

遡上波水位記録の修正解析法について

西 隆一郎*・中村和夫*・佐藤道郎*

A New Approach for Modified Swash Wave Analysis

Ryuichiro NISHI, Kazuo NAKAMURA, Michio SATO

The processes of wave shoaling, wave breaking, up-rush and backwash on a sandy beach cause transformation of incident waves. Change in wave height on a sandy beach is fairly well understood, however changes in wave period (dominant wave frequency) as well as the number of local waves over a cross-shore profile are only poorly understood. The wave period is a primary parameter to compute many hydraulic parameters related to the nearshore currents and sediment transport on sandy beaches. In addition, it is necessary to know the number of local waves on a beach for estimating the total force on a sand particle on the sea bed and on other coastal structures set inside a surf-zone or swash zone. Therefore, field measurements of incident waves and swash waves were conducted, to obtain an insight into the changes in local wave periods and the number of local waves, at Hazaki Oceanographical Research Facility Pier. An approach to the modified analysis of swash waves is proposed here, for which the swash wave date modification has been conducted to exclude the raw data during the dried-bed-period from the original data.

Keywords: swash wave, wave period, number of waves, field measurement

1. まえがき

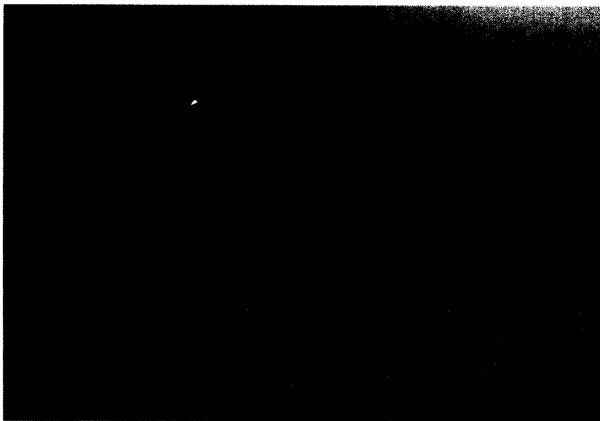


Fig. 1 Wave shoaling, breaking, and swashing on a sandy beach.

Fig. 1 に示すように外洋から海岸に入射する波は、浅水変形および碎波過程を通してエネルギーの多くを失い、最終的に遡上域でほとんどの波エネルギーを消散する。このような波の変形や波に伴う流体運動および漂砂の現

Table 1 Classification of cross-shore sediment transport formulas

(1) Concentration type $q = \int_0^h c(z)u(z)dz$ (1.1) Dally (1982), Stieve and Battjes (1984), Steetzel (1992), etc.
(2) Shear stress type $q = A_w \frac{(\tau - \tau_{cr})}{\rho g}$, $q = f(\Psi)$ (1.2) Madsen and Grant (1976), etc.
(3) Energy dissipation type $q = K(D - D_{eq})$ (1.3) Dean (1977), Moore (1982), Kriebel (1985), Larson and Kraus (1989), Nishi et al. (1994)
(4) Velocity type (Energy type) $q = M u ^n$ (1.4) Bagnold (1962), Bailard (1988), etc
(5) Combined model $q_w = A_w \frac{(\tau - \tau_{cr})u}{\rho g} + A_{wb} \frac{nf_d E}{\rho g}$ (1.5) Watanabe (1987), etc.

象を取り扱う上で、個々波の波高と周期は最も基本的なパラメーターである。このうち、浅海域での浅水変形・碎波・波遡上に伴う波高変化等については数多くの研究がなされ（例えば、小川・首藤, 1982; 久保田ら, 1988

：久保田ら，1989参照），数値的な予測も高精度で行われている．一方，砕波帯および遡上域の波の周期に関しては，一般的に入射波の周期が保存されるという仮定が用いられ，現実には起きている砕波帯や遡上域での周期の変化が，海浜流の計算や漂砂量の計算に取り込まれる事はほとんどない．

例えば，岸沖漂砂量の算定には Nishi (1999) を参考にすると，Table 1 に示すように流速，せん断応力，波エネルギー消散，波の非線型性などを用いるが，表中のどの岸沖漂砂量式に関しても，局所漂砂量 $q(x)$ を計算するためには，局所的な波高と周期が最も基本的なパラメーターであることに間違いはない．通常，波浪が原因で海底地形の変化を引き起こすような，底質移動の最も激しい砕波帯・遡上域内では，波高変化だけではなく，同時に波の周期変化およびそれに伴う局所的な通過なみ数の変化が，砕波による波の分裂や遡上域での引き波の影響で生じている．

