

波打帯での水理特性および砂移動の現地観測

小 川 由 信*・首 藤 伸 夫**

1. はじめに

海浜変形の問題を扱う場合、碎波帯内の波高変化、流速場の解明は不可欠であり、近年、これらに関する実験あるいは現地観測による研究がさかに行われている。しかしながら、波打帯 (swash zone) に関しては、汀線の前進・後退といった現象に直接結びついているにもかかわらず、未だこれに関する研究例は少ない。Waddell¹⁾は、現地観測により波打帯でのうちあげ波の特性について検討しており、うちあげ波間の相互干渉や低周波数の定常波のうちあげ波への影響はうちあげ斜面の基部で生じていることを指摘している。一方、碎波帯付近での流速場に関しても最近研究がさかになってきたが、もどり流れの影響の強い波打帯を同様に扱うことはできないと考えられる。

本論文では、波打帯に設置した二次元水路内の数点での波形・底部流速に関する現地観測、およびこれと別に行った砂移動に関する現地観測の資料をもとに、波打帯の水理特性と砂移動特性について行った若干の検討結果を報告する。

2. 現地観測

(1) 現地水路での水理観測

観測は茨城県大洗海岸および福島県鮫川海岸で行った。いずれの場合も波峰線に直角な方向に幅 1.2m、長さ約 20m の木製二次元水路を設置している。測定項目は水位、流速およびうちあげ高である。図-1 にそれぞれの現地での測定器の配置および縦断勾配を示す。水位とうちあげ高は、大洗海岸では連動する 4 台の 16mm メモーションカメラで小型スタッフを撮影することにより、また鮫川海岸では容量式波高計、抵抗線式波高計、16mm メモーションカメラを併用して測定した。流速は 2 方向および 1 方向電磁流速計によって測定したが、鮫川海岸ではセンサーをほぼ底部に一致させ底部流速を測定した。なお、測定時間は、大洗海岸で 1 ケース約 13 分、鮫川海岸で約 7 分であり、サンプリング間隔

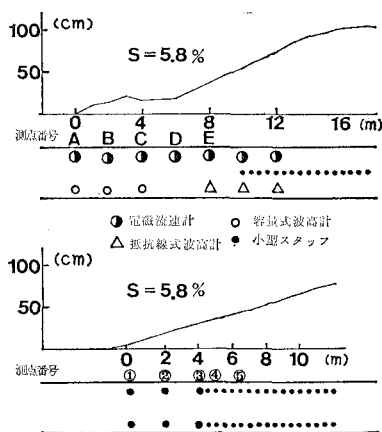


図-1 測定器の配置と縦断勾配
(上図: 鮫川海岸, 下図: 大洗海岸)

はそれぞれ 0.2 秒, 0.1 秒である。

(2) 砂移動観測

観測は宮城県荒浜海岸および茨城県大洗海岸で行った。使用した捕砂器は図-2 に示すバケットタイプのものであり、開閉は全て人力による。今回はある一地点における移動砂量の経時変化を見るために捕砂器を波峰線にほぼ平行に近接して 6 個設置し、1 秒間隔に 6 秒までの累加捕砂量を測定した。小型スタッフを 16mm メモーションカメラで撮影することにより波形を、1 方向電磁流速計により流速を、それぞれ同時に測定した。測定開始時刻は、寄せ波時は段波先端が到来した時点、引き波時は最大遡上時とした。

