

波高・周期・波向の時系列変動に対する汀線の線形応答解析

宇多高明*・伊藤弘之**・斉藤友伸***

1. ま え が き

一般に、波による漂砂は岸沖方向漂砂と沿岸漂砂とに分けて議論される。これらのうち岸沖方向漂砂による海浜変形は、暴浪による汀線の後退などに見られるように、変形速度が非常に大きいものの、海浜断面内で土砂量は保存されるから、長い時間スケールで見た海浜変形にはあまり影響しない。それに対し沿岸漂砂による海浜変形は、長期的には著しい影響を及ぼす。沿岸漂砂の均衡が崩れることは、長期的に見て土砂の著しい欠損または堆積を意味するからである。実際、我が国における海岸侵食問題の多くは沿岸漂砂量の不均衡に起因する(宇多, 1990)。したがって、海浜の長期的安定性を検討するには沿岸漂砂による海浜変形について十分考察することが必要である。このような検討においては、one line theory による解析が有効な手段となる。Bakker ほか(1970)は、one line theory により突堤周辺の海浜変形について解析した。また、橋本・宇多(1981)は Bakker と同様の方法を阿字ヶ浦海岸に適用し、波向変動に対する汀線変動の位相遅れを求め、理論により観測結果がかなり良く説明されることを示した。これらの研究では一定の入射波高・周期条件を仮定している。しかしながら現地海岸では波高、周期、波向などが時々刻々変動しており、したがって上述の仮定は現地条件と比較してかなりの差異があることも事実である。また、従来の one line theory に関する研究では、実海岸での予測計算が数多く試みられているものの、波浪の時系列データを与えた場合におけるモデルの適用性については十分に議論されていない。そこで本研究では、阿字ヶ浦海岸における観測データをもとに、汀線の変動に関して線形応答関数法による分析を試みる。そして、その結果を長期間にわたる海浜変形データと比較することにより、one line theory の現地海岸への適用性について論ずる。

2. 波向変動と海浜変形

阿字ヶ浦海岸は茨城県那珂湊市にあり、南北約 10 km の砂浜海岸の南端に位置している。この海岸では1976年以降、観測用栈橋を用いて毎週一回の割合で波向観測、深浅測量および栈橋軸に直交する方向の地形測量が行われてきている(Uda et al., 1990)。岸沖方向には栈橋軸に沿って 3 m 間隔で測点 No. 1~No. 80 を配し、沿岸方向には栈橋より北側に測点 N1~N10 を、南側に測点 S1~S10 を 10 m 間隔で配した(図-1)。この場合、岸沖方向の基準点は最も陸側の測点 No. 1 に置く。波向は栈橋軸に平行な方向からの入射角を 0° とし、反時計回りを正とする。また、N10, S10 地点の地盤の高低差より地盤高の沿岸方向勾配 i_x が求められる。ただし南側の地盤高が高い場合の勾配を正とする。また、以下の分析に際しては長期間の変動に注目するため、全ての変数について20週間の移動平均値を求めた。

波向や波浪エネルギーの変動に対する海浜地形の応答を調べるためには、海浜地形変化を良く代表し得るパラメータを選定しなければならない。本論文では、1.0 m ~ -1.0 m の間における 0.5 m 間隔の等高線の、基準