例えば，Fig. 2 に示すような沖波，砕波帯，遡上域の水位記録（電圧信号）が得られたとする．図中，上から5列目までが，沖から砕波帯にかけての水位変動で，上から6列目と7列目が，遡上波の水位記録である．これら遡上域の水位記録で，データが平坦になっている箇所は，砂浜表面が干出している状態を表す．また一番下の列は，遡上波の先端位置つまり遡上波フロントの水平移動距離を示すものである．これらのデータに，通常のゼロクロス法を適用して求めた（1）波高変化，（2）周期変化，（3）なみ数の変化を Fig. 3 に示す．波高が，沖から岸に向かい減少するにつれ，周期もいったん低下し，その後，見かけ上の周期が増加していることが分かる．また，なみ数は砕波帯で若干増加し，遡上域で減少していくことが分かる．このような周期およびなみ数の変動状況は砕波形態にも強く依存すると考えられるが，少なくとも浅海域では波の周期および任意の地点を通過するなみ数が保存されないことが分かる．したがって，浅海域の流体運動や局所漂砂量の推定精度を高めるには，砕波帯及び遡上域で波周期の変化およびなみ数の変化に関する過程をまず理解する必要がある．

本研究では，特に遡上域での波の周期変化特性を明らかにするために必要となる，遡上波記録の修正解析法について考察する．

（注）ここで，Fig. 2 中遡上波計については遡上波フロントの水平移動距離を示す．また，容量式波高計による遡上域の水位記録については，計測地点が干出しドライベッドになる時間を考慮してないために，周期はどちらかと言えば遡上波のリターンピリオドを表すと考えられる．また，水位記録の補正については，後述する．

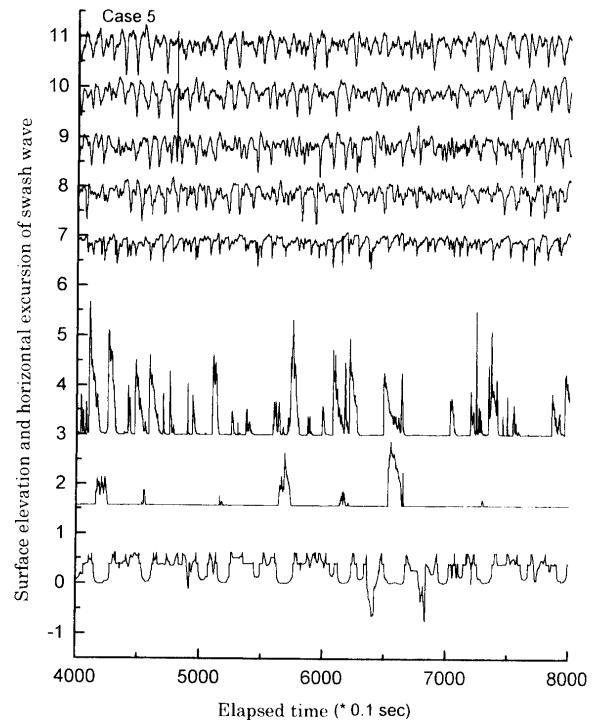


Fig. 2 Time series of surface elevations and horizontal excursion.

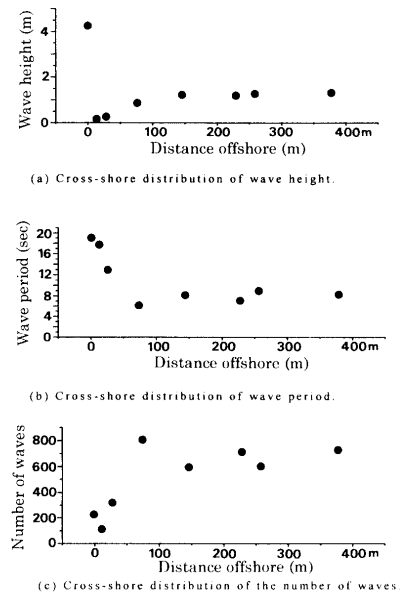


Fig. 3 Change in wave height, period, and the number of waves over the cross-shore profile.

