

貝殻片混合砂の掃流移動特性に関する実験的研究

Experimental Study on Bed Load Transport of Shell fragment-Mixed Sand under Waves

熊谷隆宏¹・中嶋さやか²・琴浦 毅³

Takahiro KUMAGAI, Sayaka NAKAJIMA and Tsuyoshi KOTOURA

Beneficial use of shell for constitutive materials of beach is proposed instead of its disposal. Since the shape of shell fragment is oblate, the knowledge on littoral drift of sand with spherical shape could not be applied directly for understanding of its behavior under waves. In this study, critical shields number and fall velocity of shell fragment are evaluated changing oblate shapes of the fragments, and the characteristics of bed load transport of shell and shell-mixed sand beds are examined by a movable-bed experiment. From the experiments, the effects of oblateness on the increase of resistance to wave and current are elucidated. It is found that the interaction of sand and shell on their movements has an effect on the bed - load rate changing the height of sand ripples.

1. はじめに

近年、ホタテやカキ等の貝類の養殖量の増加に伴い、副産物である貝殻の処分方法が問題となっている。このような中、李ら（2000, 2002）は、破碎したカキ殻を浚渫粘土と混合した土を埋立柱として有効利用することを念頭に、混合土の圧密、非排水せん断強度および変形特性を明らかにしている。また、坪田・佐伯（2004）は、護岸や岸壁の裏込材等に、貝殻を直接利用することを目的として、ホタテ貝殻を対象に、排水せん断強度の指標である内部摩擦角や破碎を伴う体積ひずみ量を調査している。その他、泉田ら（2004）は、ホタテ貝殻を用いた覆砂による栄養塩の溶出抑制効果について、有効拡散係数の指標を用いて明らかにしている。こうした地盤や覆砂材としての利用以外に、例えば、近年、規制により採取が困難な砂の代わりに、浅場・干潟造成や養浜等の材料として用いることも、貝殻の有効利用方法の1つとして考えられる。

波が作用する場における底質の移動特性に関して、粒径の異なる砂から構成される混合砂に対しては、これまで多くの研究が行われている。例えば、鈴木ら（1994）は、砂漣形成時およびシートフロー時における混合砂の移動形態を実験的に明らかにしている。また、張ら（1995）は、侵食性と堆積性の波浪の各作用時における混合砂の岸沖方向の分級機構を実験的に明らかにしている。このように、混合粒径砂の漂砂特性に関する研究は行われているが、貝殻片や貝殻片混合砂の移動特性に関する研究成果は非常に少ない。特に、破碎した貝殻の形状は、扁平形状になり得

るため、球体形状の砂を対象にした既往の漂砂の研究成果をそのまま適用できない可能性がある。

本研究では、貝殻片および貝殻片混合砂の掃流移動特性の解明を目的として、貝殻片の形状を変化させて、移動限界シールズ数、沈降速度を調査するとともに、粗砂を用いたケースと比較しながら移動床実験を行った。

2. 貝殻片の移動限界および沈降特性

(1) 移動限界シールズ数

比重2.89、殻厚0.6-0.8mm程度のシジミ貝殻を用いるとともに、形状の違いが与える影響を調べるために、殻厚に対する平面寸法をそれぞれ1:1, 1:3, 1:5に破碎調整した貝殻片を用いて、一樣流に対する移動限界シールズ数を調べる実験を行った。実験で使用する貝殻片を図-1に示す。また、貝殻片との比較検討のため、1粒あたりの水中重量が貝殻片と同等な粒径1mm、2-3mmの粗砂（比重2.6）の実験を併せて行った。すなわち、寸法比1:1の貝殻片は径1mmの粗砂と同等の重量であり、寸法比1:3や1:5の貝殻片は2-3mmの粗砂と同等の重量である。

実験装置は、図-2に示すように、長さ3.5m、幅0.1m、高さ0.1mで勾配1/30の水路を用い、その中央部に長さ0.5m、深さ0.05mの土槽を設置した。水路の上流端には、水供給タンクを設置し、タンクの水位の高さを調整することにより水路を流れる流速を調整した。次の手順によ

