

沿岸域における流れの長周期変動と風の関連性

岡田 知也*・橋本 典明**・永井 紀彦***

1. はじめに

近年, 開放的な沿岸域の砕波帯沖合における流動特性が, 漂砂に及ぼす影響や海岸付近の水環境を考える上で境界条件として非常に重要視されている。その様な流動特性の一つとして, 底層部付近において頻繁に発生する最大流速が 50 cm/s を越え数日程度の周期を持つ流れの長周期変動がある。この流れの発生要因についてはこれまで多くの研究がなされてきた。佐藤(1995, 1996)は, その流れは岸に沿う強風によって発生し, コリオリ力によって維持され, さらに砕波による運動量が供給されたものとしている。安田ら (1996, 1997) は, 風および波の作用が沖合流れの流速・流向に対する支配因子であることを準 3 次元モデルを用いた解析によって示している。また, 八木ら (1996, 1997, 1998) は鹿島灘において長期の観測を行い, 海上風, 海流からの暖水波及効果および陸棚波の影響を指摘している。さらに, 柳ら(1984)および磯田ら(1992)は山陰海岸において, 久保田(1983)は福島沖において, 慣性周期よりも長い周期を持つ流速変動は陸棚波として説明できることを示している。

以上の様に, 沿岸域の流動特性について多くの研究がなされているものの, 観測の困難さから観測事例はまだそれほど多くなく, 長期間の観測に限って言えば実施例は非常に少ない。そこで本研究では, 日本沿岸の広範囲かつ長期間の観測データを解析することにより, 主にその流れの発生要因についての検討を行った。

また, これまでの研究により, 沿岸域の流動特性に対する風の影響は非常に重要であることは示されているものの, 風に対する考察は「沿岸方向に吹く強風」程度の認識である。したがって本研究では, 流れの長周期変動が顕著に現れる場合の風の特性についても検討を行った。なお, 流れの長周期変動と風相互間の物理的な機構は現時点において不明確な点が依然として多いことから, 解析手法として時系列解析を用いたアプローチを試みた。

2. 解析手法

本研究では解析手法として主に多変量自己回帰モデル (MAR モデル) と回転スペクトルを用いた。両手法ともに多方面で使用されている手法ではあるが, 以下に簡単に説明する。

2.1 MAR モデル

MAR モデルは, 多変量時系列

$$y_n = (y_n(1), \dots, y_n(l))^t \dots\dots\dots (1)$$

について, 時系列の現在の値を過去の値 y_n, \dots, y_{n-m} と l 次元白色雑音 v_n を用いて

$$y_n = \sum_{m=1}^M A_m y_{n-m} + v_n \dots\dots\dots (2)$$

のように表現するモデルである。ここで, A_m は $a_m(i, j)$ を (i, j) 成分とする $l \times l$ 行列の自己回帰係数行列である。時系列が MAR モデルに従う場合, クロススペクトル行列 $P(f)$ は

$$P(f) = A(f)^{-1} W A(f)^{-1*} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。ここで * は行列の複素転置を表す。また, W は白色雑音 v_n の分散共分散行列である。

このとき, 白色雑音成分 v_n の各成分が互いに無相関であるその分散共分散行列が対角行列 $W = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_l^2\}$ となる場合には, 第 i 成分のパワースペクトルは $A(f)^{-1}$ を $B(f) = (b_{ik}(f))$ と表すことにより

$$P_{ii}(f) = \sum_{j=1}^l b_{ij}(f) \sigma_j^2 b_{ij}(f)^* \equiv \sum_{j=1}^l |b_{ij}(f)|^2 \sigma_j^2 \dots\dots\dots (4)$$

と表すことができる。これは第 i 成分の周波数 f での変動のパワースペクトルが l 個のノイズ源の影響に分解でき, その影響の大きさが $|b_{ij}(f)|^2 \sigma_j^2$ で表せることを示している。したがって

$$r_{ij}(f) = \frac{|b_{ij}(f)|^2 \sigma_j^2}{p_{ii}(f)} \dots\dots\dots (5)$$

とおくと, r_{ij} は $y_n(i)$ の周波数 f における変動のうち $v_n(j)$ に起因する割合を表し, ノイズ寄与率と呼ばれる。

2.2 回転スペクトル

ベクトル時系列 $(x(t), y(t))$ に対して, 通常のスペク

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室
** 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室室長
*** 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室室長

