

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.47 NO.3 September 2008

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 47 卷 第 3 号 (Vol. 47, No. 3), 2008年9月 (September 2008)

目 次 (CONTENTS)

汀線位置の長周期変動特性および汀線位置変動の変化量に及ぼす 沖波エネルギーフラックスと沿岸流速の影響鈴木崇之・栗山善昭.....	3
(Characteristics of Long-term Shoreline Change and the Effects of the Offshore Wave, the Energy Flux and Longshore Current Velocity on the Shoreline Change Rate Takayuki SUZUKI, Yoshiaki KURIYAMA)	
現地調査に適したアマモ生長量推定方法の開発細川真也・井上徹教・内藤了二・中村由行.....	31
(A New Method for the Estimation of Eelgrass-Growth Rate Shinya HOSOKAWA, Tetsunori INOUE, Ryoji NAITO, Yoshiyuki NAKAMURA)	
震央位置を利用したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測辰巳大介・富田孝史.....	55
(Real-time Tsunami Prediction Based on Inversion Method Utilizing Epicenter Daisuke TATSUMI, Takashi TOMITA)	

汀線位置の長周期変動特性および汀線位置変動の変化量に及ぼす 沖波エネルギーフラックスと沿岸流速の影響

鈴木 崇之*・栗山 善昭**

要 旨

茨城県波崎海岸における汀線位置, 沿岸流速, および鹿島港沖にて観測された沖波波浪の変動特性を把握すると共に, 1000 日以上 of 長周期成分を再合成した, 汀線位置変動の変化量, 沖波エネルギーフラックス, 沿岸流速の関係を対象海岸において観測された 15 年間のデータを用いて検討した. その結果, 汀線位置は岸沖方向に 1 年間で平均約 42 m 変動すると共に, 長期的にも 15 年の間に約 36 m 変動していたことが分かった. 汀線位置の長期変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分の長周期変動の間には, 沖波エネルギーフラックスが増加するほど汀線位置が後退する関係が見られた. また, 沿岸流速の長周期変動とも相関関係が見られ, 南向きの流れが増加するほど汀線位置が後退する関係が見られた. しかしながら, 沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分の長期的変動との間に相関関係は見られなかった. 汀線位置の長期変動の変化量と相関関係が見られた, 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸流速の長期変動は, おおむね同じ割合で, 汀線位置の長期変動の変化量に影響を与えていることが示唆された.

キーワード: 汀線位置変動の変化量, 沖波エネルギーフラックス, 沿岸流速, 現地観測

* 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チーム 研究官
** 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チームリーダー
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話: 046-844-5045 Fax: 046-841-9812 e-mail: suzuki-t@pari.go.jp

Characteristics of Long-term Shoreline Change and the Effects of the Offshore Wave, the Energy Flux and Longshore Current Velocity on the Shoreline Change Rate

Takayuki SUZUKI*
Yoshiaki KURIYAMA**

Synopsis

A 15-year data set of beach profiles, longshore current velocities near the shoreline position and offshore wave heights and periods were used to examine the characteristics of shoreline change, longshore current and offshore wave energy flux. Although the Hasaki coast is known as a stable sandy beach, the shoreline position changed on-offshore direction for several tens of meters in the long-term. Also, the frequency components lower than 0.001 Hz of them were reconstructed, and the effects of the offshore wave energy flux and the longshore current velocity on the shoreline change rate were examined. Comparing the shoreline change rate and the wave energy flux revealed that the shoreline change rate decreases when the wave energy flux increases. Moreover, the longshore current velocity has a correlation with the shoreline change rate. The shoreline change rate decreases when the southward longshore current velocity increases. However, no correlation was observed between the longshore component of the wave energy flux and the shoreline change rate. The comparisons of the wave energy flux and the longshore current velocity suggest that the shoreline change rate was influenced by both the wave energy flux and the longshore current velocity.

Key Words: shoreline change rate, wave energy flux, longshore current velocity, field measurement

* Researcher, Coastal Sediments and Processes Research Group, Coastal and Estuarine Environment Research Division, Marine Environment and Engineering Department

** Head of Group, Coastal Sediments and Processes Research Group, Coastal and Estuarine Environment Research Division, Marine Environment and Engineering Department

Nagase 3-1-1, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan
Phone : +81-46-844-5045 Fax : +81-46-841-9812 e-mail : suzuki-t@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 現地データの概要	8
2.1 地形断面測量	8
2.2 沖波波浪	9
2.3 沿岸流速	9
3. 観測データの変動特性	10
3.1 汀線位置の変動	11
3.2 沖波エネルギーフラックスの変動	13
3.3 沿岸流速の変動	15
4. 汀線位置変動の変化量, 沖波エネルギーフラックス, 沿岸流速の関係	15
4.1 汀線位置変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの関係	16
4.2 汀線位置変動の変化量と沿岸流速の関係	17
4.3 沖波エネルギーフラックスと沿岸流速の関係	18
5. おわりに	19
謝辞	20
参考文献	20
記号表	21
付録 A 月平均値を用いた各データの年毎の変動	23
付録 B 沖波波浪に関する参考図面	27
付録 C 重回帰分析解析結果	28
付録 D 波崎海岸の航空写真, および地形断面測量と沿岸流速観測の参考写真, 図	29

1. はじめに

汀線位置は、砕波帯内での波や流れの影響による底質移動に伴う地形変化により変動する。静穏時には浮遊砂よりも掃流砂の方が卓越するため、底質は岸向き移動が卓越し、汀線位置は前進する。一方、荒天時には波や流れによって浮遊した底質が中層の戻り流れによって沖に輸送されることから、汀線位置は後退する。しかしながら、近年、地球温暖化に伴う海面上昇や低気圧の暴風化による海岸侵食の加速化が懸念されている。汀線位置の変動特性や外力との関係を把握することは、汀線変動の傾向および今後の対策の検討、さらには海岸保全や海岸管理の面からも重要である。

汀線位置の変動特性は、対象となる海岸が位置する周辺地形や海象条件により大きく異なる。Larson and Kraus (1994) は、アメリカ東岸に位置するノースカロライナ州、Duck において観測された 11 年間分の地形データを用いて、海底形状の季節変動やその変化量の解析を行っている。また、Byrnes and Hiland (1995) はフロリダ州沖に位置する Cumberland 島などにおける汀線位置と地形データを用いて沿岸漂砂量と周辺地形との関係について検討している。山本ら (1999) は阿字ヶ浦海岸で観測された約 20 年間の地形測量データを解析し、汀線位置の変動特性について検討している。Różyński (2005) はポーランド海岸において汀線位置の長期変動について解析した結果、対象海岸では 7 年から 8 年、20 年強、数十年の周期をもつ沿岸方向の定常波が見られ、地域によって主要な周期変動は異なるものの、これらの変動に追従して汀線位置も長期的に変動していることを示した。田中ら (2005) は、国土地理院地形図による情報に古地図の情報も付加できることを確認し、より長期の汀線変動傾向について検討を行っている。Miller and Dean (2007) は、汀線位置の現地観測データに対して経験的固有関数解析 (Empirical Orthogonal Function Analysis : EOF 解析) を実施し、対象海岸における汀線の変動特性について検討を行っている。波崎海岸については、鈴木・栗山 (2006) により、汀線位置変動と沖波エネルギーフラックスとの関連性について検討が行われている。

また、Wijnberg and Terwindt (1995) は汀線位置の変動が波浪の影響のみではなく、沿岸域に形成されるバーにも関係していることを示唆している。さらに、Revell and Griggs (2007) は、アメリカ、カリフォルニア州サンタバーバラ周辺における 70 年間の航空写真を用いて砂浜の幅や汀線変動の検討を行い、長期間における海岸変化にはエルニーニョが重要な役割を果たしている可能性を

指摘している。加えて、漂砂の起因力となる波や流れは海岸構造物や港などの建設によって大きく変化することから、建設後に漂砂形態が変化し、地形変化と共に汀線位置も変化するケースが見られる (例えば、田中, 1983 ; Ranasinghe and Tuner, 1997 ; Pandian *et al.*, 2004)。さらに、ビデオ画像データや空中写真を用いての汀線変動の解析 (例えば、Plant and Holman, 1997 ; 黒澤・田中, 2001 ; Aarninkhof *et al.*, 2003 ; Alexander and Holman, 2004) や X バンドレーダーを用いての汀線位置やバーの変動についての解析も行われており (Takewaka, 2005)、より広範囲を対象とした研究も進められている。

短期的な汀線位置の変動予測に関しては、いくつかの算定式が提案されている。砂村 (1980) は深海での有義波高および有義波周期を用いた式を提案し、日本国内 2 ヶ所、アメリカ国内 1 ヶ所にて得られた現地データを用いた検証を行いおおむね良好な結果を得ている。加藤ら (1987a) は沖波のエネルギーフラックスを用いた式を提案し、日々の汀線位置の前進過程と後退過程を精度良く算出している。また、森・田中 (1998) は沿岸方向の地形データを用いた経験的固有関数解析により、岸沖漂砂に起因する汀線変化と沿岸方向に起因する汀線変化とに分離し、それぞれ C_3 パラメータ (Sunamura and Horikawa, 1974)、波エネルギーの沿岸方向成分との間に相関関係を見出した。さらに、この結果を用いての汀線位置変動予測では、変化の概略を得る結果を得ている。加藤ら (2006) は判別分析による短期汀線の予測を試み、定性的には 80 % 以上の予測的中率が確保できることを報告している。

しかし、これらの提案式を用いた汀線位置変動の再現期間は、長期的な変動が明確には現れない数週間から数ヶ月間となっている。そのため、より長期的な汀線位置の変動を予測するには汀線位置の長期データを解析し、その特性を把握することが必要である。Miller and Dean (2004) は一定の外力を受けて汀線位置が時間と共に平衡位置に近づくことを前提とした汀線位置予測モデルを提案し、アメリカ国内 10 地点において 2 年間から 40 年間の予測を行っている。このモデルは 3 つのパラメータを用いて誤差が最小となるように決定している。その結果、適応させた 10 地点でおおむねよい結果を示しているけれども、全体的に長周期変動の振幅がやや過小評価されている。

このように汀線位置変動の解析や数値モデルの構築が進められているものの、汀線位置の長期変動に対して 1 日毎といった詳細な長期データを用いた検討は、現地データの不足により解析はほとんど行われてこなかった。

長期的な汀線変動やそれと外力との関係を解明するためには、長期的かつ詳細なデータの解析が必要不可欠である。

そこで本研究では、太平洋に面する茨城県波崎海岸での汀線位置、沿岸流速、さらに、沖波波浪から算出した沖波エネルギーフラックスの変動特性について検討すると共に、汀線位置の変動に大きな影響を及ぼしていると考えられる、岸沖漂砂との関連性が強い沖波エネルギーフラックス、沿岸漂砂との関連性が強い汀線付近の沿岸流速による汀線位置変動への影響について、対象海岸において計測された15年間分のデータを用いて検討を行った。沖波のエネルギーフラックスについては、波向きを用いて岸沖方向成分と沿岸方向成分に分離し、それぞれ検討を行った。

2. 現地データの概要

2.1 地形断面測量

波崎海洋研究施設（以下HORSと表記、図-1、写真-1）が位置する茨城県の波崎海岸では、長さ427 mの観測栈橋に沿って、休日を除く1日1回地形断面を計測している。陸上部はスタッフとオートレベルを用いて測量し、海域部は栈橋上から質量約3 kgのレッドを降ろし、海底面から栈橋までの距離を用いて測量を行っている。なお、岸沖方向位置 (x) はHORS周辺固有の座標軸であり、沖向きを正としている（図-2）。

本研究では、取得された地形断面データのうち、1987年1月から2001年12月までの15年間分を解析に使用した。図-3 (a)、(b)はそれぞれ解析期間中の地形断面の重ね合わせに平均断面を加えたもの、および地形断面の標準偏差である。高さの基準 (D.L.) は波崎港工事基準面 (T.P. -0.687 m) であり、観測地点における朔望平均干潮面、平均海面、朔望平均満潮面はそれぞれ0.20 m, 0.65 m,