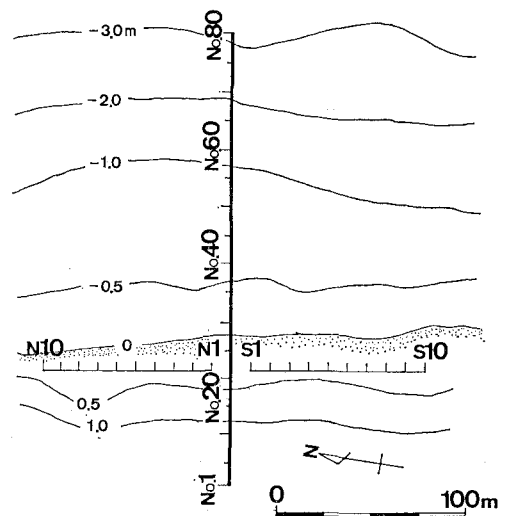


図-1 地形測量の測点配置

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員

*** 正会員 群馬県伊勢崎土木事務所

点からの沖向き距離 y_z , 汀線の沿岸方向 勾配 $\partial y_0/\partial x$, および 海浜断面積の初期値からの変化量 ΔA を 海浜地形変化を代表するパラメータとして選ぶ. 汀線の沿岸方向勾配は前浜勾配 i_f が沿岸方向に一定であると仮定すれば i_x/i_f で与えられる. 海浜断面積は測点 No. 1~No. 80 のデータを積分すれば良い. 最初に, 地盤高の沿岸方向勾配に関し, N10, S10 地点間の勾配 (i_x) と, N5, S5 地点間の勾配を 図-2 に示す. 両者は1977年を除けば非常に高い相関を示す. このことは, 栈橋から南北に 100 m 離れた区間では, 海浜地形が沿岸方向にほぼ一様勾配で変動していることを示す. 以上の点より N10, S10 地点間で汀線の沿岸方向勾配を算出し, 波向の20週間移動平均値 ($\bar{\theta}$) とともに経年変化図としてまとめると 図-3 となる. 汀線の沿岸方向勾配は位相遅れを伴いつつ波向に応答し, ほぼ1年周期で変動しているようである. しかし, 両者の相関はあまり良好ではない.

次に, 汀線変化量 (Δy_0) を波向 ($\bar{\theta}$) とともに 図-4 に示す. 汀線も波向変化に対して位相遅れを伴いつつ約1年周期で変動している. 図-4 に示すように波向変化は8~9年という非常に長い変化傾向を有している. この長期変化傾向については観測期間が短いため十分な解析が困難と思われることから, さらに1年間の移動平均

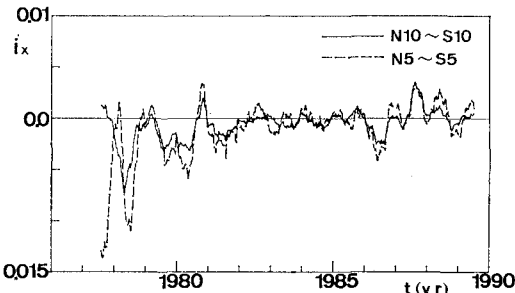


図-2 地盤高の沿岸方向勾配の経年変化

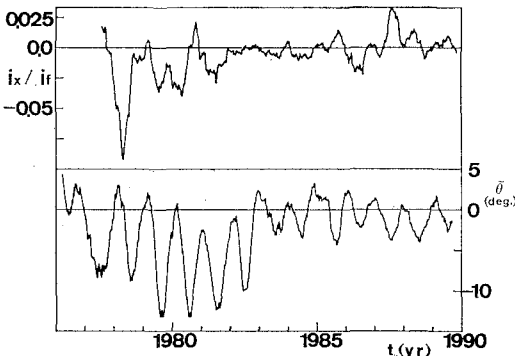


図-3 波向と汀線の沿岸方向勾配の経年変化

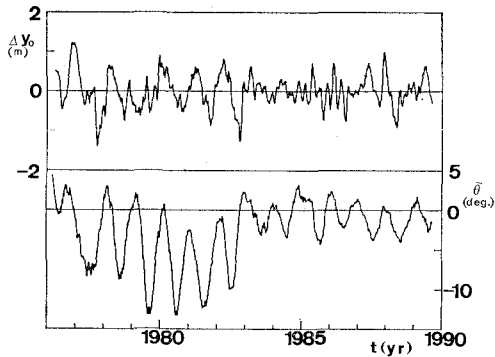


図-4 波向と汀線変化量の経年変化

値 $\bar{\theta}$ を求め, 波向 ($\bar{\theta}$) より差し引いて, その変動を調べることとする (図-5 参照). これによると $\theta' = \bar{\theta} - \bar{\theta}$ と Δy_0 の相関はかなり高くなっており, 以後の分析にこれらのパラメータは十分用いられると考えられる.