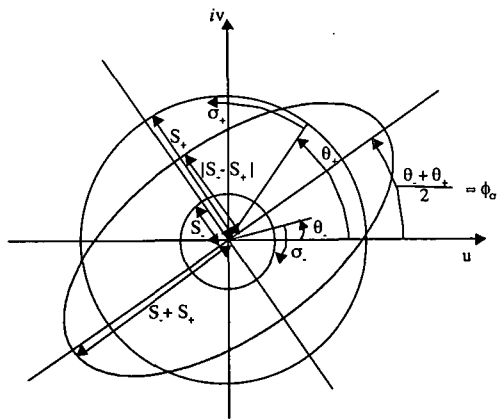


図-1 回転スペクトルの概念図(θ_+ , θ_- は S_+ , S_- それぞれに対する位相, σ_+ , σ_- は S_+ , S_- それぞれに対する角周波数)

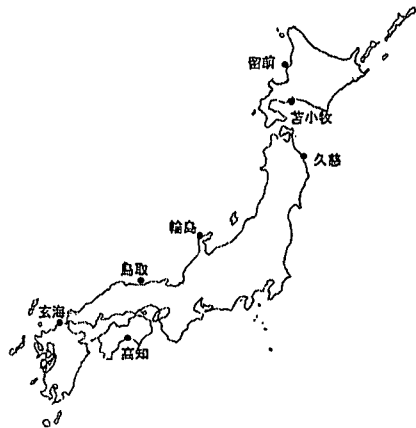


図-2 海象計設置地点

表-1 海象計による測定地点の詳細

測定地点	解析に用いたデータの期間	測定間隔	岸からの距離	設置水深	上層	中層	下層
留萌	1997.1.1~12.31	1時間	4.3 km	50 m	10 m	20 m	30 m
苫小牧	1997.1.1~12.31	1時間	4.0 km	51 m	10 m	20 m	30 m
輪島	1997.1.1~12.31	2時間	2.8 km	50 m	10 m	20 m	30 m
鳥取	1997.1.1~12.31	2時間	2.3 km	30 m	10 m	15 m	30 m
高知	1997.8.1~12.31	2時間	1.7 km	25 m	5 m	10 m	20 m

トル P_{xx} , P_{yy} およびクロススペクトル $P_{xy} = K_{xy} - iQ_{xy}$ を用いると, 反時計回りスペクトル S_- , 時計回りスペクトル S_+ および全スペクトル S は

$$S_+ = \frac{1}{4} \{ P_{xx} + P_{yy} + 2Q_{xy} \} \dots\dots\dots (6)$$

$$S_- = \frac{1}{4} \{ P_{xx} + P_{yy} - 2Q_{xy} \} \dots\dots\dots (7)$$

$$S = S_+ + S_- \dots\dots\dots (8)$$

で定義される。また, 回転係数 $C_{R\sigma}$, 平均長軸方向 ϕ_σ および楕円軸の安定性 E_σ は次式で与えられる。

$$C_{R\sigma} = \frac{S_- - S_+}{S} = \frac{-2Q_{xy}}{P_{xx} + P_{yy}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\tan 2\phi_\sigma = \frac{2K_{xy}}{P_{xx} - P_{yy}} \dots\dots\dots (10)$$

$$|E_\sigma|^2 = \frac{\{ (P_{xx} + P_{yy})^2 - 4(P_{xx}P_{yy} - K_{xy}^2) \}}{\{ (P_{xx} + P_{yy})^2 - 4Q_{xy}^2 \}} \dots\dots\dots (11)$$

以上の様に与えられる回転スペクトルの概念図を図-1に示す。時系列ベクトルが時計回りの回転運動をする場合は $C_{R\sigma} < 0$ ($S_- - S_+ < 0$) であり, 反時計回りの回転運動をする場合は $C_{R\sigma} > 0$ ($S_- - S_+ > 0$) である。直線的な往復運動をする場合は $C_{R\sigma} = 0$ ($S_- - S_+ = 0$) である。平均長軸方向は時系列ベクトルが描く楕円の長軸方向を示す。安定性は平均長軸方向の安定度であり, 安定性が小さい場合には平均長軸方向は有意なものではない。

