

離岸流の時間変動特性について

出口一郎¹・吉井 匠²・野村尚生³・荒木進歩⁴

現地海岸の極浅海域で計測された流速の時系列から、離岸流と思われる離岸方向流速を抽出し、その時間変動特性について、流速計設置位置と同じ位置で計測された水位変動と水深 7 m 地点で計測された入射波の波群特性との関連で解析した。対象海岸で入射波が顕著な波群を形成している場合は、その波群周期は 100 s~150 s 程度で、極浅海域でその周期に対応する周期で長周期の水位変動が生じ、離岸流の流速にも同じ周期成分の変動が検出された。線形理論から推定される流速変動の振幅は 0.2-0.3 m/s に達することもわかった。しかし、実測された流速変動にはそれより長い数十分の周期を持つ変動も含まれており、その成因については明らかにできなかった。

1. はじめに

1990 年以降、毎年 200-400 名が遊泳中に海浜事故に巻き込まれ、その約半数が死亡あるいは行方不明となっている。離岸流は、このような海浜事故に深く関わっているといわれている。さらに、極浅海域における漂砂移動を含む物質輸送に重要な役割を果たしている。通常、このような離岸流は、従来の海浜流数値計算法で解析されるが、計算される結果は定常な流れである。しかし、現地海岸で実測される離岸流の流速は時間的に大きな変動を示す。そこには、さまざまな時間スケールの変動が含まれている。また、このような時間変動を示す流れは、遊泳者にとっても非常に危険な流れとなる。

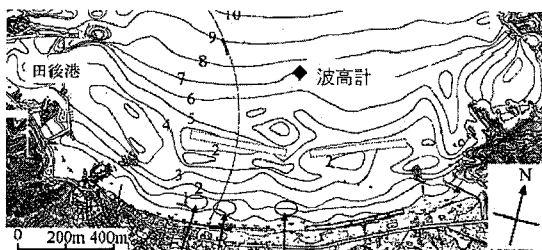
本研究の目的は、現地実測された離岸流の流速に基づき、その時間変動を引き起こす要因について、考察することである。

2. 離岸流の現地実測

2002 年から 2005 年の夏季に、鳥取県浦富海岸において離岸流の実測を行った。使用した計測器は、数台の電磁流速計と圧力センサーで、これらを離岸流の発生が予想された極浅海域にアレー配置し、水平方向 2 成分の流速と水位変動の計測を行うと同時に、水深 7 m の地点で超音波波高計による入射波高と波向の測定を行った。また、気象条件が良好な場合は、100 m から 150 m 上空に係留した飛行船に搭載したビデオカメラで離岸流の流況の撮影も行っている。それぞれの計測器の計測モードは、2002 年度は全て毎正時から 20 分間のバーストモードで、2003 年及び 2005 年は全て連続モードで計測し、サンプリング間隔は、水深 7 m 地点の計測器は、0.5 s

それ以外は 1 s である。

ここでは、2002 年、2003 年及び 2005 年に、電磁流速計によって計測された流速記録に基づいて考察する。図-1 に、浦富海岸と計測器の配置について示す。なお、これらの実測期間における潮位偏差は、最大 30 cm で、極浅海域の計測器の設置水深は 0.6 m~1.2 m の間であった。



2005 2003 2002 計測器設置位置

図-1 浦富海岸と計測器設置位置

3. 実測された離岸流流速の時間変動

極浅海域で測定された海浜流流速のうち、比較的強い冲向き流速が含まれ、特徴的な変動を示す流速ベクトル時系列を図-2~6 に示す。図-2 は 2002 年 9 月 7 日 7 時から 20 分間、図-3 は 2003 年 7 月 3 日 0 時から 1 時間、図-4 は、2003 年 7 月 7 日 17 時から 1 時間、図-5 は、2005 年 9 月 4 日 7 時から 1 時間に、電磁流速計で計測された流速の移動平均 (60 s) 値を、30 s 間隔に描いた流速ベクトルである。それぞれの計測時期における水深 7 m 地点で計測された入射有義波高 (Hs)、周期 (Ts)、平均波向 (dir) などの情報を、まとめて表-1 に示してある。

これらの流速計測地点はすべて水深 0.6~1.2 m の間で計測されたもので、図-2, 3 及び 5 の上段は沖側、下段は岸側での計測結果で、図-2, 3 は 10 m、図-5 は 4 m 間隔に設置されたものである。