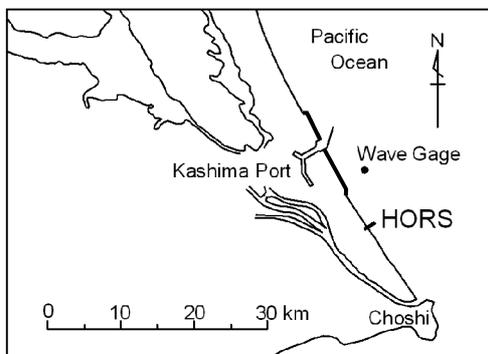


図-1 波崎海洋研究施設 (HORS) の位置



写真-1 観測栈橋全景

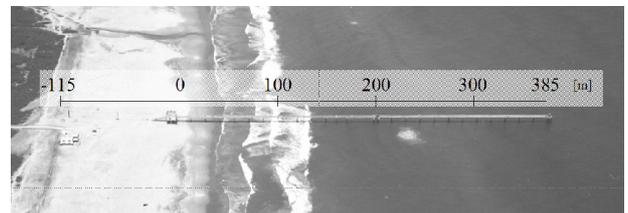


図-2 HORSでの岸沖方向座標軸

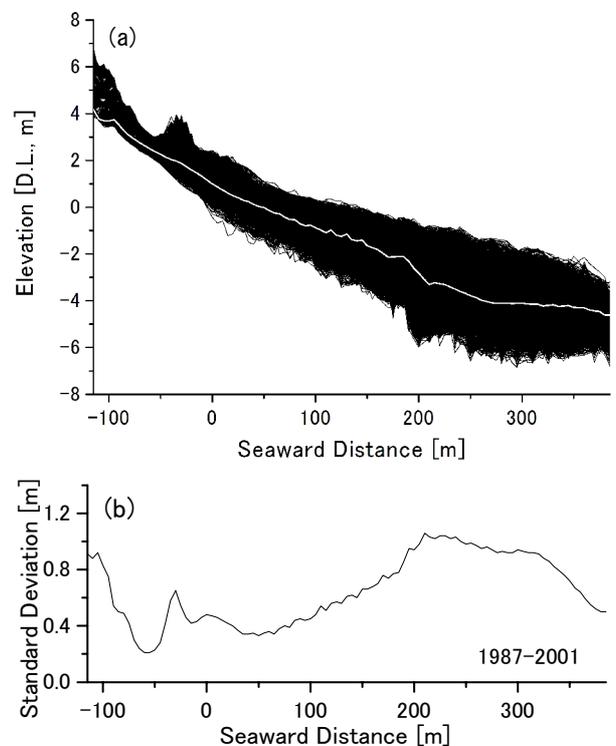


図-3 (a)解析期間中の地形断面 (D.L.基準) の重ね合わせとその平均値, (b)地形断面の標準偏差

1.25 mである。

平均地形断面の海底勾配は、汀線付近では約1:40であるものの、沖へ向かうほど緩やかになり、 $x = 300$ m付近では約1:200となっている。底質粒径は岸沖方向にほぼ一様であり、その中央粒径は0.18 mmである(加藤ら, 1990)。図中、 $x = 0$ を中心としたやや高い標準偏差は、汀線付近においてバームの形成、消失が起っているためである。 $x = -50$ mから-25 mの範囲における高い標準偏差は飛砂の影響により観測棧橋の斜路の背後に砂が堆積したことによるものである。汀線位置はこの地点よりも沖側に位置していることから、これによる解析への影響はない。また、 $x = 250$ m辺りを中心とした高い標準偏差は、バームの移動に伴う地形変化の影響である。

観測を行っている HORS の幅 3.3 m の調査作業用プラットフォームは橋脚により支持されている。そのため、この橋脚による地形形状への影響により、汀線位置が局所的にずれてしまうことが考えられるけれども、栗山(2001)により棧橋直下も含めて HORS 周辺の地形は沿岸方向にほぼ一様であることが示されていることから、本解析においても観測した地形断面データから得られる汀線位置をそのまま用いることとした。

本解析に用いる汀線位置は、解析期間中の天文潮位の平均値と汀線付近における水位上昇量の平均値を加えた地盤高を有する岸沖方向位置と定義した。天文潮位については、鹿島港内にて計測された天文潮位を波崎海岸での値に補正した値(波崎海岸 [D.L., m] = 鹿島港 [D.L., m] - 0.223 [m])の平均値(D.L. + 0.70 m)を用いた。汀線付近における水位上昇量は、柳嶋ら(1988)が対象海岸において計測された地形断面および沖波波浪観測の結果から提案した算定式を用いて推定したところ、その量は0.30 mであった。そこで、ここでは潮位の平均値に水位上昇量を加えた D.L. + 1.00 m の地盤高を有する岸沖方向位置を汀線位置と定義した。

2.2 沖波波浪

沖波の波高および周期は、鹿島港沖の水深約 24 m の地点(図-1)に設置された超音波式波高計(USW)により2時間毎に観測されている。この沖波波浪は、全国港湾海洋波情報網(NOWPHAS)の観測地点の1つとして計測されているものである(例えば、永井, 2002b)。解析期間中の平均有義波高および平均有義波周期はそれぞれ 1.34 m, 7.97 s であった。

沖波のエネルギーフラックスは、式(1)を用いて観測された2時間毎の有義波高および有義波周期を算術平均して得られた値を基に1日毎の値を算出した(例えば、

栗山ら, 2004)。

$$E_f = \frac{1}{16} \rho g (H_{1/3})_0^2 C_{g0} \quad (1)$$

ここで、 E_f は沖波エネルギーフラックス、 ρ は海水密度、 g は重力加速度、 $(H_{1/3})_0$ と C_{g0} はそれぞれ鹿島港沖にて観測された有義波高と群速度である。

鹿島港沖にて計測された波向きには多くの欠測が見られたことから、橋本ら(1999)の波浪推算法により算出された波向きを用いて、沖波エネルギーフラックスを岸沖方向成分(E_{fx} : 沖から岸への入射を正)と沿岸方向成分(E_{fy} : 北から南への入射を正)とに分離した。また、計測器の故障などによる欠測期間における沖波の有義波高および有義波周期についても、橋本ら(1999)の波浪推算法によって求めた値を使用した。

2.3 沿岸流速

HORS では、観測棧橋に沿って地形断面測量と共に約 50 m 間隔でフロート(浮き)を用いた沿岸流速の観測も休日を除く1日1回行っている。フロートに対する波や風の影響を小さくするため、観測用の直径約 20 cm のフロートの比重を海水よりもやや大きくし、それを 1 m のロープで目印ブイに取り付けたものを用いて海面より約 1 m 下方の沿岸流速を測定した。観測では、棧橋直下へフロートを投入し、目印ブイに取り付けた長さ 30 m のロープが張るまでの時間を測定すると共に、フロートが流れた方向の角度を分度器で測定した。各測定地点において3回計測を行い、その平均値を観測値とした。

本方法による沿岸流速値の精度については、Kuriyamaら(2008)により電磁流速計による観測結果(V)と本方法による観測結果(V_{Float})との比較が行われており、両者の相関係数は0.97、標準偏差は0.086 m/sであり、また、標準誤差(σ/\sqrt{N} : σ は標準偏差、 N はデータ数であり5473個)は0.0012 m/sであることが示されている。以上より、フロートによる沿岸流速の観測は簡単な方法であるけれども、精度良く沿岸流速を測定できることが確認されている。式(2)は栗山ら(1992)によって得られた、フロートによる沿岸流速の観測値(V_{Float})を真の沿岸流速値(V)に変換する式である。以下の解析では、式(2)によって変換された流速値を用いる。

$$V = 0.81 V_{Float} \quad (2)$$

沿岸流速の座標軸は、沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分(E_{fy})のそれと同様に北から南に向う流れを正とした。汀線変化に寄与すると考えられる、沿岸流速による底質移動は汀線近傍での流れの影響が最も大きいと考えられる。HORSでは、今回解析に用いるデータの計

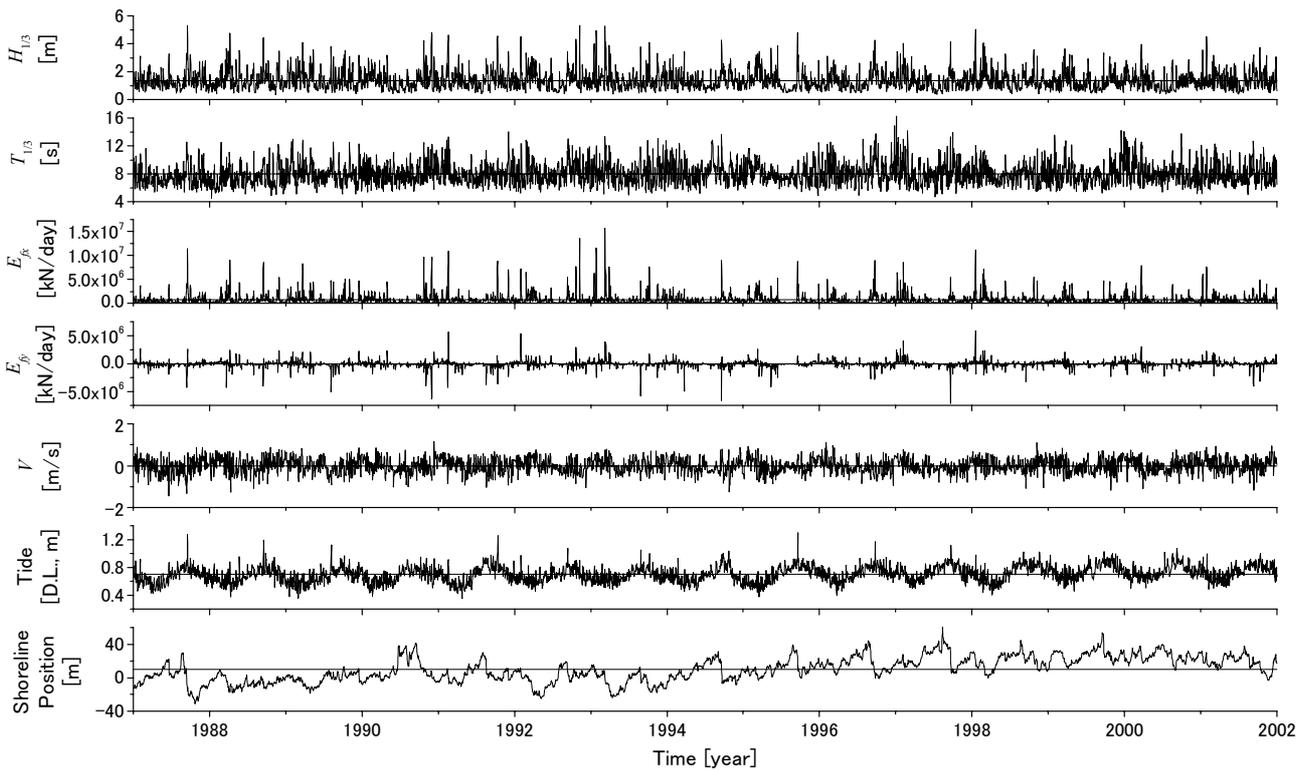


図-4 解析期間中の沖波有義波高 ($H_{1/3}$), 沖波有義波周期 ($T_{1/3}$), 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{fx}) と沿岸方向成分 (E_{fy}), 沿岸流速 (V), 潮位, 汀線位置の変動

測点 ($x = 115 \text{ m}$) より岸側においても沿岸流速の観測を行っている. しかし, これらの観測地点は潮位や地形形状によっては汀線位置よりも岸側に位置し, 欠測期間を有している場合があることから, 解析には $x = 115 \text{ m}$ で観測されたデータを使用することとした.

3. 観測データの変動特性

始めに, 解析を行った1987年1月から2001年12月までの沖波有義波高 ($H_{1/3}$), 沖波有義波周期 ($T_{1/3}$), 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{fx}) と沿岸方向成分 (E_{fy}), 沿岸流速 (V), 潮位, 汀線位置の日平均の変動を 図-4 に示す. また, 表-1 にはそれぞれの平均値, 最大値, 最小値および標準偏差を示す. 図-4 の各グラフに示した直線はそれぞれの平均値である.

沖波エネルギーフラックスについては, 式 (1) で示したように沖波有義波高の2乗を用いることから, 波の主方向の成分である岸沖方向成分の変動は有義波高の変動と類似している.

HORS 周辺の汀線位置は, HORS が位置している地点から北に 4.25 km の地点に1964年から1974年までに建

表-1 解析期間中の沖波有義波高 ($H_{1/3}$), 沖波有義波周期 ($T_{1/3}$), 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{fx}) と沿岸方向成分 (E_{fy}), 沿岸流速 (V), 潮位, 汀線位置の平均値, 最大値, 最小値および標準偏差

	平均値	最大値	最小値	標準偏差
$H_{1/3}$ [m]	1.34	5.32	0.35	0.65
$T_{1/3}$ [s]	7.97	16.26	4.53	1.50
E_{fx} [kN/day]	7.48×10^5	1.57×10^7	1.18×10^4	1.09×10^6
E_{fy} [kN/day]	-6.21×10^4	5.85×10^6	-7.12×10^6	5.84×10^5
V [m/s]	-0.009	1.16	-1.46	0.33
潮位 [D.L., m]	0.70	1.30	0.35	0.11
汀線位置 [m]	10.1	60.5	-31.0	14.7

設された鹿島港南海浜の埋め立て護岸, および1965年から1972年にかけて行われた南海浜護岸沖への土砂投棄の影響により1979年までに建設以前と比べて約50m前

進した(加藤ら, 1987b). しかし, この鹿島港南海浜護岸建設の影響による地形変化は, 加藤ら(1987b)にもあるように1980年の時点で見られなくなっていることから, 今回解析に用いたデータの初年(1987年)の段階で安定していたと考えて良い.

潮位については, その変動をスペクトル解析した結果, 1年周期の変動が卓越しており, 3年から5年の長周期変動成分のエネルギー値は小さく, ピークも見られなかった. ただし, 15年間に潮位は約10 cm上昇しており(0.71 cm/年), 汀線付近の斜面勾配がおよそ1/40であることから, 汀線位置には岸沖方向に約4 mの差が表れることになる. しかし, 地形変化に伴う汀線位置の変動に比べると, この潮位上昇による変動は小さく, また, 汀線位置の決定の際には平均潮位を用いていることから, 全体として潮位の上昇に伴う汀線位置への影響はさらに小さくなる. ゆえに, 本解析では潮位による汀線変動への影響は小さいと判断し, これを用いた検討は行わないこととした.