2. 水位記録の現地測定

Fig. 2 に示したような遡上域の水位記録には，通常，遡上域底面が干出しドライベッドになる時間帯の記録が一定の信号値として含まれている．このまま普通のゼロクロス法で解析すると，得られる周期については上げ波

(up-rush) と引き波 (back-wash) として流体力が砂浜表面に作用する真の周期に、波が作用していない (砂浜表面が干出して水が無い) 時間が加算された一種の遡上波の再帰時間としての周期を求めている事になる。遡上域でこの種の問題を解決するには、ドライベッド時の記録を除外して、実質的な波高、周期、なみ数、波の実質作用時間を求める事が、流体運動の解明のためには必要と考えられる。ただし、このような手法が妥当なのか検討するために、まずは現地海岸での波浪データが必要であった。そこで、遡上域での水位記録を解析する場合のこの種の問題点およびその修正法について考察するために、まず、現地海浜で、遡上波および比較に用いる入射波の記録を計測した。

2.1 水位記録測定

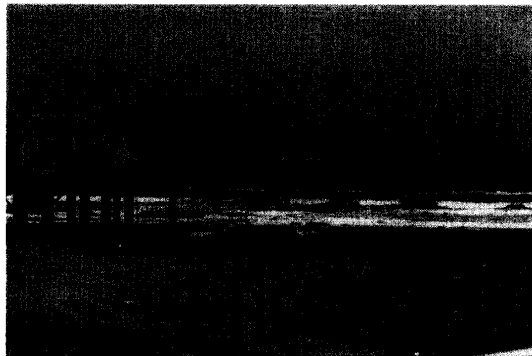


Fig. 4 Overview of the Hazaki Oceanographic Research Facility.

Table 2 Time table of the measurements

Case	Date	Initiation
Case2	98 / 09 / 11	21 : 16 : 22
Case3	98 / 09 / 11	22 : 16 : 11
Case4	98 / 09 / 12	09 : 13 : 02
Case5	98 / 09 / 12	10 : 20 : 13
Case6	98 / 09 / 12	11 : 22 : 40
Case7	98 / 09 / 12	12 : 31 : 08
Case8	98 / 09 / 12	13 : 36 : 17
Case10	98 / 09 / 12	14 : 42 : 23
Case11	98 / 09 / 12	16 : 26 : 13

現地波浪データの収集は、Fig. 4に示す運輸省港湾技術研究所羽崎海洋観測棧橋で行った。この棧橋の総延長は約400mである。波浪測定には、棧橋の378m, 258m, 228m, 145m, 75mに据え付けられた5台の超音波式波高計と、遡上域の27.5m, 12.5mに設置した水位計測用の容量式波高計2本と、全長100mで基準点から35m~0mの位置に敷設した容量式遡上波計1本の合計8チャンネルを使用した。ただし、本研究では主に遡上域のデー

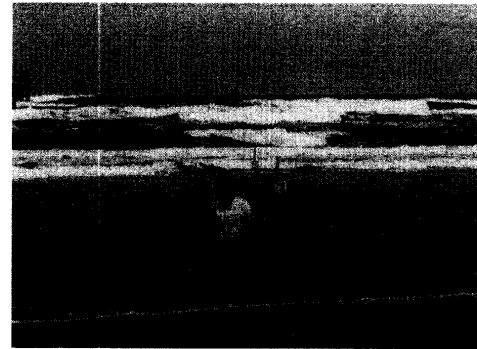


Fig. 5 Typical wave condition during the measurement.

Table 3 Output example of the Wave Train Analysis Package.

Case2 (offshore incident wave)	
number of data	= 32768
sumpling time	= 1.000000E-01 sec
r.m.s n(t)	= 4.139847E-01
skewnwss	= 8.187215E-01
kurutosis	= 3
zero-up cross method	zero-down cross method
No. OF WAVES = 676	No. OF WAVES = 675
H _{max} = 2.727938	H _{max} = 3.136657
H _(1/10) = 2.080600	H _(1/10) = 2.049735
H _(1/3) = 1.570870	H _(1/3) = 1.564182
H _{rmsup} = 1.053740	H _{rmsup} = 8.629E-01
H _{rmsup} = 8.62E-01	H _{rmsup} = 1.053653
T _{mean} = 9.569423	T _{rmsdown} = 6.800018
T _{max} = 8.941308	T _{max} = 8.635882
T _(1/10) = 7.695794	T _(1/10) = 7.726877
T _(1/3) = 4.844939	T _(1/3) = 4.838413
T _{mean} = 4.844939	T _{mean} = 4.838413

