

超音波流速計による碎波帯における長期連続観測

土屋 義人・吉岡 洋・棚橋 輝彦
仲井 圭二・森田 行司・磯部 憲雄

LONG TERM NEARSHORE CURRENT OBSERVATION IN SURF ZONES WITH ULTRA-SONIC CURRENT METERS

By Yoshito TSUCHIYA, Hiroshi YOSHIOKA, Teruhiko TANAHASHI,
Keiji NAKAI, Koji MORITA and Norio ISOBE

Synopsis

A series of long-term observations of nearshore currents have been carried out at Ogata Coast using ultra-sonic current meters (USC) mounted on Ogata Wave Observatory's T-shaped observation pier. The USC's noise reduction circuit was improved for remarkable noise caused by air bubbles and suspended sand which are introduced by breaking waves.

Continuous USC's records reveal some characteristics of the nearshore currents (NSC) at Ogata Coast, they include:

- 1) The tidal flow is weak and the influence of wind is very large.
- 2) The typical relation between the winter monsoon and the NSC has been determined. Then the monsoon occurs, wind and waves come from the west developing the NSC as the longshore current which flows to the east. The wind then comes from the east, or becomes weak, and waves come from the east, their periods increase, and the NSC becomes from the longshore current to the offshore current.
- 3) Within the surf zone, this strong offshore current has a homogeneous velocity profile from the surface to the bottom.

1. はじめに

海岸環境の保全、とくに海岸侵食対策に関して、高波浪時の海浜流、漂砂の動態を究明するため、碎波帯における波や流れの長期連続観測が実施されなければならない。われわれはすでに、超音波流速計を改良して、生物付着の影響が著しい沿岸海域において長期連続観測を実施して、長期安定性を実証した。そこで、さらにきびしい環境である碎波帯に超音波流速計を設置し、碎波に伴う気泡や漂砂が引き起こすノイズの対策を改善して、平均流から碎波による乱れを含む広範囲の周波数帯の流れの長期連続観測を実施した。

1.1 本観測研究に至るまでの超音波流速計の開発

本観測研究において使用したのは海上電機(株)の超音波流速計(USC)のRC型とFC型である。RC-200は、当初は波による往復運動を計測して波向きを計測算出するために使用されてきた。それをを用いて、

沿岸域で平均流を長期間計測するには、測器の精度の長期安定性が要求され、また生物付着などの様々の障害を克服するノウハウが蓄積されなければならなかった。そこで、防災研究所白浜海象観測所、(財)気象協会調査部および海上電機(株)技術部が協同研究グループを組織して、和歌山県の田辺湾に設置されている白浜海洋観測塔において、1981年から2年間にわたる長期連続観測を実施した。その結果、RC-200が潮流計として充分使用できることが確認されただけでなく、長期間の平均流の観測は沿岸海域の流れの実態を明らかにするのに非常に有効であった^{1,2,3)}。そこで砕波帯における長期連続観測にもRC型(RC-200に圧力センサーを組み込んだRC-210A)を使用することにした。

一方、より細かい空間スケールの乱れを計測するために、小型の超音波流速計FC-300を使用した。FC型は水平流が卓越する流れの3次元成分を計測する目的で、主として湖や河川および浅海域で短期間の集中的な観測に使用されてきた⁴⁾。FC型は全体の大きさがRC型より小さく、鉛直方向に数台並べて設置することも可能であり、流れの3次元的な構造や乱れの構造を明らかにする観測に適している。しかし、小型に作られているため、構造がきゃしゃで砕波帯のような強い力の働く場所で長期間観測した例はなかった。

1.2 本観測研究に至るまでの大湊海岸の海岸工学的研究

新潟県大湊町の大湊海岸には、京都大学防災研究所大湊波浪観測所があり、日本海に突き出した波浪観測用栈橋を利用して、波浪および漂砂の観測を行ない、海岸侵食対策の基礎的な研究を続けてきた。とくに、空中発射式超音波波高計の開発により、砕波帯における水面変動の時空間特性を求めることに成功している⁵⁾。また、栈橋に沿って測深および砂の採集が毎週実施され、長期にわたる海底地形および底質の変化を明らかにしてきた⁶⁾。しかし、流れの観測はきびしい自然環境のために短期間しか実施できなかった^{7,8)}。そこで、白浜海洋観測塔における超音波流速計の長期連続観測の成果をふまえて、大湊波浪観測所の観測用栈橋を利用して、砕波帯における流れの観測に超音波流速計を適用する目的で、防災研究所海岸災害部門、(財)気象協会調査部および海上電機(株)技術部が協同研究グループを組織した。そして予備観測として、1984年に旧栈橋の先端に超音波流速計RC-210Aを設置し、半年間連続観測を行なった。1985年にそれまで使用してきた帝国石油株式会社の天然ガス採掘用栈橋(旧栈橋)が撤去され、新しくT字型の観測専用栈橋が設置された。本観測として1986年には新栈橋に超音波流速計を3台(RC-210A 1台、RC-300 2台)設置し、長期連続観測を開始した。それと並行して、冬期高波浪時にFC型USCを臨時設置して集中観測を実施している。

2. 観測方法

2.1 観測システム

現在、大湊波浪観測所の波浪・漂砂観測用栈橋において、Fig. 1のように3台のRC型USCが稼働している。No. 1はRC-210Aで、水平二次元の流れと水圧を、No. 2とNo. 3はRC-300で三次元の流れを計測している。RC型による長期連続計測と並行して、1988年3月の1週間および12月の1週間、FC-300を栈橋のNo. 4地点(Fig. 1)に設置して、集中観測を実施した。いずれも海底は水深約5mの砂地であり、長さ5mのパイルを水中ジェットで打ち込んで、海底上1~1.5mの高さに流速計センサーを固定した。

RC型による長期連続観測の出力はA/D変換装置内蔵の2台のデジタルデータレコーダーに収録される。1台は0.5秒サンプリングで3時間ごとに10分間記録し(短周期データ)、もう1台は2分のローパスフィルターを通して1分サンプリングで連続記録(長周期データ)している。1週間に1回テープ交換して、東京の気象協会におくり、1次処理されて標準のデジタル磁気テープに編集される。短期集中

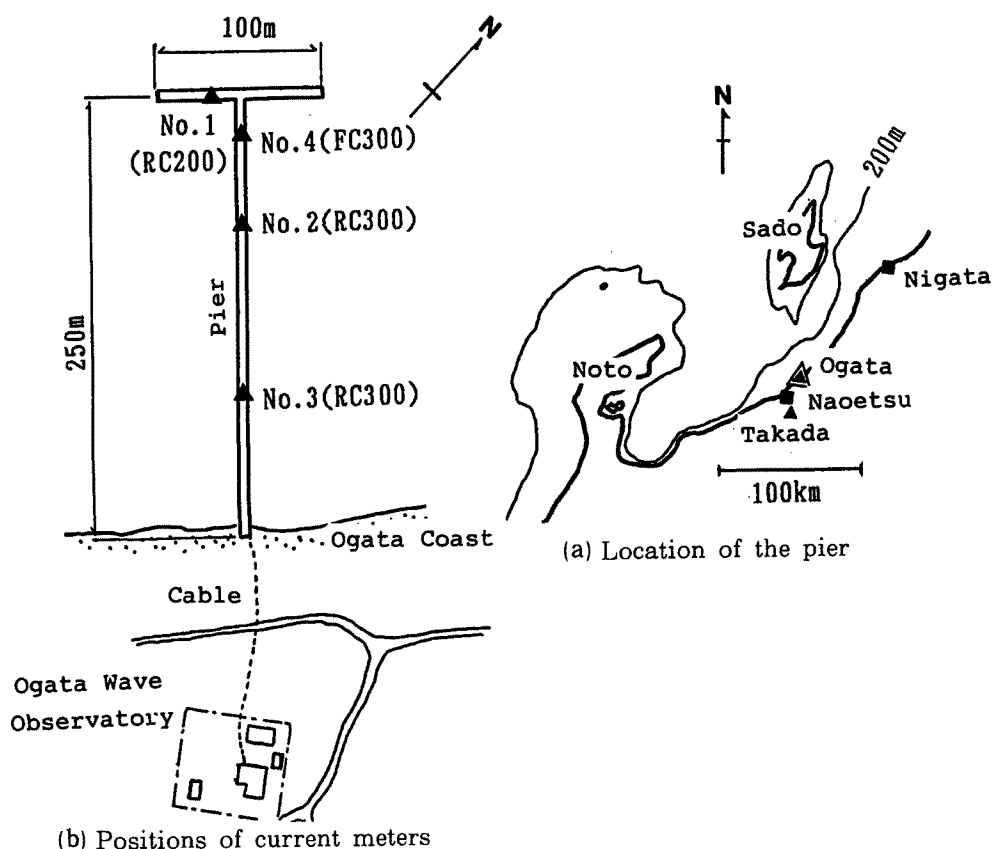


Fig. 1. Location of Ogata Wave Observatory's T-shaped observation pier, and positions of ultra-sonic current meters (Nos. 1-4).

観測においては、RC型およびFC型USCと一緒に超音波波高計および容量式波高計の出力を0.1～0.2秒サンプリングで20分以上連続して、別のデジタルデータレコーダーに収録し、防災研究所の資料センターで解析している。

2.2 流速計の改良

波による振動流や碎波が卓越する海域であるから、それが流速計のフレームにあたって生ずる乱れが平均流の測定に誤差を生ずる。その影響を出来るだけ小さくするために、水中センサー部を改造した。すなわち、RC-300型はFig. 2に示したように、首を直角に曲げ、さらに45度回転させる格好で設置した。FC-300型もFig. 3に示すように、水平に設置した。また、現場で様々の改良を試みるために、RC-210A型の水中プローブに内蔵されている電子回路を切り放して、栈橋先端の観測ボックスに設置した。この処置は、小スケールの流速変動を正確に計測するために、測定回路の時定数を種々変更して、最適な値を見出したり、長期連続観測中に生じたトラブルの原因を追求したりする時に非常に有効であった。また、FC-300型は計測が5サイクルで行われるように設計されているが、碎波帯の乱れを計測するには最低10サイクルの時間的な分解能が必要であり、そのように改良した。

2.3 ノイズ処理回路の改良

超音波流速計では、一般にプローブ間の超音波の伝播経路内に魚類などが入り込んだ場合には、計測が

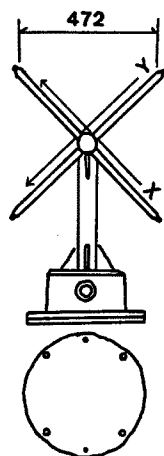


Fig. 2. Drawing of modified RC-type ultra-sonic current meter.

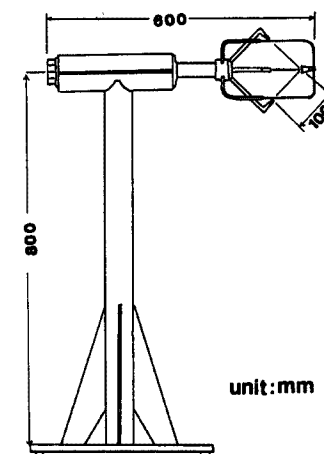
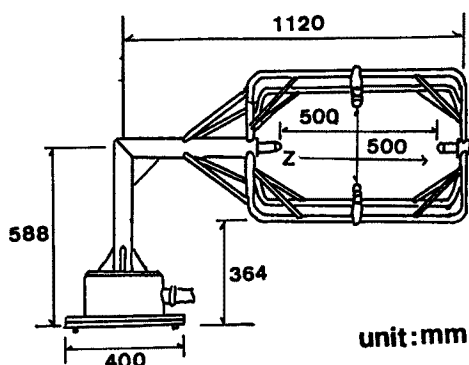


Fig. 3. Drawing of FC-type ultra-sonic current meter.

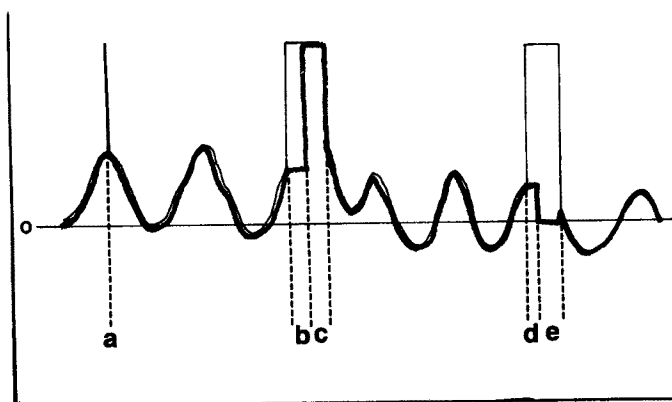


Fig. 4. Schematic of the effect of noise reduction circuit where the thin line is without noise reduction and the fat line is with noise reduction.

一時的に妨げられる。その結果、測定信号にスパイク状のノイズが出現することがある。

大潟海岸に最初に設置した USC (RC-210 A) には、このような障害に対して、以下に述べるようなノイズ処理回路が組み込まれていた。すなわち、一組のプルーブで往路と復路における超音波の伝播時間の差は流速に比例するが、和はプルーブ間の距離と音速によって決まり、ノイズ出現前後では一定と見なされる。従って、1回の計測で超音波の伝播時間の差と和を両方計測し、和が一定値であれば正常であるとみなす。異常を検出した場合には、検出前の計測信号（前正常値）を出力するようにする。その後、検出値が正常に戻れば、検出値を出力するようになるが、異常値検出が長引いて、予め設定した時間（ホールドタイム）を超過すると、検出値が異常であろうとなかろうと検出値を出力するようになる。ホールドタイムは受波信号によって発生するパルスの回数で設定する。ノイズ処理前の計測信号と処理されたものとの対応をモデル化して Fig. 4 に示すが、魚の妨害に起因するような瞬間的なノイズは、Fig. 4 (a) に示すように効果的に除去された。ノイズ処理回路のブロック図を Fig. 5 に、その作業のフローチャートを Fig. 6 (a) に示す。

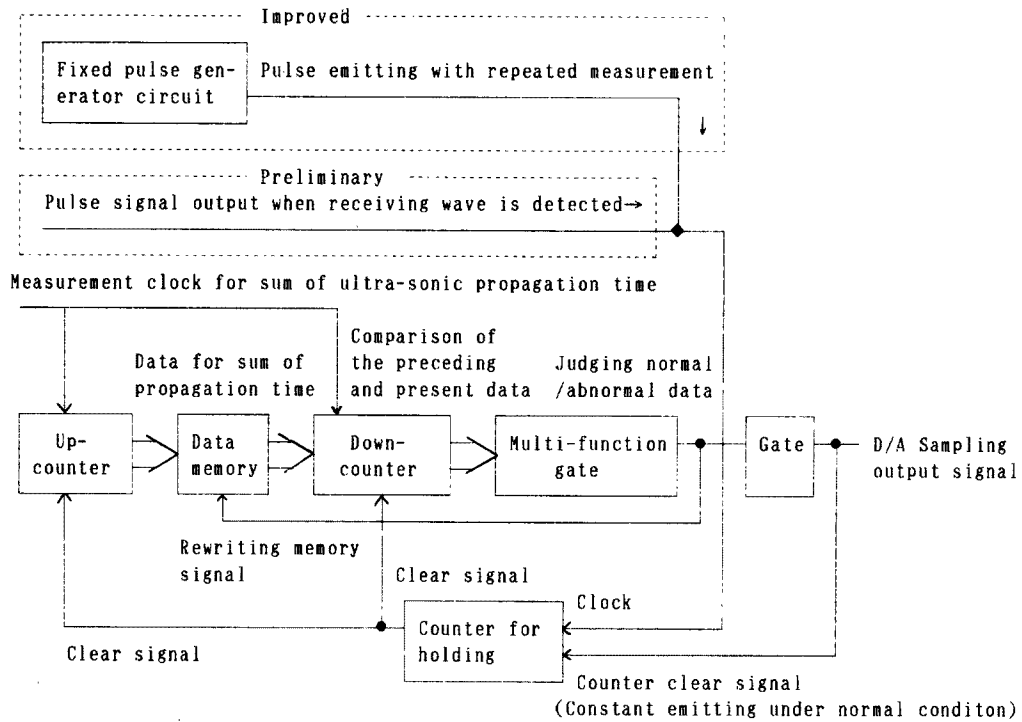


Fig. 5. Block diagram of the noise reduction circuit.