以上より, 本研究では, 汀線位置, 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸方向成分, および沿岸流速の変動について, それぞれの変動特性について検討すると共に, 汀線位置変動の変化量に対する沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸方向成分, および沿岸流速の影響について検討した.

3.1 汀線位置の変動

汀線位置の周期変動特性を把握するために, 15年間の汀線位置変動のスペクトル解析を行った. スペクトル解析にはFFT法(Fast Fourier Transform)を用い, 演算数を 2^n に合わせるため, 実際のデータ(5479個)にゼロ値を所定個数合わせ, 実際のデータ以上となる $n=14$ (16384

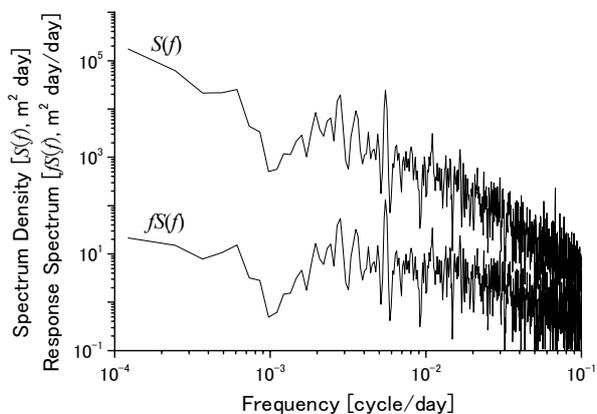


図-5 汀線位置変動のパワースペクトルと応答スペクトル ($fS(f)$)

個)として計算を行った. データ数としては8192個の利用も可能であるけれども, 長周期変動を出力する際に両端部のデータが欠落してしまうことから16384個とした. ゼロ値を加えることで求められる周波数間隔が短くなるけれども, 非ゼロ区間の長さは変わらないことから結果に変わりはない(例えば, 日野, 1977). しかし, ゼロ値の追加により全体のエネルギーレベルが低下してしまうため(例えば, 合田, 1990), エネルギーレベルを上げる補正が必要となるが, ここでは相対的にどの周波数にピークがあるかを検討するため補正は行わないこととした. 休日の汀線位置については, 前後日の値を用いて線形補間した値を用いることとし, フィルターには三角フィルター, 平滑化本数は5本とした.

図-5に汀線位置変動のパワースペクトルを示すと共に, 支配的な周波数帯を得るために地震学などで用いられている概念であるスペクトル密度に周波数を乗じた応答スペクトルを併せて示す(例えば, 永井, 2002a). 汀線位置の変動は応答スペクトルの形状からも分かる通り, 6ヶ月周期(0.00549 cycle/day), 9ヶ月周期(0.00391 cycle/day), 1年周期(0.00281 cycle/day)にピークを持っていた. また, 1000日以上周期帯においても大きなエネルギーを有し, 4.5年周期(0.00061 cycle/day)においてもやや高い値を示していた. さらに, より長期の変動も有しているけれども, これは解析期間である15年以上の周期変動によるものと考えられる.

ここで, 永井(2002a)と同様に, 周期帯毎の変動成分の大きさを表記するために, 波浪におけるスペクトル情報の表示法に用いられている周期帯換算有義波高が次式で定義されていることに倣い, 以下の式を用いて周期帯毎の汀線位置変動有義振幅(y_m)を求めた.

$$y_m = 4.004 \left(\int S(f) df \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここに, $S(f)$ はスペクトル密度, f は周波数である. また, 式(3)の積分範囲は定義される周波数帯の範囲である. ここで算出される値は, 汀線位置変動と同じ次元(単位)のメートルである. 計算の結果, 周波数範囲 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cycle/day, $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cycle/day, $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cycle/dayでの値はそれぞれ21.0 m, 19.3 m, 10.8 mであった. 波崎海岸は堆積と侵食を繰り返しながらもその汀線位置は比較的安定した砂浜海岸であると認識されていたけれども(例えば, 加藤ら, 1987b), 1000日以上長周期変動が, スペクトル密度のピーク値を有する100日から1000日周期の変動帯と同等の変動量を有していることがわかった.

本研究では, 解析期間内に3波から5波程度見られる変動周期(3年から5年周期程度)に着目しており, また, 汀

線位置変動のスペクトル解析より、1000日周期はスペクトルの谷であったことから、ここでは1000日周期を境としてそれ以上の周期成分を再合成したものを長周期変動と定義して検討を行う。

まず始めに、対象海岸における汀線位置の1年間の変動（季節変動）を把握するために、15年間分の汀線位置の変動を重ね合わせたものを図-6(a)に示す。ここでは、季節変動に着目するため1000日以下の周期成分を再合成したものを使用している。細線はそれぞれ各年の1年間の変動を示し、太線はその平均値（季節変動）である。なお、縦軸は岸沖方向位置である。また、図-6(b)には汀線変動の標準偏差を示す。標準偏差の平均値は7.85 mであった（図中破線）。汀線位置は、1年の間に約20 m岸沖方向に変動しており、その変動はおおむね次のような傾向を示している。

1月から2月にかけての汀線位置は、各年により沖側または岸側への変動が見られるけれども、その平均値に着目するとほぼ一定である。2月下旬から4月上旬にかけてすべての年に見られる汀線位置の後退は、低気圧によって発生する高波浪が原因であると考えられる。この時の標準偏差はおおむねその平均値以下であることから、解析期間を通じて汀線の後退が発生していた時期であるといえる。4月以後8月にかけては、高波浪が来襲する頻度が低いため汀線位置は徐々に前進するけれども、8月下旬から9月下旬にかけては再び大きく後退する。この汀線の後退は台風の来襲による高波浪が原因である。この高波

浪による汀線の後退は、台風の来襲に大きく依存するため、この時期の標準偏差は大きな値を示している。その後、12月下旬にかけて汀線位置は僅かではあるが前進している。

続いて、汀線位置の長周期変動特性を検討するために、汀線位置変動の1000日以上長周期成分を再合成したものを生データから算出した年平均値と共に図-7(b)に示す。年平均値の変動は、長周期変動と良く一致している

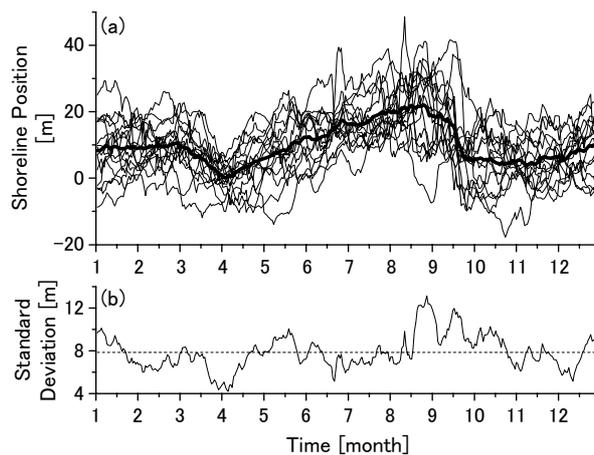


図-6 (a) 各年の汀線位置の1年間の変動（細線）およびその平均値（季節変動、太線）、(b) 汀線位置変動の標準偏差

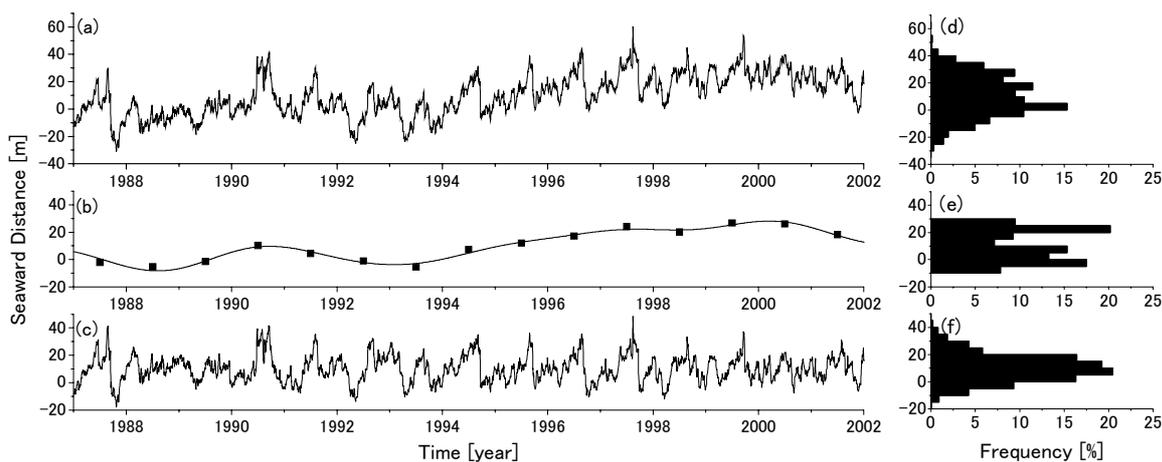


図-7 汀線位置変動と汀線位置の頻度分布、(a) 汀線位置変動の生データ、(b) 1000日以上長周期成分を再合成した汀線位置変動と生データから算出した年平均値、(c) 1000日以下の周期成分を再合成した汀線位置変動、(d) 汀線位置変動の生データの頻度分布、(e) 1000日以上長周期成分を再合成した汀線位置変動の頻度分布、(f) 1000日以下の周期成分を再合成した汀線位置変動の頻度分布

ことがわかる。図-7(a)は15年間の汀線位置変動の生データであり、図-7(c)は1000日以下の周期成分を再合成した汀線位置変動である。また、それぞれの変動における汀線の岸沖方向位置の頻度分布を汀線位置変動図の右側に示す(図-7(d), (e), (f))。生データの変動, 1000日以上および1000日以下の周期成分を再合成した変動の標準偏差はそれぞれ14.7 m, 11.1 m, 9.6 mであった。1000日以上の上長周期成分を再合成した汀線位置(図-7(b))およびその頻度分布(図-7(e))より、汀線位置は1995年あたりを挟んでそれ以前と以後の2つに大きく区分できることがわかる。汀線位置は1994年から一時的に汀線位置の変動が停滞する1997年あたりにかけて継続的に前進することにより、1997年以後の汀線位置は1994年以前のそれに比べて20 m程度前進している。汀線位置はその後2000年をピークとしてやや後退している。

1999年に行われた海岸法の改正により、砂浜も海岸管理者が、消波等の海岸を防護する機能を維持するために設けたもので、指定したものに限っては海岸保全施設として取り扱われることとなった(海岸法第二条)。したがって、砂浜幅についても利用面、環境面、防護面を考慮する必要がある。まず、利用面については海水浴場等の成立条件として30 m以上(海洋性観光地計画の手びき, 1987)、また、環境面では、加藤ら(2001)が海浜植物の生息環境から検討を行い、太平洋に面した緩勾配の砂浜では最低でも20 mを必要としている。防護面では砂浜に消波機能を期待し、背後地に越波が生じない幅が必要となる。対象海岸では、1000日以下の汀線位置変動(図-7(c))での年最大岸沖変動幅の平均値は41.6 mであるけれども、この変動に1000日以上の上長周期変動幅(36.4 m)が加わることも考慮すると、その変動幅は78.0 mとなり、その変動幅は約1.9倍となる。

現在の対象海岸の砂浜幅は100 m以上有しており、これらの条件を満たしているけれども、人工海浜や他の砂浜海岸において設計等の検討を行う際には、短期だけでなく数年以上の長周期変動の効果も含めてこれらを検討する必要があることを示唆している。

3.2 沖波エネルギーフラックスの変動

鹿島港沖にて観測された沖波波浪を用いて算出した沖波エネルギーフラックスの各方向成分の変動から、パワースペクトルを算出した。図-8(a), (b)にそれぞれ岸沖方向成分(E_{fx})および沿岸方向成分(E_{fy})の結果を示す。

両者共に6ヶ月周期(0.00549 cycle/day)と1年周期(0.00269 cycle/day)にピークを有していた。しかし、500

日周期(0.002 cycle/day)から1000日周期(0.001 cycle/day)の範囲において、岸沖方向成分はピークを有しているけれども、沿岸方向成分はほとんどエネルギーを有しておらず、その変動特性は大きく異なっていた。1000日以上の上長周期帯においては、6ヶ月周期や1年周期ほどのエネルギーは有していないけれども、岸沖方向成分については4.5年周期(0.00061 cycle/day)、沿岸方向成分については3.7年周期(0.00073 cycle/day)に弱いピークを有していた。両者共に、さらに長期の変動も見られるけれども、これは汀線位置変動と同様、解析期間以上の長期変動によるものと考えられる。

始めに、解析に用いた15年間の沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分(E_{fx})および沿岸方向成分(E_{fy})から算出した季節変動と変動の標準偏差をそれぞれ図-9(a), (b)、図-10(a), (b)に示す。両図は同一のスケールで記載している。ただし、季節変動は汀線位置変動のそれと同様に、1000日以上の上長周期変動を除去した各年の1年間の変動を平均して算出した。