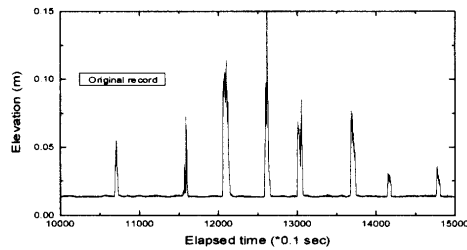
たと、入射波として比較に用いる沖波のデータだけを使用する。波の測定は、サンプリング間隔0.1秒で32768個のデータを Table 2 に示すようなスケジュールで、1998年9月11日午後9時から12日午後5時の間に計11回行った。なお、観測期間中の海象は、低気圧の接近のために比較的荒れており、Fig. 5 に示すように棧橋先端で碎波している波があるような状況であった。

2.2 波浪データの一時処理結果

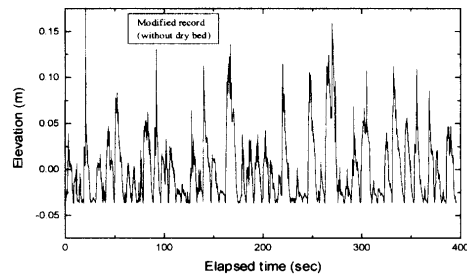
計測した水位データは通常の一時的処理として、まず、ゼロアップクロス法による統計波解析と、FFTによる周波数スペクトル解析を行い、波高変化、周期変化および入射なみ数の岸沖方向変化の概要について調べた。なお、統計波解析には西ら (1997) により開発された、Wave Train Analysis Package を使用して、Table 3 に示すような各計測地点での代表波高とそれに対応する代表波周期、および通過なみ数を求めた。また、浅海域での周波数スペクトルの変化についても Fig. 6 のように求めた。

3. 遡上波記録の修正法

Fig. 6 (a) に示すように遡上域の水位記録には、砂浜がドライッドとなり流体 (波) 力が作用しない時間帯のデータが含まれているために、この期間の計測記録を除



(a) Time series of a raw data in a swash-zone.



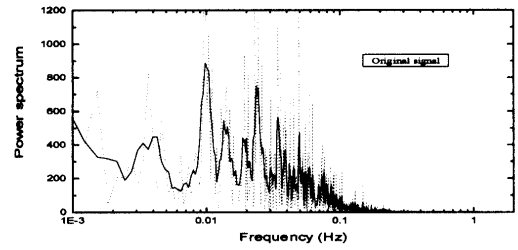
(b) Modified time series of the surface elevation in the swash-zone.

Fig. 6 Change in frequency spectra over a cross-shore profile.

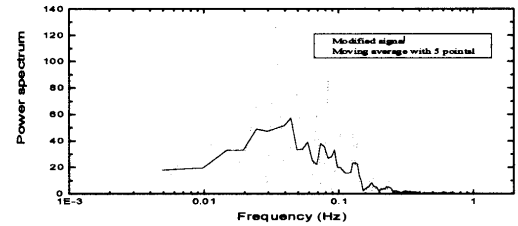
Table 4 Representative wave characteristics of original and modified swash data.

(Original swash data)	(Modified swash wave data)
number of data = 32768	number of data = 3958
sampling time = 1.00E-01	sampling time = 1.00E-01
r.m.s n(t) = 1.743448E-02	r.m.s n(t) = 3.588650E-02
skewnwss = 5.024386	skewnwss = 1.271618
kurutosis = 31	kurutosis = 4
zero-up cross method	zero-up cross method
No. OF WAVES = 81	No. OF WAVES = 61
Hmax = 2.591E-01	Hmax = 2.581E-01
H(1/10) = 1.758E-01	H(1/10) = 1.778E-01
H(1/3) = 1.161E-01	H(1/3) = 1.248E-01
Hrmsup = 7.520E-02	Hrmsup = 8.240E-02
Hmean = 5.023E-02	Hmean = 6.416E-02
Tmax = 34.125450	Tmax = 13.008230
T(1/10) = 25.725640	T(1/10) = 11.486150
T(1/3) = 58.266600	T(1/3) = 9.826818
Tmean = 38.533620	Tmean = 6.283154

外しないと実質的な遡上波の周期が求まらない。そこで、遡上域においてはドライベッド時の記録を除外する Fig. 6 (b) に示すようなデータ補正を、Fig. 6(a) に示す元々の水位記録に適用し、水位記録を作成し直し、新たに波浪解析を行った。このようなドライベッド時の補正を行わない場合と、行った場合の代表波高の比較例を Table 4 に示す。良好な水位記録が取得されていた Case5 では、このような補正を行えば、計測時間3276.8秒の内、沖側の遡上波水位計で268.1秒、Case6 では146.6秒と47.2秒、Case8 では221.5秒と223.8秒、Case10 では653.3秒と380.2秒の間、遡上波が作用していた。これは、引き波時の汀線に近い状況下での遡上波の水位記録であっても、入射波に比較して1/4.3程度しか遡上域で砂浜表面に流体力が作用しないことを示している。



(a) original swash wave.