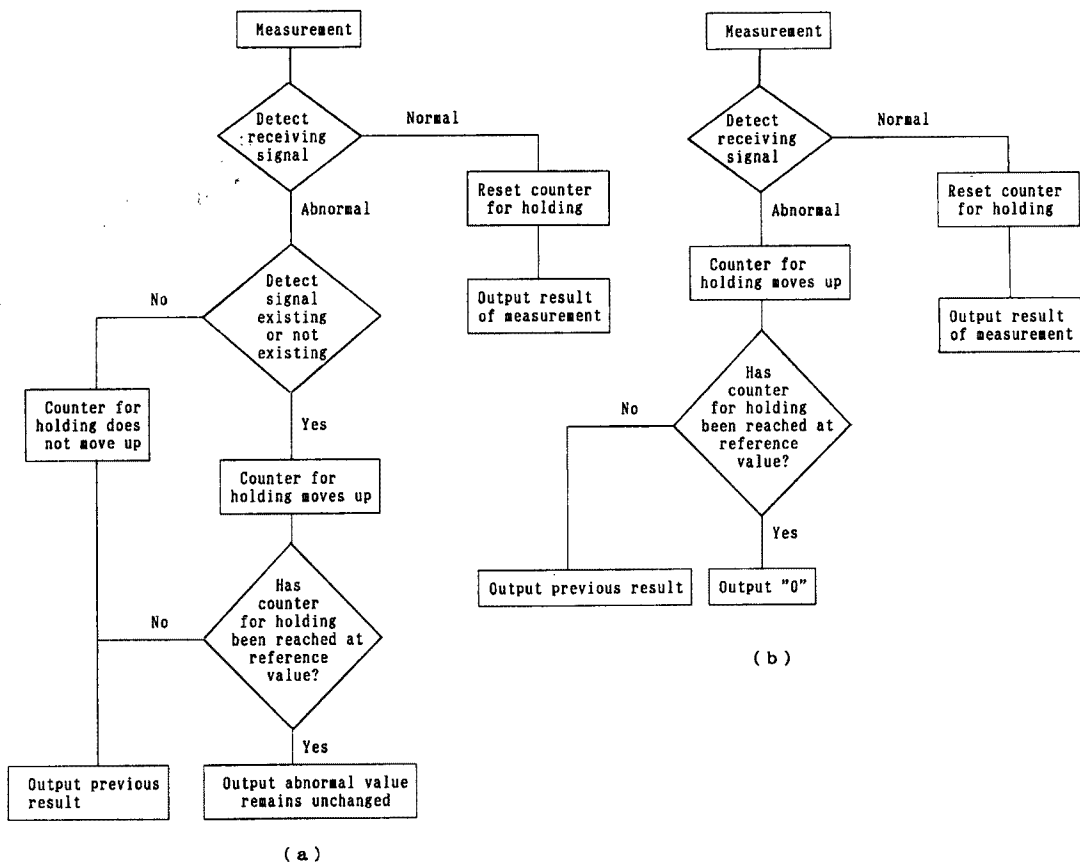


Fig. 6. Flow chart of the noise reduction method : (a) preliminary and (b) improved.

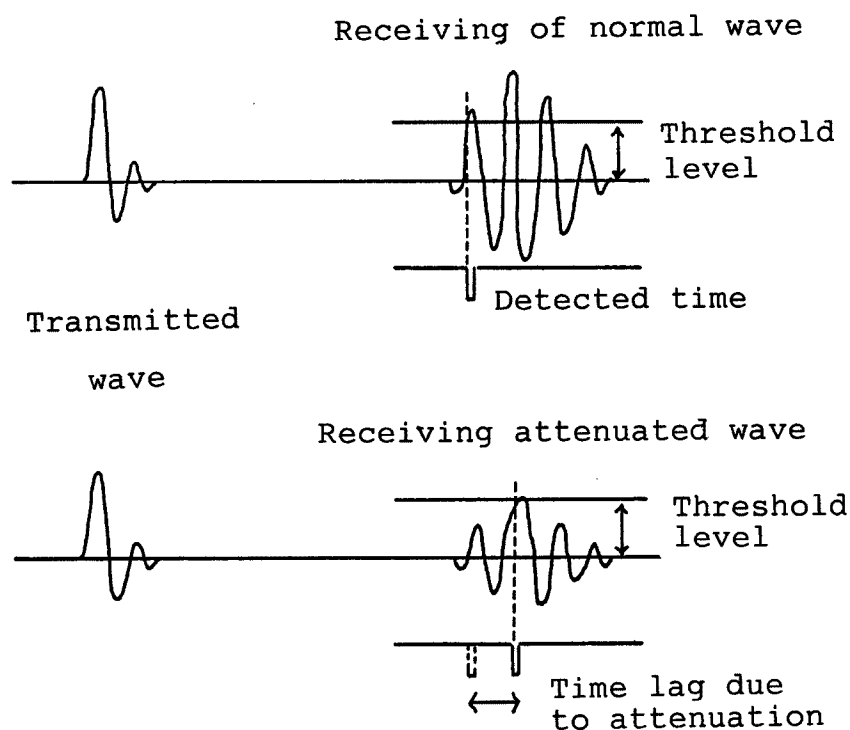


Fig. 7. Mechanism of noise generation by attenuation of the pulse amplitude.

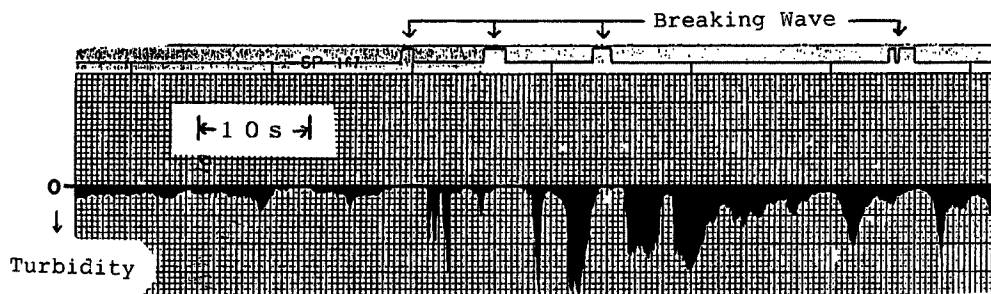
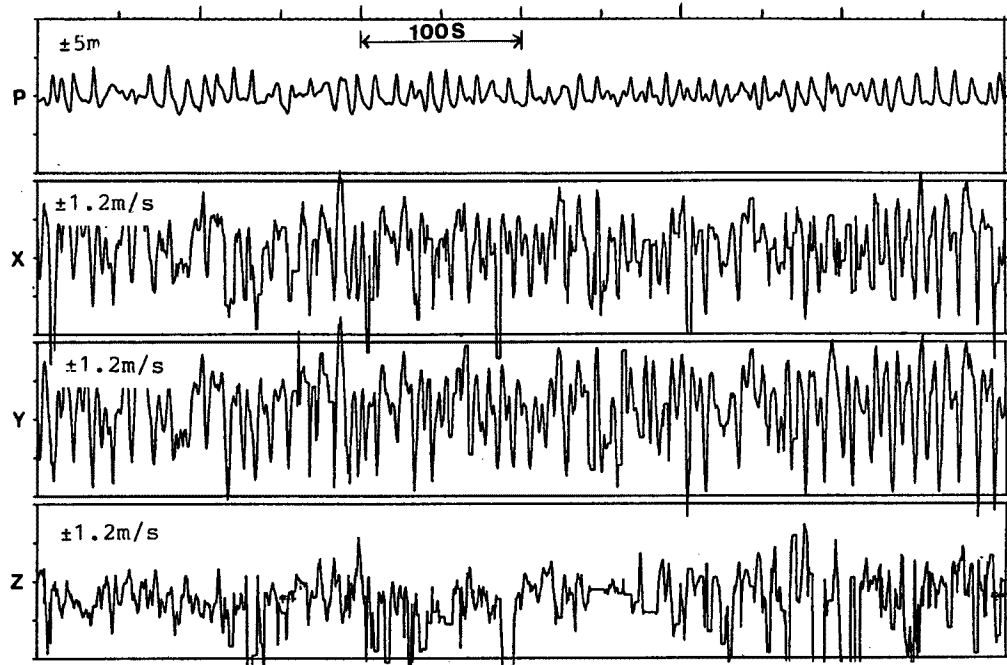


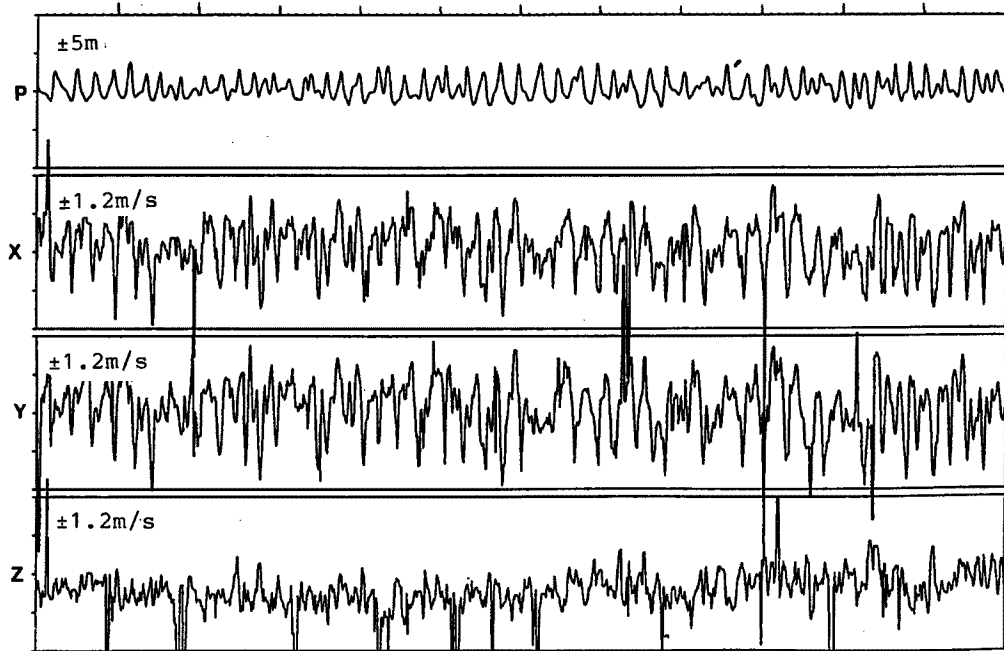
Fig. 8. Change in turbidity induced by breaking waves.

しかし、大潟海岸における計測結果では、Fig. 7に示すように、砕波時の気泡や漂砂の影響を受けて、超音波パルスが減衰し、本来のパルスより後続のパルスを受波したり、全く受信しない場合が起こっていた。どちらの場合も見かけ上異常な流速が計測され、伝播時間の和から異常が検出されるので、ノイズ処理回路が働くのであるが、異常期間が波の周期程度まで継続するために効果的な除去ができなくなってきた。

流速計測中には砕波に伴う気泡の影響の他に漂砂の影響も著しい。例えば、栈橋から濁度計を設置して、砕波と濁りとの関係を調べると、Fig. 8に示すように、波の峰が通過する時（寄せ波）には濁りは発生せず、波の谷が通過する時（引き波）に発生して、一度発生した濁りはしばしば波の周期以上に存続する。その場合、当然異常が検出され、受波信号パルス数が一定になるまで前正常値が出力されるが、受波信号が減衰して途切れ途切れの状態であるので、Fig. 4 (b)に示したように、ホールドタイムは異常に長くなる。そして、受波回数が一定値になると、次の計測が異常であろうと無条件に正常値として受



(a)



(b)

Fig. 9. Examples of current records observed by the ultra-sonic current meter with noise reduction circuit: (a) preliminary and (b) improved.

け入れてしまうので、まだ異常が続いていると、Fig. 4 (c)に示したように、異常値を前正常値として次のホールドタイム間出力してしまうことになる。このようなノイズの混入は生データを扱う限り、視覚的にパターンから識別できるが、ローパスフィルターを通した平均流を扱う場合、実際に発生した強流か、見かけ上のものかの判別が困難であった。

そこで、Fig. 5およびFig. 6 (b)に示したように、超音波パルスが減衰して受波が検出不能になった時、ホールドタイムは固定パルス信号によって数え、ホールドタイムが切れたときは、出力される前正常値は0に設定するように、ノイズ処理回路を改良した。その結果、Fig. 4 (d)に示したようにホールドタイムが異常に長期化することはなく、また、Fig. 4 (e)に示したように長期間一定値出力の値は0 cm/sに限られる。Fig. 9にノイズ処理回路の改良前 (a) と改良後 (b) の計測例を示す。図の最上段はNo. 1における水圧変化すなわち波高であり、その下はNo. 3におけるUSC (RC 300) の三軸 (Fig. 2参照) の流速変動である。(a), (b)の2事例で波高はほとんど等しく、従って碎波および漂砂によるノイズ発生は同程度と予想される。そして、改良後の流速変動には0 cm/sの一定出力はあるものの、異常値の一定出力は減少している。このようにノイズ処理回路の改良は、碎波にともなうノイズを完全に除去できるものではないが、極端な異常値の混入を防ぎ、ローパスフィルターを通して出力される平均流に、見かけ上の異常な流れをつくり出す危険性はなくなった。

2.4 観測の障害とその対応

碎波帯における長期流速観測における困難な条件を考えると、次のような要因が予想された。碎波帯では、高波浪と漂砂が卓越するので、(1) 波力による損傷、(2) 砂混じりの流れすなわち漂砂の存在による測器の摩耗、(3) 漂砂や気泡によるノイズ混入、および(4) 漂砂による測器の埋没または架台周辺

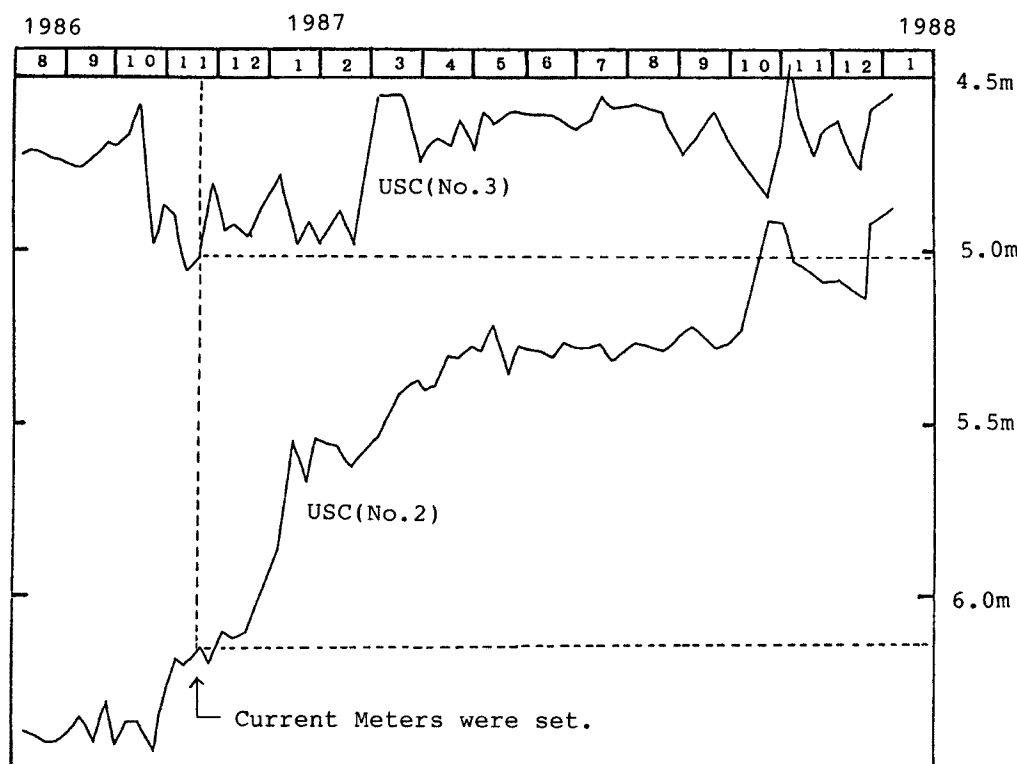


Fig. 10. Variations of water depths at the position of ultra-sonic current meters.