表-1 より、図-2 及び 3 に示す流速は、ほぼ定常に波

1 正会員 工博 大阪大学教授大学院工学研究科地球総合工学専攻
2 正会員 修(工) (財)電力中央研究所
3 学生会員 大阪大学大学院工学研究科
4 正会員 博(工) 大阪大学講師大学院工学研究科地球総合工学専攻

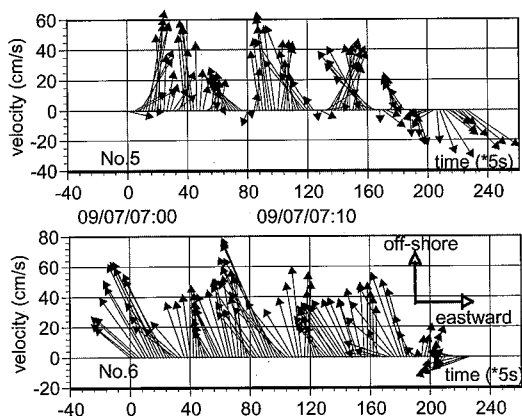


図-2 平均流ベクトル時系列 (2002/09/07/07:00)

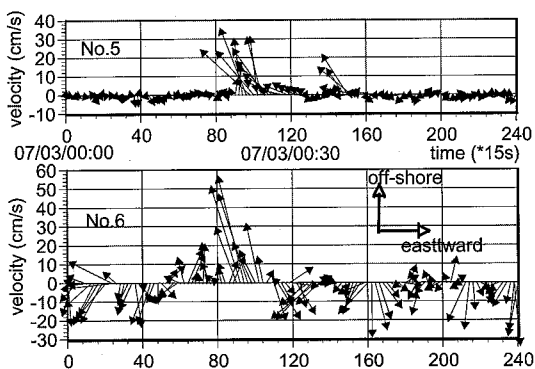


図-3 平均流ベクトル時系列 (2003/07/03/00:00)

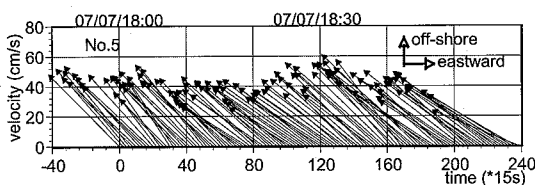


図-4 平均流ベクトル時系列 (2003/07/07/18:00)

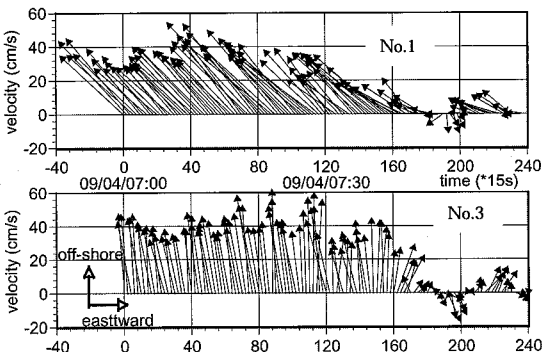


図-5 平均流ベクトル時系列 (2005/09/04/04:00)

が入射している状態で計測されたもので、前者は完全に碎波帯内、後者は碎波帯外での計測結果である。また図-4は、波向が変動した状態、図-5は波高が急増し、波向も変化している状態での計測結果で、前者はほぼ碎波点付近、後者は碎波帯内での計測結果である。

表-1 計測時の入射波高と統計諸量

Yr	M/D	HR	H_s (cm)	T_s (s)	dir	η_{rms} (cm)	η_{es}/η_{rms}^2	T_{es} (s)	T_g (s)	GF
2002	9/7	07:10	223	7.6	NNE	37.3	2.71	82	115	0.70
		07:30	225	7.7	NNE	38.9	2.13	58	116	0.67
		07:50	194	7.4	NNE	38.5	2.11	48	162	0.66
2003	7/3	00:00	51	5.1	N	14.3	2.04	27	43	0.57
		01:00	49	4.9	N	13.8	2.07	26	40	0.60
		02:00	48	4.8	N	13.6	2.26	30	31	0.60
2003	7/7	17:00	70	4.8	NNW	17.8	2.03	31	90	0.57
		18:00	80	5.0	N	22.1	2.33	30	33	0.63
		19:00	81	5.2	N	22.3	2.20	33	38	0.63
2004	9/4	06:00	92	5.7	N	25.2	2.50	51	151	0.75
		07:00	112	6.3	N	30.2	2.53	62	120	0.71
		08:00	145	6.5	NNE	38.7	2.54	57	117	0.74

