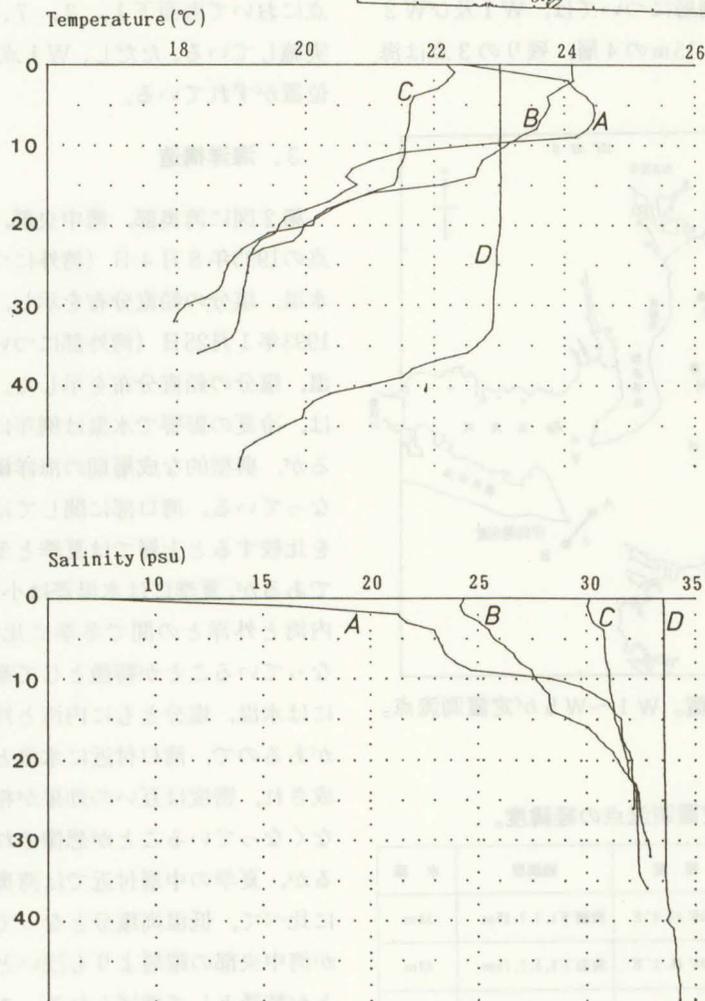
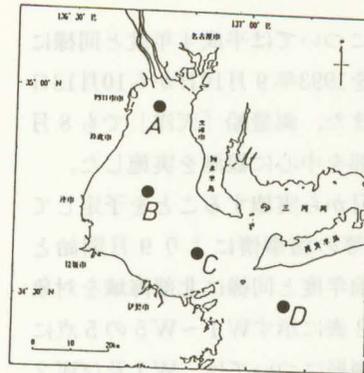
第1図 観測点の位置。W1～W5が定置測流点。

第2表 定置測流点の経緯度。

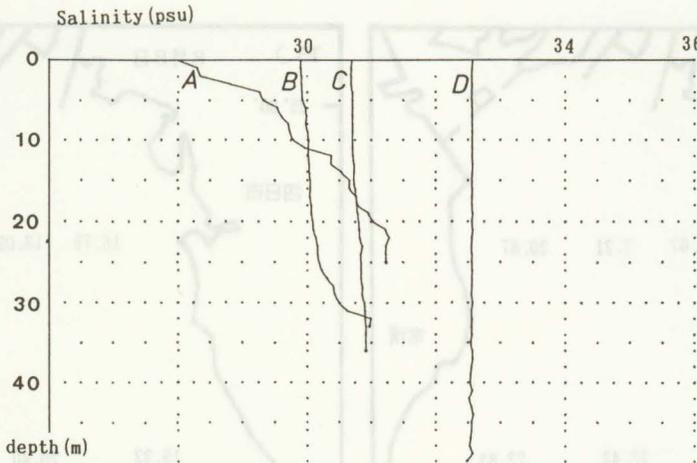
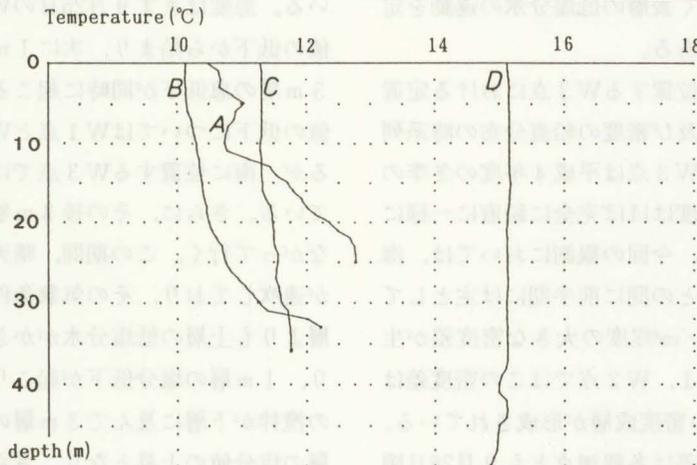
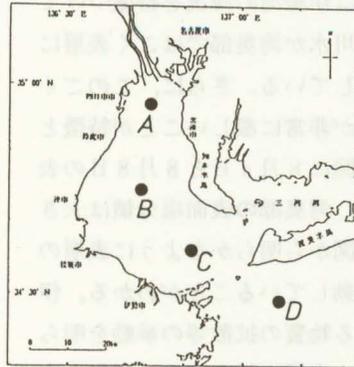
観測点	緯度	経度	観測層	水深
W1	34° 53.7' N	136° 42.0' E	海面下1, 3, 7, 15m	18m
W2	34° 55.4' N	136° 46.2' E	海面下1, 3, 7, 15m	23m
W3	34° 46.0' N	136° 39.1' E	海面下3, 10m, 底上2m	24m
W4	34° 48.4' N	136° 47.0' E	海面下3, 10m, 底上2m	25m
W5	34° 50.0' N	136° 43.0' E	海面下3, 10m, 底上2m	28m