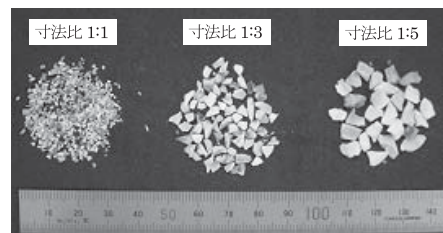


図-1 実験で使用するシジミ貝殻片

1 正会員 Ph.D. 五洋建設(株) 技術研究所
2 正会員 修(農) 五洋建設(株) 技術研究所
3 正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所

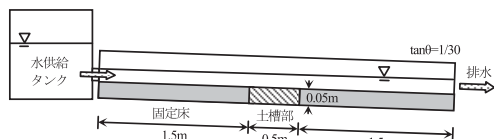


図-2 移動限界シールズ数の調査に関する実験装置

表-1 移動限界シールズ数調査結果

材料	移動限界シールズ数
貝殻 (寸法比1:1)	0.054
貝殻 (寸法比1:3)	0.069
貝殻 (寸法比1:5)	0.065
砂 (径1mm)	0.054
砂 (径2-3mm)	0.050

り実験を行った。

- ① 材料の天端を固定床の天端と一致させながら、土槽部に対象材料を設置する。
- ② 水供給タンクと水路を連通させて、タンクの水を水路に導く。このとき、定常的な流れにおける材料の移動開始が始まる限界を調べるために、タンクの水位を約1分間保つ。材料が移動しない場合は、タンクの水位を上昇させ、水路を流れる流速を増加させる。
- ③ 材料の初期移動が始まる流れに至ったときの水位と流速を計測する。さらに、水位および流速からせん断力に換算するとともに、体積が等価な球体に換算した径を用いて、移動限界シールズ数を評価する。

表-1に移動限界シールズ数の調査結果を示す。寸法比1:3や1:5の偏平な貝殻片は、球体形状の砂に比べて抗力を受けにくく、流れに対する移動抵抗力が強いこと、ただし、寸法比が大きくなると、揚力を受けやすくなることや、微小な不陸部で抗力を受けやすくなるため、移動抵抗力の増加に限界があることがわかった。

(2) 沈降速度

材料の水中沈降速度の調査では、径0.1m、長さ1mの透明パイプを使用し、次の手順で実験を行った。

- ① パイプの下端に底版を付けて、鉛直に設置するとともに、パイプ内部を水で満たす。
- ② パイプの上端から、約5gの材料群を水中自由落下させる。平衡状態の沈降速度を計測するため、着底までの0.5mの深さを沈降するのに要する時間を計測するとともに、材料の水中沈降速度を評価する。
- ③ 上記の手順の調査を5回行った平均の沈降速度をその材料の沈降速度とする。

得られた沈降速度と、体積が等価な球体に換算した径を用いてRubey式より算定される沈降速度との比較を図-3に示す。実験において、偏平な貝殻片の多くは、尖った部分を先端にして沈降するのでなく、回転しながら沈降する形態を示した。図において、球体状の材料であれ

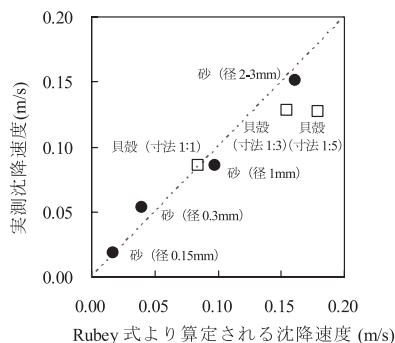


図-3 砂および貝殻片に対する沈降速度調査結果

ば、実測の速度と算定される速度が概ね一致するのに対し、貝殻片の偏平性が強くなると、回転しながら落下するため、球体形状を想定して算定される速度に比べて沈降速度が遅くなる特性が明らかになった。この結果は、偏平性が強い貝殻片は、波や流れによって巻き上げられると、遅い沈降速度のため、海底面に沈降するまでに時間を要し、移動距離が大きくなることを示唆している。

3. 貝殻片混合砂の掃流移動特性

(1) 移動床実験概要

図-4に示す実験装置において、水深を0.28mに設定し、波高0.14m、周期1.4sの規則波を1時間作用させて、移動床実験を行った。底質には、母材の細砂 ($D_{50}=0.15$ および0.3mm) に、前述の貝殻片や粗砂を0, 10, 30, 50, 100%の割合でそれぞれ混合した混合砂を用いた。