海底の洗掘があげられる。

RC 型による長期観測によれば、(1) および (2) は問題にならなかった。ただし、FC-300 型の 1 台は高波浪時にプールの枠が歪んでしまい、計測不能となった。また、(3) については前節で考察した通りである。そして、なによりも (4) は予想以上に深刻である。Fig. 10 は流速計設置地点 (No. 2, No. 3) の水深の変化を大潟波浪観測所の栈橋に沿う測深データから求めたものである。設置直後の冬期に沖側 (No. 2) では海底は 70 cm 上昇し、岸側 (No. 3) でも 40 cm 上昇した。二年目には (1988 年, 1 月), 沖側はさらに 30 cm 上昇し、岸側は積算すれば変わらないが 20 cm 上下している。沖側はセンサー半分が砂に埋まっており、岸側も海底すれすれになっていると予想される。そのため、漂砂の影響を強く受け、また海底すれすれで計測しているので鉛直流がほとんどなく、せっかく 3 次元タイプの流速計を設置した有効性が小さい。

碎波帯は浅海域の一部であるため、(5) 生物付着や、(6) 浮遊物 (海藻, 網, ビニール) の巻き付きも当然起こる問題である。年に数回, ダイバーにかきおとしや浮遊物の除去を頼んできたが, かきおとしはかえってプールを傷つける危険性がある。年に 1~2 回, 水中センサー部の防虫塗装を行なって, 1 台だけセンサープールの故障が起こって取り替えたほかは, 無欠測で 1989 年 3 月現在まで連続観測を実施している。

3. 観測結果

長期連続観測の短周期データおよび短期集中観測データには, 波による振動流や乱れがとらえられている。一方, 長期連続観測の長周期データは 2 分のローパスフィルターを通した平均流である。それはさらに適当な時間帯で平均操作して, データ解析を行なうので, 平均流と呼ぶと混乱する。そこで, 本観測の長周期データでとらえられた流れを, 大潟海岸の海浜流と便宜上呼ぶ。海浜流には潮流, 風成流, 密度流および波による質量輸送によって生じた狭義の海浜流 (沿岸流+離岸流) が含まれる。

3.1 海浜流の季節特性

No. 1 における海浜流の変化を Figs. 11 (1)~(8) に示す。これらは 1987 年 11 月から 1988 年 7 月までの毎正時の 10 分間平均した海浜流をベクトル表示したものであり, 1 カ月ごとにとりまとめたものである。流向は海岸に平行な成分 (NE および SW) を横軸に, 冲向きの方向 (NW) を縦軸に取ってある。また, 高田測候所 (Fig. 1 参照) における 1988 年 2 月と 7 月の風向風速を Fig. 12 に示す。向きは流れの場合と同様で, 横軸が海岸沿い, 縦軸が冲向きである。風と海浜流とを比較すると, 強い流れが発生しているときには必ず強い風が吹いており, 風に対応した流れが卓越していることが分かる。また, 風がほとんど吹いていないときには大きさは数 cm/s 程度の微弱な流れがみられるが, 潮流を反映する日周期, 半日周期の周期性は明瞭でない。日本海沿岸の潮位は太平洋沿岸に較べると小さいので, 潮流も弱いと予想される。

Fig. 11 の資料をもとに, 月毎に流向流速別に出現頻度分布を作成した結果を Table 1 に示す。ここで流速の階級は強 (30 cm/s 以上), 中 (20~30 cm/s), 弱 (10~20 cm/s), 微弱 (10 cm/s 未満) の 4 階級とし, 流向は 8 方位とした。その中で冬期および夏期の代表として 1988 年 2 月および 7 月を選び, その流向分布グラフを Fig. 13 に示す。ここでは 10 cm/s 以上のデータのみを用いた結果と, 全データを用いた結果とを示した。2 月, 7 月いずれも E, SE, S 向きの流れはほとんど見られない。外の季節についても同様で, これは岸に向かう流れがほとんど無いということを示している。

微弱流を除いた 10 cm/s 以上の流れでは, 2 月には沖に向かう流れ (W, NW, N) が卓越しているが, 7 月は岸にそう流れ (NE) が卓越している。冬には 30 cm/s 以上の強流がしばしば出現し, その頻度は 1 月で 132 時間 (5.5 日), 2 月で 85 時間 (3.5 日) 程度である。沿岸方向の流れは 1 年を通じて新潟に向

Table 1. Frequency table of nearshore currents observed at Ogata Coast, which is classified by current directions and magnitudes of velocity

1988	C. S.	C. D.								Missing data
		NW	N	NE	E	SE	S	SW	W	
Jan.	Calm	51	90	44	5	6	26	106	86	2
	W	10	33	14	0	0	1	15	14	
	M	9	18	20	0	0	0	4	12	
	S	20	93	46	0	0	0	0	19	
Feb.	Calm	78	57	34	11	4	5	120	94	6
	W	34	39	15	0	0	0	12	40	
	M	15	11	7	0	0	0	1	21	
	S	23	13	7	0	0	0	0	49	
Mar.	Calm	84	111	105	15	1	16	111	67	12
	W	18	32	29	0	0	0	8	29	
	M	6	16	22	0	0	0	2	14	
	S	2	16	11	0	0	0	0	17	
Apr.	Calm	73	130	165	10	4	9	67	68	1
	W	15	42	72	0	0	0	5	3	
	M	0	17	29	0	0	0	0	0	
	S	1	1	8	0	0	0	0	0	
May	Calm	118	180	161	11	3	10	51	59	0
	W	7	38	57	0	0	0	11	1	
	M	0	2	10	0	0	0	0	0	
	S	0	5	20	0	0	0	0	0	
Jun.	Calm	83	124	139	13	4	17	66	56	0
	W	7	45	109	1	0	0	5	5	
	M	0	1	35	0	0	0	0	0	
	S	0	2	8	0	0	0	0	0	
Jul.	Calm	83	182	170	6	7	11	52	62	0
	W	6	38	85	0	0	0	9	3	
	M	0	1	24	0	0	0	0	1	
	S	0	0	4	0	0	0	0	0	

C. D.: Current direction, C. S.: Current speed, Calm: $0 \leq \text{C. S.} < 10 \text{ cm/s}$,
W: $10 \leq \text{C. S.} < 20 \text{ cm/s}$, M: $20 \leq \text{C. S.} < 30 \text{ cm/s}$, S: $30 \text{ cm/s} \leq \text{C. S.}$

かう流れ (NE) が直江津に向かう流れ (SW) より卓越している。

岸側の USC (No. 3) の流向流速別出現頻度分布は省略したが、沖側 (No. 1) と岸側 (No. 3) の流れを比較すると、冬にはそれほど差はないが、夏には岸側の方が流れが弱い。夏 (5月~7月) に沖側で冲向き (NW) の流れが発生したときの岸側の流向流速別出現日数を Table 2 に示す。微弱流を除くと岸側では SW 方向の流れが卓越し、普段卓越している NE 方向の流れが対応しておらず、興味深い事実といえる。

海浜流の周期特性や風との対応が冬期と夏期においてどのくらい変化するものかを調べるために、Figs. 11 (3) および (8) と Fig. 12 の資料を使って、海浜流および風のパワースペクトルとコヒーレンスを計算した。流れおよび風は岸沖方向成分と沿岸方向成分に分け、1時間のサンプリングタイムで512個の

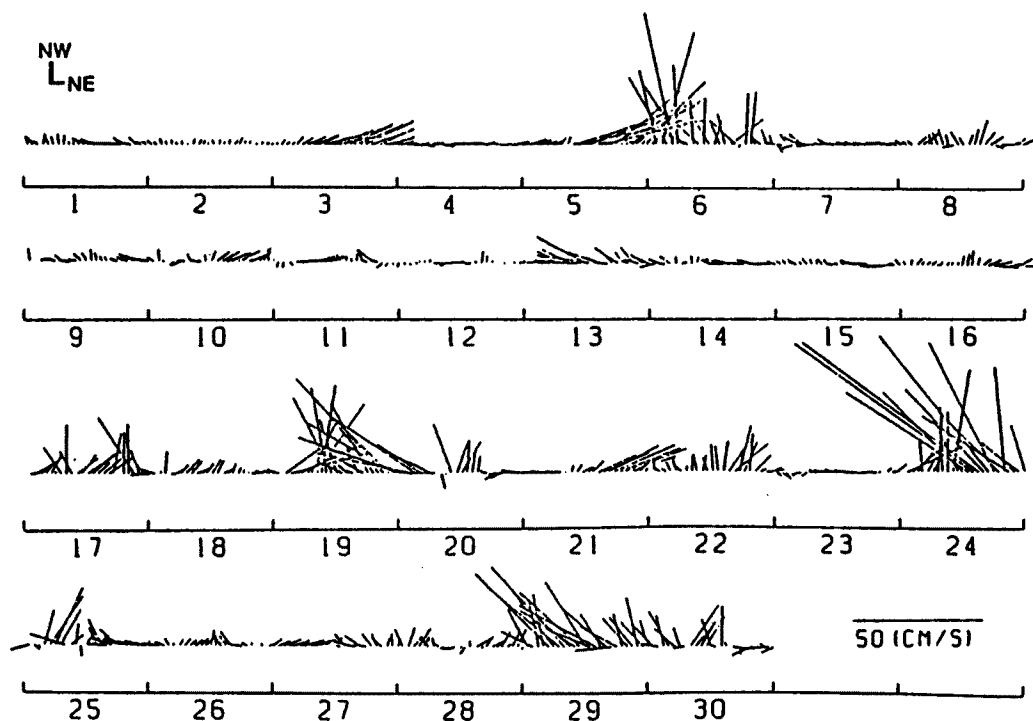


Fig. 11(1). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Nov. 1987.

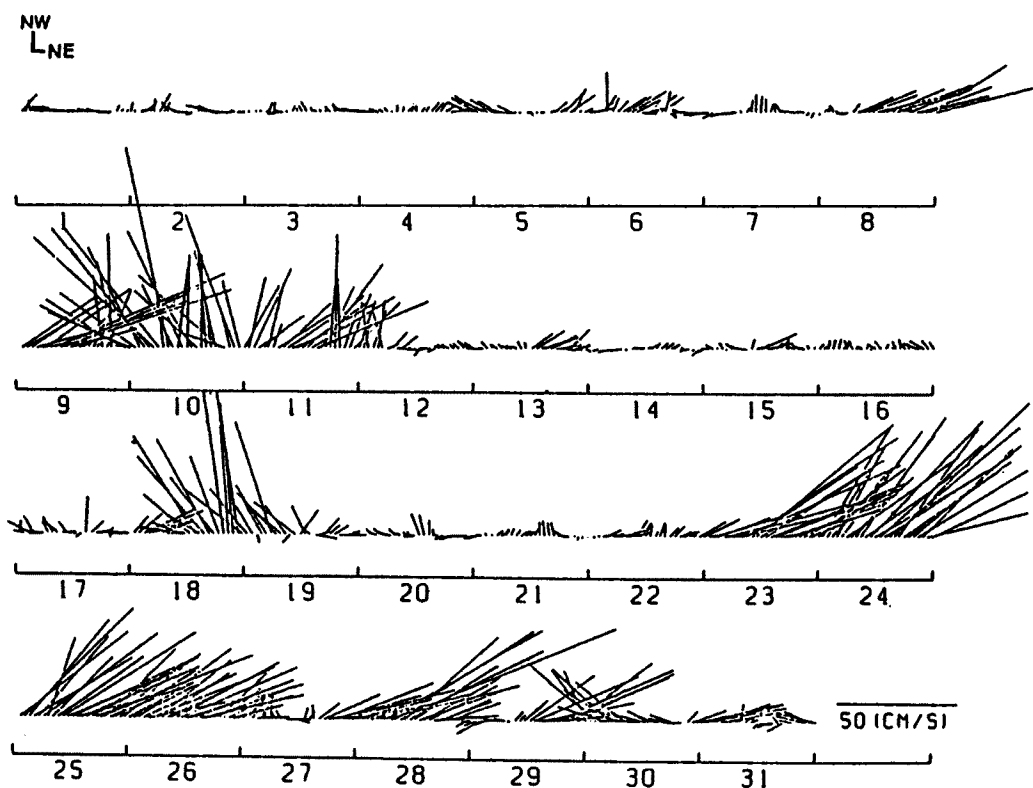


Fig. 11(2). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Jan. 1988.

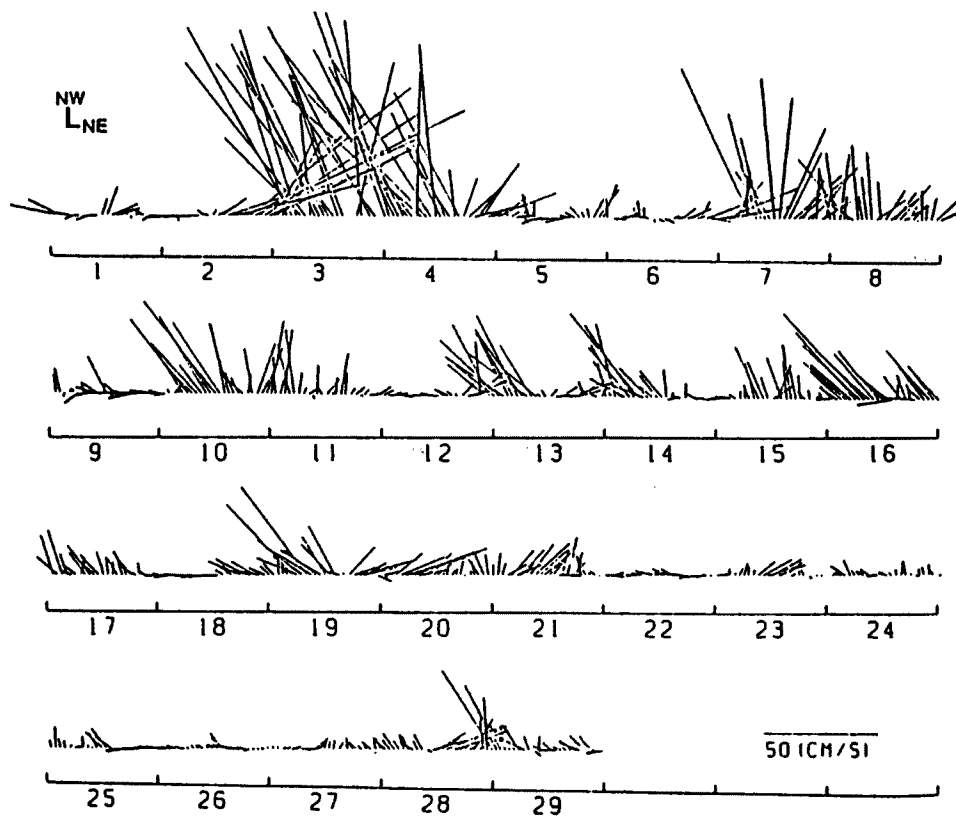


Fig. 11 (3). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Feb. 1988.

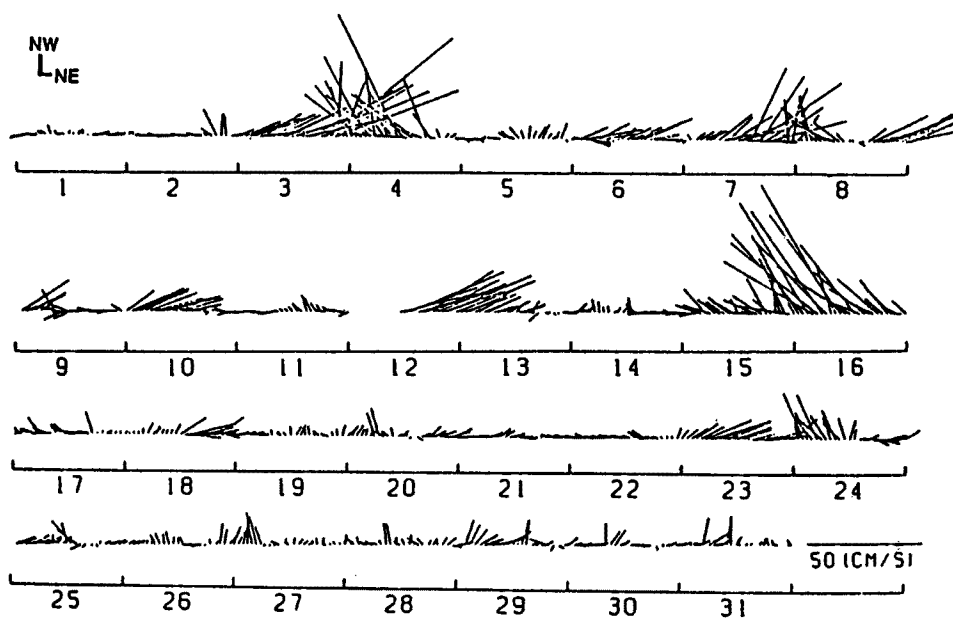


Fig. 11 (4). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Mar. 1988.

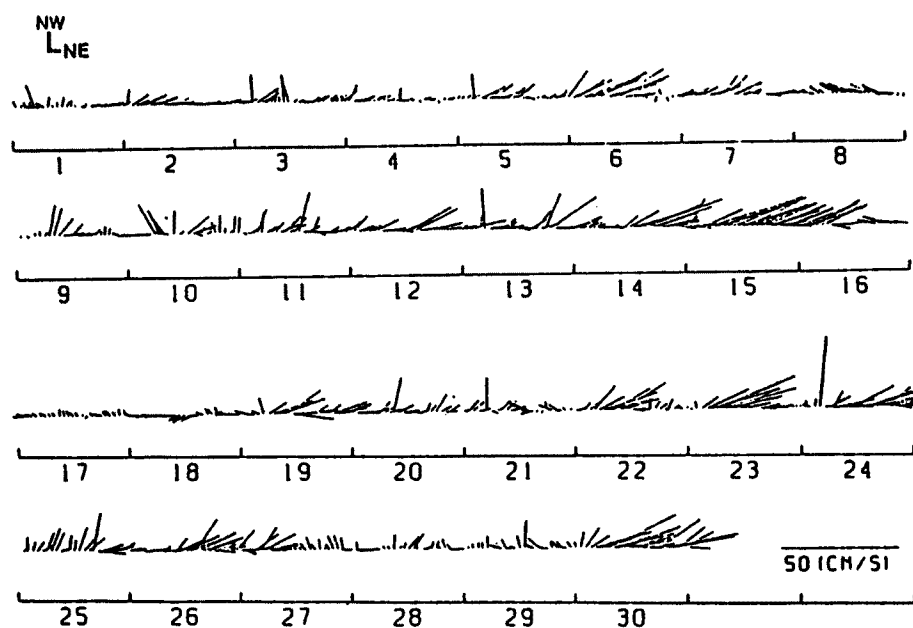


Fig. 11(5). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Apr. 1988.