3. 海洋構造

第2図に湾奥部、湾中央部、湾口部及び湾外の4点の1993年8月4日（湾外については8月8日）の水温、塩分の鉛直分布を示し、第3図に同じ4点の1993年1月25日（湾外部については1月29日）の水温、塩分の鉛直分布を示した。8月の観測については、冷夏の影響で水温は例年に比べて低くなっているが、典型的な成層期の海洋構造を表す鉛直分布となっている。湾口部に関しては、第2図と第3図とを比較すると上層では夏季と冬季の塩分差は同程度であるが、夏季には水温差は小さくなっているため、内湾と外洋との間で冬季に比べて密度差が大きくなっていることが特徴として挙げられる。逆に冬季には水温、塩分ともに内湾と外洋との間に大きな差があるので、湾口付近に水温と塩分のフロントが形成され、密度は互いの効果が相殺されてあまり差がなくなっていることが想像される。次に湾奥部であるが、夏季の中層付近では湾奥部の海水が湾中央部に比べて、低温高塩分となっており、湾奥部の躍層が湾中央部の躍層よりも浅いところに現れていることが特徴として挙げられる。これは上層の海水が湾を南下する間に下層の水を取り込んでいることを示唆している。また年間を通して低塩分水が表層に存在しているが、夏季にごく表層に塩分値が非常に低



第2図 湾奥部(A), 湾中央部(B), 湾口部(C), 湾外部(D)における1993年8月4日(湾外部は8月8日)の水温塩分の鉛直分布。



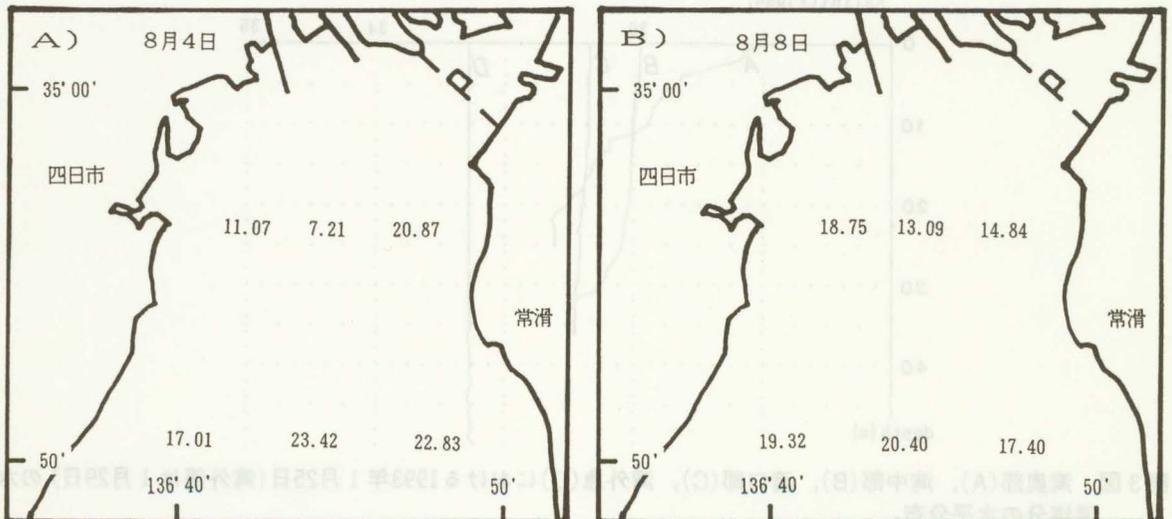
第3図 湾奥部(A), 湾中部(B), 湾口部(C), 湾外急(D)における1993年1月25日(湾外部は1月29日)の水温塩分の水平分布。

く、また温度の低い海水が存在することが大きな特徴となっている。これは伊勢湾の海況を特徴づけている木曾三川からの河川水が湾奥部ではごく表層に存在していることを示している。さらに、このごく表層の低塩分水の変化が非常に激しいことが特徴として挙げられる。第4図に8月4日と8月8日の表面の塩分分布を示すが、湾奥部の表面塩分値は大きく異なっており、この図から明らかなように表層の低塩分水が短時日で変動していることがわかる。伊勢湾での表層を浮遊する物質の拡散等の挙動を明らかにするには、このごく表層の低塩分水の運動を定量的に把握する必要がある。

次に湾中央部西側に位置するW3点における定置測流期間の水温、塩分及び密度の鉛直分布の時系列変化を第5図に示す。W3点は平成4年度の冬季の観測期間においては密度はほぼ完全に鉛直に一樣になっていた点であるが、今回の観測においては、海面下3mと海底上2mとの間に前半期には主として塩分差から $8 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 程度の大きな密度差が生じていた。湾奥部のW1, W2点ではこの密度差はさらに大きくなり、強い密度成層が形成されている。この上層と下層の密度差は各観測点とも9月26日頃に急速に小さくなり、W3点における後半期の密度