実験で用いる波の底面せん断力に対する材料のせん断抵抗の比を表すシールズ数を評価した結果を表-2に示す。シールズ数の値より、作用波は、混合材料に対して、静止～初期移動を生じさせる条件に相当し、また、母材の細砂に対しては、掃流や浮遊の漂砂形態を生じさせる条件に相当することがわかる。実験中、ビデオ撮影により

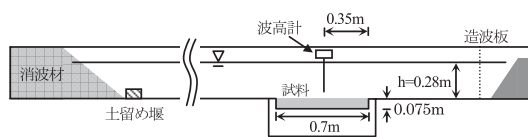


図-4 移動床実験装置

表-2 実験の波浪条件に対する各材料のシールズ数

材料	シールズ数
細砂 (径0.15mm)	0.29
細砂 (径0.3mm)	0.18
貝殻 (寸法比1:1)	0.08
貝殻 (寸法比1:3)	0.05
貝殻 (寸法比1:5)	0.05
砂 (径1mm)	0.09
砂 (径2-3mm)	0.05

材料の移動形態を調査するとともに、実験終了後の地形変化（砂漣形状）を調査した。また、1時間、波浪を作用させた後に土留め堰に捕捉された流出材料の量より、岸向きに移動した正味の漂砂量フラックスを算定した。

(2) 実験結果

母材と混合材料に関する正味の漂砂量フラックスの観測結果を図-5、6に示す。ここでは、底質がその材料で100%構成されていることに換算したフラックスで表している。すなわち、本研究の換算漂砂量フラックスは、観測されたフラックスに対し、混合底質におけるその材料の存在率で除すことにより評価したものである。

図-5、6において、寸法比1:1の均等な貝殻片を混合した底質と、同等重量の径1mmの粗砂を混合した底質は、同程度の漂砂量フラックスを示し、材料の違いによる移動特性の違いは見られない。一方、寸法比1:3や1:5の扁平な貝殻片を混合した底質は、同等重量の粗砂を混合したケースに比べて、漂砂量フラックスが小さく、安定性が高い。ただし、寸法比1:3と1:5の貝殻片をそれぞれ混合した底質の漂砂量フラックスを比較すると、寸法比1:5の貝殻片は、寸法比1:3のものより水中重量が約3倍大きいにも関わらず、混合底質の漂砂量フラックスは同程度であり、安定性が増加しないことがわかる。

このような移動特性は、前章で明らかにされた扁平な貝殻片の移動限界特性（球体状の材料に比べて抗力を受けにくく安定性が高い一方、扁平性が強くなると、揚力を受けやすくなることや微小な不陸部で抗力を受けやすくなるため、移動抵抗性の増加に限界がある）、および沈降特性（扁平性が強くなると、球体状の材料に比べて、沈降速度が遅く、巻き上がった底質の移動が大きくなり

やすい）といった特性より、理解することができる。

母材が0.15mmと0.3mmのケースを比較すると、母材の漂砂量フラックスは、0.3mmのケースの方が若干少ないものの、混合底質の移動特性に明瞭な違いは見られない。使用した混合底質のように、母材と混合材料の粒径比が大きい場合、母材径の2倍程度の変化では、混合底質の移動特性に変化が現れにくいと推察される。

また、図-7の模式図に示されるような混合底質の掃流移動形態が実験で観察された。

- ① 波の作用直後の平坦地形時において、1粒あたりの重量が大きい混合材料は、ほぼ静止状態にある一方、母材は、往復の掃流移動を生じる。
- ② 掃流移動する母材により砂漣が形成されると、砂漣上の速い流れにより、母材が浮遊移動する一方、周囲の母材が侵食されて砂漣上に孤立している混合材料は、回転を伴う掃流移動を生じる。このとき、混合材料どうしのかみ合わせが良いものは、比較的移動が小さい。また、埋没している混合材料は静止状態にある。
- ③ 埋没状態にある混合材料は、その基部周辺が侵食されると、抗力が增大して移動する。被覆防護の機能を持つ混合材料が、底質中から抜け出して移動すると、生じる不陸で流れが乱れ、母材の漂砂量が増加する。

図-8に、実験終了時における砂漣表面の例を示す。作用する波に対し、混合材料の移動抵抗抗力が小さい場合、混合材料の掃流移動が有意に現れ、母材との混合状態で砂漣が形成される一方、混合材料の移動抵抗抗力が大きい場合、混合材料の掃流移動は小さく、砂漣の頂部は、母材のみで構成される。