各等深線変化量 (Δy_z) と θ' の相互相関係数の最大値 (R) とその場合の位相差を表-1 に示す. 等深線距離と波向の相互相関係数は 1.0 m の等高線の場合最大となり, 沖合に位置する等深線ほど相関係数が小さくなる. これより, 波向変動の影響が前浜付近で最も顕著になることが分かる. 宇多ほか (1988) は, 1976年~1982年の間の θ と Δy_0 の5週間移動平均値に関し, それらの位相差が12週間であることを示した. 本論文では1976年~1989年に測定された θ' と Δy_0 の20週間の移動平

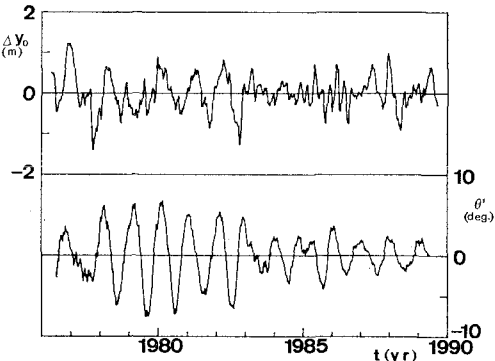


図-5 1年間移動平均値を除いた波向と汀線変化量の経年変化

表-1 波向と等深線距離の変化量の相関係数

	R	位相差 (weeks)
$\Delta y_{1.0} \sim \theta'$	0.51	9
$\Delta y_{0.5} \sim \theta'$	0.49	9
$\Delta y_{0.0} \sim \theta'$	0.43	9
$\Delta y_{-0.5} \sim \theta'$	0.29	11
$\Delta y_{-1.0} \sim \theta'$	0.27	11

均値に関して位相差を求めたためか、前報より位相差は短くなり、9週間となった。

次に、海浜断面積の変化量 (ΔA) の経年変化を 図-6 に示す。海浜断面積は 1978 年～1979 年 (期間①) と 1982 年～1983 年 (期間③) の間顕著に減少し、また 1979 年～1982 年 (期間②) と 1983 年～1985 年 (期間④) には全体として増加傾向を示す。このような断面積の変化状況を理解するために、各期間内における代表的な断面形を 図-7 に示す。期間①、③では断面積が著しい侵食傾向を示していたが、この期間では上に凸型の断面形が凹型へと変化したことが分かる。また期間②、④では断面積が増加傾向にあったが、この期間では逆に凹型から凸型への断面変化が生じている。以上の点は、汀線付近での土砂堆積、侵食に応じて海浜断面積がそれぞれ凸型、凹型になることを示している。すなわち、沿岸漂砂による海浜断面形の変化は 図-8 のように模式化される。最近、宇多ほか (1990) は、沿岸漂砂量の水深方向分布を仮定して地形変化を予測する等深線変化モデルを開発した。このモデルはバー・トラフの存在する場合適用困難であるが、ここでは比較のため等深線距離の水平方向変化量の水深方向分布を求めてみた (図-9)。沿岸漂砂量の水深方向分布が時間的にほぼ一定であったとすると、その分布はほぼ 図-9 のように近似される。図-9 によれば、-3m 付近ではバー・トラフの形成のため単調な

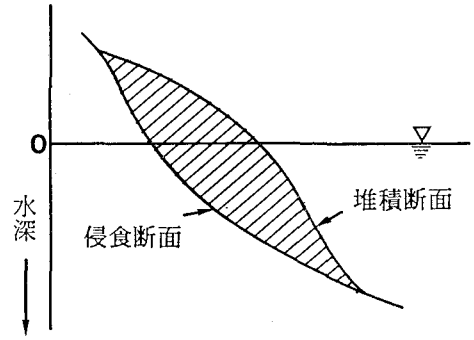


図-8 海浜断面形変化の模式図

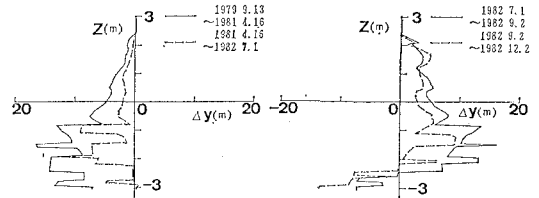


図-9 等深線変化量の水深方向分布

関数ではないが、-2m 以浅では侵食、堆積の場合ともそれらの絶対値は良く似た分布形を示し、陸方向に単調に減少する関数となっている。この結果は、等深線変化モデルにおいて漂砂量の水深方向分布が仮定されることの合理性を補強するものである。