(b) modified swash wave.

Fig. 7 Power spectra of original and modified swash wave data.

Fig. 7には、オリジナルの水位記録と補正を行った遡上波の水位記録のスペクトル形状を示す。補正を水位記録に行わない場合に遡上波の周波数スペクトルでは、入射波の卓越周波数約0.1Hzよりも小さい0.025Hz, 0.01 Hz, 0.004Hz 近傍に卓越した周波数のピークがある。しかしながら、これらのピーク周波数は遡上波が流体力を底面に及ぼす実質的な長周期変動の周波数ではなく、この時間間隔（周波数の逆数）で波が遡上することを示しているようである。一方、補正を行った (b) では低周波数側の擬似ピーク周波数の多くが消えている。

Fig. 8には、比較のために沖波（入射波）と、遡上波のフロントの水平移動距離、そして、前述のような補正を行い求めた2チャンネル分の遡上波の水位記録を示す。図中の (c), (d) の記録の時間軸スケールが、(a), (b) とは異なることに注意が必要であるが、それぞれ個々の周期が、沖波と遡上域で顕著に異なっていることが分かる。さて、このようにして求めた遡上域の水位記録に対して、間瀬 (1986) が遡上形の記録に適用したような peak-to-peak 法を用いることも可能ではあるが、沖波や碎波帯の波に対してゼロクロス法を適用し、遡上域の波にだけ peak-to-peak 法を用いるのは斉合性の面で若干の矛盾がある。ただし、補正した水位記録の平均値をゼロ面としてゼロクロス法を適用しても、小さな遡上波の水位記録がこのゼロ面と交差せず、周期を過大評価する可能性が大きい。そこで、このような問題を避け周期の変化を検討するために、当面、補正した水位記録をスペクトル解析することにした。その解析例を、Fig. 9 に示す。

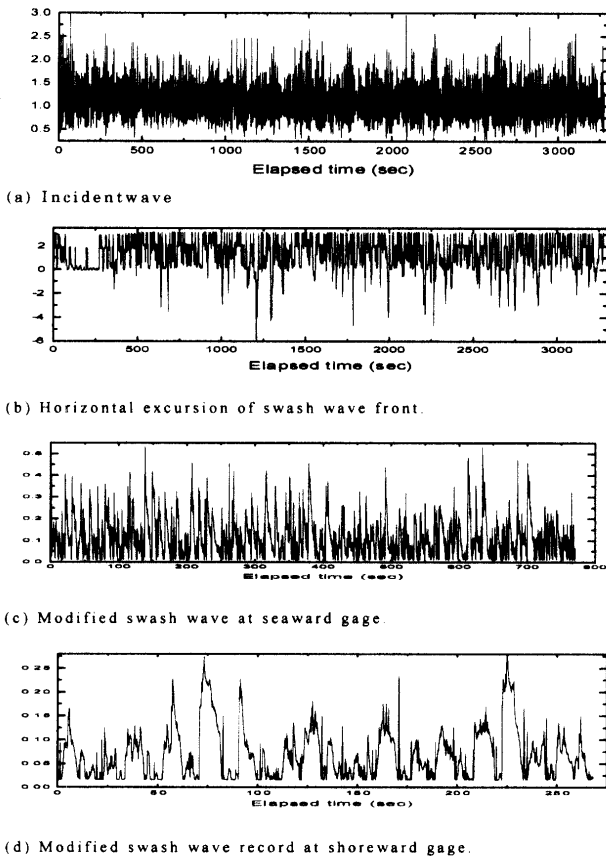


Fig. 8 A comparison of the incident wave and correspond swash wave of case 5. (the scale of horizontal axis is different.)