換算漂砂量フラックスは、底質がその材料で100%構

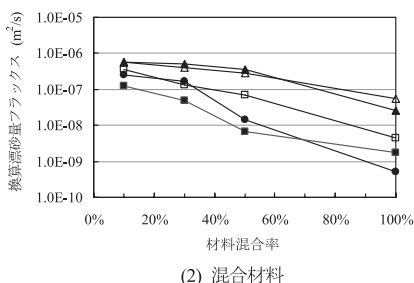
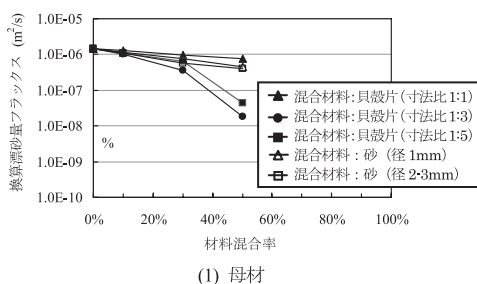


図-5 混合底質の換算漂砂量フラックス（母材：0.15mm）

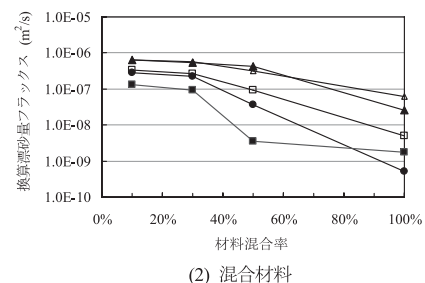
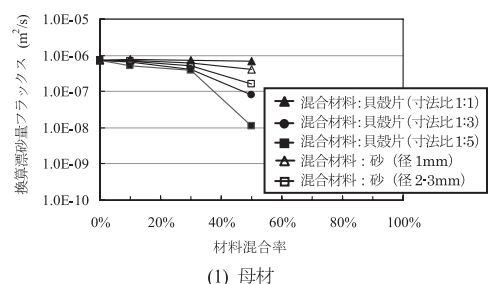


図-6 混合底質の換算漂砂量フラックス（母材：0.3mm）

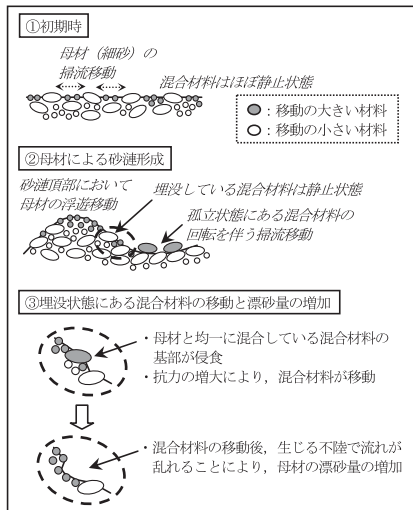
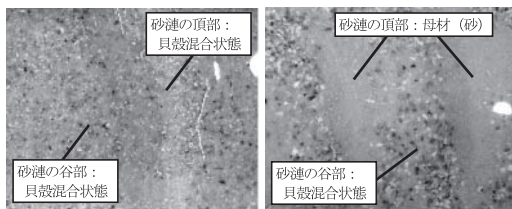


図-7 粒径比が大きい混合底質の掃流移動形態の模式図



(1) 貝殻片 1:1 混合 (2) 貝殻片 1:3 混合

図-8 実験終了時における砂漣表面の例
(母材: 0.3mm 砂, 材料混合率: 30%)

成されていることに換算した量であるため、母材と混合材料の移動が、互いに独立している場合、混合材料の量に影響されることなく、各材料の換算漂砂量フラックスは一定になる。しかしながら、実際には、図-5, 6に示されるように、混合材料の増加とともに換算漂砂量フラックスが低下する傾向が現れており、母材と混合材料の移動は、相互干渉するものと考えられる。