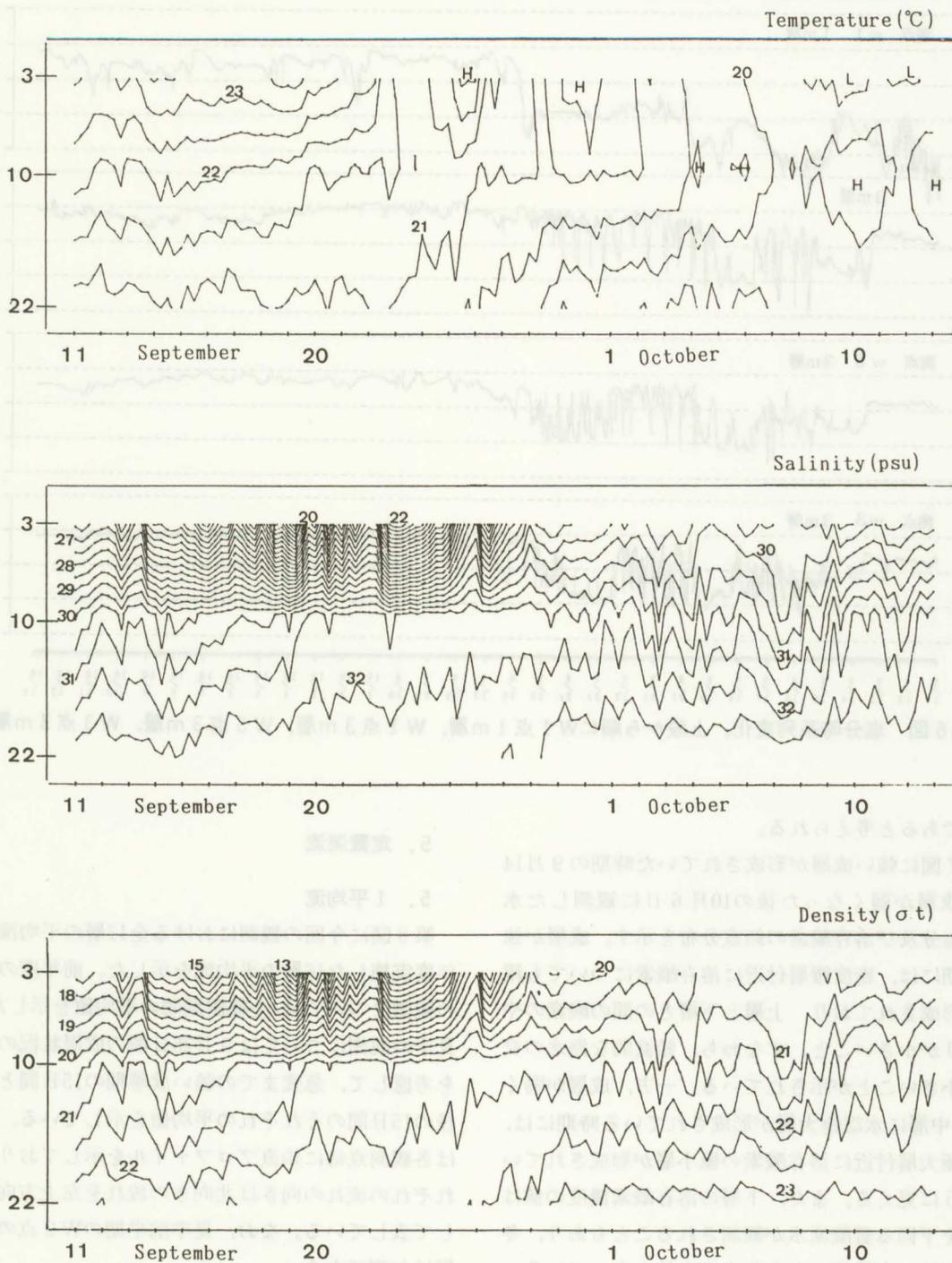
差は $3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 程度となっている。また、後半期の特徴としては水温の極大値が中層に現れていることである。これは既に海面冷却による鉛直混合が中層付近にまで及んできていることを示しており、成層から鉛直混合にいたる移行期に見られる特徴である。

先に述べた9月26日頃の成層状況の急変は塩分の時系列変化によく現れている。第6図は伊勢湾の西側の測点のW1点の1m層と3m層、W5点の3m層及びW3点の3m層の塩分の時系列変化を示している。急変はまず9月25日のW1点の1m層の塩分値の低下から始まり、次に1m層の塩分値の上昇と3m層の急低下が同時に起こる。この3m層の塩分値の低下についてはW1点とW5点はほぼ同時であるが、南に位置するW3点では数時間遅れて発生している。さらに、その後3m層の塩分の上昇へとつながって行く。この期間、晴天が続き、強い北西風が連吹しており、その気象条件等により、まず1m層よりも上層の低塩分水がかき混ぜられることにより、1m層の塩分低下が起こり、そして徐々に海水の攪拌が下層に及んで3m層の塩分値の低下と1m層の塩分値の上昇となり、さらにもっと下層に海水の攪拌が及んで行くことで成層場の急変が起こった