図-2及び3は、間歇的に発生する離岸方向流れの典型的な例であり、前者では10-15分間隔で3回、後者では単発で流れが発生している。また、図-3に見られるように、碎波帯外では岸沖方向に10m離れた2地点でほぼ同時に離岸方向流れが発生し、その継続時間は高々10分程度である。しかし、図-2に示す碎波帯内では、岸沖方向に10m離れた2地点の流速には類似性は少なくなる。

一方、図-4及び5は、いずれもリップチャンネルの西側斜面付近で計測されたものであるが、ほぼ定常な斜め沖向きの流れが継続(図-5に示す場合も7時30分ころまで)しているように見える。しかし、岸沖方向の流

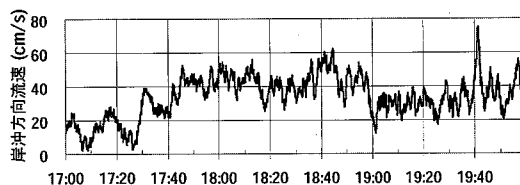


図-6 岸沖方向流速成分の時間変化 (2003/07/07)

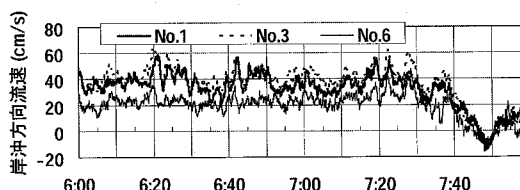


図-7 岸沖方向流速成分の時間変化 (2005/09/04)

速成分の 60 s 移動平均時系列をそれぞれ図-6, 7 に示すが、周期数分から 10 分程度で 20 cm/s 程度の振幅で変動する成分が存在する。

なお、図-7 に示す No.1,3 及び 6 は、この順に沖から岸に 4 m 間隔で設置した流速計で計測された結果である。

表-1 より、図-6 において、17 時から 18 時にかけての流速増加は波向きの変化により、また図-7 における 7 時 30 分から 50 分にかけての流速の減少は、波向の変化と入射波高の増大（碎波位置と流速測定点の相対的な位置の変化）によって生じたものと考えられる。

4. 長周期変動成分の解析

(1) 入射波（水深 7 m 地点）の波群特性

3. で示した離岸方向流れに含まれる長周期時間変動

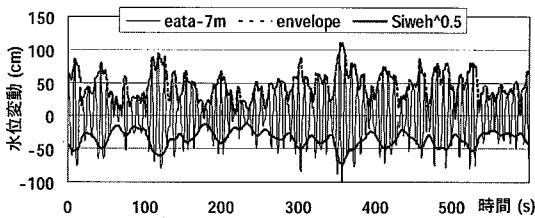


図-8 入射波時系列 (2002/09/07/07:00-07:10)

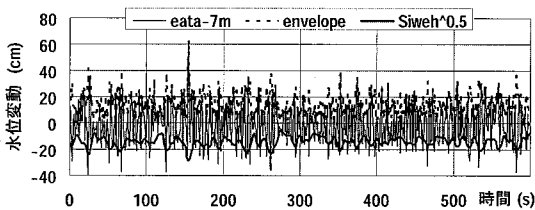


図-9 入射波時系列 (2003/07/03/00:00-00:10)

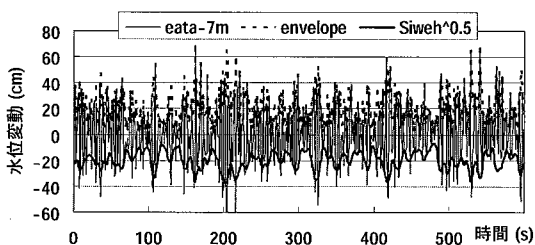


図-10 入射波時系列 (2003/07/07/18:00-18:10)