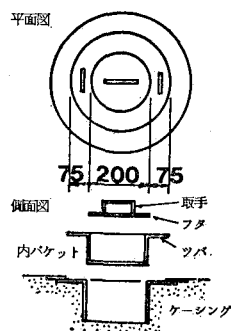


図-2 捕砂器

3. 水理観測結果

(1) うちあげ波形の変化とうちあげ高

大洗海岸で得られた各測点でのうちあげ波形の時間的変化の一例を図-3 に示す。図中には、一番沖側の測点①の平均水深 (27.3 cm) から測った地盤高を記してあ

* 学生員 東北大学大学院工学研究科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

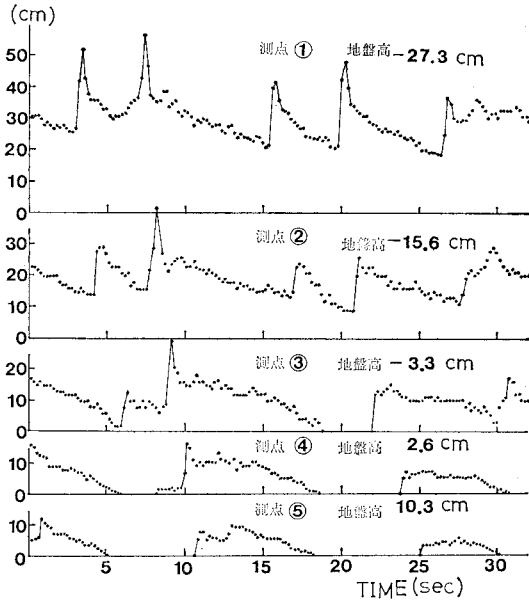


図-3 うちあげ波形 (大洗海岸)

る。測点①では周期が1分程度の長周期の変動が見られる。波は測点②～③の間でうちあがっており、同時にこの領域で寄せ波と引き波の相互干渉が生じている。Waddell¹⁾によれば、相互干渉が起こるか否かは、波のうちあげ時間と入射波の周期の大小関係によって決まる。しかしながら、ある波が引き波の影響を受けるかを判断するには波の時系列を考えなければならず取り扱いが面倒である。そこでここでは波の統計的性質の変化を見ていくことにする。その際、堀田ら²⁾も指摘しているように、波を如何に定義すべきかが問題となる。ここではうちあげ波の性質の変化を見るという意味で図-4の

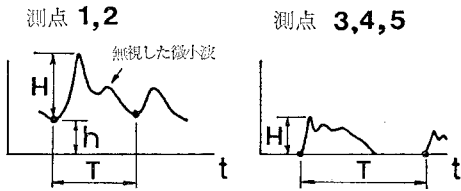


図-4 波諸量の定義

ように波諸量を定義し、うちあげ波以外の5cm以下の波高の微小波は無視し、無視した波は前の波に加えた。以上の方法で定義した波高(柱状図)と周期(実線)の分布の場所的变化を図-5に示す。測点①での波高分布は碎波帯内で一般に見られるような双峰型分布をしているのに対し、測点②では比較的波高分布は均等化している。また、波がうちあがった後の波高分布は、波高の小さいものが削れていくような分布形状となっており、これらの領域では相互干渉が少ないことを示している。周期の変化を見ると、測点①から③にかけて分布

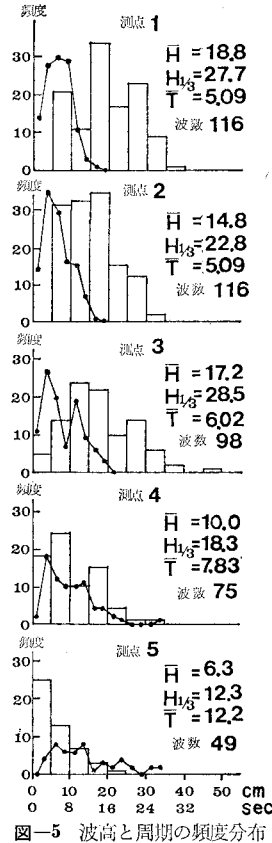


図-5 波高と周期の頻度分布

の双曲化が見られる。また、測点②から③にかけて波高分布が大きく変化しているが、これは先にも述べた長周期変動の影響であると考えられる。そこで、この長周期変動の影響を見るため、測点①,②での、波峰の底面からの高さ($h+H$)の分布を図-6に示した。いずれの分布も測点③での波高分布に似た形になっており、分布の幅もほぼ等しい。これから、うちあげ波の波高分布は、個々の波の波高だけでなく長周期の変動に大きく影響されることが分る。

次に、測点①の底面から測ったうちあげ高 R の頻度分布と、一波ごとに前面水深から測ったうちあげ高 R' の頻度分布

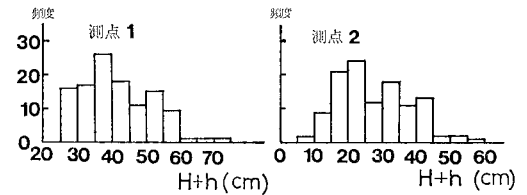


図-6 波峰の高さの分布

を図-7に示す。 R の分布は波のうちあがり始めの測点③における波高 H の分布形と類似であり、分布幅がやや広がっている。これは、うちあげ波の空間分布が比較的相似形であることを表わしている。また、前述の議論とも合わせると、うちあげ高 R は、長周期の変動の影響を強く受けると考えられる。また、 R' と測点①の波高 H の分布を比べると、 R' がかなり平坦な分布をして