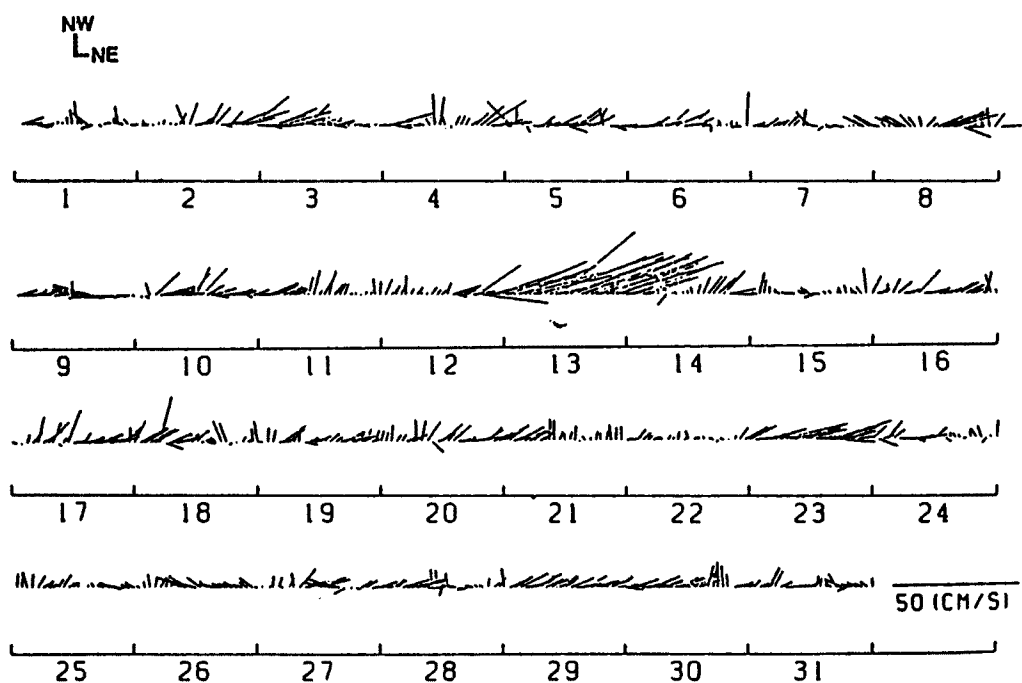


Fig. 11(6). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in May 1988.

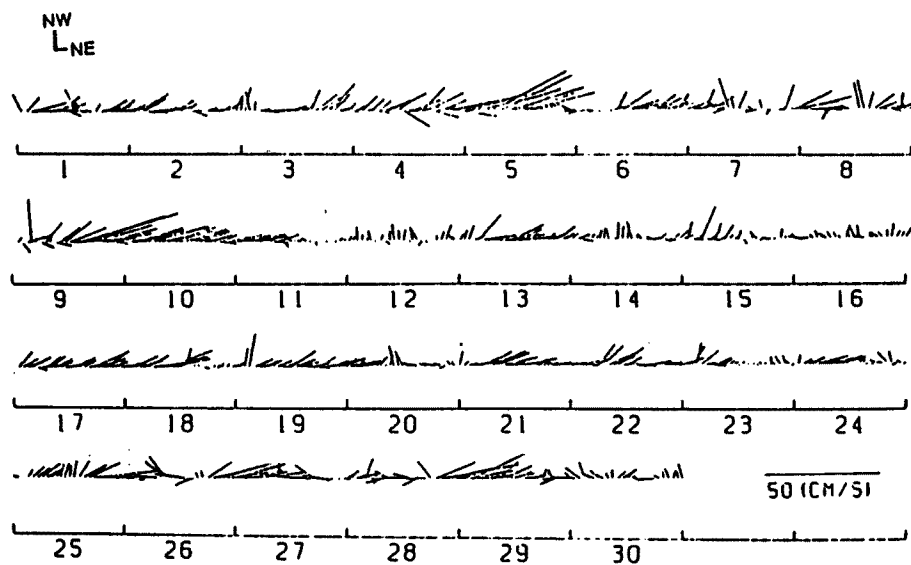


Fig. 11 (7). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Jun. 1988.

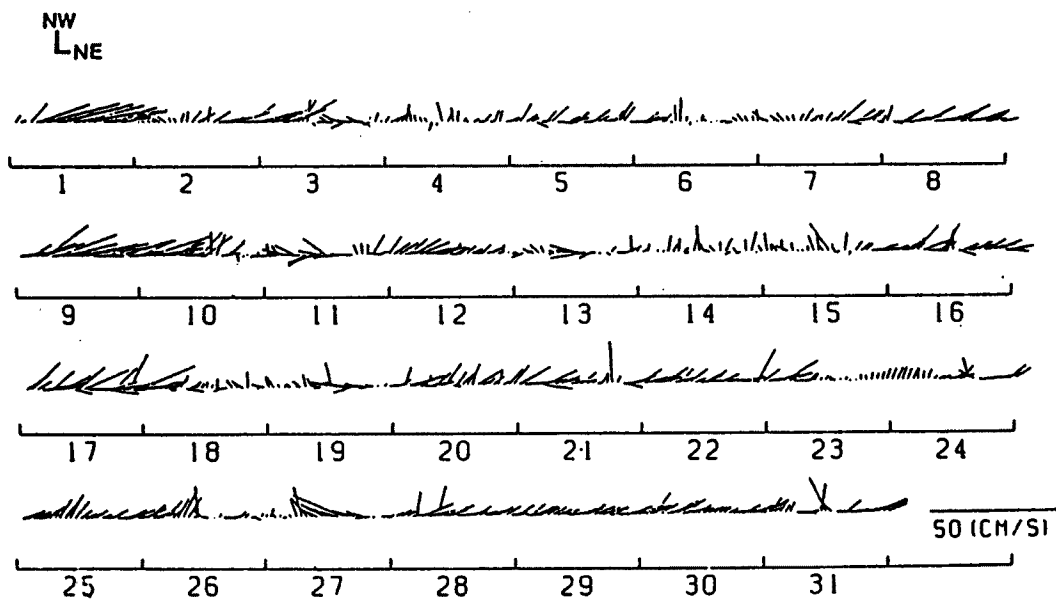
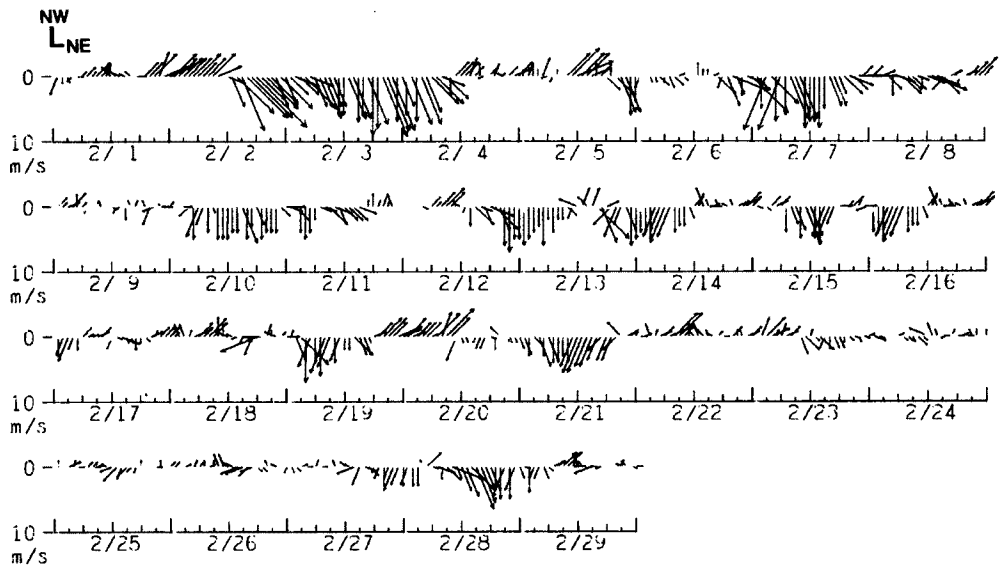
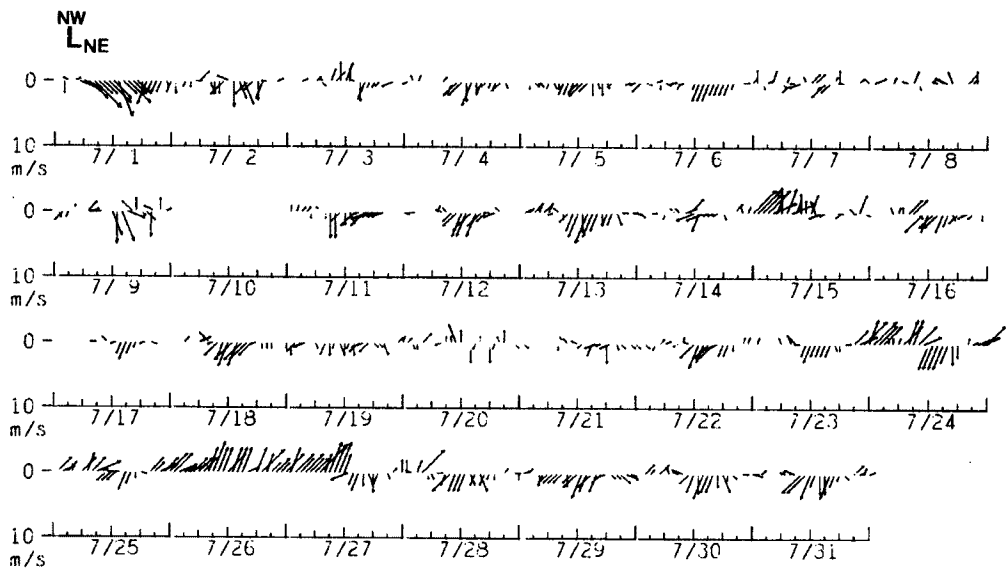


Fig. 11 (8). Nearshore current vectors observed by USC (No. 1) in Jul. 1988.

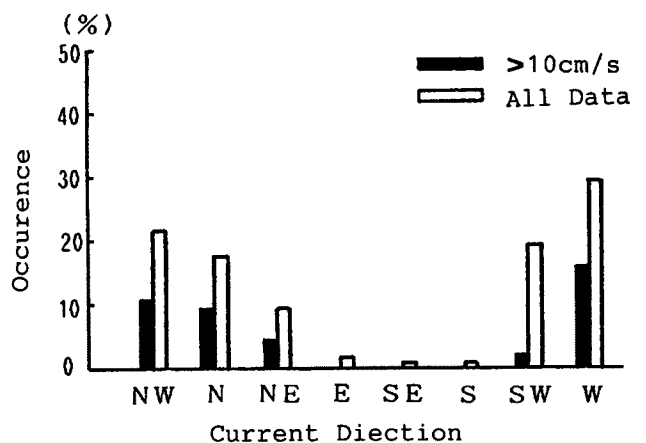


(a)

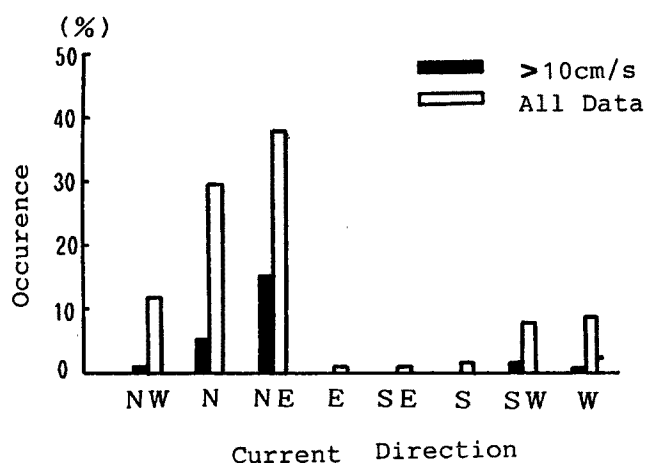


(b)

Fig. 12. Wind vectors observed at the Takada Meteorological Station :
(a) Feb. 1988 and (b) Jul. 1988



(a)



(b)

Fig. 13. Directional histograms of the nearshore currents observed by USC (No. 1): (a) Feb. 1988 and (b) Jul. 1988.

Table 2. Nearshore current frequency distribution observed at the onshore point (No. 3) during offshore directed current at the offshore point (No. 1) in summer season (1988, May-Jun.)

Station of USC		Onshore (No. 3)										
		C. D.	NE			SW			MW			Calm
			C. S.	W	M	S	W	M	S	W	M	
Offshore (No. 1)	NW	W	0	0	5	0	1	12	0	0	1	35
		M	0	1	0	1	0	1	0	2	0	4
		S	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

C. D.: Current direction, C. S.: Current speed, Calm: $0 \leq C. S. < 10$ cm/s, W: $10 \leq C. S. < 20$ cm/s, M: $20 \leq C. S. < 30$ cm/s, S: 30 cm/s $\leq C. S.$

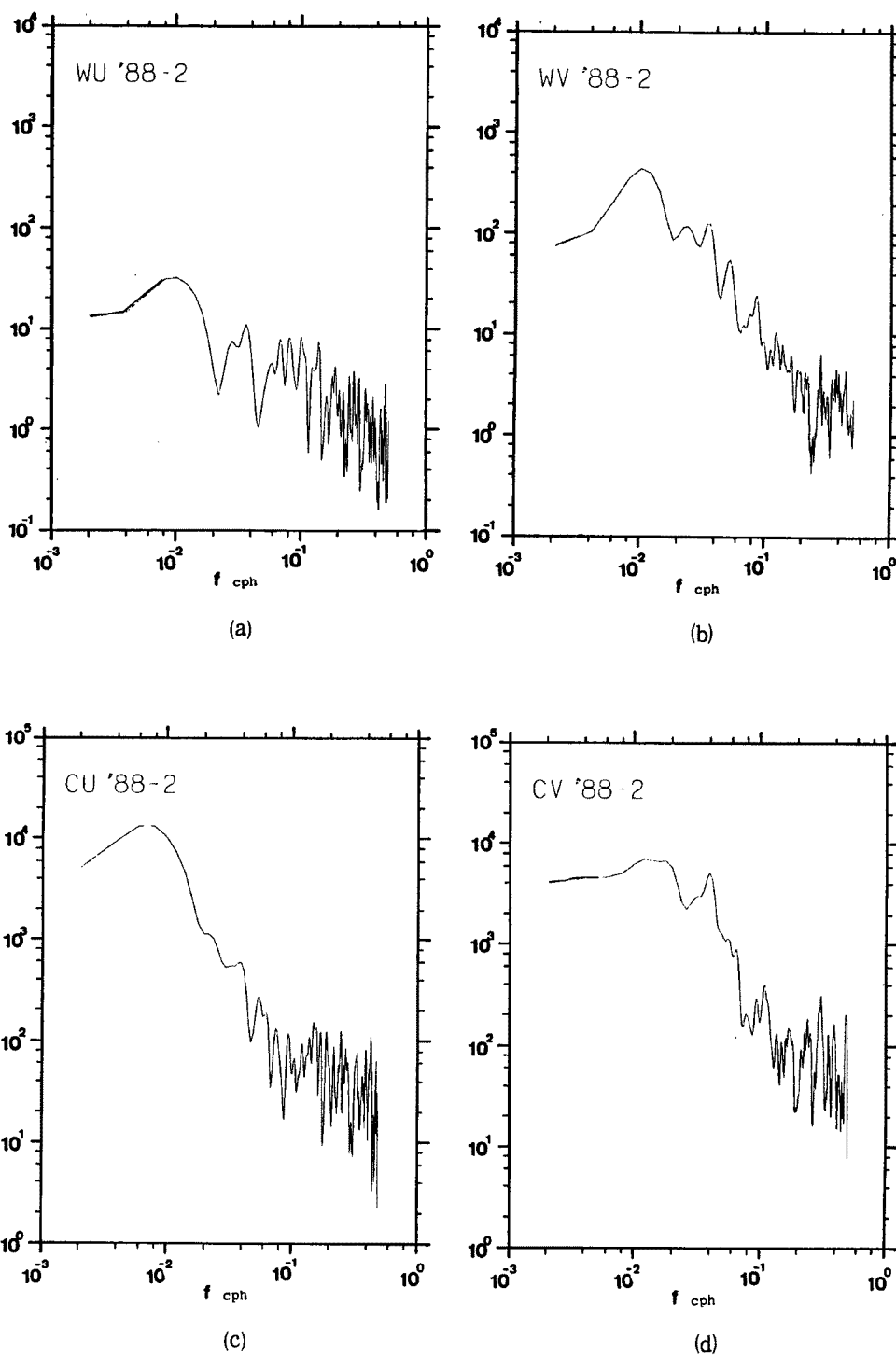


Fig. 14. Power spectra of the nearshore current and the wind at Ogata Coast in Feb. 1988 : (a) Alongshore component of wind, WU. (b) On-offshore component of wind, WV (c) Alongshore component of current, CU and (d) On-offshore component of current, CV.