実験で観察された混合底質の移動形態から、混合底質の掃流移動特性には、形成される砂漣が大きな影響を与えと考えられる。図-9, 10に、砂漣高さおよび砂漣波長と材料混合率の関係を示す。ここで、砂漣が生じなかった場合の砂漣高さはゼロとする。砂漣波長は、材料混合率によらずほぼ一定であるのに対し、砂漣高さは、材料混合率の増加とともに、低下する傾向があることがわかる。本研究では、混合材料の増加に伴って、砂漣が縮小する現象と、換算漂砂量フラックスが低下する現象が同時に現れる関連性に着目し、母材と混合材料の相互干渉による漂砂量フラックスの変化について考察する。

(3) 砂漣に着目した漂砂量フラックスの変化量の評価

材料混合率によって変化する砂漣の大きさに着目して、漂砂量フラックスの変化を評価する。岸沖漂砂量フ

ラックスを評価する漂砂量式として、式(1)のようなシールズ数の3乗に比例するモデル (Madsen・Grant, 1976; Shibayama・Horikawa, 1985) が提案されている。

$$\bar{q}/(w_0 d) \propto \psi^3 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 w_0 は沈降速度、 d は粒径、 ψ は最大シールズ数、 $\bar{q}$ は半周期平均の漂砂量フラックスである。

また、Jonsson (1963) は、粗面乱流時における底面せん断力の振幅を $\hat{\tau}$ 評価するための摩擦係数 f_w を与える式を提案している。

$$\hat{\tau} = (1/2) \rho f_w u^2_b \dots\dots\dots(2)$$

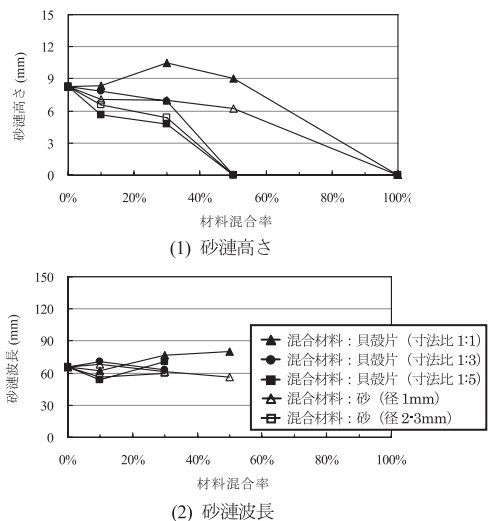


図-9 混合底質の砂漣高さおよび波長 (母材: 0.15mm)

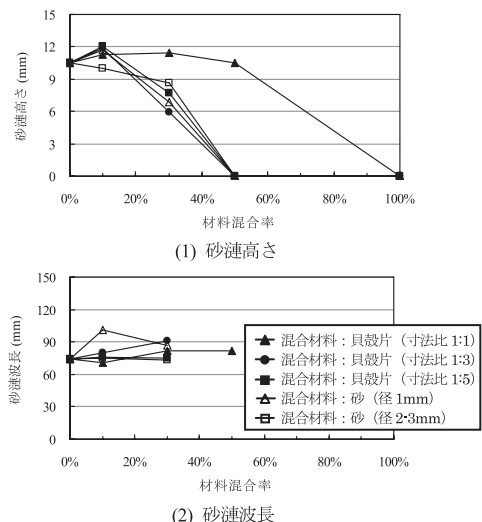


図-10 混合底質の砂漣高さおよび波長 (母材: 0.3mm)

表-3 漂砂量フラックス解析に用いる砂漣高さ

母材	材料混合率	砂漣高さ
細砂 (径0.15mm)	10%	0.070m
	30%	0.060m
	50%	0.00m
細砂 (径0.3mm)	10%	0.105m
	30%	0.075m
	50%	0.00m

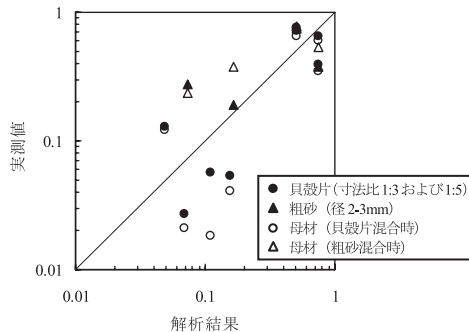


図-11 各材料に対する換算漂砂量フラックスの低下率の解析結果と実測値の比較

$$\frac{1}{1/(4\sqrt{f_w})} + \log_{10} \left[\frac{1}{1/(4\sqrt{f_w})} \right] = -0.08 + \log_{10} (a_b / k_s), \quad (f_w < 0.3) \quad \text{.....(3)}$$