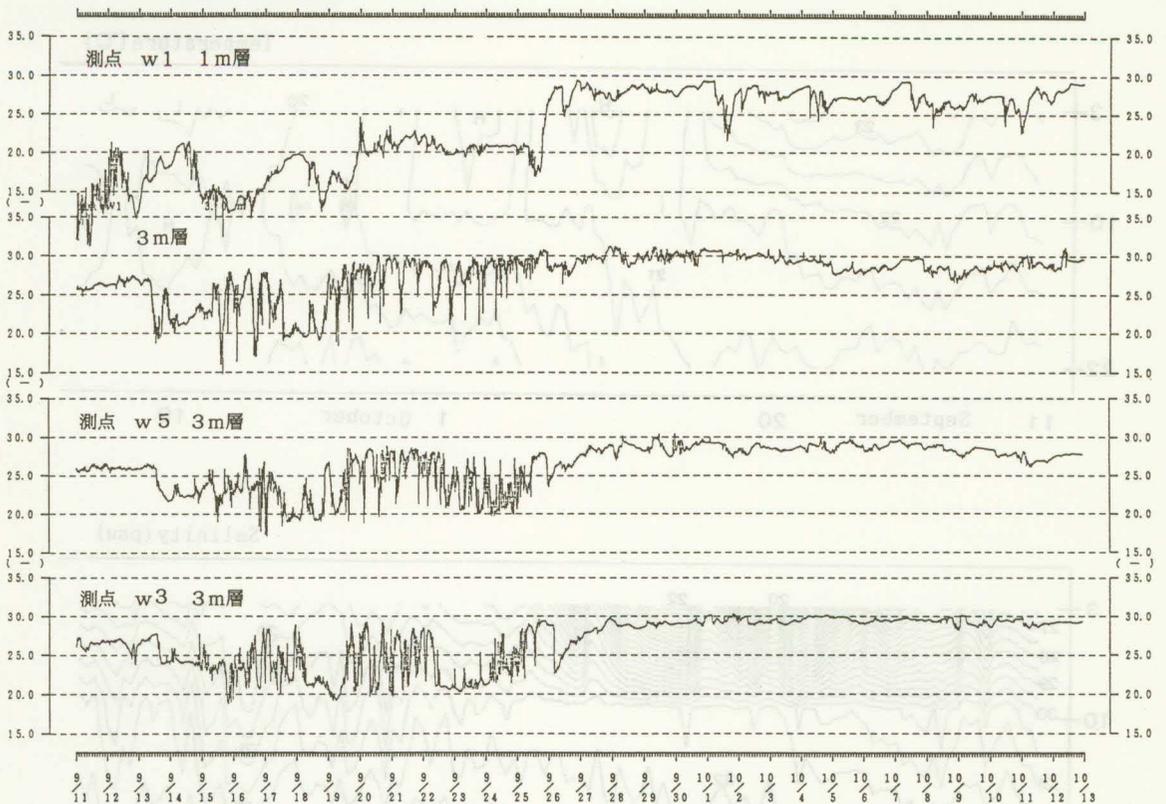
第4図 湾奥部の表層塩分の水平分布。A) 8月4日, B) 8月8日。

測量図表付録



第5図 W3点の水温, 塩分, 密度のイソプレット第図。

塩分時系列変化



第6図 塩分時系列変化。上段から順にW1点1m層，W1点3m層，W5点3m層，W3点3m層

ものであると考えられる。

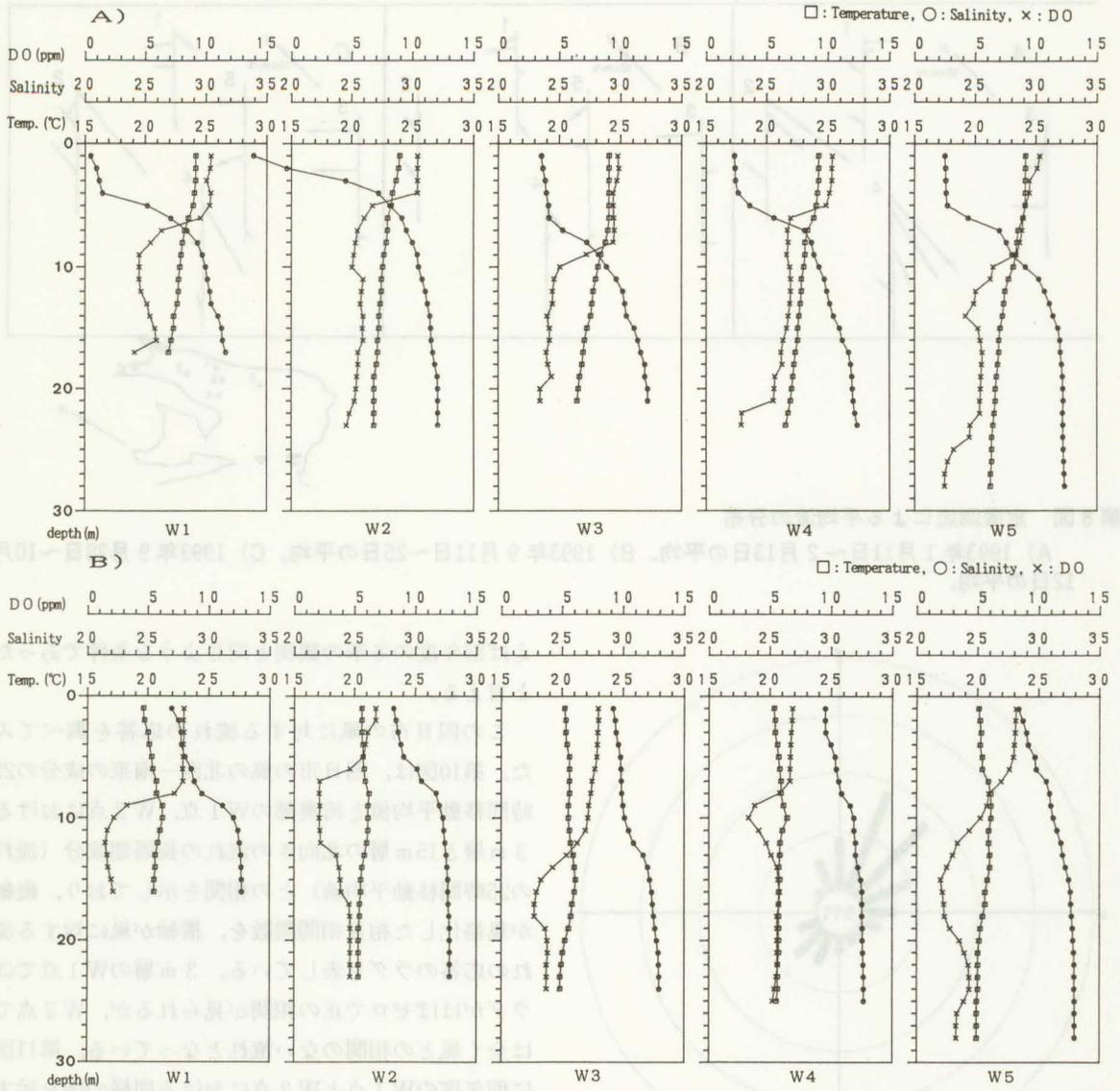
第7図に強い成層が形成されていた時期の9月14日と成層が弱くなった後の10月6日に観測した水温，塩分及び溶存酸素の鉛直分布を示す。成層が強い時期には，密度躍層付近に溶存酸素についても躍層が形成されており，上層と下層との間の酸素のやり取りが小さいこと，すなわち，鉛直的な海水の交換が小さいことが示されている。一方，成層が弱くなり，中層に水温極大層が形成されている時期には，その極大層付近に溶存酸素の極小層が形成されているように見える。また，下層の溶存酸素濃度の値は1ppmを下回る貧酸素水が観測されることもあり，冬季に比べて全般的にかなり小さな値となっている。

5. 定置測流

5. 1 平均流

第8図に今回の観測における全17層の平均流と前年度実施した16層の平均流を示した。前年度の冬季の観測については，全観測期間の平均値を示したが，夏季の観測については9月26日頃の成層状況の急変を考慮して，急変までの強い成層期の15日間と急変後の15日間のそれぞれの平均値を示している。図では各観測点毎に鉛直プロファイルを示しており，それぞれの流れの向きは北向きの流れを左上方向きとして表している。なお，夏季前半期のW2点の1m層は欠測である。