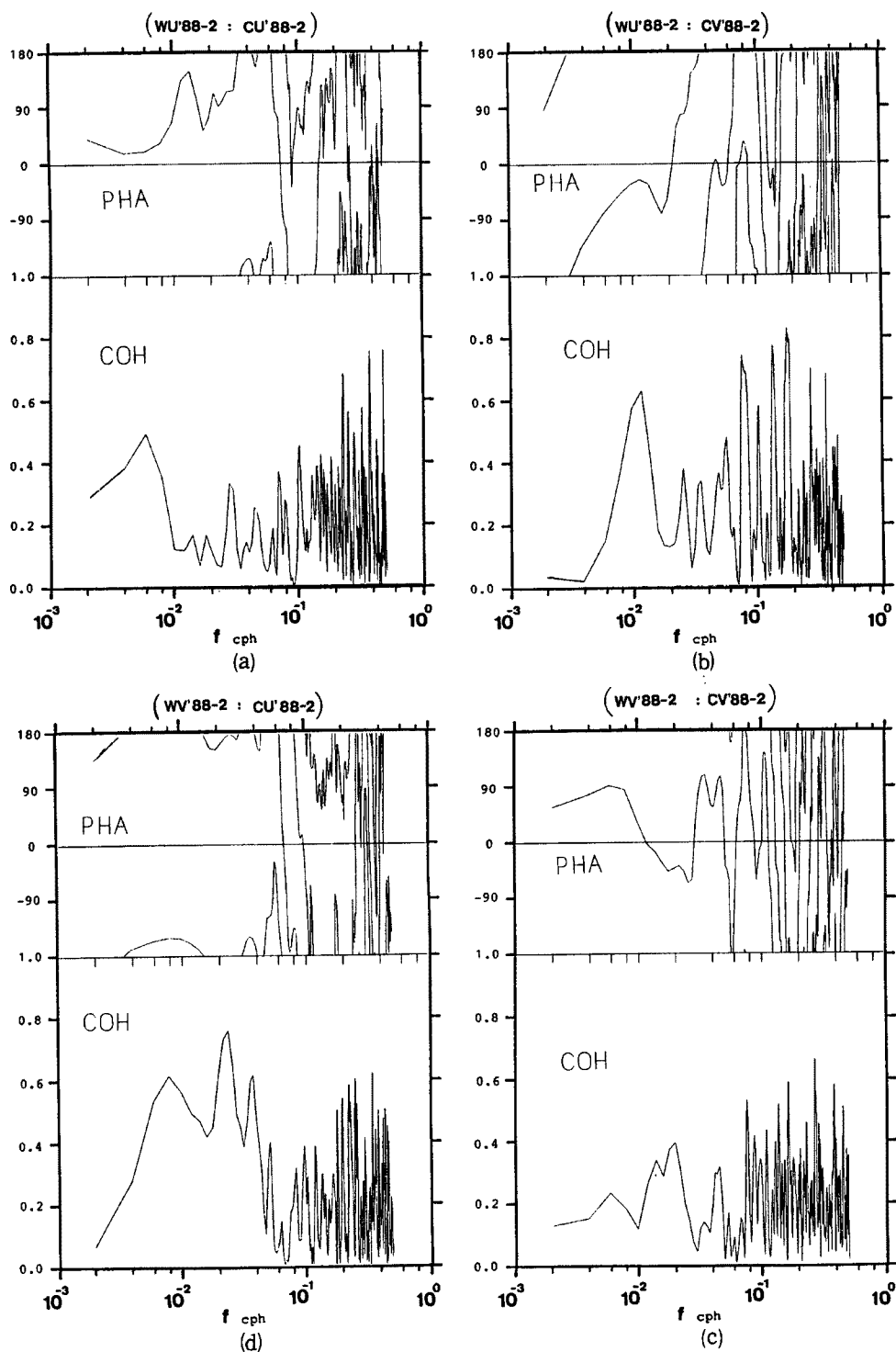


Fig. 15. Coherences and phases between the nearshore current and the wind at Ogata Coast in Feb. 1988: (a) Alongshore component of wind and alongshore component of current, (b) Alongshore component of wind and on-offshore component of current, (c) On-offshore component of wind and alongshore component of current, and (d) On-offshore component of wind and on-offshore component of current.

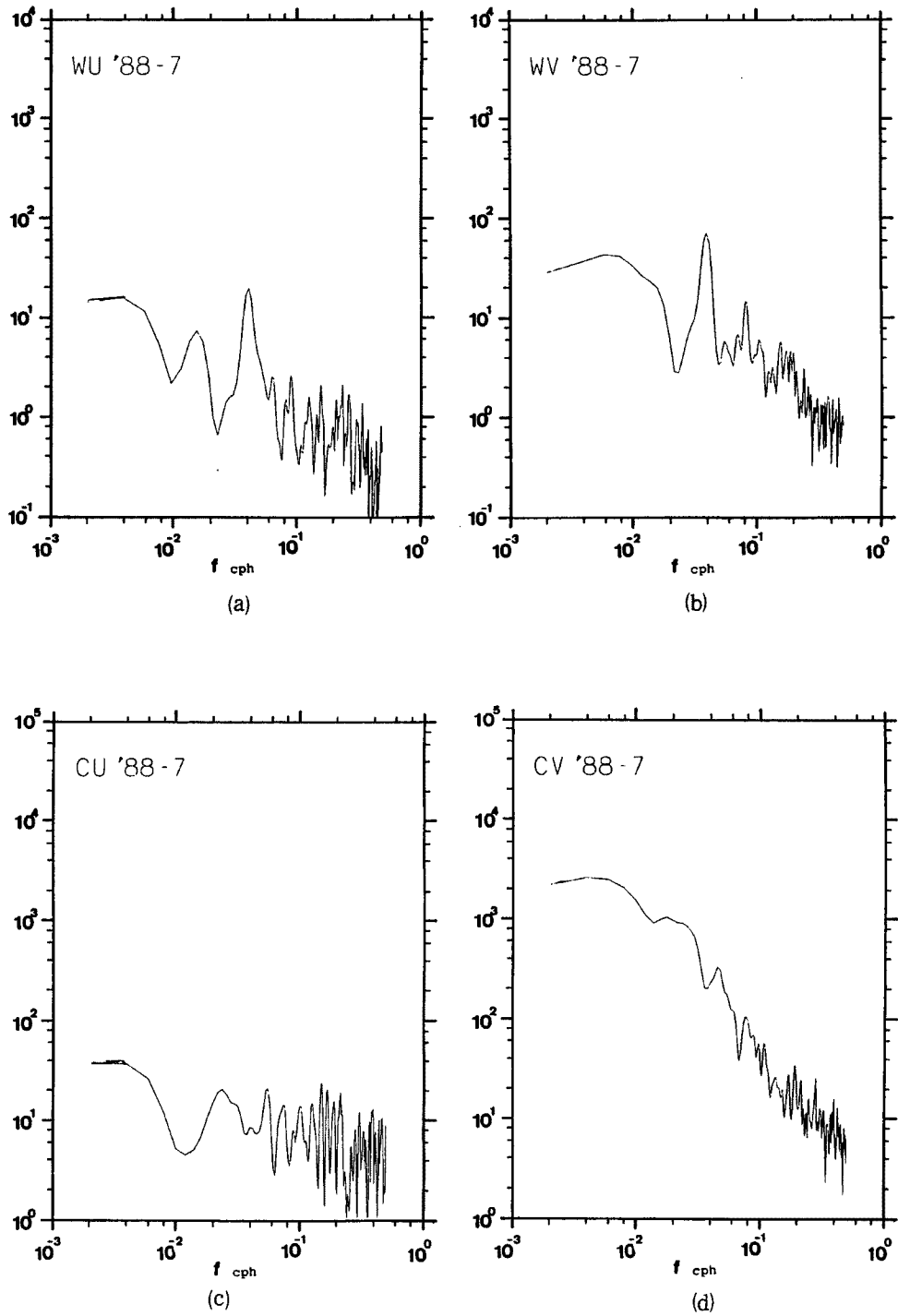


Fig. 16. Power spectra of the nearshore current and the wind at Ogata Coast in Jul. 1988 : (a) Alongshore component of wind, WU (b) On-offshore component of wind WV, (c) Alongshore component of current, CU and (d) On-offshore component of current, CV.

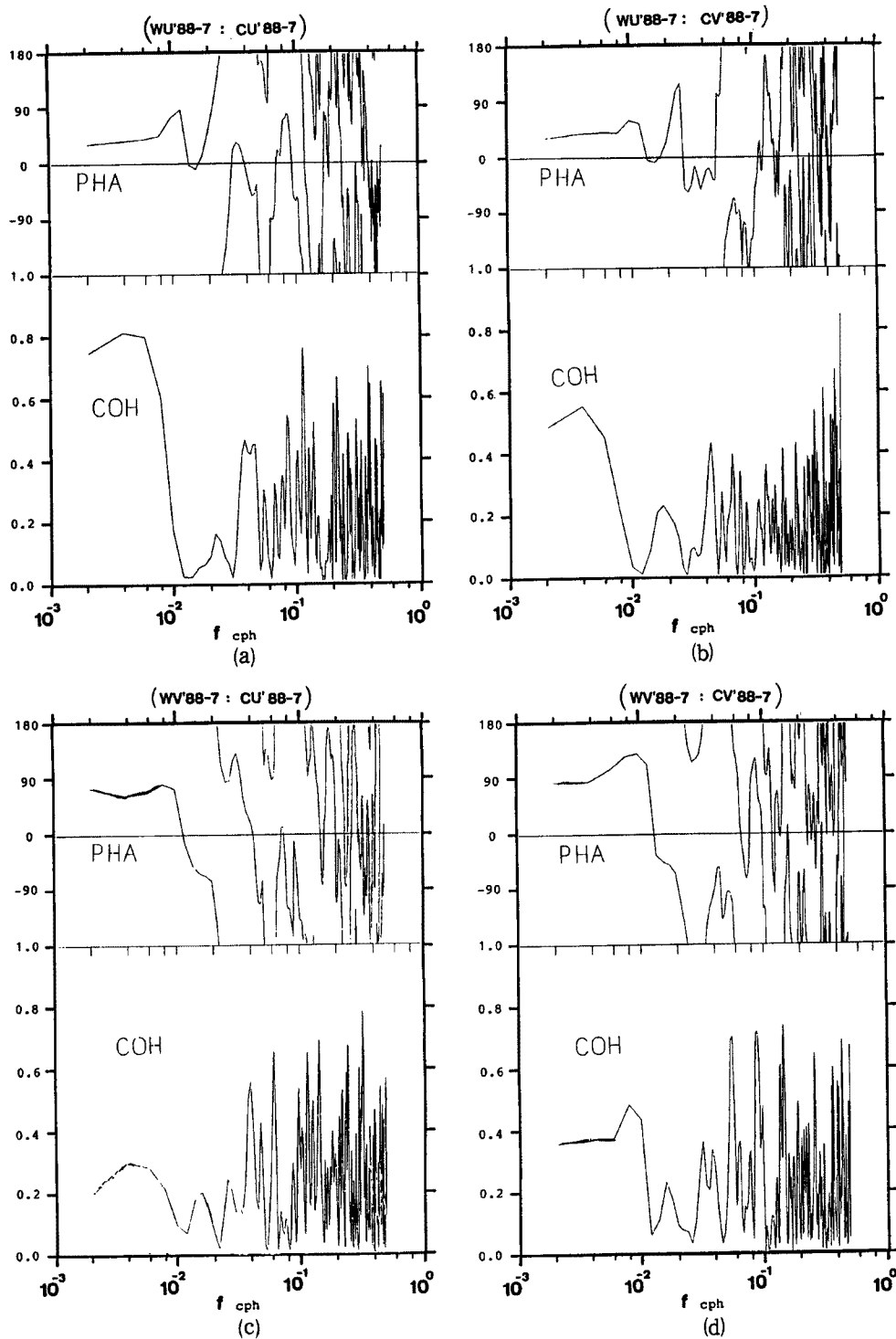


Fig. 17. Coherences and phases between the nearshore current and the wind at Ogata Coast in Jun. 1988: (a) Alongshore component of wind and alongshore component of current, (b) Alongshore component of wind and on-offshore component of current, (c) On-offshore component of wind and alongshore component of current, and (d) On-offshore component of wind and on-offshore component of current.

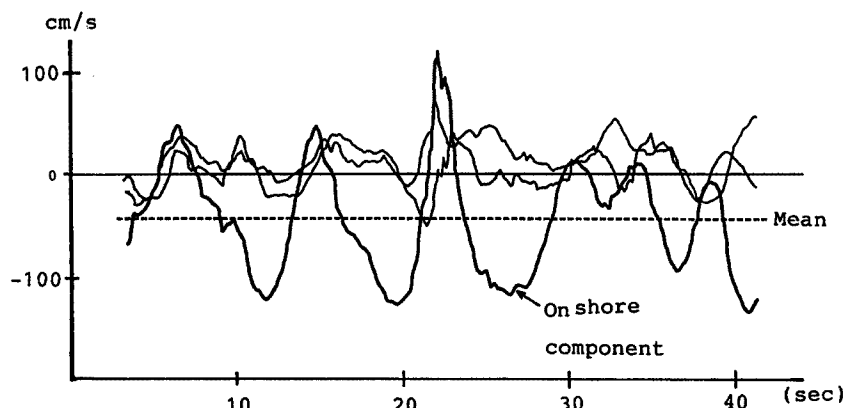


Fig. 18. Records of the nearshore currents observed by USC (No. 4 : FC-300) under the condition of wave breaking (Mean offshore drift can be observed in on-offshore component.).

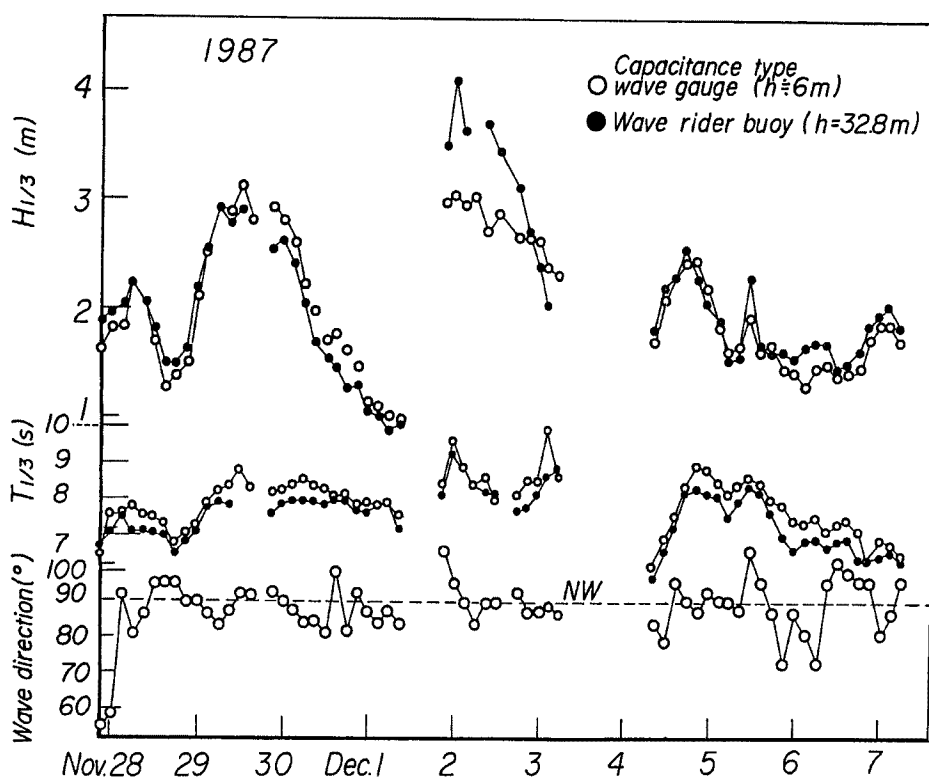


Fig. 19. Wave characteristics observed by capacitance type wave gauge at the pier and wave rider buoy⁹⁾.