3. 解析に用いたデータの概要

3.1 流れ

現在, 図-2に示すように全国7ヶ所に波浪観測を目的として, 超音波式水中発射型の波高・波向・流速計である海象計が設置されている。海象計は, 陸岸から約3

km, 水深約50mの海底に設置されており, 上層・中層・下層の計3層の流速を測定することが可能である(詳細は表-1参照)。今回の解析では, そのうちの留萌・苫小牧・輪島・鳥取・高知の計5地点のデータを用いた。

図-3(a)に, 流れの時系列データの一例として, 50時間の移動平均が施された鳥取沖下層のデータを示す。また, X成分中の薄細線は2時間毎の生データ, 薄太線は1ヶ月間の移動平均を施した結果である。生データから流速変動は最大40 cm/sを越えることが分かる。また, 50時間の移動平均を施した結果から流速変動は数日周期の変動であることが, 1ヶ月間の移動平均を施した結果からX方向に海流成分と思われる10 cm/sの定常流があることが分かる。さらに, 流れの変動は一方向(X方向)に強く偏っていることが分かる。ここでX方向は, 平均長軸方向が一定値を示し楕円軸が安定している $f < 0.01$ (1/hr)の範囲の平均長軸方向の平均値の方向で岸から沖に対し右方向としている。図-4, 5は各周波数に対する平均長軸方向および楕円軸の安定性を示したものである。(この時点では, 0°は東方向, 90°は北方向を示している。)また, Y方向はX方向に対して垂直で沖方向とする。この様な座標の定義は, 扱う海岸が鳥取沿岸の様な直線海岸のみならばX方向と汀線方向は良く一致するため必要とならないが, 輪島沿岸のような地形が複雑な海岸においては, 座標軸を客観的に決定する方法として非常に有効である。以下, XY座標はこの方法によって各沿岸毎に決定された座標を表している。

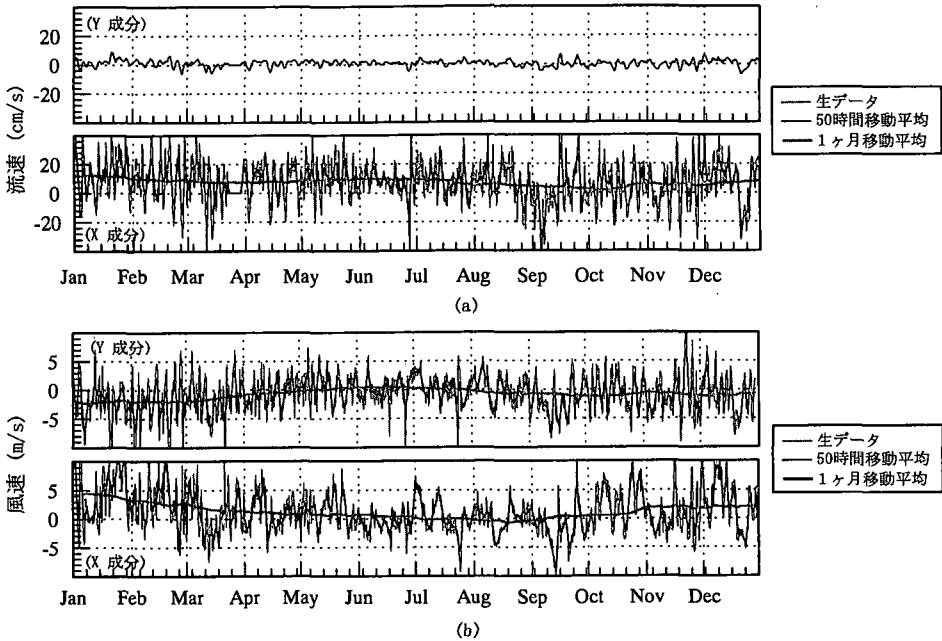


図-3 時系列データの一例，鳥取，1997年 (a)流れ(下層)，(b)風

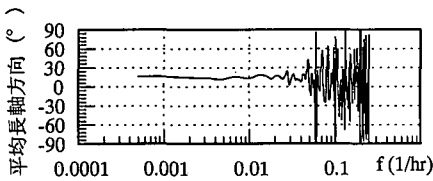


図-4 平均長軸方向(鳥取，下層，1月～3月)

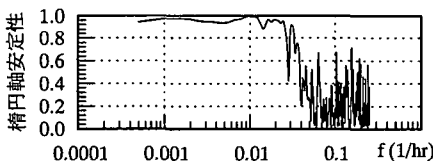


図-5 楕円軸安定性(鳥取，下層，1月～3月)