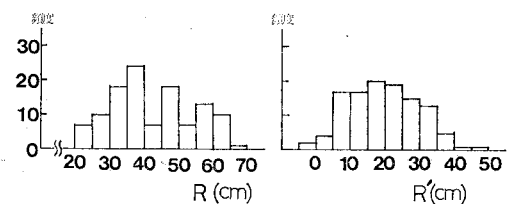


図-7 うちあげ高の分布

いるが、これは、測点①から測点②にかけて波高が平坦になっていることに対応していると考えられる。

(2) 波打帯での底部流速の特性と波形との関係

表一に鮫川海岸で得られた各点の底部流速の約7分間の平均値を示す。表からもわかるように、いずれの場合、いずれの測点においても底部流速は沖向きの値を示しており、その値はある場所で最大値を有している。こ

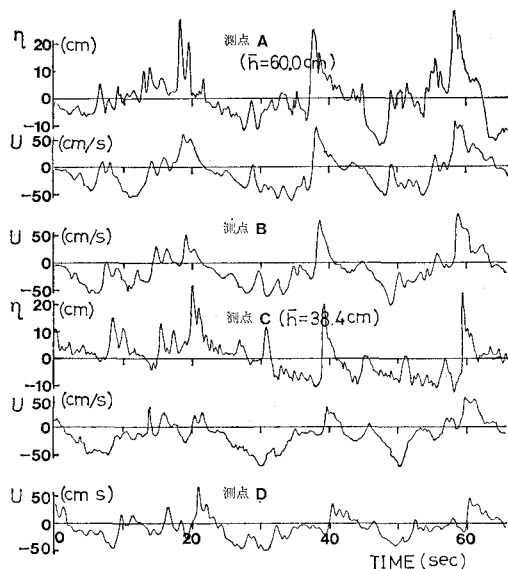
表一 底部流速の時間平均 (鮫川)

Case	測点 A	測点 B	測点 C	測点 D
1	-13.2 (56.9)	-17.2	-18.8 (38.4)	-11.6
2	-10.4 (60.0)	-15.7	-16.7 (38.4)	-10.0
3	-15.1 (64.7)	-21.0	-20.0 (34.0)	-10.8

単位は cm/s で、岸向きを正とする。
括弧内は平均水深 (cm) を表わす。

のような碎波帯内での底部のもどり流れの存在は、すでに堀川・砂村ら⁹⁾により指摘されており、現地観測結果にも表われているが、砂移動現象を扱う上でその性格、大きさを把握することは重要である。従来は碎波帯内でのもどり流れを定常流の一部とみなし、波浪による成分と定常流成分の重ね合わせで底部流速を表わしている⁹⁾が、波打帯でも同様に扱い得るかは疑問である。

図一8に測点 A (沖側)～測点 D (岸側)の底部流速と測点 A, C の波形の時間的変化を示す。この図から、沖側の測点 A (平均水深 60.0 cm) では波形と底部流速の変動の対応が比較的良いのに対し、岸側の測点 C (平均水深 38.4 cm) では対応が悪く、約 20 秒間隔ごとに流速値が大きく負になる部分が生じていることが分る。そこで、上記の波形および流速データの平均値からの変動成分について、データ数 2048、データ間隔 0.1 秒で F.F.T. でスペクトル解析をした。結果を図一9 (a) (b) (c) に示す。水位、底部流速とも測点 A と C でスペクトル密度の形状がかなり異なっており、沖側の測点 A