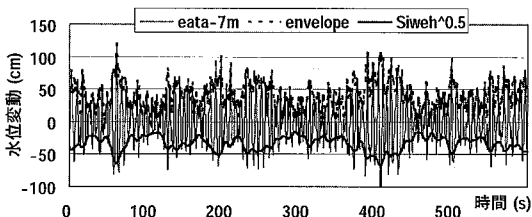


図-11 入射波時系列 (2005/09/04/04:00-04:10)

の成因を、入射波の波群特性との関係で検討する。

図-8~11 は、図-2~5 に示す流速測定時間に対応する時間において、水深 7 m 地点で計測された水位変動の 10 分間の時系列である。これらの図より明らかなように、いずれの時系列も波群を形成し、特に図-2, 4 及び 5 に示す結果に対応する入射波高が比較的大きな場合に顕著である。

このような波浪の波群特性を解析する方法については、すでにさまざまな方法が提案されている。ここでは、Funke and Mansard (1979) によって提案された SIWEH (smoothed Instantaneous Wave Energy History) に基づいて波群特性について考察する。図-8~11 には、水位変動のヒルベルト変換から求められる包絡波形と、式 (1) から計算される SIWEH の時系列も示してある。ただし、SIWEH については、水位変動と次元をあわせるために $1/2$ 乗し、マイナスをつけて包絡波形と重複しないように図示してある。

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$Q(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p & |\tau| < T_p \\ 0 & |\tau| \geq T_p \end{cases}$$

ここに、 $\eta(t)$ は実測水位変動時系列、 T_p は $\eta(t)$ のパワースペクトル $S(f)$ のピーク周波数に対応する周期である。

当然のことながら、包絡線よりも SIWEH のほうがスムーズな波形を示し、波群の特徴がより明確に現れている。

なお、表-1 中には、 $\eta(t)$ の 2 乗平均値 η_{rms} 、 η_{rms} で無次元化した SIWEH 時系列の波別解析から求められる有義振幅 η_{es}/η_{rms}^2 、有義周期 T_e および波群特性（大きさ）を表現するパラメータとして GF (Groupiness Factor) (式 (2)) と波群周期 T_g (式 (3)) の値も示してある。

$$GF = \sqrt{m_{e0}/m_0} \quad (2)$$

$$T_g = (m_{e0}/m_{e2})^{0.5} \quad (3)$$

ここに、 m_{e0} 、 m_{e2} は SIWEH スペクトル $S_e(f)$ の 0 次と 2 次モーメント、 m_0 は入射波スペクトル $S(f)$ の 0 次モーメントである。

GF を波群特性をあらわすパラメータとして用いることの問題点については、すでにさまざまな議論が行われている（たとえば、Haller and Dalrymple, 1995）が、ここでは、同一地点で同一の計器を用いて計測された水位変動を同じ解析方法で計算された波群特性をあらわすパラメータとして考える。表-1 から明らかなように、

SIWEH 及び入射波の水位変動スペクトルから計算される各種パラメータについては、比較的ばらつきが大きく、時系列から直接計算される有義諸量については、比較的ばらつきの少ない結果が得られている。特に、波群の長さに関わるパラメータは、表-1 に示す波別解析された SIWEH の有義周期のほうが、 T_g よりも見た目の波群長さを適切に表現しているように見える。

(2) 極浅海域の長周期水位変動と流速変動

図-12~15 に、図-2~5 に流速ベクトルを示した同時期に流速計設置位置で計測された水位変動の 60 s 移動平均値の時系列を示す。

図-12 及び 15 中の No. は、図-2 及び 5 の計測器設置位置と同じである。図-12 及び 15 より、碎波帯内にお

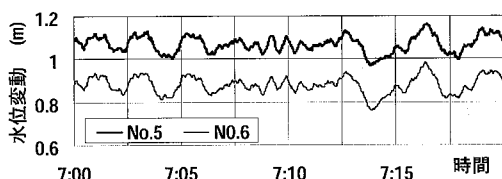


図-12 極浅海域の水位変動 (2002/09/07/07:00-07:20)

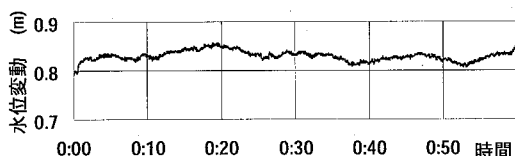


図-13 極浅海域の水位変動 (2003/07/03/00:00-01:00)