3.2 風

風は，地上観測風ではなく，地形解像度が非常に優れているECMWF(中規模範囲気象予報ヨーロッパセンター)の海上風($H=10$ m)を採用した。ECMWFは通常の地上観測風とは異なり観測地点における局所的傾向を含まないという利点を持つ。図-3(b)は鳥取沖海上風の時系列データを一例として示したものである。流れの変動と較べ，風の変動は等方的であることが分かる。また，50時間の移動平均が施された風の変動周期は流れの変動周期と比較的良く一致している。

4. 解析結果および考察

4.1 流れと風の周波数特性

図-6は，1年間のデータを10分割し，それぞれの期間に対するパワースペクトルを並べたものの一例を示したものである。パワースペクトルの算出にはMEMを用いた。MEMの次数の決定に際しては，最大を $3\sqrt{m}$ (m はデータ個数)として，FPEが最小となる次数を選択している。分割された各期間において，慣性周期以上の周期をもつ長周期変動が卓越していることが分かる。また，それぞれのスペクトル形状を比較するとピークの位置，大きさ共に異なり，非定常性が非常に強いことが分かる。

図-7は流れが卓越するX方向成分および風のパワースペクトル(周波数 0.03 (1/hr)以上)の一例を示したものである。両者のピーク周波数は大局的には一致しているものの多少のずれがある。また，ピーク周波数におけるエネルギー密度の大きさの比率もピーク周波数毎によって大きく異なっていることが分かる。

4.2 風の流れに対する寄与

そこで，流れのX成分に対し，流れのX，Y成分および風のX，Y成分が実際にどの程度寄与しているのかをMARモデルを用いて解析を行うことにする。MARモデル解析に際し，時系列データは図-6に示したとおり強い非定常性を持っていることから1ヶ月間隔に分割した。また海流等のトレンド成分は最小二乗法を用いて2次のオーダーで除去された。MARモデルの次数決定は

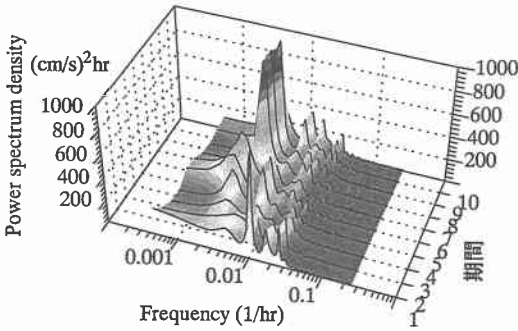


図-6 1年間のデータを10分割した各期間に対するパワースペクトルの一例(鳥取, 底層)

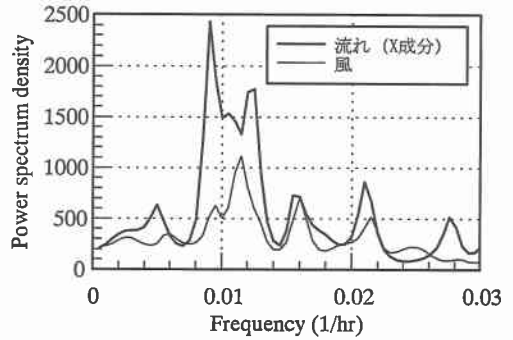


図-7 慣性周期以上のパワースペクトルの一例(輪島, 1月, 下層)(単位:流れ:(cm/s) 2 hr, 風;(m/s) 2 hr)