最後に移動高を求めておく。海浜断面積の変化量 ΔA と汀線変化量 Δy_0 より、両者の相関係数を求めると 0.81 と高く、それらの回帰係数より移動高は 6.4m となった。この値は他の外洋に面した海岸における約 10m (宇多ほか, 1987) なる値と比較してやや小さい。その理由として、当海岸が磯崎岬の遮蔽域の影響を受けること、また測量範囲が地形変化の沖合限界を完全には包含していないことが指摘される。

以上の点より、地形変化を分析する際の代表パラメータとしては汀線を用いることとする。汀線は海浜断面積の変化量とも相関が高いから、いずれを用いても同様な結果を得ることができる。

3. 波向に対する汀線の線形応答解析

式 (1), (2) で表わされる漂砂の連続式と Savage 型の漂砂量式を用いて応答解析を試みる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + h \frac{\partial y_0}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q = F \left(\tan \theta - \frac{\partial y_0}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

座標系は沿岸方向に x 軸、岸沖方向に y 軸をとり、沿岸漂砂量を q 、漂砂の移動高を h とする。また、漂砂量式中の係数 F は式 (3) で与える。

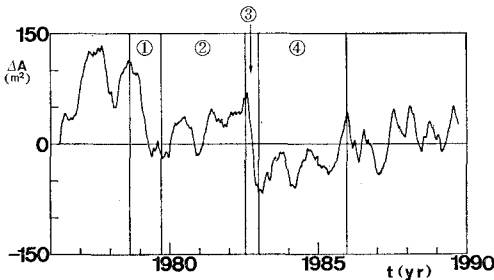


図-6 海浜断面積の経年変化

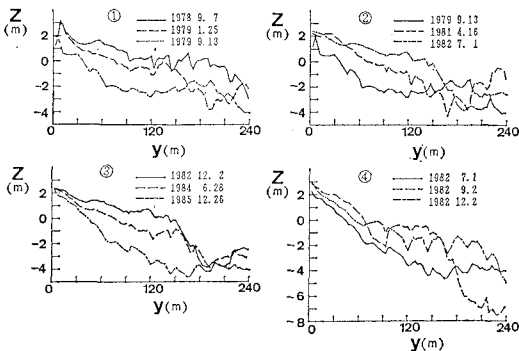


図-7 堆積・侵食期間における代表海浜断面形

$$F = \frac{w}{8} (H^2 C_g)_0 K_r^2 \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $w(H^2 C_g)_0/8$ は深海におけるエネルギーフラックス、 K_r は屈折係数、 α は漂砂量係数である。深海での群速度は波の周期 T を用いれば $0.78 T$ となる。栈橋付近では等深線がほぼ平行かつ一様であるから、屈折係数 K_r は1に近似される。漂砂の移動高は有義波高のエネルギー平均値の沖波換算値と関係することが示されており、宇多ほか (1987) によれば、 $h \doteq 10 \bar{H}'_0$ なる関係が求められている。阿字ヶ浦海岸での $\bar{H}'_0$ は約 1.5 m であること、また前節で示したように当海岸の移動高は $h=6.4$ m と得られているから、両者の比をとると、 $h=5.2 \bar{H}'_0$ となる。そこで、ここでは $h=5.2 \bar{H}'_0$ の関係が成り立つとする。また波向は沿岸方向に一定で、時間のみの関数とする。波高および地形のデータは1週間間隔で測定されているから、解析における最小時間単位も1週間とする。式 (2) を式 (1) に代入し、 $\tan \theta \doteq \theta$ と近似すると式 (4) が得られる。ここで $k^2(t)$ は式 (5) で与えられる。また $x=0$ に y 軸と平行な十分長い突堤があり、漂砂が完全に遮断されると仮定すれば、境界条件は式 (6) で与えられる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = k^2(t) \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$k^2(t) = F(t)/h(t) = 1.13 \times 10^4 \alpha H_0(t) T(t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$y_0 = 0 \quad \text{at } t=0; \quad \frac{\partial y_0}{\partial x} = \theta(t) \quad \text{at } x=0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (4) の拡散型偏微分方程式を解くに際して、 y_0 の応答関数を $G(t, \tau)$ とおくと、 $\partial y_0 / \partial x$ の応答関数は $\partial G / \partial x$ となり、それぞれ式 (7)、(8) で表わされる。ここに $K(t, \tau) = \int_0^t k^2(u) du$ である。