図-9(a)より、岸沖方向成分は2月下旬から3月および8月から9月にかけて特に高いピークが見られる。これらはそれぞれ低気圧および台風の影響によるものである。この両時期においては、標準偏差も特に大きな値を示している。図-6(a)の汀線変化の季節変動と比較すると、汀線位置は主にこの両時期に後退していたことがわかる。また、5月から9月にかけては、他の月に比べると沖波エネルギーフラックスの値は小さく、さらに、標準偏差も小さいことから、この期間はおおむね静穏な波浪状況

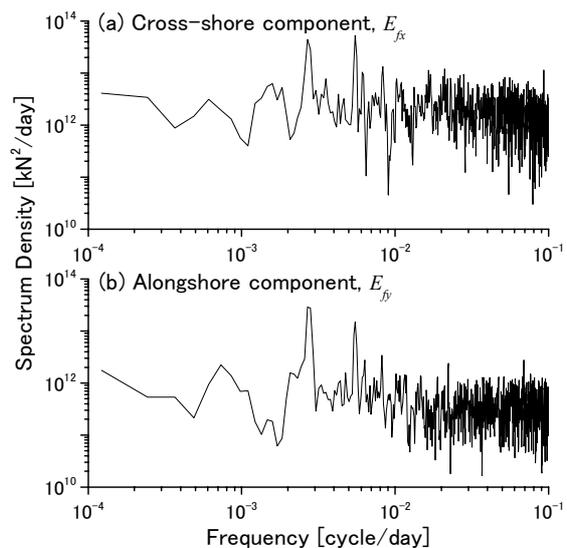


図-8 沖波エネルギーフラックスのパワースペクトル、(a)岸沖方向成分(E_{fx})、(b)沿岸方向成分(E_{fy})

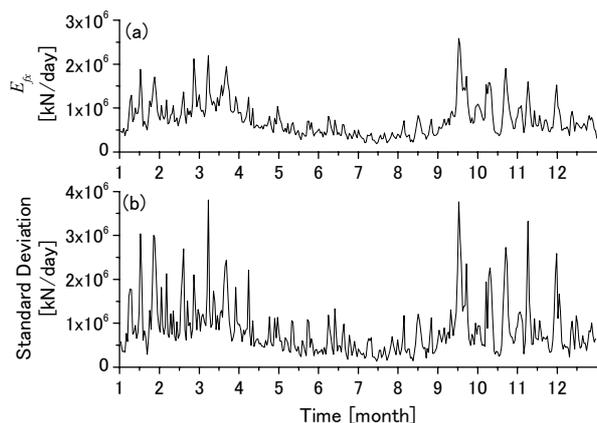


図-9 (a) 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{fx}) の季節変動, (b) 変動の標準偏差

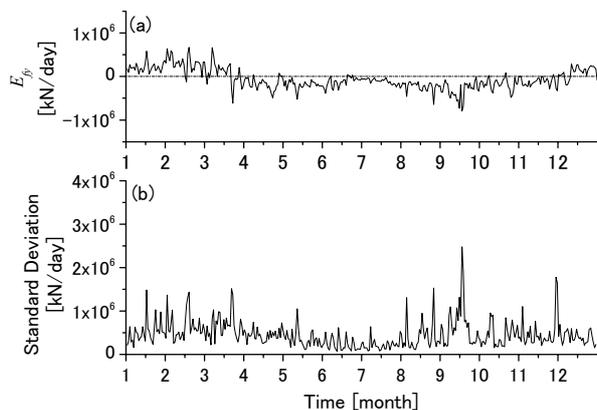


図-10 (a) 沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分 (E_{fy}) の季節変動, (b) 変動の標準偏差

が続いていたと判断できる。

沿岸方向成分の季節変動を見ると(図-10(a)), 岸沖方向成分の変動とは異なり季節変動の平均値の変動は小さく, また, 標準偏差も小さい。季節変動に着目すると, 1月から3月の南向きの波浪とは異なり, 9月あたりの波浪は逆方向(北向きの流れ)へと変化する。これは, 1月から3月に発生する低気圧は主に北からの高波浪を発生させるのに対し, 9月に発生する台風は南からの高波浪を発生させるためと考えられる。標準偏差の変動を見ると, 岸沖方向成分ほどの大きさは有していないけれども, 同様に1月から4月, 8月から12月までは他の月と比べやや高い値を示している。

次に, 1000日以上 of 長周期成分を再合成した沖波エネルギーフラックスの変動特性について検討を行った。図

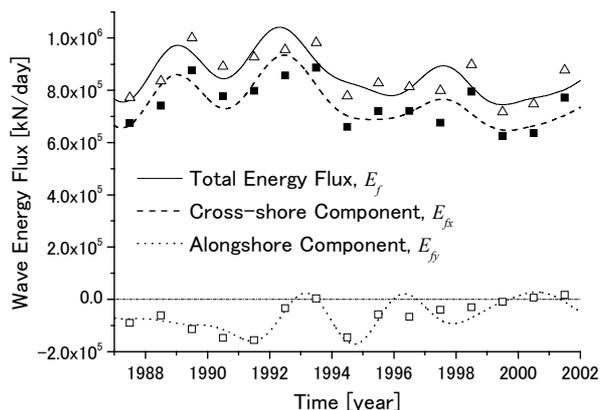


図-11 1000 日以上 of 長周期成分を再合成した変動と生データから算出した年平均値; 沖波エネルギーフラックス (E_f : 実線, 白三角), 岸沖方向成分 (E_{fx} : 破線, 黒四角), 沿岸方向成分 (E_{fy} : 点線, 白四角) の変動

-11 に沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{fx}) と沿岸方向成分 (E_{fy}), 分離する前の沖波エネルギーフラックスの長周期変動 (E_p), およびそれぞれの生データから算出した年平均値の変動を示す。岸沖方向成分と沿岸方向成分の長周期変動の平均値は 7.49×10^5 kN/day, -6.22×10^4 kN/day であり, 分離する前の沖波エネルギーフラックスの長周期変動の平均値は 8.56×10^5 kN/day である。それぞれの年平均値の変動は, それぞれの長期変動とややずれている年があるけれども, 全体を通しては良く一致している。

岸沖方向成分は全沖波エネルギーフラックスとほぼ同一の変動を示し, そのエネルギーフラックスは全体の約9割であった。1994年以後の沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分は, それ以前と比べて減少しており, 1994年以後の平均値はそれ以前の平均値に比べ約13%減少していた。沿岸方向成分に関しては, 1994年以前は変動を伴いながらも北向きのエネルギーフラックス ($E_{fy} < 0.0$) が支配的であったけれども, 1994年以後その傾向は弱まっていた。

図より, 岸沖方向成分は常に正の値を示し, 春先と秋のピークを持つ変動をしているのに対し, 沿岸方向成分は岸沖方向成分と同時期にピークを有するものの, その値は正と負を取り変動している。したがって, 岸沖方向成分の長周期変動は春先と秋に来襲する高波浪の強弱によって支配されるのに対し, 沿岸方向成分の長周期変動は高波浪の強弱に加え, 波浪の来襲方向によっても支配されることとなる。

3.3 沿岸流速の変動

15年間分の沿岸流速変動を用いて算出したパワースペクトルを図-12に示す。ここでも、休日の沿岸流速値については、地形断面データの処理と同様に線形補間により算出した値を用いた。図より、1年周期(0.00269 cycle/day)、6ヶ月周期(0.00549 cycle/day)に高いピークを持つと共に、長周期変動域においても約1000日周期(0.0011 cycle/day)やそれ以上の周期変動にも弱いピークがみられた。

汀線位置変動や沖波エネルギーフラックスの解析時と同様に、15年間分の沿岸流速を用いて算出した季節変動および変動の標準偏差をそれぞれ図-13(a), (b)に示す。ただし、1000日以上 of 長周期変動は除去している。季節変動の平均値は-0.09 m/sであり、標準偏差の平均値は0.30 mであった。図-13(a)より12月から3月にかけては南向きの流れ($V > 0.0$)が支配的であり、それ以外の月では5, 6月および9月に南向きの流れとなる場合があるけれども、おおむね北向きの流れ($V < 0.0$)が支配的であった。ここで、標準偏差の変動に着目すると、3月及び9月に平均値よりやや高い値が続くものの、沖波エネルギーフラックスのそれと比較すると1年を通しての変動幅は小さい。

次に、1000日以上 of 長周期成分を再合成した沿岸流速の変動を生データから算出した年平均値と共に図-14に示す。年平均値は長期変動とややずれている年があるけれども、全体を通しては良く一致している。図は沿岸流速の長周期変動を示していることから、流速値としては小さい値を示しているけれども、日々の観測では底質が十分移動可能な流速値が計測されている。長期的な沿岸流速変動に伴う汀線位置変動を考える際には、底質の沿岸方向の移動方向を決定させる沿岸流速の符号が正(南向き)であるか負(北向き)であるかが重要となる。図より、長期的には0を挟んで南向き($V > 0.0$)と北向き($V < 0.0$)の流れの卓越する時期が交互に表れているけれども、汀線が大きく前進した1994年から1997年にかけても含め、北向きの流れが支配的であった。汀線付近では北向きの流れが支配的であることは、栗山ら(2005)による沿岸流速の累積値からも示されている。

4. 汀線位置変動の変化量, 沖波エネルギーフラックス, 沿岸流速の関係

沖波エネルギーフラックスや沿岸流速による汀線位置の変動への影響を考える際には、汀線位置変動の時間微分から算出される変化量(汀線位置変動の変化量)との

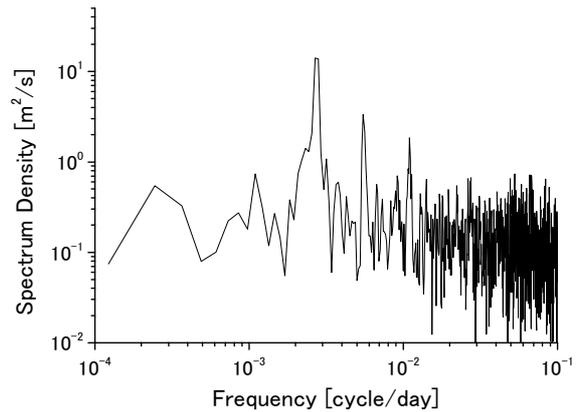


図-12 沿岸流速変動のパワースペクトル

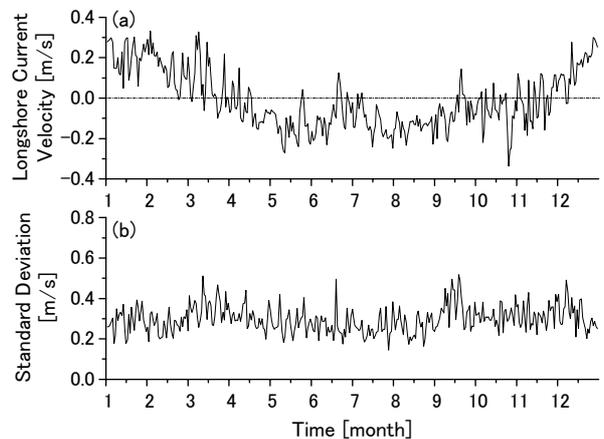


図-13 (a) 沿岸流速の季節変動, (b) 変動の標準偏差

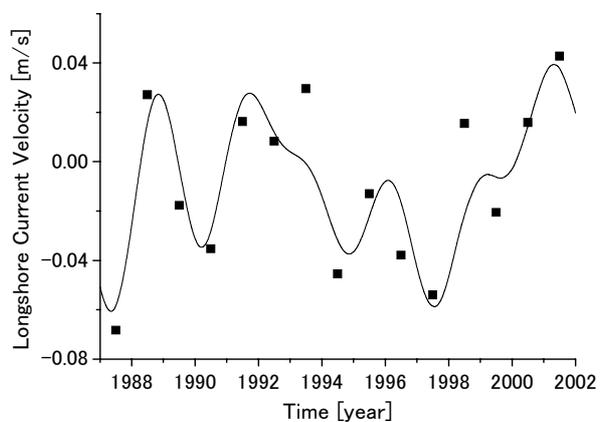


図-14 沿岸流速の1000日以上 of 長周期成分を再合成した変動と生データから算出した年平均値

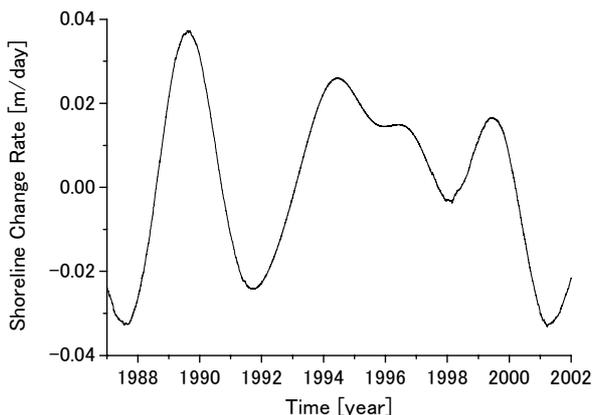


図-15 1000 日以上の長周期成分を再合成した汀線位置変動の変化量

関係を検討する必要がある。

始めに、1000 日以上 of 長周期成分を再合成した汀線位置変動の変化量を図-15 に示す。汀線位置変動の変化量は周期的に変動しているけれども、汀線が大幅に前進した 1994 年から 1997 年にかけての変動は小さく、徐々に減少しながら常に正の値を示していた。