ここに、 u_b および a_b は、底面における水粒子の流速および軌道振幅、 k_s は相当粗度である。

本研究では、相当粗度に関して、砂漣形成時には、砂漣高さで与え、砂漣が形成されない条件では、球体に換算した混合材料の径で与えることにより、摩擦係数を求め、底面せん断力とシールズ数を評価する。さらに、式(1)のように、シールズ数の3乗に比例すると仮定して、換算漂砂量フラックスを評価する。

混合材料として、寸法比 1:3 と 1:5 の貝殻片および粒径 2-3mm の粗砂を用いたケースを抽出し、図-9、10 に基づき、表-3 のように砂漣高さの条件を設定する。材料混合率 10% 時を基準にした 30% と 50% 時における各材料の換算漂砂量フラックスの低下に関して、解析結果と実測値を比較すると、図-11 のように、概ね一致する。この結果より、混合底質において、母材と混合材料の相互干渉の影響が可視化される形態として、砂漣が重要であることがわかる。ただし、偏平な貝殻片と粗砂を混合したケースで、混合材料の増加に伴う漂砂量フラックスの低下量を比較すると、貝殻片を混合したケースの方が、低下量が多いことがわかる。このため、砂漣形状だけでなく、混合材料の形状が持つ底質の被覆効果の違いを考慮に入れることが、今後の課題として重要である。

4. おわりに

偏平形状になりうる貝殻片および貝殻片混合砂の掃流移動特性の解明を目的として、破碎形状を変化させた貝殻片の移動限界シールズ数、沈降速度を調査するとともに、粗砂を用いたケースと比較しながら、移動床実験を行った。実験の結果、適度な偏平性は、波や流れに対する移動抵抗力あるいは安定性を増加させる一方、強い偏平性は、逆に低下させる特性を明らかにした。

また、混合底質の掃流移動状態において、混合材料の増加とともに換算漂砂量フラックスが低下する傾向が現れることから、母材と混合材料の移動は相互干渉すると考えられる。この相互干渉が漂砂に与える影響について、材料混合率によって変化する砂漣の大きさに着目して考察した。形成される砂漣の大きさをパラメータとして、各構成材料のシールズ数を評価するとともに、既往の漂砂量式を援用して、材料混合率の変化に伴う漂砂量フラックスの変化量を概略的に評価できることがわかった。

本研究の移動床実験における掃流移動条件として、混合材料の移動が小さい波浪条件が用いられた。掃流移動条件の中でも、混合材料の移動がより大きい条件では、砂漣の形態や漂砂量フラックスの変化特性に関して、今回の実験と異なる特性が現れる可能性がある。今後の課題として、波浪条件を変えながら、詳細に調査することが重要であると考えられる。

参考文献

- 泉田典彦・中泉昌光・三上信雄・米山正樹・若松純子・菊池有 (2004) : 水産系副産物 (貝殻) の覆砂代替材としての有効活用に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.1043-1048.
- 鈴木高二朗・渡辺 晃・磯部雅彦・M. Dibajnia (1994) : 振動流作用下における混合粒径底質の移動現象について, 海工論文集, Vol.41, pp.356-360.
- 張 達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信 (1995) : 混合砂の分級過程に関する実験的研究, 海工論文集, Vol.42, pp.481-485.
- 坪田幸雄・佐伯公康 (2004) : 水産系副産物 (貝殻) の裏込材への有効利用に関する基礎的研究-ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角-, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.377-381.
- 李 基豪・風間基樹・寺田賢二郎・柳澤栄司 (2000) : 破碎されたカキ殻を含む浚渫粘土の透水特性, 土木学会論文集, Vol. 652, III-51, pp. 245-256.
- 李 基豪・風間基樹・寺田賢二郎 (2002) : カキ殻混合土の非排水せん断強度・変形特性, 土木学会論文集, Vol. 701, III-58, pp. 303-314.
- Jonsson, I.G. (1963): Measurement in the turbulent wave boundary layer, Proc. 10th Congr. IAHR, pp.85-92.
- Madsen, O.S and W.D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport, Proc. 15th ICCE, pp.1093-1112.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1985): A numerical model for two dimensional beach transformation Proc. JSCE, Vol. 357 / II-3, pp.167-176.