4. あとがき

高波浪時における海浜侵食を考える上で重要な遡上域の波浪特性を明らかにするに当たり、未だ十分な知見が得られているとは言いがたい遡上域の周期特性およびなみ数の特性に着目した研究の一環として、本研究を行った。遡上域での水位記録にどのようにゼロクロス法を適用すべきか、考察をさらに加えなければならないが、当面以下のようなことが分かった。

現地の遡上波フロント計測用に作成した遡上波計の容量線は、高波浪時に浅海域に漂着しているゴミ等が絡まると線材が切れやすく、また、底面から1cm程度しか浮かして敷設していないので、漂砂により埋まりやすい欠点等があった。そのために、高波浪時の長期観測を行うには、改良が必要なが分かった。本研究では、得られた波浪水位記録の解析から、浅海域での波高変化・周期変化・なみ数変化に関し計測した範囲では、波高が碎波点近傍で最大に成り、その後波高が減少するにつれて波の周期も20%低下していることが分かった。その後、波が遡上するようになると波高はだんだん0に近づくが、

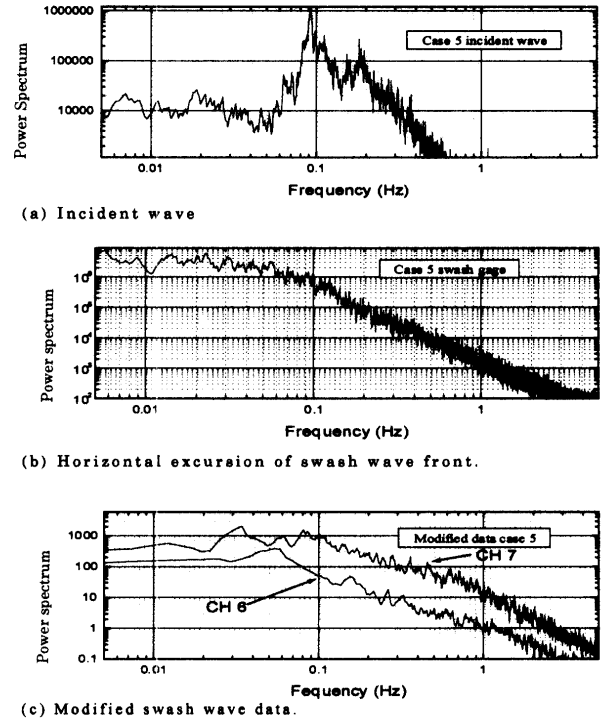


Fig. 9 Change in power spectra of incident wave, horizontal excursion of swash wave front, and modified swash wave data.

見かけ上の周期は約4倍ほどに増加していた。ただし、遡上域の砂浜表面が干出するドライベッド時の補正を得られたままの記録に行った場合、周期は波高と同様に遡上限界点に向かい0に近づくことが分かる。周波数スペクトルに関しては、沖側では平均して卓越入射波周期の約10秒前後にピークがあるが、遡上波計が示す遡上波フロントの水平移動距離に関しては低周波側のピークが卓越している。この低周波側のピークは、碎波帯内の記録に現れる卓越入射波周波数以外の低周波側の卓越周波数に対応していた。また、遡上波の水位記録にドライベッドに対する補正を行うと、実質的に低周波側のエネルギーが減少するが、入射波の卓越周波数よりも約3倍程低い低周波側にエネルギーのピークが存在する傾向があった。

遡上域の底面を構成する砂粒子あるいは遡上域に設置された海岸構造物等に作用する流体力を算定するには、作用するなみ数を精度良く知る必要がある。しかし、現在のゼロクロス法は遡上域の水位記録に補正を加えても、そのままではなみ数を過小評価する可能性が大きいために、この点に関しては今後さらに検討が必要である。

謝 辞

本研究を行うに当たり、観測棧橋の施設を提供していただいた運輸省港湾技術研究所の栗山室長を始めとする担当部署の方々に深湛の謝意を表させていただく。また、

(株)エコーの上堂園氏には、観測に当たり便宜を図っていただき、感謝する次第です。

参考文献

- 小川由信, 首藤信夫, 1982: 波打ち帯の水理特性について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.135-139.
- 久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄, 1988: 急勾配前浜海岸における遡上波の現地観測, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp.118-122.
- 久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄, 1989: 現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学講演会論文集, 第36巻, pp.119-123.
- 間瀬 肇, 1986: 不規則波の波群特性と浅海変形特性に関する研究, 京都大学学位論文
- R.Nishi, M.Sato, and N.C. Kraus, 1997: Development of wave train analysis package -WAVETRAP-, 鹿児島大学工学部研究報告, No.39, pp.179-198.
- R.Nishi, 1999: Geomorphological aspects of beach and dune profile evolution due to waves, 鹿児島大学理工学研究科学学位論文