本章においては 1000 日以上 of 長周期成分を再合成した長周期変動を用いて、汀線位置変動の変化量、沖波エネルギーフラックス、沿岸流速の関係について検討を行う。

4.1 汀線位置変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの関係

1000 日以上 of 長周期成分を再合成した汀線位置変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{fs})、沿岸方向成分 (E_{fl}) とのクロススペクトルをそれぞれ図-16, 17 に示す。このクロススペクトル解析の際もスペクトル解析時と同様の条件で行った。解析期間以上の変動周期である 0.0001 cycle/day あたりの精度についてはやや落ちている可能性が考えられるけれども、全データ長に数波見られる数年周期変動の周波数帯でのコヒーレンスや位相関係については妥当な結果が得られていると考えられる。

図より、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分は汀線位置変動の変化量と同一の周波数変動 (4.5 年周期, 0.00061 cycle/day) にピークを有し、沿岸方向成分については汀線位置変動の変化量のピーク周期よりもやや短い周期 (3.7 年周期, 0.00073 cycle/day) にピークを有していた。また、コヒーレンスについては、汀線位置変動の変化量と岸沖方向成分との関係の方が沿岸方向成分との関

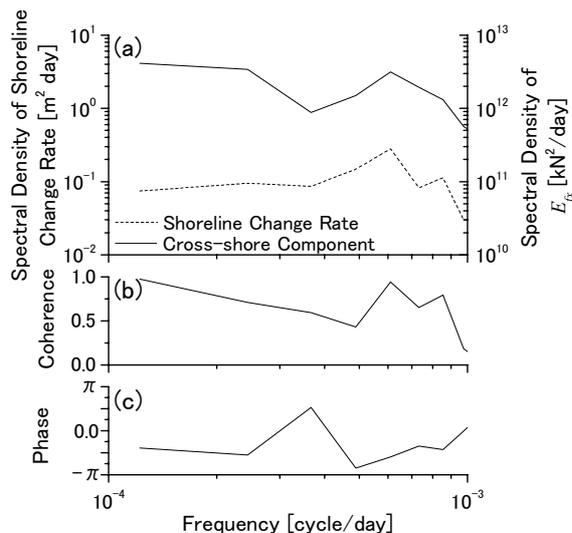


図-16 汀線位置変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分とのクロススペクトル, (a) パワースペクトル, (b) コヒーレンス, (c) 位相

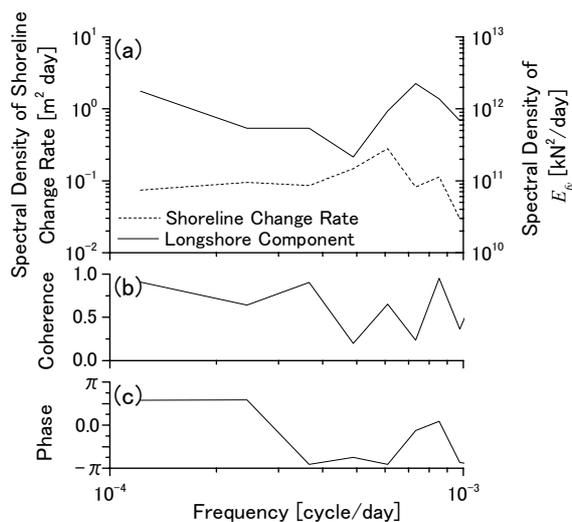


図-17 汀線位置変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分とのクロススペクトル, (a) パワースペクトル, (b) コヒーレンス, (c) 位相

係よりもおおむね高い値を示している。汀線位置変動の変化量と岸沖方向成分の間には、 $-\pi/2$ 程度の位相のずれが見られる。短期的な汀線位置の変動では、風波による高波浪の来襲前にうねりによる長周期波が来襲することにより、波浪のピークよりも前に汀線が後退することが報告されているけれども (加藤ら, 1989), この長周期変動における位相差の原因は現時点では不明である。

次に、汀線位置変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの相関関係について検討を行った。図-18に1000日以上の長周期成分を再合成した、岸沖方向成分 (E_{β}) と汀線位置変動の変化量の関係を示す。ただし、長周期変動データの両端部については、その精度がやや低下することから、ここでは両端部から全データ長の1/10のデータを省いて検討を行った。また、1000日以上の周期帯を検討していることから、その変動が十分に判断できると考えられる1000日の1/8となる125日(約4ヶ月)間隔でデータをプロットした。以後示す1000日以上の長周期成分を用いた相関関係図についても同様の処理を行った。

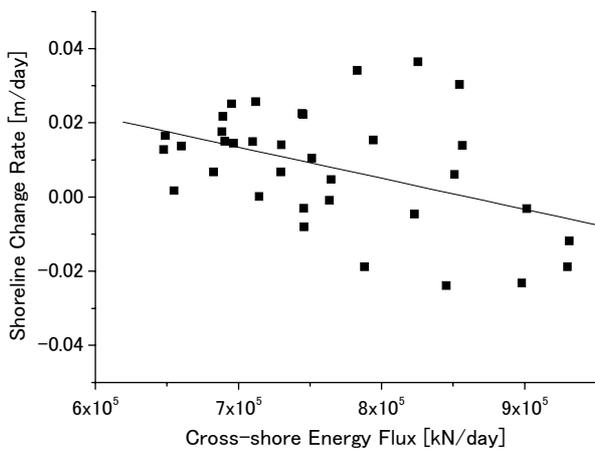


図-18 1000日以上の長周期成分を再合成した、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{β}) と汀線位置変動の変化量との関係

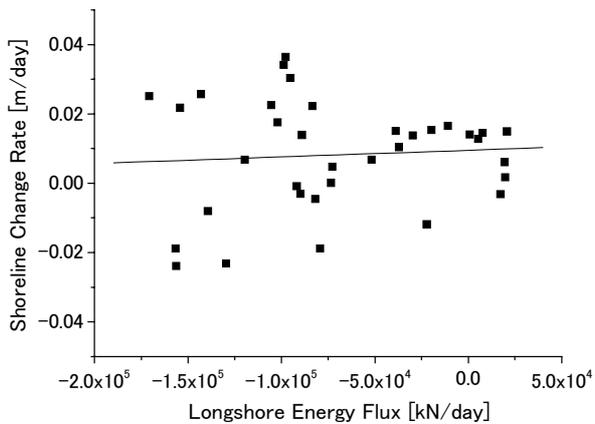


図-19 1000日以上の長周期成分を再合成した、沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分 (E_{β}) と汀線位置変動の変化量との関係

両者の間には負の相関関係が見られ ($R = -0.44$, $p = 0.009$), 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分が増加するほど汀線位置変動の変化量は負の方向、つまり、汀線が後退する関係が見られた。

$$\frac{dy_s}{dt} = -8.38 \times 10^{-8} E_{\beta} + 0.0721 \quad (4)$$

ここで、 y_s は汀線位置、 t は時間である。ここでは両者の関係性についてのみ検討していることから、線形近似を用いることとした。短期的な汀線位置変動と沖波エネルギーフラックスの関係を検討した加藤ら(1987a)の結果も踏まえると、対象海岸においては沖波エネルギーフラックスの約90%を占める岸沖方向成分が、短期的な汀線位置変動だけではなく、数年周期以上の長期的な汀線位置変動に対しても影響、すなわち、岸沖方向成分が増加すると共に汀線が後退する関係にあることがわかった。汀線位置変動の変化量が0.0 m/dayの時の沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分は 8.60×10^5 kN/dayである。

さらに、沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分と汀線位置変動の変化量の間についても岸沖方向成分の際と同様の解析を行ったけれども、両者の間に相関関係はみられなかった(図-19, $R = 0.07$)。つまり、対象海岸において沖波エネルギーフラックスの10%程度を占める沿岸方向成分は、長期の汀線位置変動の変化量に対してほとんど影響を与えていないと言える。

4.2 汀線位置変動の変化量と沿岸流速の関係

次に、1000日以上の長周期成分を再合成した汀線位置変動の変化量と沿岸流速の関係について検討を行った。図-20に両者のクロススペクトルを示す。図より、汀線位置変動の変化量と沿岸流速との間にはおおむね逆位相の相関関係が見られる。また、コヒーレンスについては汀線位置変動のパワースペクトルのピーク位置あたりにおいてやや減少するけれども、おおむね0.6以上の値を示している。

図-21に1000日以上の長周期成分を再合成した、沿岸流速と汀線位置変動の変化量の間を示す。ここでも沖波エネルギーフラックスの解析時と同様に線形近似を用いることとした。両者の間には負の相関関係、つまり、北向きの流れ ($V < 0.0$) が強くなるに従い汀線は前進し、南向きの流れ ($V > 0.0$) と共にそれは後退する傾向が見られた ($R = -0.41$, $p = 0.015$)。汀線位置変動の変化量が0.0 m/dayの時の沿岸流速は0.018 m/sである。

$$\frac{dy_s}{dt} = -0.278V + 0.00506 \quad (5)$$

以上より、汀線位置の1000日以上となる長周期変動の

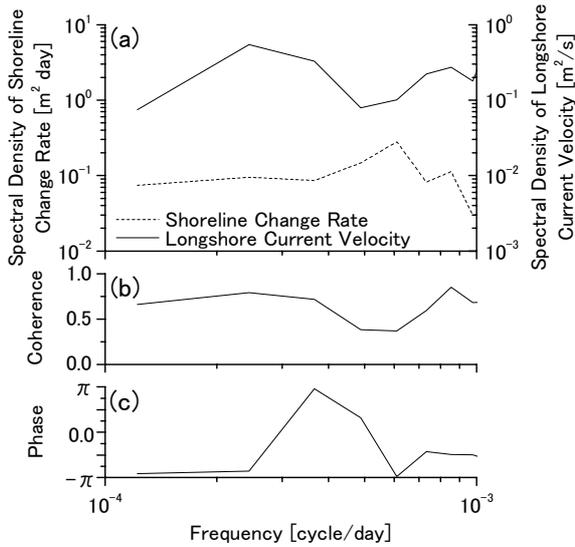


図-20 汀線位置変動の変化量と沿岸流速のクロススペクトル, (a) パワースペクトル, (b) コヒーレンス, (c) 位相

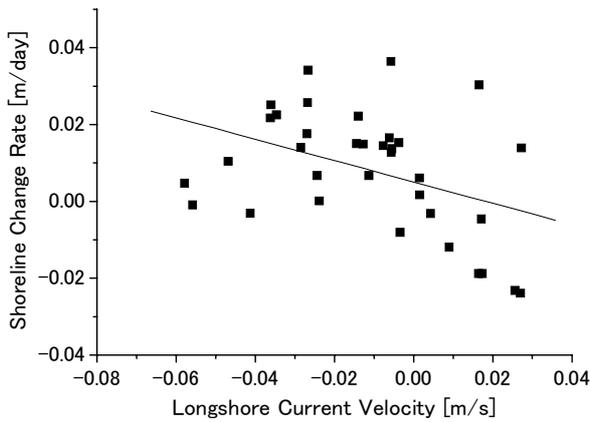


図-21 1000 日以上の長周期成分を再合成した, 沿岸流速と汀線位置変動の変化量との関係

変化量は, 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分, および汀線近傍の沿岸流速との相関が高いことがわかった.

4.3 沖波エネルギーフラックスと沿岸流速の関係

最後に, 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分, 沿岸方向成分と沿岸流速との関係について検討を行う.