冬季と夏季の平均流の分布を比較すると，似通ったところがあるが，差異として認められる点のひとつ



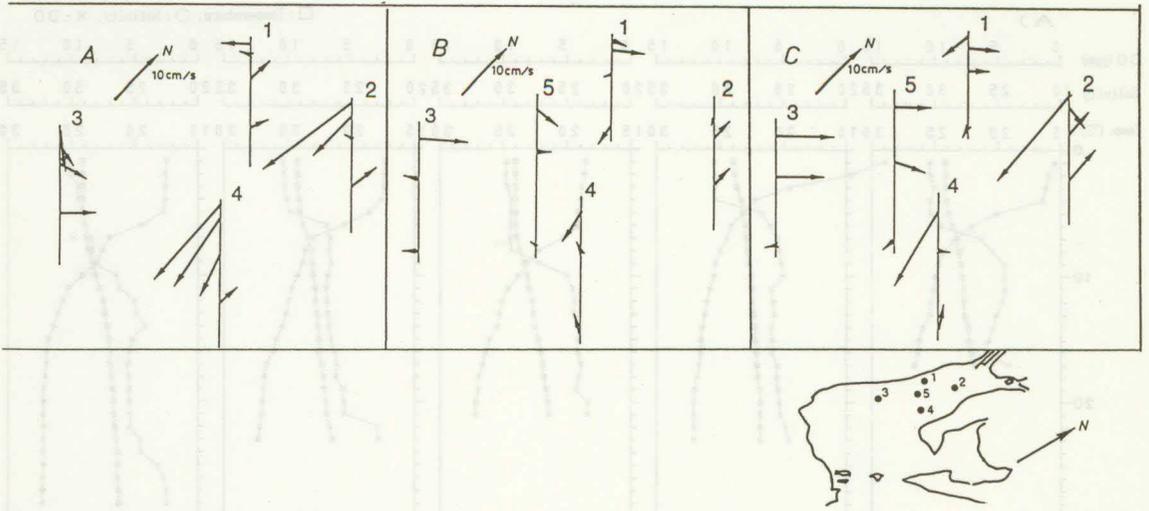
第7図 水温，塩分，溶存酸素鉛直分布。A) 9月14日，B) 10月6日。

つは、冬季は上層が南流，下層が北流となる鉛直循環的傾向が見られるのに対し，夏季には，観測層の違いもあるのだろうが，西側の観測点の下層には小さいながらも南流の成分が現れていることである。さらにもう一点の違いとして，W2点の3m層の違いがある。冬季には明らかに南向きの平均流となっていたが，夏季には全くその南向きの平均流は見られず，短い期間の観測の平均ではあるが夏季で

も1m層に顕著な南向きの平均流が現れるのとは対照的である。W2点は木曾三川の河口に近く河川水の影響で表層に強い成層が形成されており，湾奥部の平均流の分布に対してこの強い成層が影響を与えているものと考えられる。

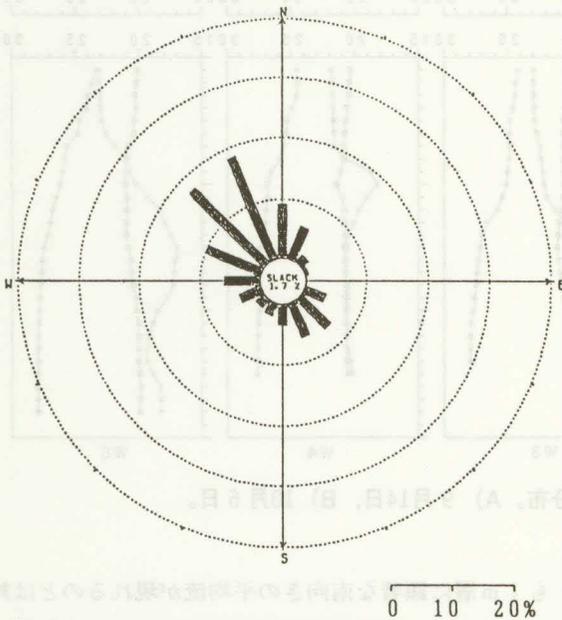
5. 2風に対する応答

定置測流は前にも述べたとおり1993年9月10日か



第8図 定置測流による平均流の分布

A) 1993年1月11日～2月13日の平均。B) 1993年9月11日～25日の平均。C) 1993年9月28日～10月12日の平均。

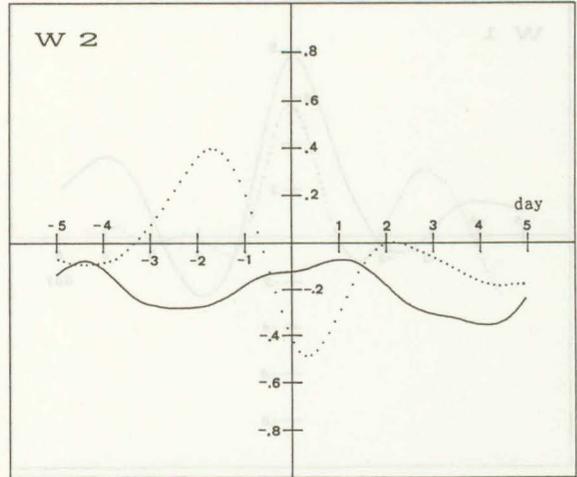
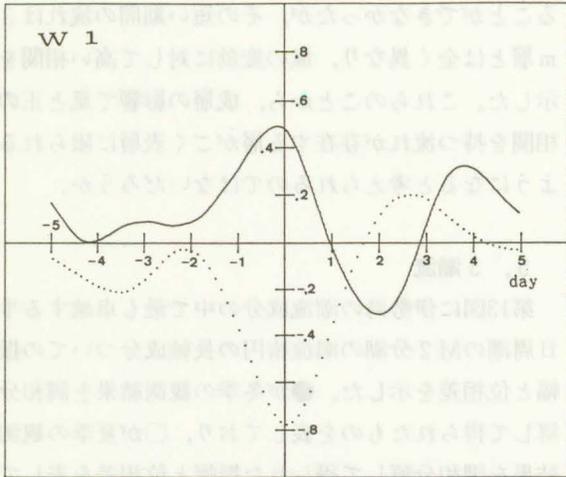