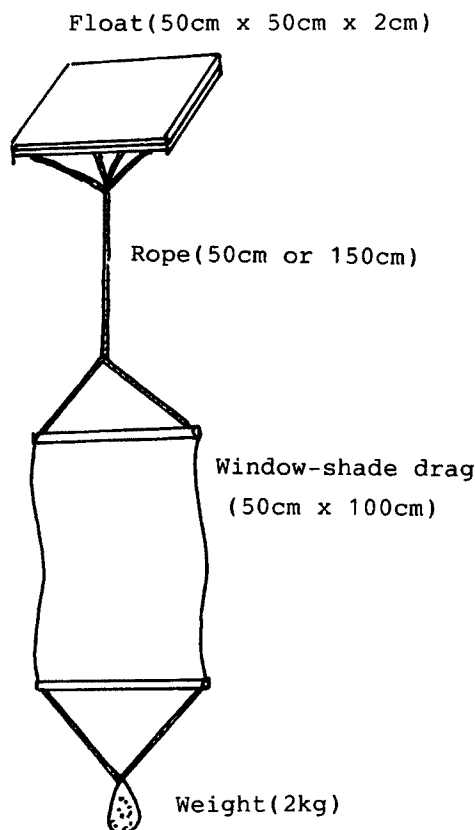


Fig. 20. Schematic diagram of float for nearshore current observation.

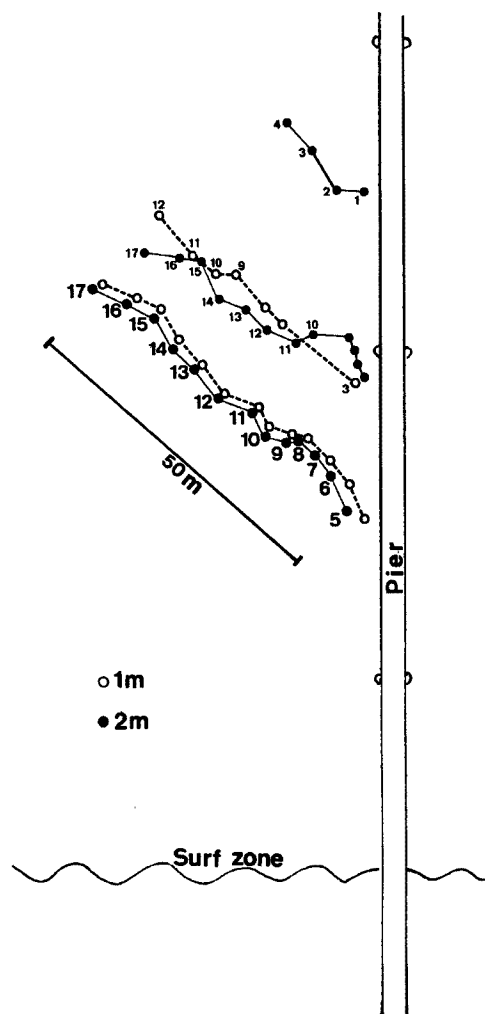


Fig. 21. Trajectories of floats (plotting interval is 30 sec).

データ (512時間 = 26.3日) を用い、FFTによって計算した。Figs. 14 および 15 に冬期 (1988年2月) の結果、Figs. 16 および 17 に夏期 (1988年7月) の結果を示す。10時間以下の短周期領域に多くのパワーおよびコヒーレンスのピークが乱立しているが、これは見かけのものかも知れない。使用したデータが毎正時の10分間平均値であり、1時間以下の短周期変動を完全に除去していないので、エイリアジングが起こっている可能性が高いからである。

冬期には周期100時間あたりに風、流れともにパワーピークがあり、そのコヒーレンスをみると岸沖方向の風 (WV) と沿岸に平行な流れ (CU) との相関および沿岸に平行な風 (WU) と岸沖方向の流れ (CV) との相関が高い。これは冬期季節風の吹き出しとそれによって生ずる海浜流の関係を反映している。

夏期にも100時間以上の周期に風と流れとのパワーおよびコヒーレンスのピークが存在する。ところがその相関関係を見ると、風と流れは同じ方向成分同士の間で相関が高い。また、夏期の風には明瞭な1日周期が卓越している。海陸風が起こっているのであろう。ところが流れには一日周期にピークがない。また両季節とも流れのパワースペクトルに1日周潮および半日周潮はかろうじてうかがわれる程度で、潮流の弱いことを示している。

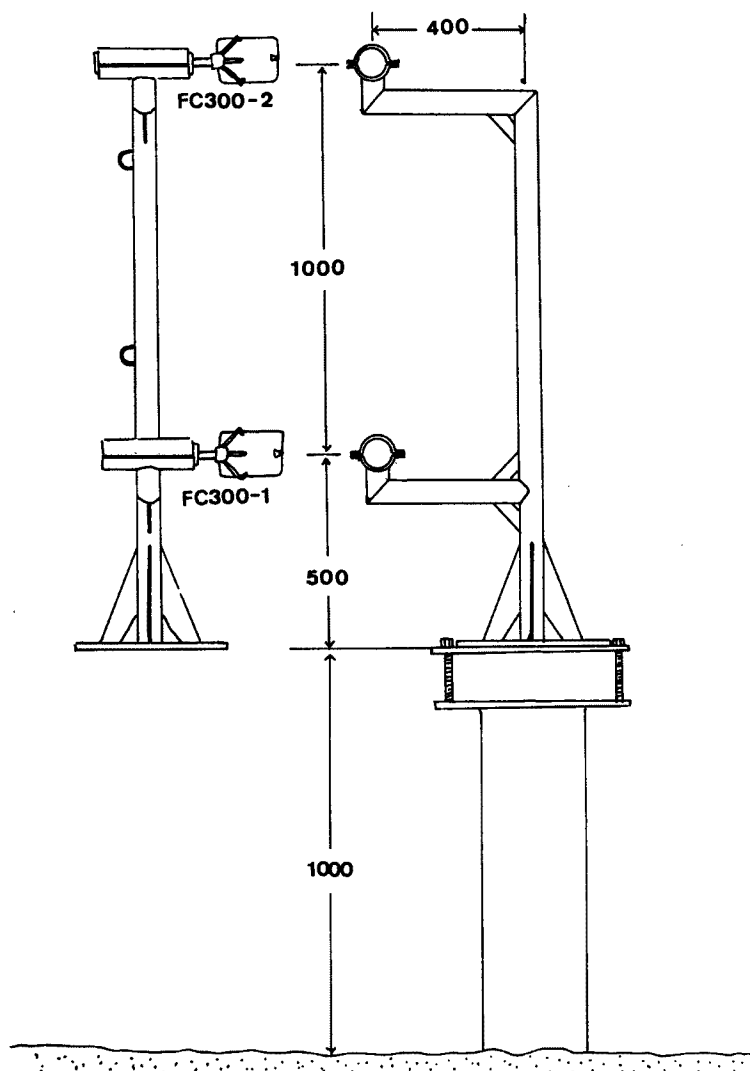


Fig. 22. Schematic diagram of the 2 ultra-sonic current meters (FC-300) and supporting system.

3.2 冬期の冲向きの強流

Fig. 11 に顕著にみられる冬期高波浪時の強い冲向きの流れは、超音波流速計による連続観測によって、初めてその存在が確認された現象である。それまでの短期間の浮子を追跡する流れの観測では岸沿いの流れや岸に向かう流れは観測されたが、冲向きの流れは検出されなかった^{7,8)}。それが超音波流速計の観測を始めると、旧栈橋時代の予備観測の時から、高波浪時に強い冲向きの流れが計測された。発見当初はこのような顕著な現象が実際に起っているならば、当然これまでの観測で見つかっているはずであると考え、これは見かけのものであるかも知れないという疑いを抱き、以下に述べるような解釈を試みた。

まず、予備観測では流速計が栈橋の橋脚のそばに設置してあったので、波が橋脚に衝突反射して局所的に異常な流れが発生したものと解釈した。そこで新栈橋完成後には、流速計はすべて橋脚から離して設置したが、それでも高波浪時に強い冲向きの流れが計測された。

次に、ノイズ処理の副作用で見かけ上冲向きの流れが起ることも予想されるが、実際の計測値は

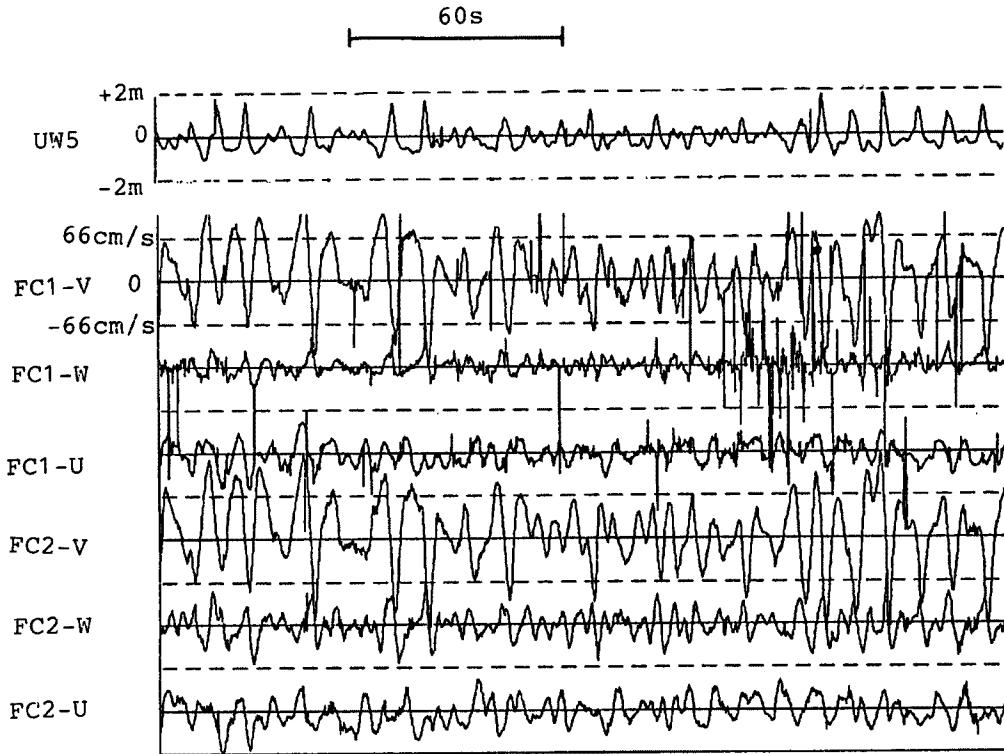


Fig. 23. Records of waves and 3 components of currents measured at the points of 1.5 m and 2.5 m from the sea bottom.

50 cm/sにも達し、それでは説明できない。また、短周期データを見ると、Fig. 18に示すように、ノイズが起こっていないときにも明らかに冲向きの平均流の存在が明瞭に認められる。小なくとも海底に固定した流速計でオイラー的に計測する限り、冲向きの強流は実在するといえる。

一方、岸方向に流れが一様な碎波帯では波の岸向き質量輸送（ストークスドリフト）とつり合うような冲向きの流れが存在する。その場所で流速計でオイラー的に計測すると、ストークスドリフトは検出されず、冲向きの流れだけが捕らえられる。現地のような水深5 mの地点において、波高2 m、周期10 sの波（波長67 m）が打ち寄せれば、質量輸送は0でも、見かけ上平均して約14 cm/sの戻り流れが計測される。波高が4 mになると、見かけの冲向きの流れは50 cm/s以上になる。もし、観測された冲向きの強流がこのような仕組みの見かけのものならば、波高が4 m以上の波が存在しており、また浮子を追跡するようなラグランジュ的な測流では流れは0になるはずである。

ところが、栈橋では有義波高約3 m以上の波は水深の影響で碎波して存在できない。Fig. 19は1987年11月より12月にわたって、栈橋の先端（水深5 m）で容量式波高計を、また栈橋の沖2 km（水深30 m）でウェーブライダーを用いて、波浪の連続観測を行った資料から、有義波の波高と周期の変化を示したものである⁹⁾。沖では波高が4 mに達しても、栈橋では3 m以上にはならないことが明瞭である。

しかも、1988年3月の集中観測において、浮子によるラグランジュ的な流れ計測を行った結果からも、沖方向に強い流れが検出された。Fig. 20に示すような抵抗布式の浮子を栈橋から放流し、高さ200 mに上げた気球からその移動を写真撮影して流れを計測した。抵抗布を浮子の直下につないだものと1.5 mの紐で結んだものを用意して、表層の流れと中層（海面下2 m）の流れを観測できるようにした。超音波流速計（No. 1）では西方向に50 cm/s以上の流れが観測されているとき、栈橋から投入した浮子は、

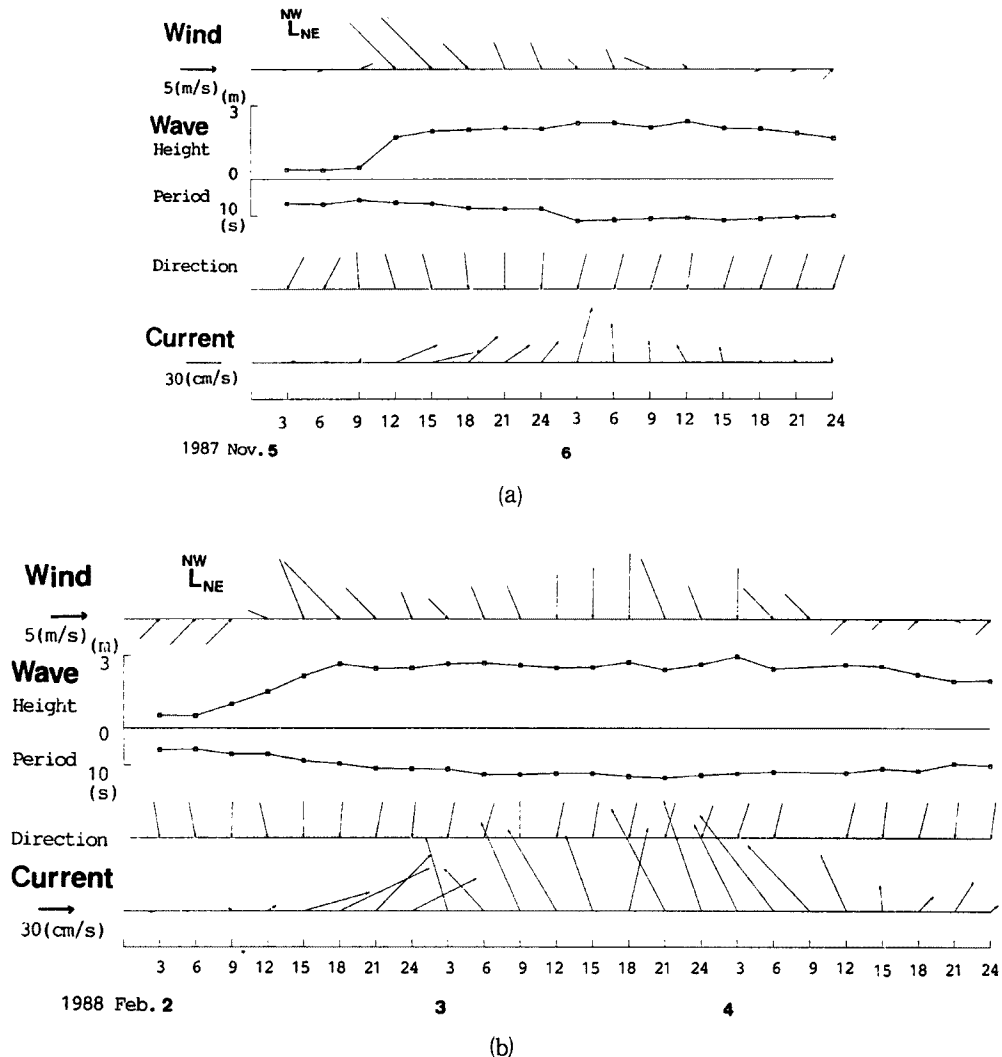


Fig. 24. Variations in nearshore current vectors, wind vectors and wave height, period and direction during the winter storm. These are the cases observed during the transition from strong longshore to strong offshore current.