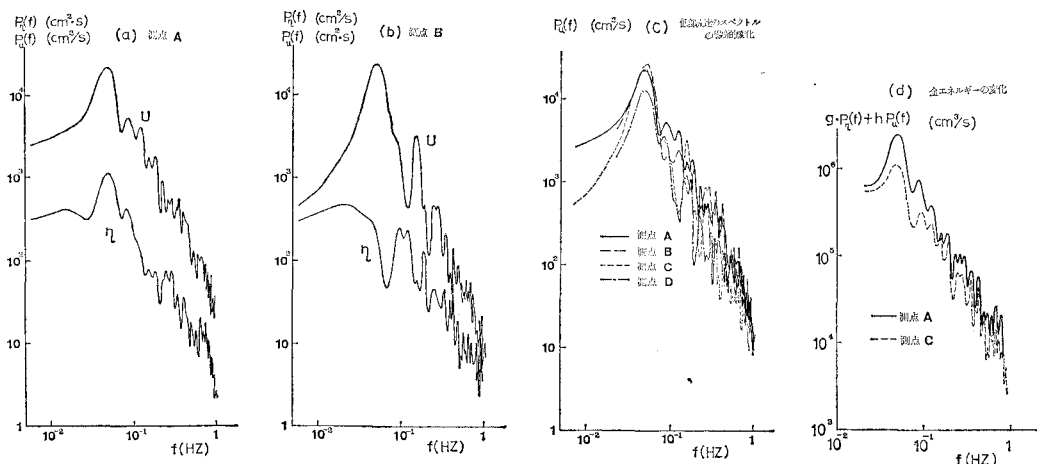
図一8 水位・底部流速の時間的変化 (鮫川 Case 3)

ではスペクトル密度の凹凸が対応しているのに対し、岸側の測点 C では特に 0.07 Hz～0.5 Hz 程度の間で凹凸が逆転している。また、図一9 (c) を見ると、測点 B から C にかけて底部流速の 0.1 Hz 付近のパワーがかなり減少している。以上の現象の解釈として、測点 C 付近に腹を持つ重複波の存在が考えられ、いま、全体のエネルギーを与えるものとして

$$g \cdot P_{\eta}(f) + h \cdot P_u(f)$$

を計算すると 図一9 (d) のように測点 A から C にかけてほぼ周波数全域で値が減少している。これは、2 点間で摩擦、乱れ、砂移動などによって失われたエネルギー、および低周波数側へのエネルギー移動に対応するものと考えられる。

次に、波形と流速の相関を定量的に評価するために



図一9 波形と底部流速のスペクトル (鮫川 Case 3)

0.05 Hz 以上の成分は完全に通過し、0.033 Hz 以下の成分は完全にカットした水位変動と底部流速の相関係数の最大値を求めたところ、沖側の測点 A では 0.68 (位相遅れ 0.2 sec) と比較的相関が良いが、岸側の測点 C では 0.35 (位相遅れ 0.4 sec) と低い値になった。したがって岸側の測点 C では、もどり流れを定常流成分として扱うわけにはいかないと考えられる。

波打帯の底部流速特性を調べるため、波形 (入力) と流速 (出力) との応答関数の振幅および位相差を示したのが 図-10 である。図には微小振幅波理論による応答

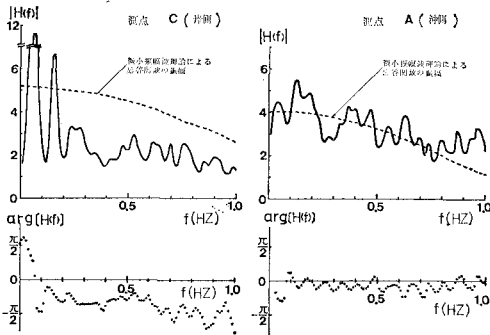


図-10 波形と底部流速の応答関数 (駿川 Case 3)

関数の値も示してある。応答関数の振幅は、沖側の測点 A では微小振幅波理論による値にほぼ近いが、岸側の測点 C では 0.05 Hz および 0.15 Hz 付近にピークを持ち、0.2 Hz 以上では微小振幅波理論による値の約半分になっている。また、位相差は、測点 A では $0 \sim \pi/6$ 程度でどちらかというと進行波であるのに対し、測点 C では $-\pi/3 \sim -\pi/2$ 程度で重複波的になっており、スペクトルに現われた特徴を明確にしている。

以上のことから、測点 C は、一度うちあげてもどる流れが次に来襲する波と丁度出会う地点になっているものと考えられる。そのため重複波的な性格が現われたのであろう。もどり流れは、ここで次の来襲波と重複して非定常性をかなり打消されて海側に流れて行く。このため、これより沖ではもどり流れの定常性が強くなる。したがって測点 A での底部流速は負の定常的もどり流れに進行波が重なった形になる。