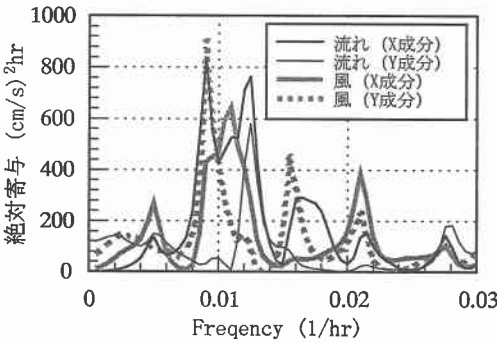


図-8 流れに対する各成分の絶対寄与。各変量の総和が図-7の流れのX成分のパワースペクトルとなる。

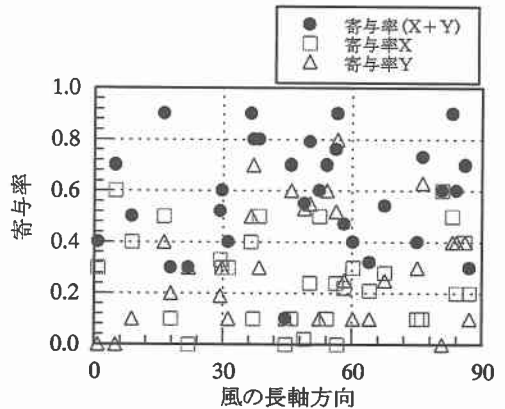


図-9 流れに対する風のノイズ寄与率と長軸方向の関係

FPE 最小を用いることにし, 最大次数は $3\sqrt{m}$ としている。

図-8は図-7に対応するデータに対して, 流れのX成分に対する各変量の絶対寄与を示したものの一例である。ここで各変量の総和が流れのX成分の全エネルギーとなる。これから, 例えば, $f=0.009$ (1/hr) においては風のY成分(岸沖方向)の寄与が大きいことが, $f=0.011$ においては風のX成分の寄与が大きいことが分かる。ピーク周波数のずれは各変量の寄与の重ね合わせの結果生じたものであることが分かる。また, 自分自身(流れ(X成分))の寄与もかなり大きいことが分かる。これは流れのX成分に対し, 流れのY成分, 風のX成分および風のY成分以外による寄与も大きいことを示している。

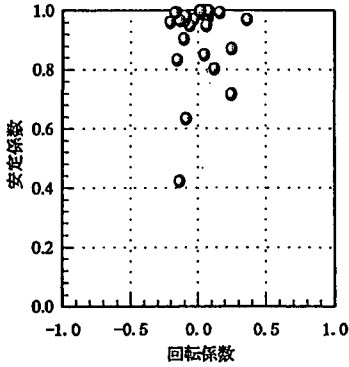
各地点, 各月の下層の流速変動に対して図-8に示す関係を求め, パワースペクトルが顕著なピークを示す周波数での風のX方向成分のノイズ寄与率, Y方向成分のノイズ寄与率および両成分のノイズ寄与率の和とそのピーク周波数における風の平均長軸方向の関係を図-9に示す。ここで両成分のノイズ寄与率の和は'風'のノイズ寄与率となる。定義では平均長軸方向は -90° から 90° まで与えられているが, 平均長軸方向が θ の風と $-\theta$ の風

の流れに与える影響は同じであるところではみなし, 0° から 90° の範囲で示している。

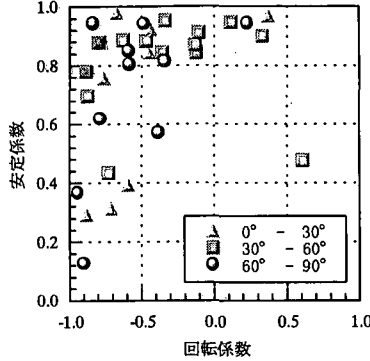
風のノイズ寄与率は, ばらつきは大きいもののおおよそ0.4から0.8の範囲であり, 風の流れに対する寄与は大きいことが分かる。風の平均長軸方向を $0^\circ\sim 30^\circ$, $30^\circ\sim 60^\circ$ および $60^\circ\sim 90^\circ$ に3分割すると, $0^\circ\sim 30^\circ$ ではX方向のノイズ寄与率が比較的に大きく, $30^\circ\sim 60^\circ$ ではY方向のノイズ寄与率が比較的に大きい。また, $60^\circ\sim 90^\circ$ ではX方向のノイズ寄与率とY方向のノイズ寄与率は同程度であることが分かる。しかしながら, 風のノイズ寄与率は風の平均長軸方向にそれほど依存しないと言える。

4.3 回転スペクトルに見る風と流れの特性

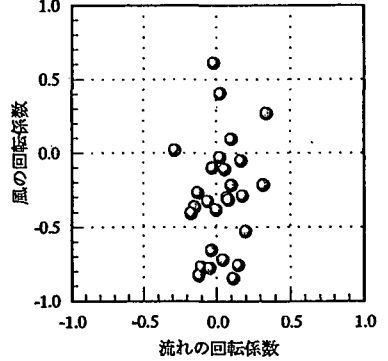
図-10は流れに対し, パワースペクトルが卓越する周波数において回転係数と安定係数を示したものである。回転方向は右回り, 左回り共に同程度発生しているものの回転係数は0に近く, 直線的な変動であることが分かる。陸棚波は沿岸域においては直線に近い時計回りの楕円運動の性格を持つ(Hsieh, 1982)ことを考慮すると, 流速変動の全ての要因が陸棚波であるとは言えないことになる。また, 図-5でも示したとおり, 流れの平均長軸