始めに, 1000 日以上 of 長周期成分を再合成した, 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{Rc}) および沿岸方向成分 (E_{Rl}) と沿岸流速の関係をそれぞれ図-22, 23

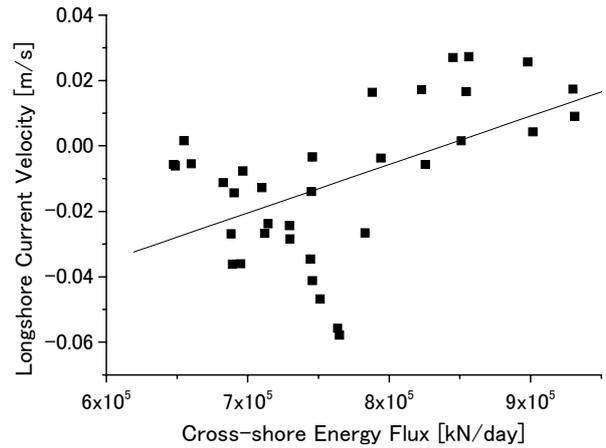


図-22 1000 日以上 of 長周期成分を再合成した沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分 (E_{Rc}) と沿岸流速との関係

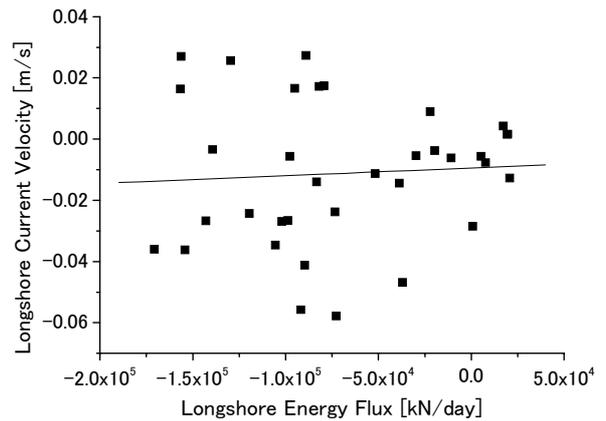


図-23 1000 日以上 of 長周期成分を再合成した沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分 (E_{Rl}) と沿岸流速との関係

に示す. 図-22より, 岸沖方向成分と沿岸流速の間には, 岸沖方向成分が増加するにつれ, 沿岸流速は正の方向, つまり, 北から南に向かう流れ ($V > 0.0$) が増加する関係が見られる ($V = 1.48 \times 10^{-7} E_{Rc} - 0.124$, $R = 0.52$, $p = 0.001$). 沿岸流速が0.0 m/sの時の岸沖方向成分は 8.38×10^5 kJ/dayである. 一方, 沿岸方向成分と沿岸流速の間に相関関係は見られなかった (図-23, $R = 0.06$). つまり, 汀線近傍の沿岸流速の長期変動は, 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分の変動の影響を受け, エネルギーフラックスが小さい低波浪時には北向き, エネルギーフラックスが大きい高波浪時になるに従い南向きの流れと

なる傾向であることがわかる。

対象海岸での1000日以上長期汀線位置変動の変化量は、4.1で示したように沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分の長周期変動と相関関係が見られ、さらに、4.2で示したように、汀線近傍の沿岸流速の長周期変動とも相関関係が見られた。しかし、図-22より、汀線位置変動の変化量の説明変数となる、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸流速の間にも相関関係が見られたことから、どちらかの汀線位置変動の変化量に対する相関の有意性が低い可能性がある。そこで、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸流速が共に汀線位置変動の変化量に影響を与えているかについて考察を行う。

汀線位置変動の変化量は、物理的に沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分との関連性が強い岸沖漂砂と沿岸流速との関連性が強い沿岸漂砂それぞれの影響を受けて決定される。しかし、長期的には主に沿岸漂砂の影響を受けて汀線位置は変動するとされている（例えば、栗山，2005）。HORSが位置する対象海岸の北には鹿島港南海浜護岸が建設されており、北向きの流れでは砂が阻止されることにより汀線は前進し、南向きの流れでは堆積した砂が流出することによりそれは後退すると考えられる。したがって、汀線位置変動の変化量の変動は、この南海浜護岸による沿岸漂砂の不均衡により生じたと解釈できる。

一方、岸沖漂砂は主に短期変動に影響を与えるとされている（例えば、栗山，2005）。数日スケールで変動する岸沖漂砂では、静穏時は浮遊砂よりも掃流砂の方が卓越するため岸向きの漂砂量が卓越し、荒天時は波・流れによって浮遊した底質が中層の戻り流れによって沖へ輸送されることから沖向きの漂砂量が卓越する。これら日々の移動漂砂量の累積により地形断面が変化し、汀線位置はそれに伴い変化する。汀線位置の長周期変動は、汀線位置の短期変動が平均化されることにより求まることから、1000日以上長期変動を用いた解析であっても、図-18に示したように、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分が比較的小さい期間は、相対的に岸向きの漂砂量が卓越していたと考えられることから汀線は前進し、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分が比較的大きい期間は、相対的に沖向きの漂砂量が卓越していたと考えられ、汀線が後退したと解釈できる。したがって、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分の長期変動と相関関係が見られた対象海岸では、この岸沖漂砂によっても汀線位置変動の変化量は長期的に変動していると考えられる。

加えて、1000日以上長期成分を再合成した、汀線

位置変動の変化量、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分および沿岸流速を用いて重回帰分析（例えば、奥野ら，1981）を行った。計算の結果、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸流速のそれぞれの標準偏回帰係数は-0.260、-0.283となった（付録C参照）。

以上の解析により、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分および沿岸流速と汀線位置変動の変化量とは共に同程度の相関を有し、さらに、重回帰分析によっても同程度の標準偏回帰係数であったことから、解析期間中に対象海岸で見られた長期的な汀線位置変動は、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分との関連性が強い岸沖漂砂と沿岸流速との関連性の強い沿岸漂砂がおおむね同じ割合で影響し、変動していたと推察される。

5. おわりに

茨城県波崎海岸における汀線位置、沖波エネルギーフラックス、沿岸流速の変動特性、および、1000日以上長期成分を再合成した、汀線位置変動の変化量、沖波エネルギーフラックス、沿岸流速の関係を波崎海洋観測施設において15年間にわたり休日を除く1日1回計測された地形断面と汀線近傍での沿岸流速および鹿島港沖にて観測された沖波波浪を用いて検討した。以下に主要な結論を示す。

(1) 汀線位置の変動は6ヶ月周期、1年周期が卓越すると共に、4.5年周期の長周期変動も有していた。また、対象海岸の1000日周期以下の汀線位置変動は岸沖方向に年平均約42m移動しており、さらに、1000日周期以上の長期変動においても15年間に約36m変動していた。

(2) 沖波エネルギーフラックスの変動は、岸沖方向成分、沿岸方向成分共に6ヶ月周期と1年周期が卓越すると共に、1000日以上長期領域においてもそれぞれ4.5年、3.7年周期の変動を有していた。ただし、500日から1000日周期において、岸沖方向成分はピークを有していたけれども沿岸方向成分はほとんどエネルギーを有していなかった。

(3) 汀線位置の長周期変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分の長周期変動とは、沖波エネルギーフラックスが増加するほど汀線位置が後退する関係が見られた。一方、汀線位置変動の長周期変動の変化量と沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分の長周期変動とは、相関関係は見られなかった。

(4) 汀線位置の長周期変動の変化量と汀線付近の沿岸流速の長周期変動とは、南向きの流れ($V > 0.0$)が増加するほど汀線位置が後退する関係が見られた。

(5) 沿岸流速の1000日以上長期変動は沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分のその影響を受け、沖波のエネルギーフラックスが増加するにつれて南向きの流れが強くなる傾向がみられた。

(6) 汀線位置の長期変動の変化量は、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分の長期変動と沿岸流速の長期変動の影響をおおむね同じ割合で受けて変動していると推察された。

(7) 汀線位置変動、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸方向成分、および沿岸流速の生データから算出された年平均値の変動は、それぞれの1000日以上長期成分を再合成した長期変動とほぼ同一であった。

沖波エネルギーフラックスおよび沿岸流速の変動要因については、気象や海流の長期変動などの影響が考えられ、これらの解明が今後の課題と考えている。

(2008年6月13日受付)

謝辞

本研究で使用した地形断面データおよび沿岸流速データは波崎海洋研究施設に常駐した沿岸土砂管理研究チーム(旧漂砂研究室)のメンバーならびに(株)エコーの観測補助員によって取得されたものである。また、沖波波浪データは国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所と独立行政法人港湾空港技術研究所海象情報研究チームより提供されたものである。さらに、本研究チームの柳嶋慎一主任研究官、ならびに(株)ブライア・コンサルタントの坂本光観測補助員とは本研究を進めるにあたって有益な議論を行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正(1981) : 多変量解析法 改訂版, 日科技連出版社, 430p.
- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次宏児(1987a) : 短期汀線変動のモデル化の試み, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.
- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児(1987b) : 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 63-96.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良(1989) : 荒天時のバーム地形の侵食—長周期波に注目した現地観測—, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田 誠(1990) : 砕波帯内の底質粒度の変動特性 — 波崎海洋研究施設における現地観測—, 港湾技術研

- 究所報告, 第29巻, 第2号, pp. 37-61.
- 加藤 茂・竹内麻衣子・青木伸一・栗山善昭(2006) : 判別分析を用いた定性的汀線変動予測とその予測精度に関する考察, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 561-565.
- 加藤史訓・鳥井謙一・橋本 新(2001) : 海浜植物の生態に必要な砂浜幅の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1216-1220.
- 黒澤辰昭・田中 仁(2001) : 空中写真による海浜汀線形状の判読に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 586-590.
- 栗山善昭・加藤一正・尾崎 靖(1992) : 沿岸流速分布の類型化と支配要因の検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 196-200.
- 栗山善昭(2001) : 沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性, 土木学会論文集, No. 677, pp. 115-128.
- 栗山善昭・伊東啓勝(2004) : 波崎海洋研究施設で観測された断面変化の卓越周期の変動特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 516-520.
- 栗山善昭(2005) : 砂浜砕波帯における流れと地形変化, ながれ, 24, pp. 47-55.
- 栗山善昭・伊東啓勝・柳嶋慎一(2005) : 長期現地観測データに基づく卓越沿岸流の岸沖分布の検討, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp. 145-153.
- 合田良實(1990) : 増補改訂 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 237-238.
- 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博(1974) : 鹿島港建設に伴う海底地形の変化について—事例研究—, 港湾技術研究所報告, 第13巻, 第4号, pp. 3-78.
- 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. 356-370.
- 鈴木崇之・栗山善昭(2006) : 波崎海岸における汀線位置の長期変動, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 621-625.
- 砂村継夫(1980) : 自然海浜における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 255-259.
- 田中則男(1983) : 日本沿岸の漂砂特性と沿岸構造物築造に伴う地形変化に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 453, 148p.
- 田中 仁・松富英夫・泉 典洋(2005) : 古地図を用いた仙台海岸・石巻海岸の長期汀線変動に関する検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 556-560.
- 永井紀彦(2002a) : 風力エネルギー活用の観点から見た沿岸域洋上風の特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1034, 34p.

- 永井紀彦 (2002b) : 全国港湾海洋波浪観測 30 か年統計 (NOWPHAS1970-1999), 港湾空港技術研究所資料, No. 1035, 388p.
- 日本観光協会 (1987) : 海洋性観光地計画の手びき 明日のリゾート開発に向けて, 日本観光協会, 166p.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999) : 第3世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第4号, pp. 3-47.
- 日野幹雄 (1977) : スペクトル解析, 朝倉書店, pp. 200.
- 森 俊哉・田中 仁 (1998) : 岸沖漂砂・沿岸漂砂に起因する汀線返送の分離, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 551-555.
- 柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸 (1988) : 波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
- 山本幸次・福島雅紀・佐藤慎司 (1999) : 阿字ヶ浦海岸における長期断面変化と砂層厚, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 636-640.
- Aarninkhof, S.G.J., Turner, I.L., Dronkers, T.D.T., Caljouw, M. and Nipius, L. (2003): A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry, *Coastal Eng.*, Vol. 49, 4, pp. 275-289.
- Alexander, P.S. and Holman, R.A. (2004): Quantification of nearshore morphology based on video imaging, *Marine Geology*, Vol. 208, 1, pp. 101-111.
- Byrnes, M.R. and Hiland, M.W. (1995): Large-scale sediment transport patterns on the continental shelf influence on shoreline response: St. Andrew Sound, Georgia to Nassau Sound, Florida, USA, *Marine Geology*, Vol. 126, 1-4, pp. 19-43.
- Komar, P.D. (1998): *Beach Processes and Sedimentation*, 2nd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, pp. 393-395.
- Kuriyama, Y., Ito, Y. and Yanagishima, S. (2008): Cross-shore variation of long-term average longshore current velocity in the nearshore zone, *Continental Shelf Res.*, Vol. 28, pp. 491-502.
- Larson, M. and Kraus, N.C. (1994): Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina, *Marine Geology*, Vol. 117, 1-4, pp. 75-94.
- Miller, J.K. and Dean, R.G. (2004): A simple new shoreline change model, *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 531-556.
- Miller, J.K. and Dean, R.G. (2007): Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics, *Coastal Eng.*, Vol. 54, pp. 111-131.
- Pandian, P.K., Ramesh, S., Murthy, M.V.R., Ramachandran, S. and Thayumanavan, S. (2004): Shoreline changes and near shore processes along Ennore Coast, east coast of south India, *J. Coastal Res.*, Vol. 20, 3, pp. 828-845.
- Plant, N.G. and Holman, R.A. (1997): Intertidal beach profile estimation using video images, *Marine Geology*, Vol. 140, 1-2, pp. 1-24.
- Ranasinghe, R. and Turner, I.L. (2006): Shoreline response to submerged structures: A review, *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 65-79.
- Revell, D.L. and Griggs, G.B. (2007): Regional shoreline and beach changes in the Santa Barbara sandshed, *Coastal Sediments '07*, pp. 1740-1753.
- Rózyński, G. (2005): Long-term shoreline response of a nontidal, barred coast, *Coastal Eng.*, Vol. 52, 1, pp. 79-91.
- Sunamura, T. and Horikawa, K. (1974): Two-dimensional shore transformation due to waves, *Proc. 14th Conf. Coastal Eng.*, pp. 920-938.
- Takewaka, S. (2005): Measurements of shoreline positions and intertidal foreshore slopes with X-band marine radar system, *Coastal Eng. J.*, Vol. 47, 2-3, pp. 91-107.
- Wijnberg, K.M. and Terwindt, J.H.J. (1995): Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, *Marine Geology*, Vol. 126, 1-4, pp. 301-330.