第9図 定置測流期間中の四日市の風向頻度。

ら10月13日までの期間に実施した。この観測期間の四日市測候所における風向頻度を第9図に示す。既に夏季の南東季節風の時季は終わって、南東の風ではなく、北北西（出現率18.5%）及び北西（出現率17.7%）の風が卓越しており、風の状況について言

えば前年度の冬季の観測と同じような条件であったと言える。

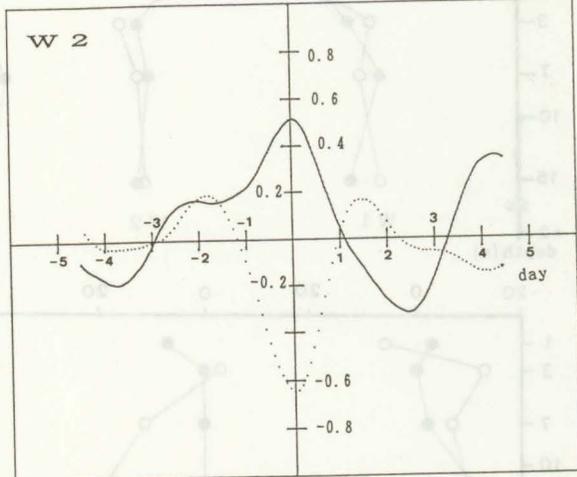
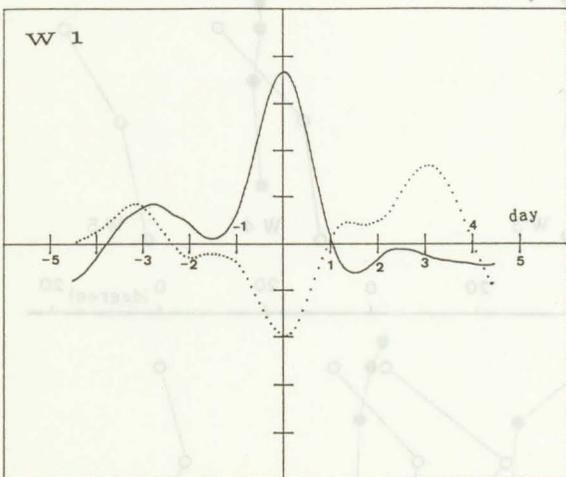
この四日市の風に対する流れの応答を調べてみた。第10図は、四日市の風の北西-南東の成分の25時間移動平均値と湾奥部のW1点、W2点における3m層と15m層の北向きの流れの長周期成分（流れの25時間移動平均値）との相関を示しており、縦軸が規格化した相互相関関数を、横軸が風に対する流れの応答のラグを表している。3m層のW1点ではラグがほぼゼロで正の相関が見られるが、W2点では全く風との相関のない流れとなっている。第11図に前年度のW1点とW2点における同様の図を示すが、冬季にはW2点でも値は低いもののラグがゼロのところでは正の相関が見られ、W1点には高い正の相関が見えており、夏季の3m層の流れは冬季に比べて風との相関が低くなっていることがわかる。第12図にはW1点について、冬季と夏季の風と1, 3, 7, 15m層の流れとの相関を示しているが、1m層の相関が冬季には3m層の相関よりも低かったものが、夏季には風と1m層の流れは0.8近くの高い相関となり、3m層よりも遥かに高い相関となっている。W2点の1m層の流れの記録は短い期間しか取得す