図一10 流れの安定係数と回転係数の関係



図一11 風の安定係数と回転係数の関係
(凡例は風の平均長軸方向を示す)



図一12 風の回転係数と流れの回転係数の関係

方向は非常に安定していることが分かる。

図一11は風に対して回転係数と安定係数の関係を風の平均長軸方向をパラメータとして示したものである。回転係数が0に近い場合は少なく、ほとんどは左回りの(楕)円的な変動であることが分かる。また、回転係数が0で直線的な変動に近い場合には風の長軸方向は非常に安定しているが、回転係数が-1に近づくほど風の長軸方向が不安定になる場合が多く現れる。さらに、この関係は風の平均長軸方向には依存していないことが分かる。このことが、風のノイズ寄与率が風の平均長軸方向にそれほど依存しない要因と考えられる。

図一8のところでも触れたように、流速変動のX成分に寄与する成分として、自分自身(流れのX成分)がある。これは流れのX成分に寄与する成分のうち、流れのX成分としても、風のX成分としても、また風のY成分としてもMARモデルでは説明がつかなくなったもの全ての成分の集まりである。図一12はその流れのX成分がピークをとりしかもノイズ寄与率が0.5以上である場合の周波数における、流れの回転係数と風の回転係数の関係を示したものである。図一10と比較しても流れの回転係数が正になる場合が増加していることから、X成分の寄与が卓越する周波数において流れは時計回りの傾向を示すと言える。よって、X成分の寄与の正体の一つとして陸棚波が考えられ、しかもその成分に対する風の寄与が小さいことから陸棚波のエネルギーが陸棚波固有の群速度0の周波数で集積した結果と推察される。しかしながら、計測は各地点において一点であるため位相速度を求めることができず、分散関係等を用いて確定するまでには至っていない。

5. 結 論

留萌・苫小牧・輪島・鳥取・高知の5地点それぞれの

下層部において最大流速は40 cm/sに及び、流れは慣性周期より長い周期をもつ長周期変動として卓越する。その長周期変動に与える風の寄与は非常に大きいものの、風向(風の平均長軸方向)にそれほど強くは依存しない。このことは、長周期の変動を考える上では、風については風向だけではなく風の回転係数および安定性も重要な要因として考える必要があることを示している。

参 考 文 献

- 磯田 豊・村山達郎・玉井孝昭(1992): 気象擾乱によって起こされた山陰沖大陸棚上の流速・水温変動, 沿岸海洋研究ノート, 第29巻, 第2号, pp. 197-205.
- 久保田雅久(1983): 気流沿岸域における長周期波動, 沿岸海洋研究ノート, 第21巻, 第1号, pp. 63-83.
- 佐藤慎司(1995): 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集 No. 521/II-32, 113-122, 1995. 8.
- 佐藤慎司(1996): 強風と高波により発達する沿岸域の大規模流れに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 356-360.
- 八木 宏・日向博文・灘岡和夫(1996): 非成層期における開放性沿岸域の底層流動特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 406-410.
- 八木 宏・日向博文・灘岡和夫(1997): 開放性沿岸域における成層期の水温構造と流動特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 416-420.
- 八木 宏・日向博文・緒方健太郎・灘岡和夫(1998): 長期・広域観測データに基づく鹿島灘沿岸域の大規模流動解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 421-425.
- 安田孝志・加藤 茂・岩田 宏・佐藤慎司(1996): 砕波帯沖合に流れの特性とその成因について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 366-370.
- 安田孝志・加藤 茂・十二正義・山下隆男(1997): 強風浪下の沖合い流れの3次元構造と発達機構, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 426-430.
- 柳 哲雄・磯田 豊・児玉理彦(1984): 山陰海岸の長周期波, 京大防災研究所年報, 第27号 B-2, pp. 611-620.
- Hsieh, W.W. (1982): On the detection of continental shelf waves off Oregon and Washington. J. Phys. Oceanogr., 12, 887-896.