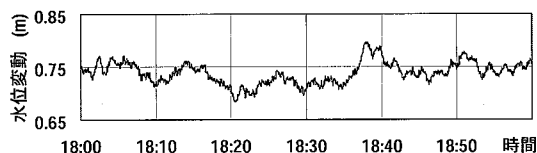


図-14 極浅海域の水位変動 (2003/07/07/18:00-19:00)

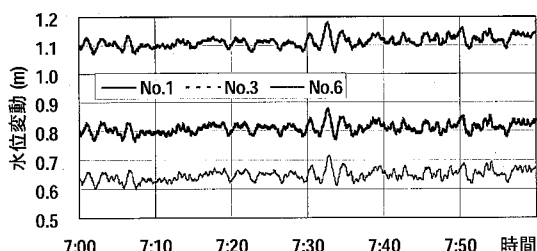


図-15 極浅海域の水位変動 (2005/09/04/07:00-08:00)

いても、岸沖方向に離れた地点における水位変動は、流速変動よりも類似性が非常に高い。また、入射波高が大きかった図-12 及び 15 に示す場合は、数分の周期を有する変動に着目すると 10 cm 程度の振幅を有するのに対し、入射波高が小さかった図-13 の場合は変動がなだらかで数 cm 程度の変動で、図-14 に示す場合も高々 5 cm 程度の振幅である。

入射波の波群によって引き起こされる set-down wave と極浅海域で計測された水位変動の関係について考察する。よく知られているように、簡単のため、 x 軸に沿って伝播する 1 次元の波動場で考えると、平均水位変動 $\bar{\eta}$ と断面平均流速 U 及び radiation stress S_{xx} は次式で関係づけられる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{h + \bar{\eta}} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)において、流体運動を引き起こす力は、右辺の radiation stress の勾配である。波群を構成する場では、 S_{xx} が波群に伴って変動する。線形理論では S_{xx} は波高の 2 乗に比例することから、SIWEH と比例する量として置き換えられる。一方、波群の波長を L_g 、波数を k_g とすると、その勾配は $k_g \cdot S_{xx} \sim k_g \cdot \eta_e \sim \eta_e / L_g$ はに比例することになる。

波群の波長についても、すでにいくつかの表現方法が提案されているが、 $L_g = \sqrt{gh} T_g$ ここでは、として計算した。表-2 には、表-1 に示す 4 期間における平均の有義周期、SIWEH 有義値及び波群周期に対してこの関係式から計算される η_e / L_g の値も示してある。ただし η_e については、有義値 η_{es} を用いた。

表-2 波群周期・波群長と有義 SIWEH の勾配

Yr	M	D	Ts(s)	$\eta_{es}(\text{cm}^2)$	$T_g(\text{s})$	$L_g(\text{cm})$	$\eta_{es}/L_g(\text{cm})$
2002	9	7	7.57	3386.48	131.00	108500.9	0.03121
2003	7	3	4.93	286.59	38.00	31473.5	0.00911
2003	7	7	5.00	653.40	53.67	44452.2	0.01470
2004	9	4	6.17	2482.63	129.33	107120.5	0.02318

表-2 及び図-12~15 に示す結果より、入射波の有義 SIWEH の勾配が大きいかほど極浅海域での長周期変動振幅が大きくなることが分かる。ただし、表-2 に示す結果では、SIWEH 振幅の 2 乗平均値の大きさと入射波の有義 SIWEH の勾配が比例関係にあることから、極浅海域の長周期変動にどちらが直接的に関与しているのかは、今回の検討では不明である。

(3) 極浅海域の水位変動と流速変動

極浅海域での水位と岸沖方向流速の長周期変動の関係について水位変動と流速のクロススペクトルに基づいて考察する。図-16 は、極浅海域で比較的大振幅の大きな長周期水位変動が計測された 2002 年 9 月 7 日 7 時 7 時

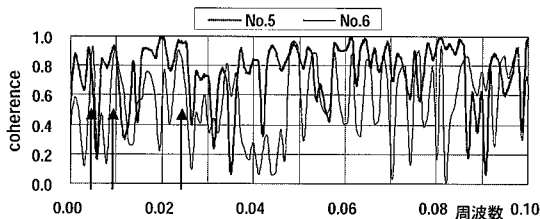


図-16 水位変動—岸沖方向流速のコヒーレンス
(2002/09/07/07:00-07:20)