第10図 成層期の四日市の風とW 1点及びW 2点の流れの25時間移動平均値の相互相関関数。

縦軸：規格化された相互相関関数，横軸：応答の遅れ。

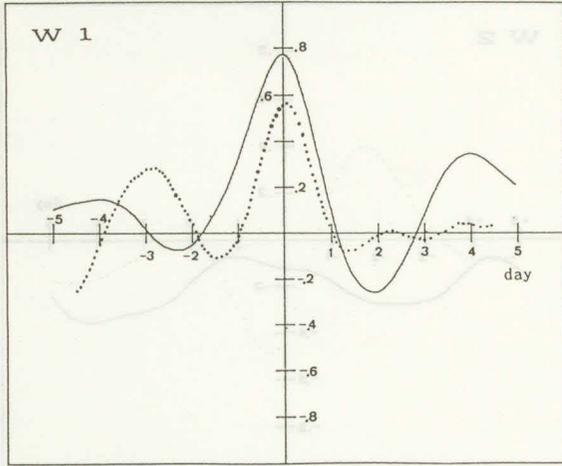
実線が3 m層，点線が15m層。



第11図 非成層期の四日市の風とW 1点及びW 2点の流れの25時間移動平均値の相互相関関数。

縦軸：規格化された相互相関関数，横軸：応答の遅れ。

実線が3 m層，点線が15m層。

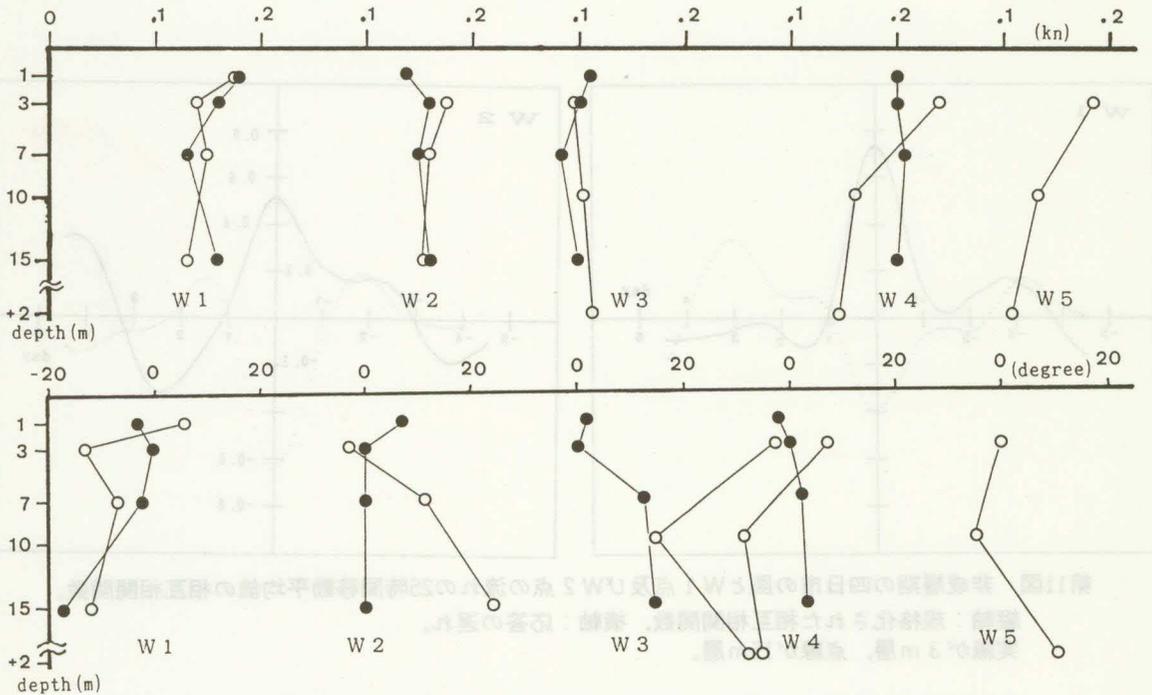


第12図 四日市の風とW1点1m層の流れの25時間移動平均値の相互相関関数。
縦軸：規格化された相互相関関数，横軸：応答の遅れ。
実線が成層期，点線が非成層期。

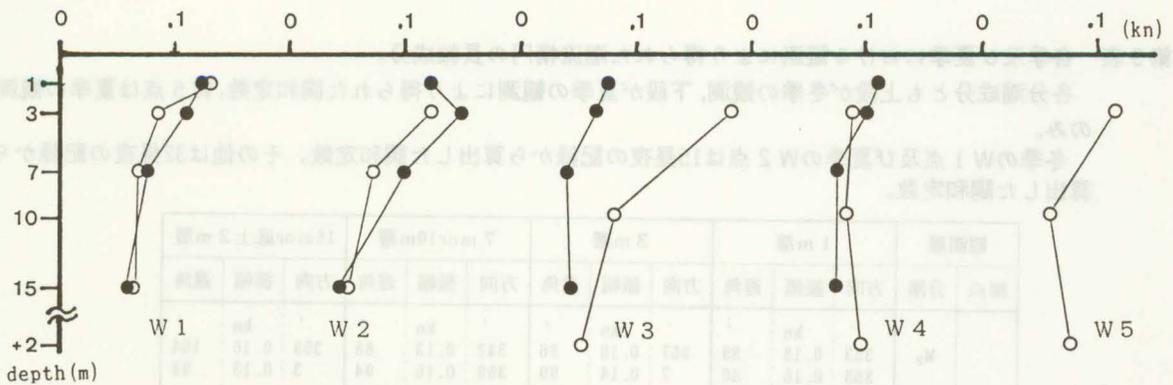
ることができなかったが、その短い期間の流れは3m層とは全く異なり、風の変動に対して高い相関を示した。これらのことから、成層の影響で風と正の相関を持つ流れが存在する層がごく表層に限られるようになると考えられるのではないだろうか。

5. 3 潮流

第13図に伊勢湾の潮流成分の中で最も卓越する半日周潮のM₂分潮の潮流楕円の長軸成分についての振幅と位相差を示した。●が冬季の観測結果を調和分解して得られたものを表しており、○が夏季の観測結果を調和分解して得られた振幅と位相差を表している。冬季については、前年の報告書にも記したが、鉛直的にはほぼ様な構造となっており、また、水平的な位相差も小さいが、夏季の場合には、鉛直的なばらつきが大きく、位相のズレは特に顕著となっている。塩分の時系列変化に潮汐周期に近い変動が見



第13図 成層期と非成層期のM₂潮流の長軸成分の振幅と位相の遅れの分布。
○：成層期，●：非成層期。
位相の遅れは非成層期の各点の3m層の遅角との差として表している。



第14図 成層期と非成層期の K_1 潮流と O_1 潮流の長軸成分の振幅の和。○：成層期，●：非成層期。

られることなどから、成層期には内部モードの振動が現れるため、鉛直的に調和定数にばらつきが生じてくるものと考えられる。

一方、半日周潮流よりもかなり弱い流れである1日周潮流は、冬季の観測でもばらつきが見られたが、今回の観測でも同様のばらつきが見られた。第14図は K_1 分潮と O_1 分潮の潮流楕円の長軸成分の振幅の和を示したものであるが、冬季のものも今回の観測観測から得られたものも上層の振幅が大きくなっている。これは風の高表面における作用等の雑音要因により上層の振幅が大きくなっているのではないかと考えられ、本来の天体の運行に伴う1日周潮流の大きさは上層ではここで得られた定数よりも小さいものであると思われる。

第3表に冬季及び夏季の観測で得られた主要4分潮の潮流楕円の長軸成分について調和定数を示す。

6. まとめ

本研究では、木曾川、長良川、揖斐川の木曾三川をはじめとする豊かな河川水の影響で強い成層が形成され易い海域である伊勢湾を研究対象海域として、成層が閉鎖性内湾域の流動と水質環境に及ぼす影響を解明することを目指している。このため、研究の最初の2年間は成層期と非成層期のそれぞれの時期の流動等物理過程の把握を行うこととし、平成4年度に海洋構造が鉛直的にほぼ一様な冬季に観測

を行い、平成5年度には成層期の流れ等の観測を実施した。その2年間の観測結果の比較から成層期と非成層期の伊勢湾の流れについて以下のようなことがわかった。

潮流について言えば、非成層期はほぼ鉛直に一様な構造となるのに対し、成層期には内部モードの潮流が発達して、振幅や位相の分布は鉛直に一様ではなくなっている。ただし、湾口のような強い潮流が発生する場所では海水は混合されており、成層期の観測の結果からも振幅や位相に鉛直的な違いはほとんど現れなかった。