$$G(t, \tau) = -\frac{k^2(\tau)}{\sqrt{\pi K(t, \tau)}} \exp\left(\frac{-x^2}{4K(t, \tau)}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x}(t, \tau) = \frac{x k^2(\tau)}{\sqrt{4\pi K^3(t, \tau)}} \exp\left(\frac{-x^2}{4K(t, \tau)}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

この応答関数を用いて、汀線および汀線の沿岸方向勾配の解析解を求めると式 (9)、(10) が得られる。

$$y_0(t) = \int_0^t G(t, \tau) \theta(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial y_0}{\partial x}(t) = \int_0^t \frac{\partial G}{\partial x}(t, \tau) \theta(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (10)$$

応答関数は時刻 τ に与えられた単位強度の作用が時刻 t において及ぼす影響を示している。応答関数は t, τ, x の関数であるが、 $\zeta = K(t, \tau)/x^2$ と変数変換すると、式 (11)、(12) が得られる。

$$-\frac{x}{k^2(\tau)} G = \frac{1}{\sqrt{\pi \zeta}} \exp\left(\frac{-1}{4\zeta}\right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{x^2}{k^2(\tau)} \frac{\partial G}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{4\pi \zeta^3}} \exp\left(\frac{-1}{4\zeta}\right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

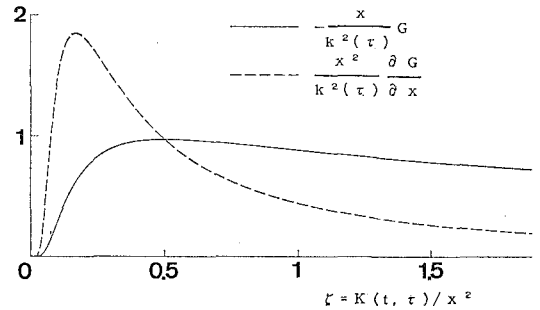


図-10 波向に対する汀線とその沿岸方向勾配の応答関数

式 (11)、(12) によれば、汀線および汀線の沿岸方向勾配の変動は ζ に依存し、変化量はそれぞれ x, x^2 に逆比例する。すなわち、入射する波浪エネルギーが大きく、突堤に近いほど海浜の変形速度および変化量が多い。応答関数の形状を調べるため、式 (11)、(12) を図-10 に示す。応答関数は両者とも1つの極大値を持ち、汀線は $\zeta=1/2$ 、汀線の沿岸方向勾配は $\zeta=1/6$ の条件で極大値をとる。また汀線の沿岸方向勾配は応答関数がデルタ関数のような形状をしており、比較的短い期間の海象条件によりそれが決定されるのに対し、汀線の応答関数はピークを示した後緩やかに減少しており、海象条件の履歴効果大きい。

1976年1月1日～1986年12月31日の期間で汀線変動の再現計算を行った。時間間隔を1週間として式 (9) をシンプソン公式で数値積分した。 $K(t, \tau)$ の計算には、波向観測日の前後7日間に阿字ヶ浦海岸の沖合で観測された日平均有義波高の沖波換算値および周期を用いた。また境界条件は栈橋から 1000 m 離れた磯崎漁港において漂砂が遮断されるとした。また漂砂量式の比例定数は以下のように定めた。波高および周期を一定とすれば、汀線変化量の位相遅れ δ は式 (13) で表わせる。

$$\delta = x \sqrt{\omega h / 2F} - \pi / 4 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで ω は波向変動の角周波数で $2\pi(\text{rad/yr})$ 、 x は突堤境界からの沿岸方向距離で 1000 m である。 δ は実測値より9週間と求められており、阿字ヶ浦海岸におけるエネルギー平均波の波高および周期、1.2 m、8.2 s を式 (13) へ代入すると、 $\alpha=0.105 \text{ t/m}^3$ が得られる。この値は Savage (1962) が実験より得た 0.217 t/m^3 と Sato・Tanaka (1966) が鹿島港における観測より得た 0.06 t/m^3 の中間であることから、ほぼ妥当な値と考えられる。