Fig. 21 に示すように、表層も中層もほとんど同じ速度で（約 50 cm/s）西方向に流下した。すなわち、オイラー的計測とラグランジュ的計測に著しい相違はなかった。

超音波流速計（RC-300）は海底に設置してあり、海底近傍の流れを計測していることになる。この冲向きの強流は、海底付近にのみ卓越するいわゆる戻り流れではないかと考え、1988 年 12 月の集中観測では、Fig. 22 に示す架台を利用して、2 台の超音波流速計（FC-300）を水深 5 m の地点で 2 台鉛直に並べて海底上 1.5 m と 2.5 m の深さで同時計測した。その結果は、Fig. 23 に示すように、2 層の流れの差は水平成分ではほとんどみられなかった。また、前述したように水面下 1 m および 2 m の流れを浮子による方法で観測した結果においても、海浜流の鉛直分布はほとんど存在しなかったことからすれば、栈橋近傍において冲向きの強流は鉛直方向にほぼ一様な分布をしていると予想される。

冲向きの強流がなぜ本観測以前の観測で見つけられなかったのか？ 後述するように、この流れは冬期季

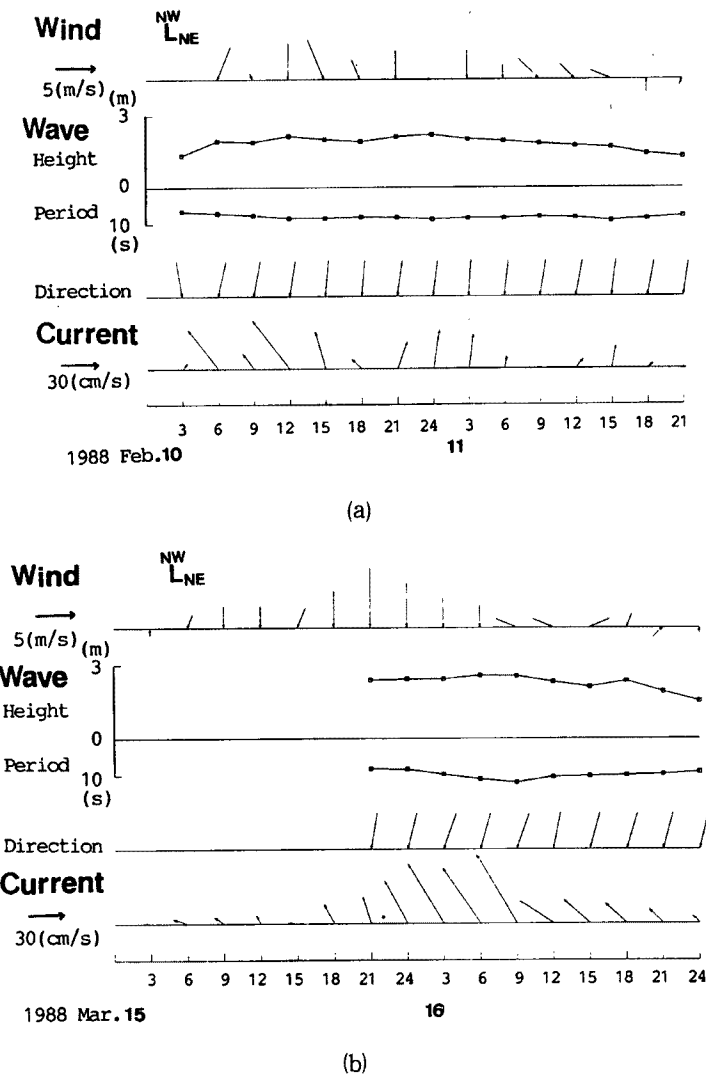


Fig. 25. Variations in nearshore current vectors, wind vectors and wave height, period and direction during winter storm. These are the cases where only the strong offshore current is observed.

節風がかなり長期間吹き続いて、うねりが栈橋の右手方向 (NNW~N) から襲来する状況でなければ出現しない。以前の観測では、荒天時の観測は3事例しかなく^{7,8)}、そのうち2例は風の吹きはじめで西風であった。冲向きの流れが期待される残る1事例も、使用した浮子が水の抵抗より風の抵抗を強く受ける構造であったため、浮子は岸に吹き流されてしまったと考える。超音波流速計による長期連続観測、および水の抵抗を増やして風の影響を小さくした浮子 (Fig. 20) による観測によって、初めて冲向きの流れがとらえられたのである。

3.3 海浜流と風との対応

Fig. 11 でみられる強い海浜流の発生事例に着目し、流れの変化に対応して、風と波の変化を調べると明瞭な関係が明らかになった。冬期に代表的なタイプとして、Fig. 24 (a) に1987年11月5~6日の事例

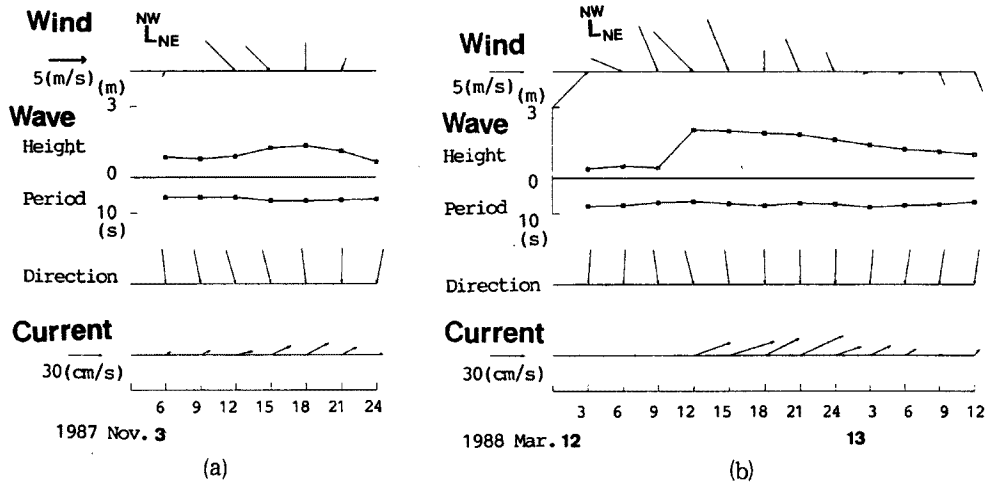


Fig. 26. Variations in nearshore current vectors, wind vectors and wave height, period and direction during winter storm. These are the cases where only the strong longshore current is observed.

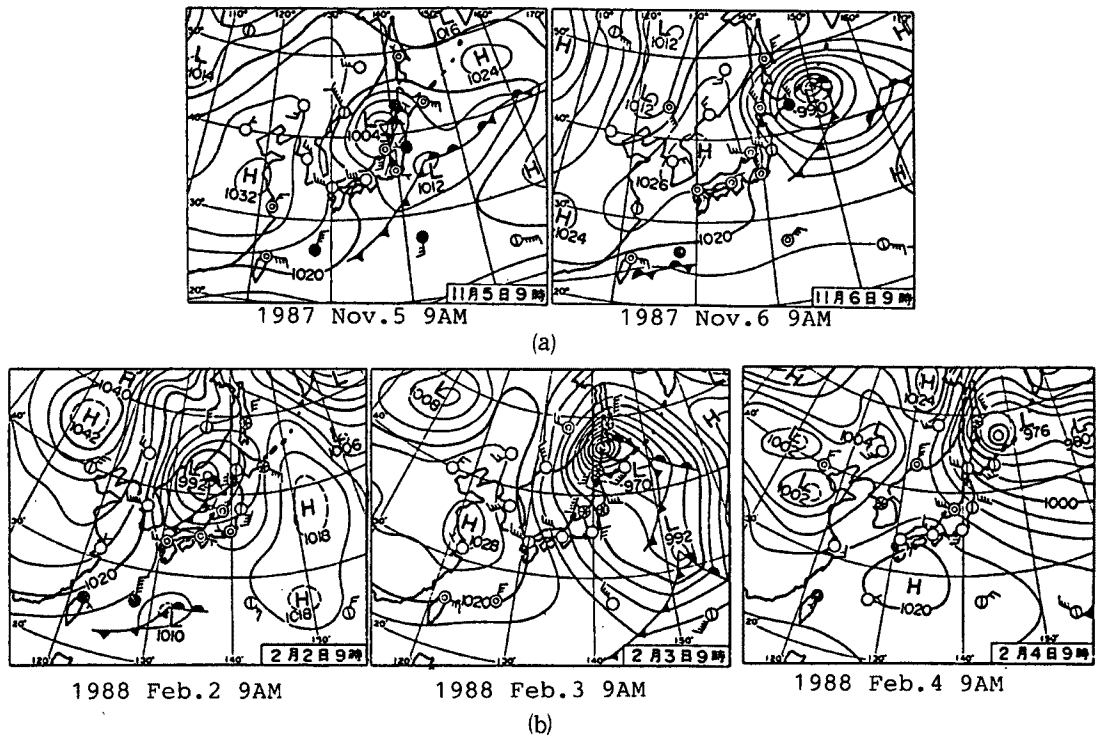


Fig. 27. Weather maps corresponding to the typical cases shown in Fig. 24.

を示す。上段は高田測候所で測定された風向風速ベクトルを、また中段は棧橋の圧力センサー付きの超音波流速計 (No. 1) によって観測された有義波高、周期および波向きを示す。さらに、下段が同流速計による海浜流の流向流速ベクトルである。風向、波向き、流向ともにそれらの方角は岸に直角の沖方向 (NW) を上方にし、右が NE (→新潟)、左が SW (→直江津) として示してある。11月5日の12時から15時にかけて西風の吹きだしが起これると、WNW 方向から周期の短い波が打ち寄せ、同時に NE 方向の沿岸流が発達する。しかし、風が衰えると、波向きおよび周期が変化して、NNW 方向からうねりが来

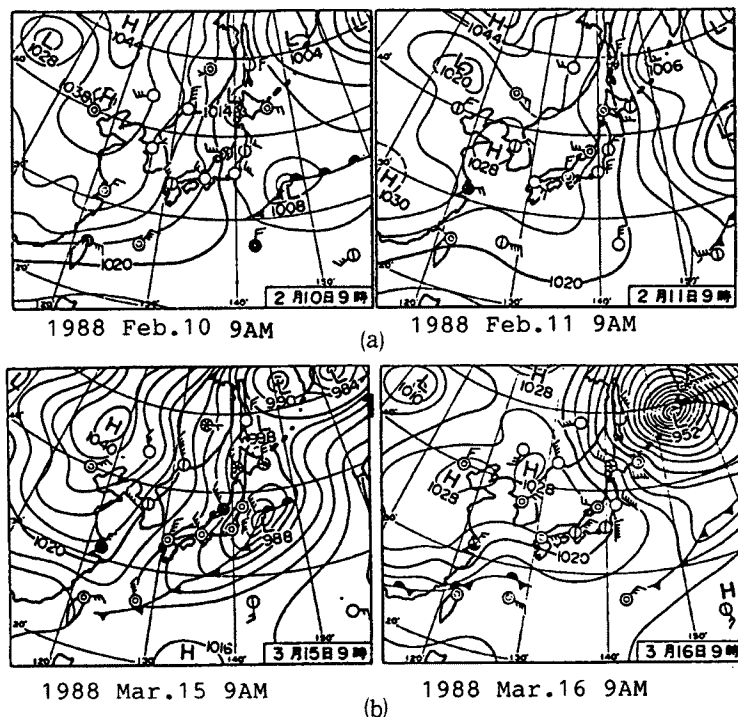


Fig. 28. Weather maps corresponding to the typical cases shown in Fig. 25.

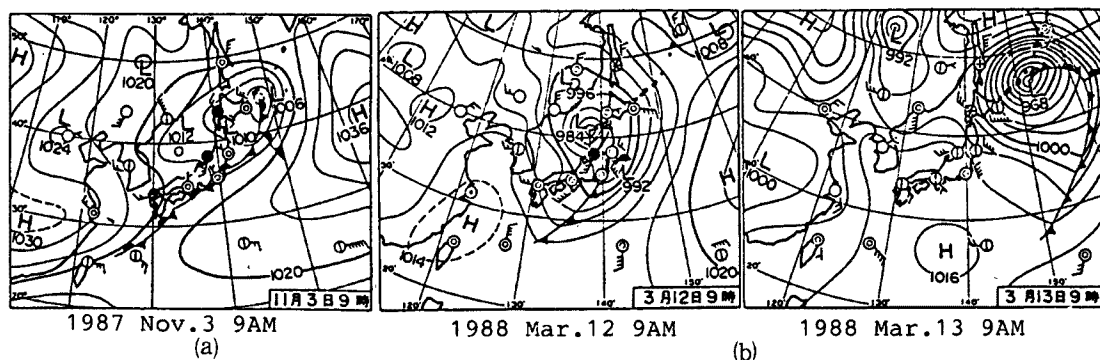


Fig. 29. Weather maps corresponding to the typical cases shown in Fig. 26.

襲し、それとともに海浜流も向きを変え、沖向きの強い流れが起こったことがよくわかる。その時の天気図を Fig. 27 (a) に示す。低気圧が日本海を北東に移動するのに伴って、西風が吹き、通過後は弱い冬型の気圧配置となり、うねりが NNW から到来した。

Fig. 24 (b) に 1988 年 2 月 2～4 日の事例を、Fig. 27 (b) にその時の天気図を示す。他の事例も解析してみると、季節風の吹き出し時には、桟橋から沖に向かって左手から強風や高波浪が襲来し、右手に流下する沿岸流が発生する。そして、風が収まるか、風向が右手よりに変わると、右手側からうねりが襲来して、流れは沖向きになることがわかる。このような沿岸に平行な風の成分の変化と岸沖方向の流れの発生との関係が、前述した風と流れとのスペクトル解析でみつかった相関関係をうみだしているのであろう。

ただし、それとは異なる事例もいくつか見られた。Fig. 25 に示した 2 事例では、最初に新潟に向かう沿岸流が出現せず、冲向きの流れだけがみられた。風の記録を見ると、最初に西風が吹かず、終始北西の風になっている。同時期の天気図 (Fig. 28) を見ると、いずれも冬型気圧配置である。また、Fig. 26 に示した 2 事例では、新潟に向かう沿岸流のみが出現し、冲向きの強流がみられない。風の変化は Fig. 24 の事例とほぼ同じであるが、波の変化を見ると、風が収まったとき、うねりの発達がみられない。同時期

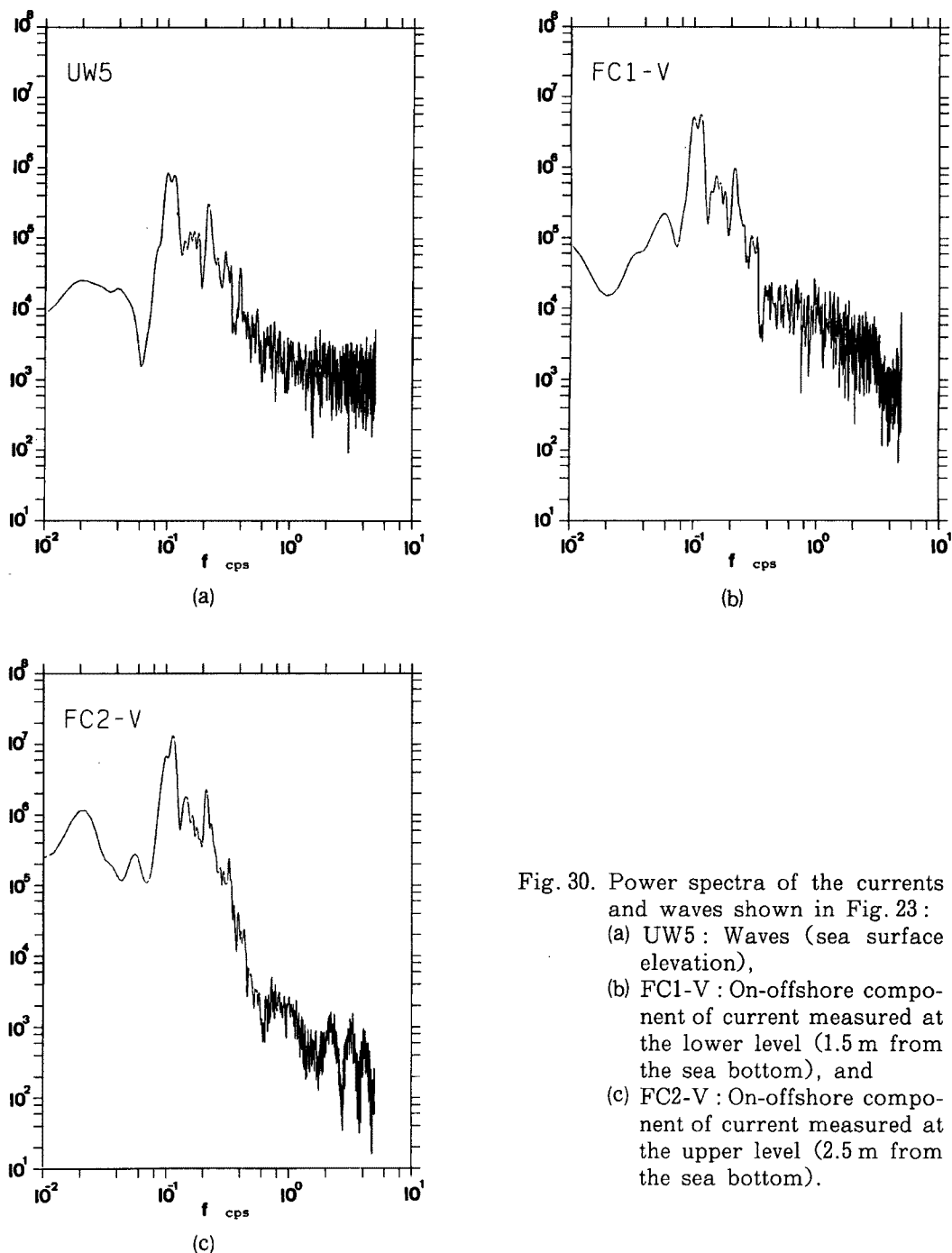


Fig. 30. Power spectra of the currents and waves shown in Fig. 23:
 (a) UW5: Waves (sea surface elevation),
 (b) FC1-V: On-offshore component of current measured at the lower level (1.5 m from the sea bottom), and
 (c) FC2-V: On-offshore component of current measured at the upper level (2.5 m from the sea bottom).