20 分の 20 分間に、碎波帯内の岸沖方向に 10 m 離れた 2 点で計測された水位変動と岸沖方向流速の時系列から計算されるコヒーレンスを、周波数 0.1 Hz 以下の領域について示したものである。

この時間における水深 7 m 地点における入射波の波群周期は、表-1 より 115 s である。図-16 において、この周期に対応する周波数 0.0087 Hz 周辺においては、両測定点とも高いコヒーレンスを示している。したがって、波群に伴う set-down wave がこの周波数周辺での流速変動を引き起こしているものと考えられる。

図-17 は、やはり極浅海域で比較的大きな平均水位変動が観測された 2005 年 9 月 4 日 7 時から 1 時間に、碎波帯内の 2 地点で計測された水位・流速のコヒーレンスを示したものである。

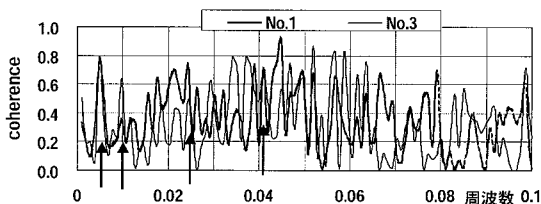


図-17 水位変動—岸沖方向流速のコヒーレンス
(2005/09/04/07:00-08:00)

表-1 より、この間の入射波の波群周期 155 s で対応する周波数は 0.0067 Hz である。図-17 より、2 地点における水位と流速のコヒーレンスはこの周波数周辺で高い値を示している。また、図-15 より、この間の長周期水位変動の振幅は 10 cm のオーダーである。このとき、水位変動計測地点の平均水深 0.8 m (No. 3 地点) において、線形長波理論で推定される水粒子速度振幅は約 15 cm/s である。また水位変動振幅が 20 cm のオーダーとなると水粒子速度の振幅も 30 cm/s にも達する。この値は、図-11 における数分の周期を有する変動成分の振幅と一致する。

図-18 は 2003 年 7 月 7 日 17 時から 1 時間の間に測定

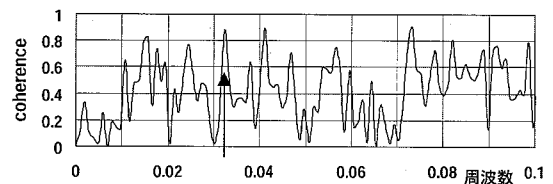


図-18 水位変動—岸沖方向流速のコヒーレンス
(2003/07/07/17:00-18:00)

された水位と流速のコヒーレンスを示す。表-1 よりこの間の入射波の波群周期は 33 s で、対応する周波数は 0.03 Hz である。図-18 では、この周波数より若干高い周波数でコヒーレンスが高くなるが、この周波数より低い周波数域でも高いコヒーレンスを示す周波数が存在する。しかしその成因は、明らかにできなかった。

さらに、同時期に沿岸方向に 20 m 離れた 2 点と岸沖方向に 10 m はなれた 2 点の水位変動の位相差を計算したところ、周波数 0.03 Hz 周辺における位相差は沿岸方向には 9.0° 、岸沖方向には 42.9° となった。この位相差に対応する位相速度は、水深 0.8 m における長波の波速とほぼ一致する。これらの結果から、離岸流速に含まれる数分の周期を持つ変動は、入射波が波群を形成することによって発生する set-down wave によって引き起こされるものと考えられる。

しかし、GF あるいは SIWEH の変動が小さく、波群が顕著ではない 2003 年 7 月 3 日の計測結果においては、波群周期の周波数に対応する領域でのコヒーレンスは高くなかった。

5. 結 論

極浅海域で計測され流速及び水位変動に基づき、離岸流の時間変動特性について検討した。その結果、離岸流に含まれる周期 100 s のオーダーの変動は、入射波の波群によって引き起こされることが分かった。しかし、波群周期よりも十分に長い変動成分あるいは突発的に発生する離岸流の成因については明らかにすることはできなかった。

最後に、本研究を行うにあたり、文科省科学研究費及び日本財団の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- Funke, E.R and Mansard, E.P.D.(1979) : Synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, Hydraul. Lab. Tech. Rep. LTR-HY-66, NRCC.
- Haller, M.C. and Dalrymple R.A.(1995) : Looking for wave groups in the surf zone, Proc. International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments, pp. 81-92.