1年間の移動平均値を差し引いた波向 ($\theta - \bar{\theta}$) に対する汀線変動に関して、実測値の20週間移動平均値と計算値を図-11 に示す。1976年では両者の差異が大きいが、これは初期地形が実際と異なるためであり、その影響は約1年間で消失している。計算結果は1979年のデー

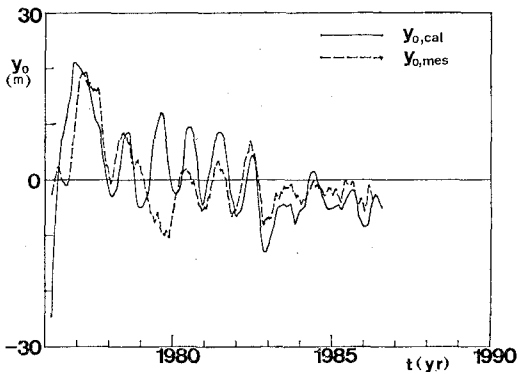


図-11 汀線変動の予測値と実測値の比較

タの一部を除き、ピークの位置や形状および振幅が実測値と良い一致を見ている。

本解析法は地形の沿岸方向の変化や波向分布を考慮しておらず、また設定したパラメータの値も漂砂量係数、移動高および突堤からの沿岸方向距離という one line theory において基本的なものだけである。それにもかかわらず、計算結果が長期にわたり実測値を良く再現できる点は one line theory が長期的な海浜変形の現象を良好に再現できる有効なモデルであることを表わしている。

4. 結 論

本研究の成果は次のように要約される。

- ①堆積および侵食過程における海浜断面形は特徴的なパターンを示す。堆積過程では上に凹型から凸型へ、また侵食過程ではその逆の断面変化が生じる。
- ②波向、波浪エネルギーフラックスに対する汀線および汀線の沿岸方向勾配の応答関数を示した。これによると

汀線に比べ、汀線の沿岸方向勾配は比較的短期間の海象条件により決定されることが分かった。

③応答関数法により汀線変動の再現計算を行い、実測値と比較したところ、長期間にわたり両者は非常に良い一致を示した。このことは one line theory が、長期的な海浜変形現象を表わす良好なモデルであることを示す。

謝 辞

阿字ヶ浦における沖波波浪データは運輸省鹿島港工事事務所から提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 橋本 宏・宇多高明 (1981): 海浜地形と外力の動的応答関係について, 土木学会論文報告集, 第 301 号, pp. 77-87.
- 宇多高明・赤穂俊作・今井武雄 (1987): 霞ヶ浦における風波による湖浜変形の実態, 土木学会論文集, No. 387/II7, pp. 161-170.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友伸 (1988): 阿字ヶ浦海岸における海浜地形の長期的変動とその原因, 土木学会論文集, No. 399/II10, pp. 165-174.
- 宇多高明 (1990): わが国の海岸侵食の現状とその問題点, 地理, Vol. 35, No. 6, pp. 34-43.
- 宇多高明・山本幸次・河野茂樹 (1990): 沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮した海浜変形モデル, 第 37 回海岸工学論文集, pp. 304-308.
- Bakker, W. T., E. H. J. Klein Breteler and A. Boos (1970): The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 12th Conf. on Coastal Eng., pp. 1001-1020.
- Savage, R. P. (1962): Laboratory determination of littoral transport rates, Proc. ASCE, No. WW2, pp. 69-92.
- Sato, S. and N. Tanaka (1966): Field investigation on sand drift at Port Kashima facing the Pacific Ocean, 10th Coastal Eng. Conference, pp. 595-614.
- Uda, T., H. Ito and T. Saito (1990): Summarized data of beach profiles and wave observations at Ajigaura Beach (2), Technical Memo., PWRI, No. 2900, 438 p.