長周期の流れに関しては、湾奥部の表面付近の強い成層は流況に大きな影響を与えているように見え、伊勢湾の東側の上層に見られる強い南下流が冬季には3m層にも明瞭に現れていたものが、成層期には表面のごく薄い層に限られたことや、風に対する正の相関を持つ層も表面の薄い層だけとなったことなどは、この強い成層の影響であると考えられる。

また、伊勢湾北部の循環の全体的なパターンも成層期と非成層期では異なっており、非成層期に上層南流、下層北流の鉛直循環流の様相であったが、成層期には下層に南流も見られ、上層で流出、下層で流入という単純な鉛直循環流という認識ではすまない循環流パターンになっているようであった。

今後、これまで得られた貴重なデータをさらに詳細に解析し、流況に対する成層の影響について検討

第3表 各季及び夏季における観測により得られた潮流楕円の長軸成分。

各分潮成分とも上段が冬季の観測, 下段が夏季の観測により得られた調和定数。W 5 点は夏季の観測のみ。

冬季のW 1 点及び夏季のW 2 点は15昼夜の記録から算出した調和定数。その他は32昼夜の記録から算出した調和定数。

観測層		1 m層			3 m層			7 m or 10 m層			15 m or 底上 2 m層		
測点	分潮	方向	振幅	遅角	方向	振幅	遅角	方向	振幅	遅角	方向	振幅	遅角
W 1	M ₂	353	0.18	89	357	0.16	86	342	0.13	88	359	0.16	104
		353	0.16	80	7	0.14	99	359	0.15	94	3	0.13	98
	S ₂	8	0.08	136	11	0.08	108	354	0.08	116	357	0.09	141
		340	0.08	113	17	0.08	125	358	0.08	121	3	0.06	120
	K ₁	292	0.04	203	20	0.05	107	335	0.05	91	353	0.03	154
		282	0.11	41	291	0.04	295	282	0.03	186	318	0.04	123
	O ₁	74	0.09	220	7	0.06	104	356	0.03	21	88	0.04	15
		277	0.03	159	16	0.04	27	17	0.04	61	336	0.03	114
W 2	M ₂	8	0.14	95	2	0.16	102	9	0.15	102	15	0.16	102
					18	0.18	105	11	0.16	91	22	0.16	79
	S ₂	29	0.08	104	36	0.08	103	8	0.07	132	10	0.08	133
					30	0.08	131	9	0.08	126	0	0.08	115
K ₁	42	0.05	149	61	0.07	139	26	0.04	74	331	0.02	138	
				306	0.07	210	352	0.06	88	308	0.04	88	
O ₁	62	0.07	189	18	0.08	92	44	0.05	58	58	0.03	7	
				351	0.05	30	17	0.02	129	331	0.02	156	
W 3	M ₂	325	0.11	106	322	0.10	107	336	0.08	95	341	0.10	93
					353	0.09	68	320	0.11	93	349	0.11	75
	S ₂	352	0.03	126	354	0.03	116	349	0.04	117	335	0.05	123
					340	0.06	107	332	0.03	112	339	0.05	111
K ₁	9	0.03	92	13	0.03	105	350	0.02	78	322	0.02	150	
				344	0.12	30	325	0.03	214	295	0.04	169	
O ₁	323	0.04	78	312	0.04	84	344	0.02	94	12	0.02	31	
				348	0.07	132	346	0.05	52	334	0.01	43	
W 4	M ₂	346	0.20	98	342	0.20	96	343	0.21	94	350	0.20	93
					358	0.24	88	337	0.16	115	334	0.15	103
	S ₂	343	0.10	119	342	0.10	121	350	0.09	119	346	0.10	121
					353	0.13	118	343	0.08	118	347	0.07	112
K ₁	22	0.07	94	20	0.06	97	4	0.03	88	345	0.06	102	
				42	0.05	101	44	0.05	33	325	0.07	122	
O ₁	340	0.04	96	349	0.05	86	347	0.04	70	344	0.02	58	
				49	0.04	15	334	0.04	105	325	0.03	122	
W 5	M ₂				356	0.19	92	355	0.13	97	11	0.11	80
	S ₂				349	0.09	121	350	0.06	129	4	0.06	112
	K ₁				303	0.08	326	75	0.03	16	340	0.06	105
	O ₁				52	0.03	60	12	0.03	54	358	0.02	91

していくとともに、この結果を活用してモデルの構築を進めていく予定である。

最後に、資料を提供していただいた三重県水産技術センター、伊勢湾シーバース(株)、現場観測作業を受託された三洋テクノマリン(株)など、本研究に協力していただいた関係者の皆様に感謝の意を表します。

Current along the Sanin Coast

参 考 文 献

三重県水産技術センター：平成5年三重県沿岸海域に発生した赤潮，(1994)

宇野木早苗：伊勢湾・三河湾 II 物理，日本全国沿岸海洋誌，pp.513-527，(1985)

山形県立大学海洋学研究所編：山形県沿岸海域の潮流と潮位，(1987)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1988)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1989)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1990)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1991)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1992)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1993)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1994)
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫：伊勢湾の潮流と潮位，(1995)

日本海の潮流と潮位

佐藤 隆夫・佐藤 隆夫
佐藤 隆夫・佐藤 隆夫

1. はじめに

日本海は、北緯35度から南緯35度の間にあり、東に太平洋、西にインド洋、南に中国海、北にオホシオツク海と接している。日本海は、北緯35度から南緯35度の間にあり、東に太平洋、西にインド洋、南に中国海、北にオホシオツク海と接している。

2. 観測

本観測は、1993年10月から1994年9月までの期間にわたって実施された。観測地点は、日本海の中央部にあり、北緯35度、東経140度の地点に設置された。

3. 結果

観測結果から、日本海には、北緯35度、東経140度の地点に設置された観測地点で、潮流と潮位の観測結果が得られた。