4. 砂移動観測結果

(1) 寄せ波時の砂移動特性と分類

流速、水位、累加捕砂量の関係の一例を 図-11 に示す。図の (a) と (b) はともに寄せ波で流速変動が比較的似ているにもかかわらず、捕砂量が大きく異なっている。うちあげ波の水粒子速度を電磁流速計で測定することにも問題はあがるが、主な原因は、ドライベッドにうちあがる前と後では砂移動の機構が異なることにあって考えられる。そこで便宜的に、寄せ波による砂移動を以下

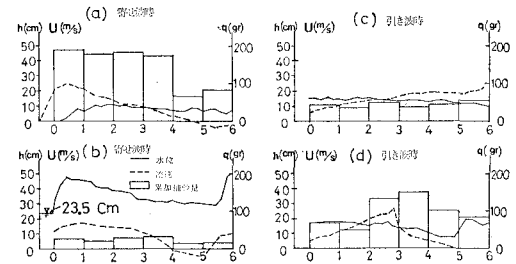


図-11 流速・水位・累加捕砂量の経時変化

の 2 つの場合に分けて考察する。

i) ドライベッドに波が遡上する場合

ii) 前面に水深があり、段波状に波が遡上する場合

なお、以下の議論では、移動砂量 q として、捕砂器の径の幅を通過する砂は全て捕えられるという仮定のもと

に捕砂量 q' を単位幅、単位時間当りの値に換算したものをを用いる。

捕砂量として最初の 1 秒間の値を用い、最大流速 U_m を用いた無次元移動砂量 $q_{0-1}/(\rho_s \cdot U_m \cdot d_{50})$ と無次元掃流力 $U_m^2/(s \cdot g \cdot d_{50})$ の関係を 図-12 に示す。図から、上記の i) と ii) が比較的良く区分されていることがわかる。

図-12 寄せ波時の砂移動形態の分類

(2) 寄せ波による移動砂量

まず、ドライベッドに波が遡上する場合を考える。図-11 (a) にも認められるように、この場合段波先端が通過する時の捕砂量が大きく、その後の捕砂量の変化は比較的少ない。最初の 1 秒間の捕砂量 q_{0-1} と最大累加捕砂量 q_{max} の比をとると、資料数が少ないものの半数以上が 0.8~1.0 に含まれている。また、以前発表した、ドライベッドへの遡上波による底面摩擦力の測定結果から波先端で底面摩擦力の振幅が大きいことが分っている。

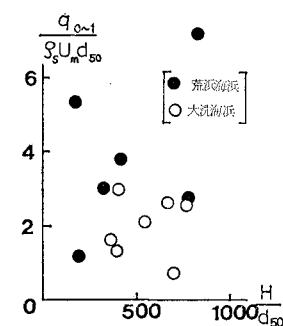


図-13 ドライベッドへの遡上波による移動砂量

これらから、ドライベッドに遡上する波については段波先端の乱れが砂移動の支配的因子であり、一波あたりの移動砂量は q_{0-1} により評価できうと考えられる。そこで、無次元移動砂量 $q_{0-1}/(\rho_s \cdot U_m \cdot d_{50})$ と乱れの強さを表すパラメータ H_{max}/d_{50} (H_{max} は遡

上波の最大水深)の関係を描いたのが図-13である。両者に比較的良好な相関が見られるが、観測場所により傾きが異なっている。地形勾配の影響も考えられるが、荒浜海岸の方が急勾配であったので、これを原因と考えるわけにはいかない。

次に、前面に水深があり、段波状に波が遡上する場合を考える。この場合も、引き波の影響がない限り図-11(b)に示されるように波先端での捕砂量が多い。段波先端の乱れの大きさは段波波高 H に関係すると思われる、また、段波先端の乱れが底面に及ぼす力の大きさは、段波波高 H と前面水深 h の比 H/h で表わされるであろう。そこで、最大単位時間捕砂量を用い、 $q_m/(\rho_s \cdot U_m \cdot d_{50})$ と H/h の関係を表わしたものが図-14である。この図