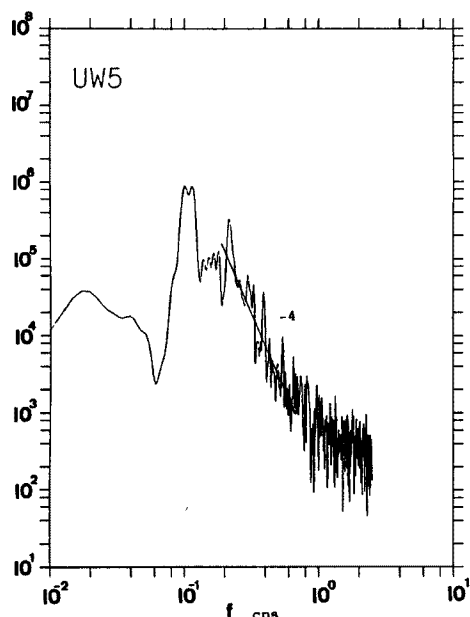


Fig. 31. Power spectrum of the sea surface elevation shown in Fig. 23 (UW 5) following noise reduction by a low-pass filter.

ものである。しかし、RC型はブローのスパンが50 cmもあるので、それより小さな空間スケールの乱れの観測は不可能である。また、RC型は頑丈だが大きいので、鉛直に複数個並べて流れの鉛直分布を求める観測には不向きである。一方、FC-300はブローのスパンが20 cmで、全体の大きさも小型で細かい乱れや鉛直分布の観測に向いている。

そこで、前述したように、1988年12月に、FC-300を2台鉛直に海底上1.5 m, 2.5 mの位置に設置して、1週間連続観測した。FC-300はもともと5サイクルで流れを計測するように回路が作られているが、2台のうち1台(上層)を10サイクルで計測するように改良した。その観測結果の一部をFig. 23に示す。FC1は下層の流速、FC2は上層の流速、UW5は水面変動(流速計設置地点直上の空中発射式超音波波高計で計測)を表し、流速のVが岸沖方向成分、Uが沿岸方向成分、Wが鉛直成分を表す。水面変動に対応して岸沖方向の振動流が卓越しているが、鉛直成分は海底に近い方が小さくなっている。

Fig. 23に示した鉛直2層同時観測データをサンプリングタイム0.1秒でA/D変換して、その4096個(=6.8分)をFFTで処理して求めたパワースペクトルをFig. 30に示す。碎波にともなうノイズが少しあるので高周波成分の領域でパワーが一定化している。しかも下層の方は5サイクル計測なので記録そのものが階段状になっており、高周波乱れの検出に悪影響を及ぼしている。そこでプログラムでノイズを除去し、5サイクルのローパスフィルターをかけてから、スペクトルを計算したのがFigs. 31, 32, 33である。f=0.1のスペクトルピークからf⁻⁴の勾配で高周波側にパワーが減少しているのは波による水粒子運動の特徴であるが、途中からf^{-5/3}に勾配が変化しているのは3次元の乱れが高周波領域に存在していることをうかがわせる。しかも波浪成分は上層のほうが大きいのに、乱れ成分は下層の方が大きい。

4. 結 論

海岸環境の保全、とくに最近の著しい海岸浸食の制御に関しては、高波浪時の海浜流、漂砂の動態を究

の天気図(Fig. 29)を見ると、日本海を低気圧が通過する形で、Fig. 27とあまり変わらないが、通過後も西風の気圧配置となっている。このタイプは夏季にもみられる。

それらを総合すると、沖向きの強流の出現には、NNW~N方向からのうねりが必須であり、それは冬型気圧配置の時である。そして、典型的な冬型気圧配置は日本海低気圧の通過によって始まることが多い。季節を問わず、低気圧の日本海通過は強い西風をもたらし、新潟に向かう沿岸流をつくり出す。そこで冬期には沿岸流の発達の後、沖向きの強流が卓越するが、夏期には沿岸流だけで終わることが多い。低気圧が本州南岸を通過して冬型気圧配置が強まれば、沿岸流ぬきで沖向きの強流が発達するのである。

3.4 波浪による水粒子運動および乱れ

波浪による水粒子運動に伴う往復流は超音波流速計で正確に計測され、とくに水平成分の計測から波向が算出される。Figs. 24, 25, 26に示した波向はRC-210A型流速計によって計測された短周期データから算出された

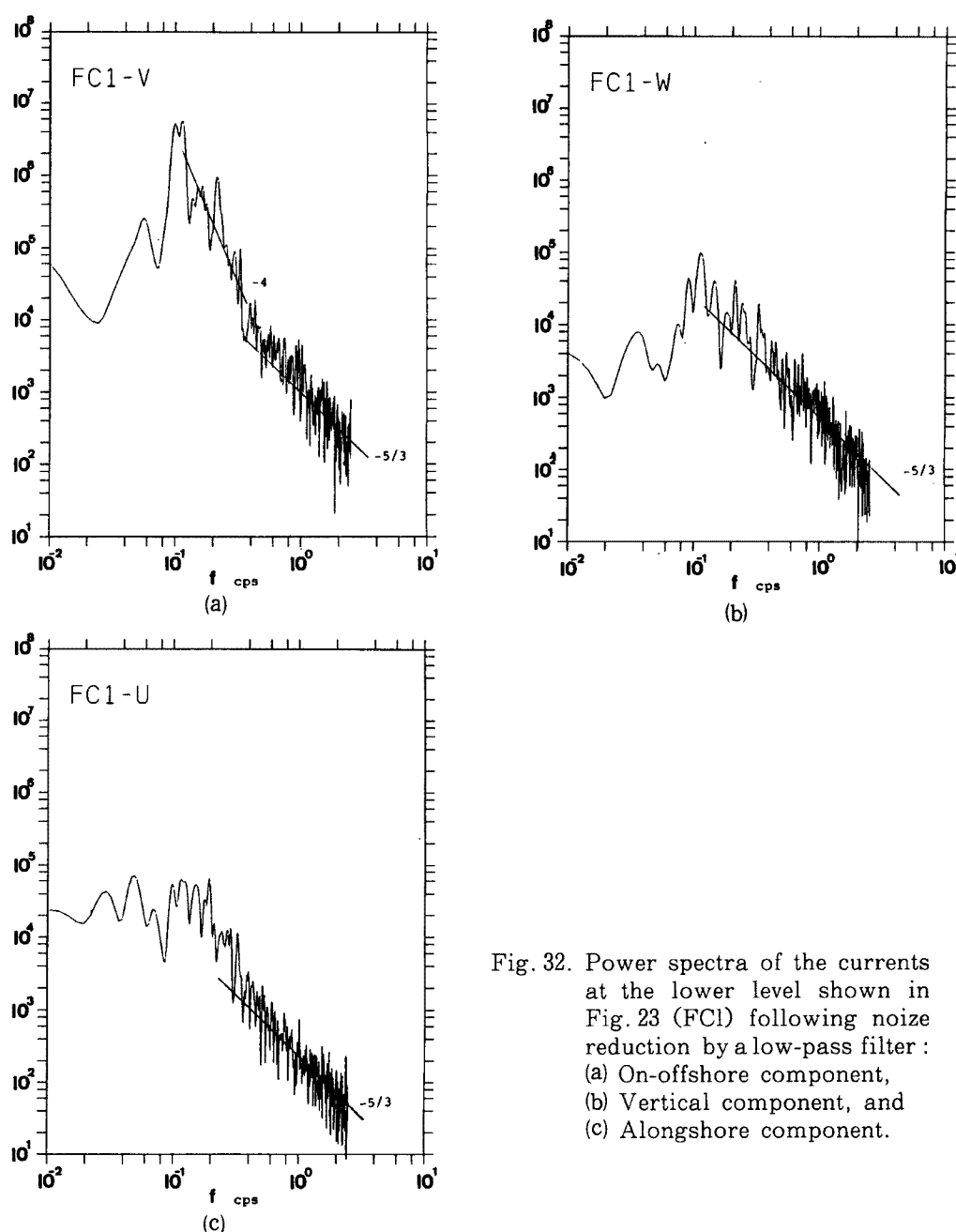


Fig. 32. Power spectra of the currents at the lower level shown in Fig. 23 (FC1) following noise reduction by a low-pass filter :
 (a) On-offshore component,
 (b) Vertical component, and
 (c) Alongshore component.

明する必要がある、砕波帯における波や流れの長期連続観測が実施されなければならない。しかし、砕波帯における流れの長期間の観測に耐える流速計は未だ開発されていない。

本研究では、従来の超音波流速計を改良することによって、砕波の直接的な影響を電氣的に除去し、砕波による水粒子速度および乱れを含む広範囲の周波数帯の流れの長期連続観測が実施できる流速計を開発した。京都大学大渦波浪観測所に設置されている波浪・漂砂観測用栈橋を用いて、改良された超音波流速計の砕波帯における性能試験を繰り返し、通年の連続観測を実施した。その観測結果から、本流速計の適用性を明らかにするとともに、砕波帯の長期間における流れの観測から、その動態の一部を明らかにすることができた。その主要な点は、1) 海浜流の記録には潮流はほとんど現れず、風に関係した流れが卓越

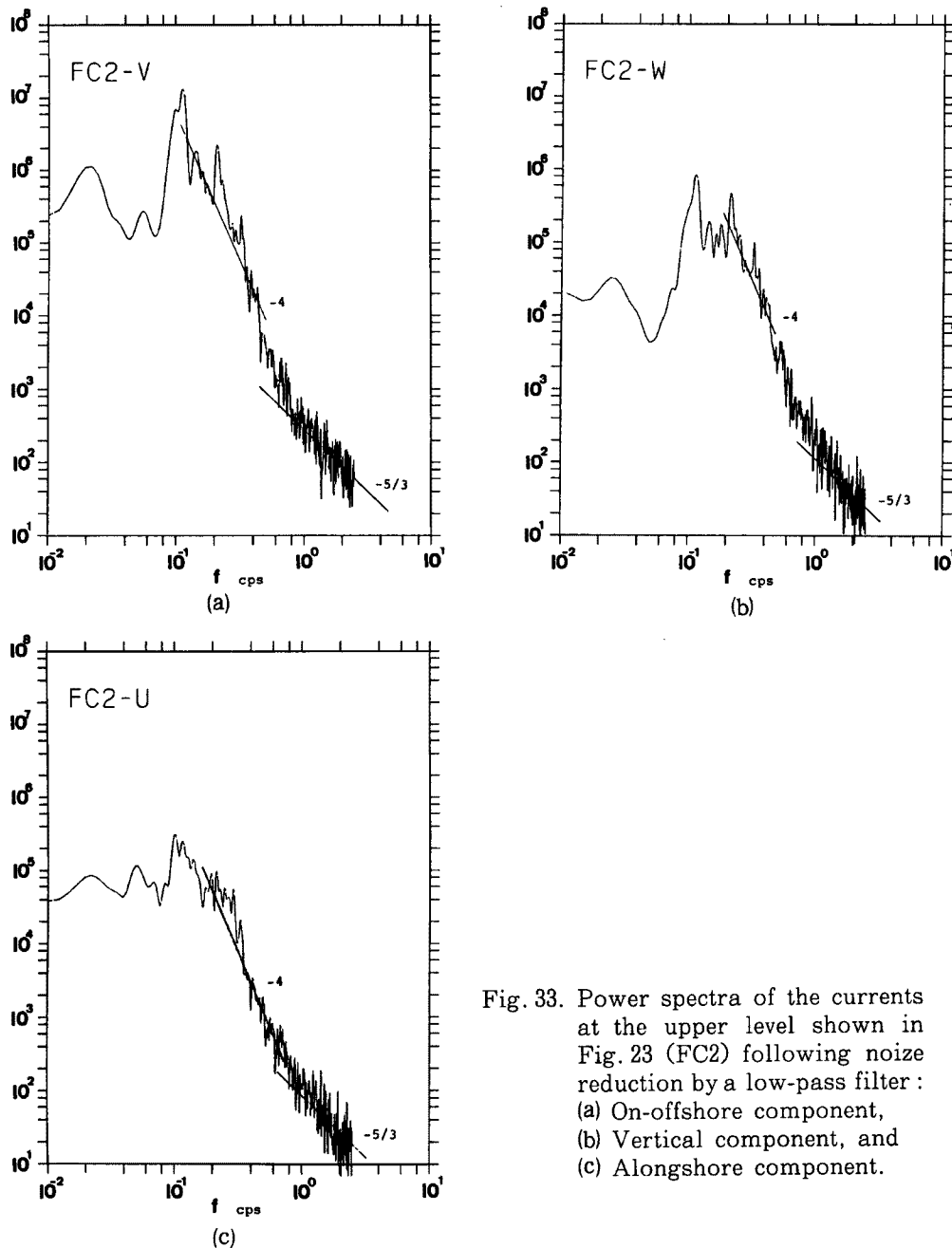


Fig. 33. Power spectra of the currents at the upper level shown in Fig. 23 (FC2) following noise reduction by a low-pass filter : (a) On-offshore component, (b) Vertical component, and (c) Alongshore component.

しており、2) 流れの変化に対応して、風と波浪の変化を調べると、明瞭な関係が存在し、3) 季節風の吹き出し時には、西寄りの強風や高波浪が襲来し、同時に東向きの沿岸流が発生するが、風が収まるか、あるいは風向が北寄りになると、うねりが襲来して、冲向き流れが卓越し、4) その冲向きの強流は鉛直方向にはほぼ一様な分布をしていると予想される。

なお、本研究の主目的が砕波帯内における流れの長期連続観測に耐える流速計の開発とそれによる長期観測の実施であるが、流速計の設置と各種の改良を可能にしたのは、砕波帯に設置された観測用栈橋という基地があるためである。しかし、砕波に伴う強力な乱れの観測においては、センサーに対する気泡の混入や漂砂の直接的な影響など、現地観測による計測器の改良のみでは解決できない現象が含まれているた

め、実験室におけるより一層詳細な測器の検定が必要ではないかと反省している。

最後に、長期連続観測のシステムを維持し、さらに長年にわたる栈橋の海底地形の測深資料を提供していただいた大潟波浪観測所の白井 亨助教授および内山 清技官に厚くお礼を述べたい。また観測とデータ解析に協力していただいた防災研究所海岸災害部門の方がた、および現地観測にご理解、ご協力をいただいた才浜漁業協同組合の皆様深く感謝する。

参考文献

- 1) 海象（流れ）観測グループ（土屋義人，吉岡 洋ら）：田辺湾における流れの長期連続観測，京都大学防災研究所年報，第 26 号（B-2），1983，pp. 637 - 672.
- 2) 土屋義人・吉岡 洋・棚橋輝彦・市川雅史・土子良治：超音波式流速計による長期潮流観測について，第 30 回海岸工学講演会論文集，1983，pp. 500 - 504.
- 3) 国司秀明・吉岡 洋・中村重久・芹沢重厚・市川雅史・森田行司：沿岸海域の係留観測における流速計特性の相互比較，沿岸海洋研究ノート，第 22 巻，第 2 号，1985，pp. 165 - 175.
- 4) 鷺見栄一：沿岸海域における反射型三次元超音波流速計の測定結果，公害資源研究所彙報，Vol. 13, No. 1，1983，pp. 107 - 117.
- 5) 土屋義人・河田恵昭・芝野照夫・山下隆男・小林証雄：現地海岸における水面変動の時空間特性，第 29 回海岸工学講演会論文集，1982，pp. 26 - 30.
- 6) Tsuchiya Y., T. Shirai and T. Yamashita: Long-term changes in beach profiles at Ogata coast, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto University, Vol. 32, Part 3, No. 292, 1982, pp. 171 - 187.
- 7) 土屋義人・白井亨・中村重久・山口正隆・芝野照夫・河田恵昭・吉岡 茂：大潟海岸における海岸変形に関する観測（1）-1980 年冬期季節風時の観測結果について-，京都大学防災研究所年報，第 14（B），1971，pp. 465 - 485.
- 8) Tsuchiya Y. and T. Shibano: Observation of longshore currents and sand drifting in storm conditions at Ogata coast, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 16, 1973, pp. 93 - 106.
- 9) 河田恵昭・吉岡 洋・芹沢重厚・土屋義人：T 型栈橋による高波浪時の海底地形計測法，第 35 回海岸工学講演会論文集，1988，pp. 387 - 391.