記号表

C_g	: 群速度
E_f	: 沖波エネルギーフラックス
E_{fx}	: 沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分
E_{fy}	: 沖波エネルギーフラックスの沿岸方向成分
f	: 周波数
$fS(f)$: 応答スペクトル
g	: 重力加速度
$H_{1/3}$: 有義波高
N	: データ数
p	: p値
R	: 相関係数
$S(f)$: スペクトル密度
t	: 時間
$T_{1/3}$: 有義波周期
V	: 真の沿岸流速
V_{float}	: フロートによる観測された沿岸流速
x	: 岸沖方向位置

y_m : 汀線位置變動有義振幅
 y_s : 汀線位置
 ρ : 海水密度
 σ : 標準偏差

付録A 月平均値を用いた各データの年毎の変動

汀線位置、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分および沿岸方向成分、沿岸流速の月平均値を用いた年毎の変動を 図-A.1~A.4 に示す。

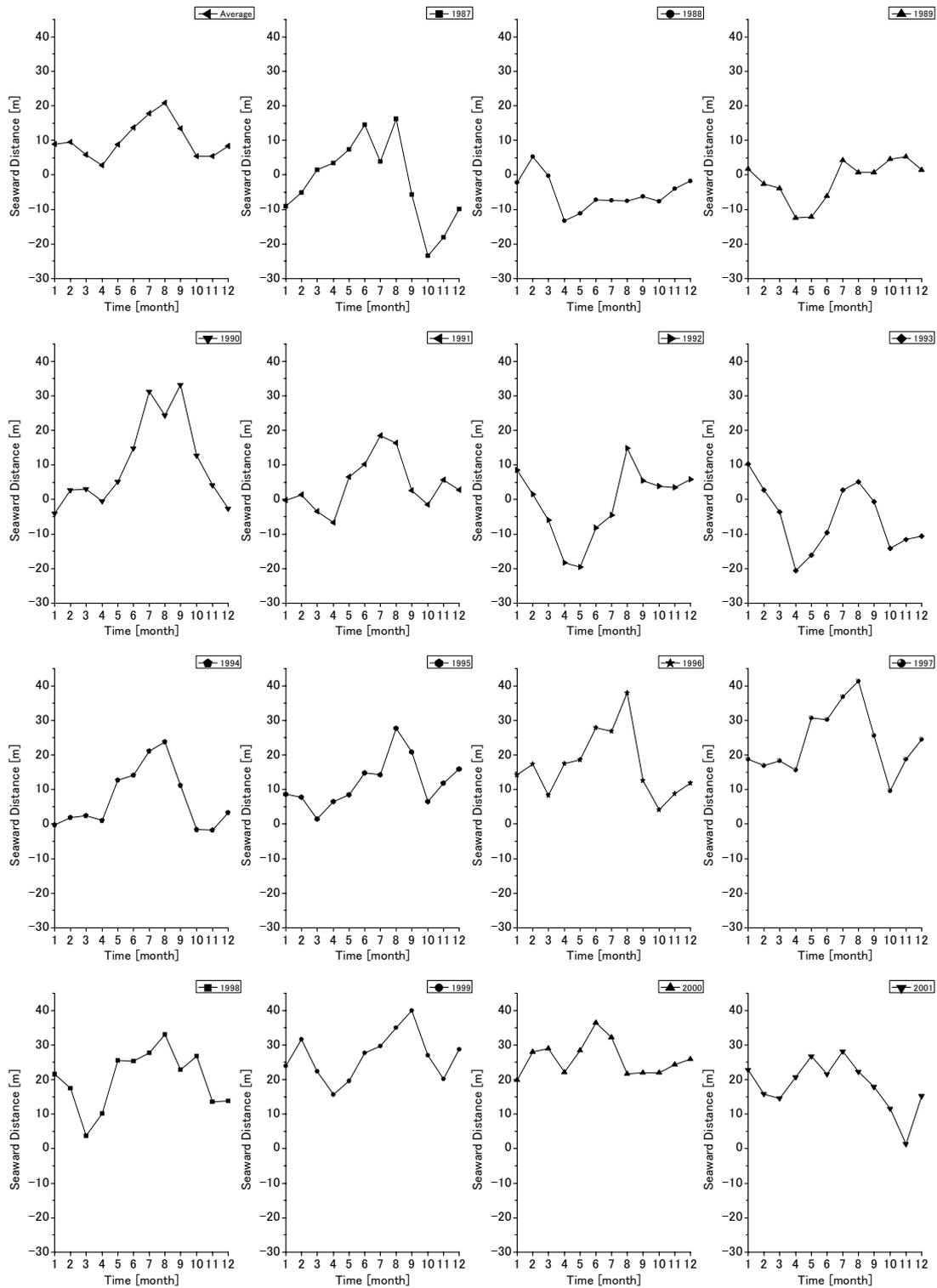


図-A.1 月平均値を用いた年毎の汀線位置の変動

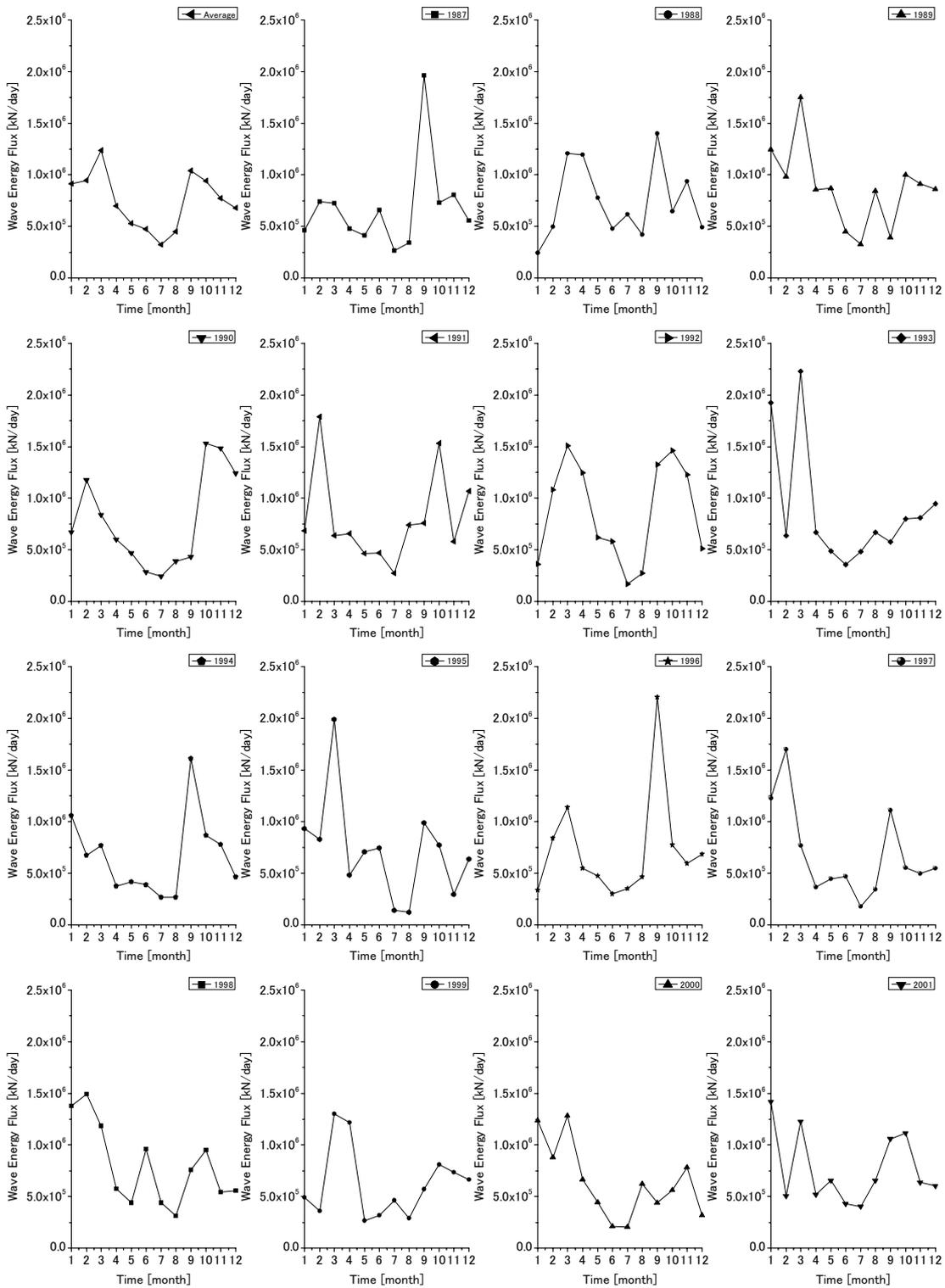


図-A.2 月平均値を用いた年毎の沖波エネルギーフラックス岸沖方向成分の変動

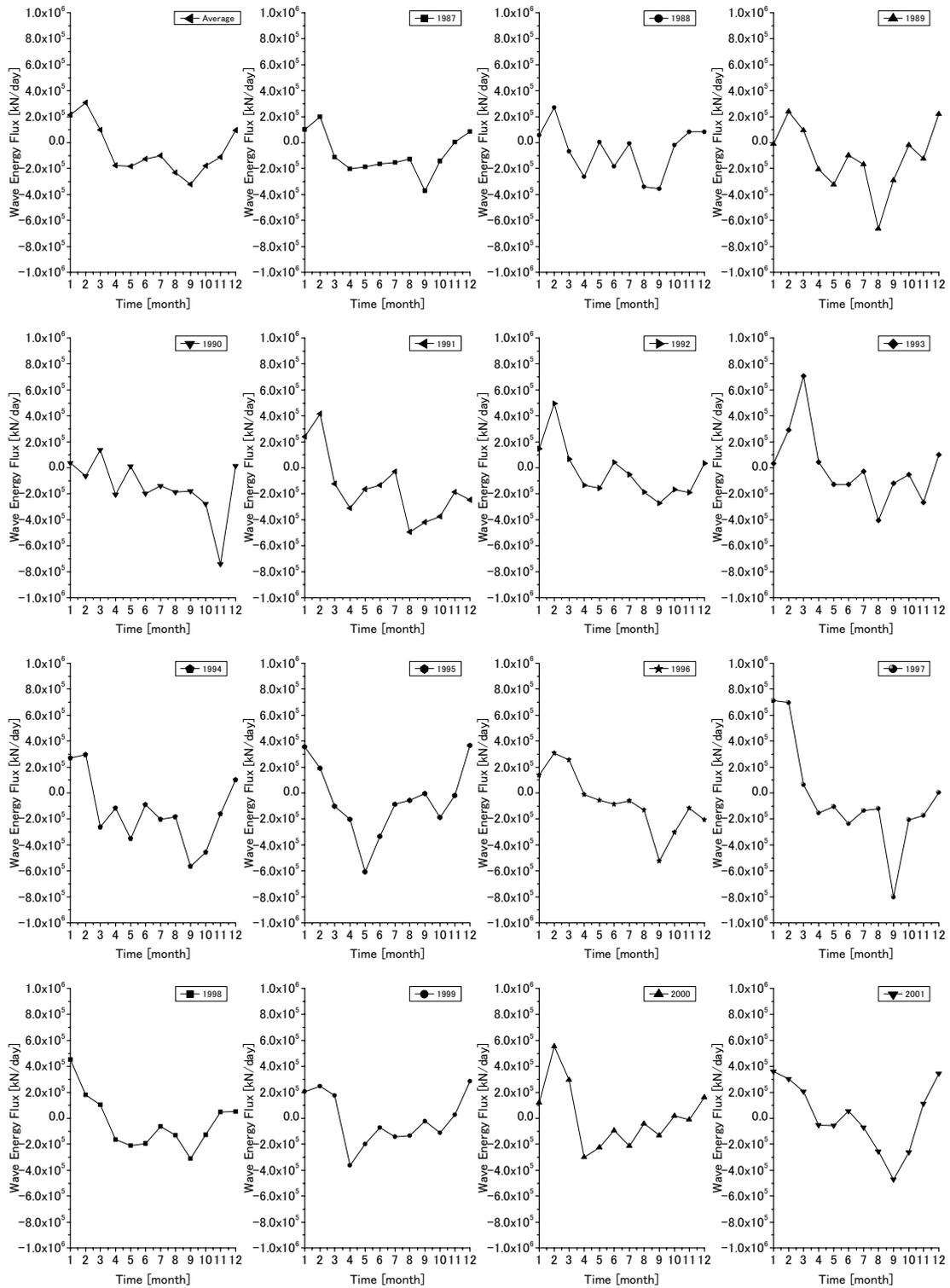


図-A.3 月平均値を用いた年毎の沖波エネルギーフラックス沿岸方向成分の変動

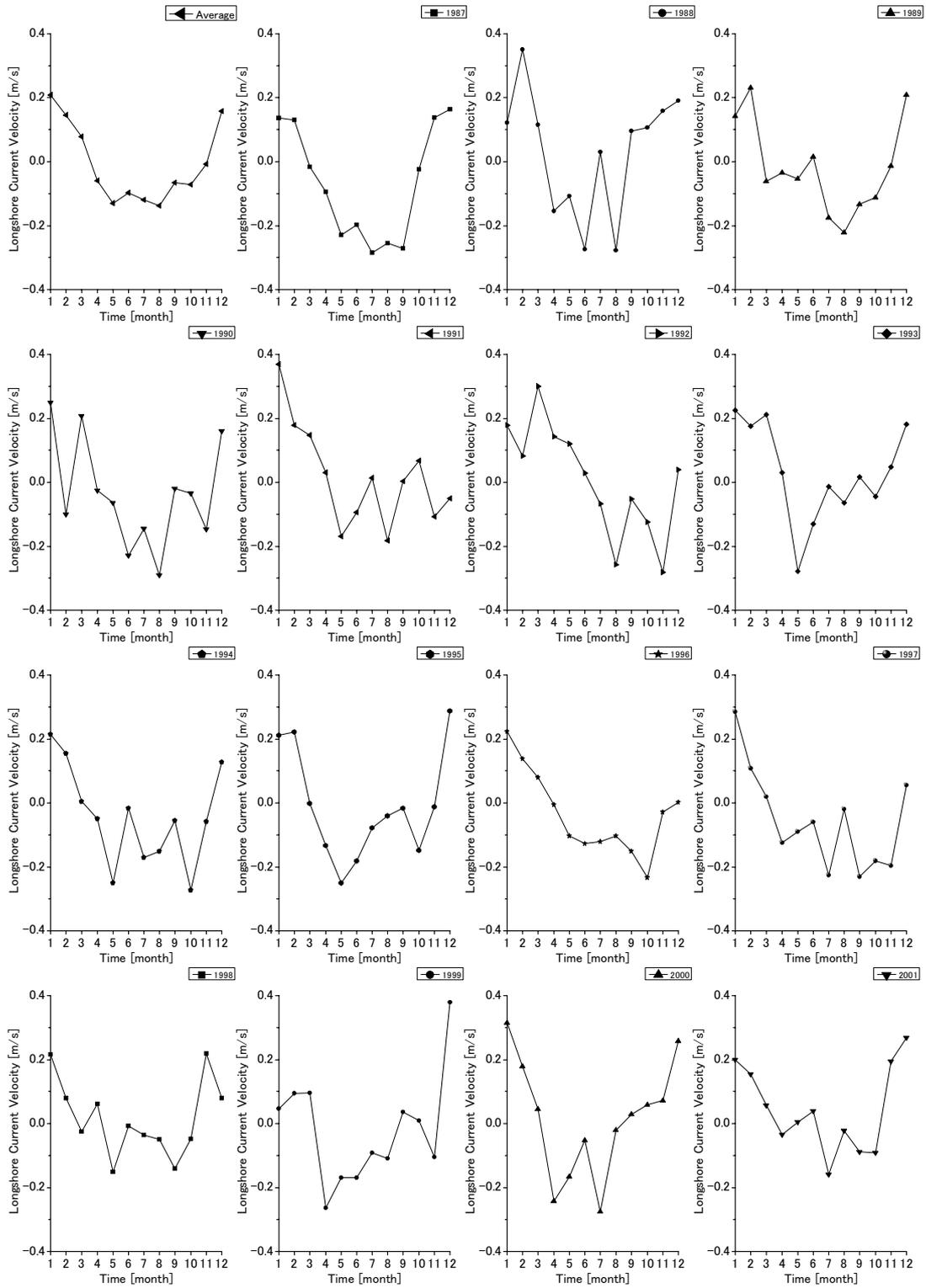


図-A.4 月平均値を用いた年毎の沿岸流速の変動

付録B 沖波波浪に関する参考図面

解析期間中、鹿島港沖にて観測された沖波波高の月別平均有義波高および有義波周期、年別平均有義波高および有義波周期をそれぞれ図-B.1, B.2に示す。さらに、沖波波高の日平均有義波高および有義波周期の階級別出現頻度分布をそれぞれ図-B.3, B.4に示す。

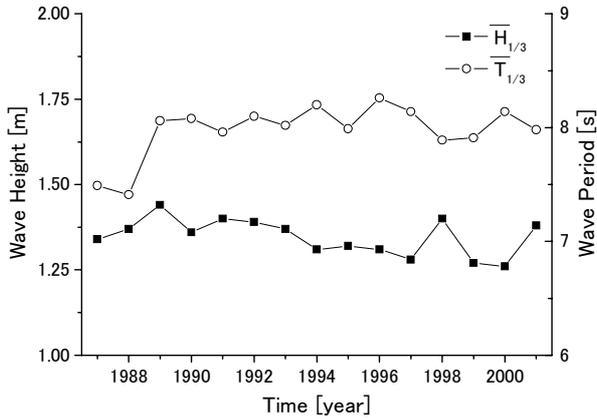


図-B.1 鹿島港沖での年別平均有義波高および有義波周期 (1987年～2001年)

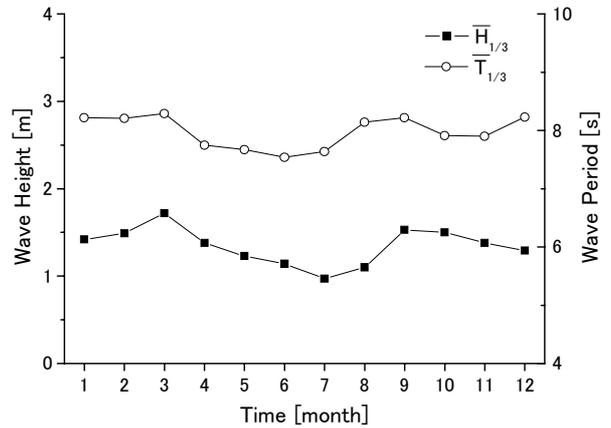


図-B.2 鹿島港沖での月別平均有義波高および有義波周期 (1987年～2001年)

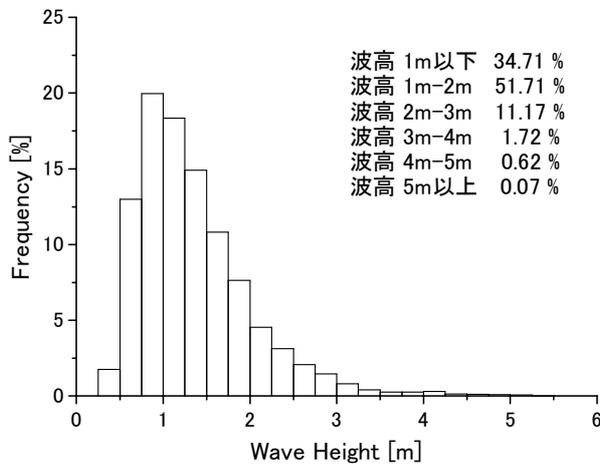


図-B.3 鹿島港沖での日平均有義波高の階級別出現頻度 (1987年～2001年)

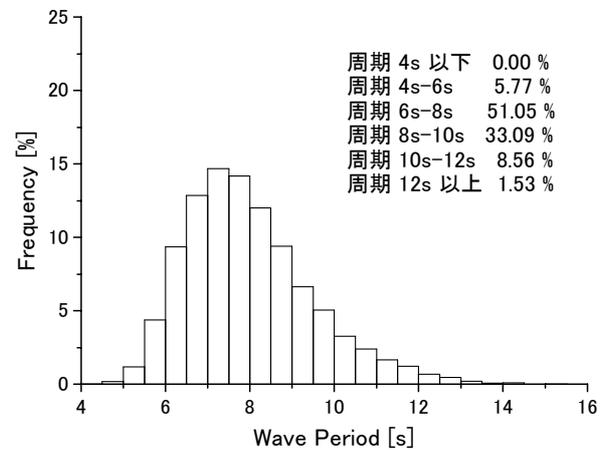


図-B.4 鹿島港沖での日平均有義波周期の階級別出現頻度 (1987年～2001年)

付録 C 重回帰分析解析結果

汀線位置変動の変化量を目的変数とし、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分と沿岸流速を説明変数として行った重回帰分析の解析結果を表-C.1に示す。ここに、変数 Y, X1, X2 はそれぞれ 1000 日以上長の長周期成分を再合成した、汀線位置変動の変化量、沖波エネルギーフラックスの岸沖方向成分、沿岸流速である。計算ではそれぞれの相関関係を算出した方法と同様に、データの両端部から全データ長の 1/10 のデータを省いて検討を行った。ただし、データ間隔は 1 日とした。

表-C.1 重回帰分析解析結果

重回帰分析(Multiple Regression Analysis)

変量	平均	分散	標準偏差	最小値	最大値
Y	8.11E-03	2.40E-04	1.55E-02	-2.42E-02	3.73E-02