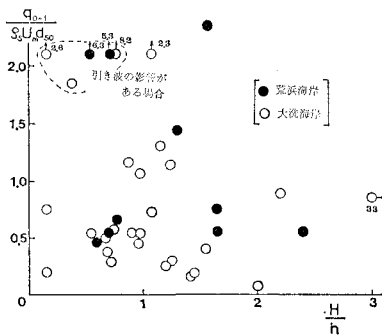


図-14 段波状の寄せ波による移動砂量

によると、 H/h が 1.2~1.3 までは H/h が増加するにつれて $q_m/(\rho_s \cdot U_m \cdot d_{50})$ も増加するが、それ以上になると無次元移動砂量が減少している。これに関しては、捕砂器の特性上 H/h が大きくなると乱れによりまき上げられた砂粒子が浮遊したまま捕砂器を通過する確率が高くなるという説明も可能であろう。このように解釈すると、 H/h が 1.3 以上での移動砂量は掃流によるものと考えられよう。以上の推論が正しいかどうかを検証するには、今後より多くのデータの蓄積と室内実験による砂移動形態の把握が必要である。移動砂量が急減するまでの資料によると $q_m/(\rho_s \cdot U_m \cdot d_{50}) \sim (H/h)^{1.5 \sim 2.0}$ である。

(3) 引き波による移動砂量

引き波による水位、流速、捕砂量の経時変化を描いたのが図-11(c)(d)である。引き波の場合、この図からもわかるように、水位変化の少ないところでは累加捕砂量の変化は小さいが、水位が減少するところでは累加捕砂量が急増している。これらの経時変化を考慮してまとめるのは現段階では困難であるので、ここではとりあえず最大単位時間捕砂量 q'_m について検討する。引波の場合は流速がゼロから始まるから、砂の運搬速度は平均流

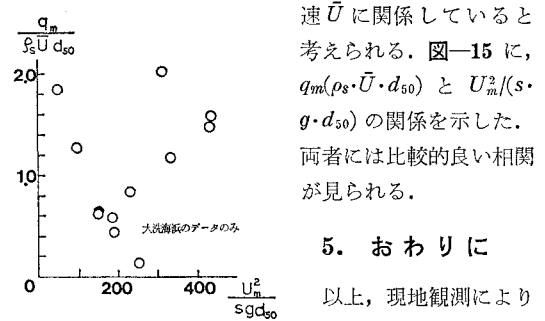


図-15 引き波による移動砂量

速 $\bar{U}$ に関係していると考えられる。図-15に、 $q_m/(\rho_s \cdot \bar{U} \cdot d_{50})$ と $U_m^2/(g \cdot d_{50})$ の関係を示した。両者には比較的良好な相関が見られる。

5. おわりに

以上、現地観測により波打帯の水理特性および砂移動特性を検討した。

以下、本観測により得られた結論と問題点を列記する。

(1) うちあげ波の波高分布およびうちあげ高さの分布は波形の、1分程度の長周期変動の影響を受ける。したがってこれらを正確に見積るためには、長周期変動の性格を把握する必要がある。

(2) 約 4m 離れた2点の波形と底部流速のスペクトル、応答関数の形から、片方ではどちらかと言えば進行波的であるにもかかわらず、他では重複波的であることが明らかとなった。したがって、波打帯での水理現象を調べるには、水位・流速の両方を各地点で同時に観測する必要がある。

(3) 波打帯での砂移動を考える際に、砂移動形態に応じて分類し、それぞれについて支配的なパラメーターがある程度明らかになった。今後、さらに浮遊砂も含めた現地観測を行ない、同時に室内実験を通じて捕砂器の特性も把握する必要がある。

謝辞：本研究を行なうにあたり、東北大学土木工学科、後藤智明氏の助力を得た。また、データ整理に協力を得た当時東北大学学部生の鈴木一章、松原 格 両君、現地観測に協力いただいた東北大学河川水理学研究室諸兄、および観測機器の便宜をはかって下さった海岸環境工学研究センターに対し、厚く感謝する次第である。

参考文献

- 1) Evans Waddel: 自然海浜における打上げ波の特性に関する現地観測, 第20回海講, pp. 545~551, 1973
- 2) 堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波帯内の波の平面分布特性について, 第27回海講, pp. 129~133, 1980
- 3) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三・品川正典: 海浜変形に関する実験的研究(第1報), 第27回年講II, pp. 95~98, 1972
- 4) 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第26回海講, pp. 46~50, 1979