X1	7.61E+05	6.56E+09	8.10E+04	6.47E+05	9.35E+05
X2	-1.12E-02	5.19E-04	2.28E-02	-5.88E-02	2.77E-02

相関行列・分散共分散行列(Correlation and Covariance Matrix)

	Y	X1	X2
Y	2.40E-04	-3.99E-01	-4.11E-01
X1	-5.01E+02	6.56E+09	4.92E-01
X2	-1.45E-04	9.07E+02	5.19E-04

偏重回帰係数(Partial Regression Coefficients)

	偏重回帰係数	標準誤差	標準偏重回帰係数	偏重回帰係数の検定	
				F 値	p 値
X1	-4.97E-08	2.93E-09	-2.60E-01	2.87E+02	1.22E-15
X2	-1.93E-01	1.04E-02	-2.83E-01	3.42E+02	8.88E-16
定数項	4.38E-02	2.31E-03	0	3.59E+02	0.00E+00

分散分析表(Table of Analysis of Variance)

要因	自由度	平方和	平均平方	検定統計量	
				F 値	p 値
回帰による変動	2	2.32E-01	1.16E-01	6.17E+02	0.00E+00
残差による変動	4380	8.22E-01	1.88E-04		
全変動	4382	1.05E+00			

決定係数:	2.20E-01
重相関係数:	4.69E-01
自由度調整済決定係数:	2.20E-01
自由度調整済重相関係数:	4.69E-01
赤池情報量基準:	-2.52E+04

付録D 波崎海岸の航空写真、および地形断面測量と沿岸流速観測の参考写真、図

静穏時および高波浪時に HORS 上空より撮影された波崎海岸の航空写真をそれぞれ写真-D. 1, D. 2 に示す。また、地形断面測量時の様子を写真-D. 3, D. 4 に、沿岸流速観測時に用いるフロート、ブイおよび分度器と観測時の模式図それぞれ写真-D. 5, 図-D. 1 に示す。



写真-D. 1 静穏時の波崎海岸 (2000年5月30日撮影)



写真-D. 2 高波浪時の波崎海岸 (2001年9月24日撮影)



写真-D. 3 海上部での地形断面測量の様子



写真-D. 4 陸上部での地形断面測量の様子

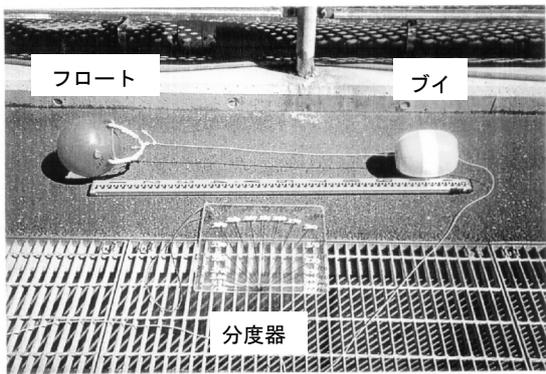


写真-D.5 フロート, ブイおよび分度器

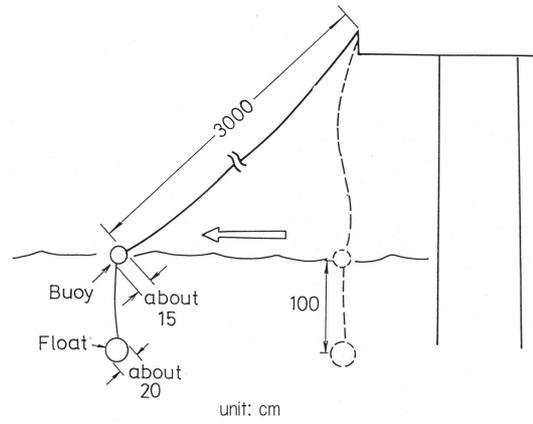


図-D.1 沿岸流速観測の模式図 (ワイヤーが伸びきるまでの時間およびその時のフロートの方向を計測する.)

港湾空港技術研究所報告 第47巻第3号

2008.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Characteristics of Long-term Shoreline Change and the Effects of the Offshore Wave, the Energy Flux and Longshore Current Velocity on the Shoreline Change Rate	Takayuki SUZUKI, Yoshiaki KURIYAMA 3
A New Method for the Estimation of Eelgrass-Growth Rate	Shinya HOSOKAWA, Tetsunori INOUE, Ryoji NAITO, Yoshiyuki NAKAMURA31
Real-time Tsunami Prediction Based on Inversion Method Utilizing Epicenter	Daisuke TATSUMI, Takashi TOMITA55