

遡上域における底質の分級過程のリアルタイム計測

Real-time Measurements of Classification in the Swash Zone

柿木哲哉¹・辻本剛三²・酒井大樹³

Tetsuya KAKINOKI, Gozo TSUJIMOTO and Daiki SAKAI

The purpose of this study is to investigate sediment grain size and morphological change in the swash zone using Image processing technique and wave gages. Although a number of researches have been carried out into sediment transport and morphological change in the swash zone, quantity of sand transport and topography in that area has not been measured directly. It was found that the technique of this study could measure the sediment grain size and bed elevations in the swash zone.

1. はじめに

海浜における底質の分級作用が岸沖方向の粒度の空間分布を生じさせることは古くから知られている (Bascom, 1951 など)。大きな粒径の砂は遡上域のステップ周辺の碎波点付近に集まり、そこから離れるにつれて粒径は小さくなるのがFoxら (1966) などによって確認されている。しかし混合砂の各粒径の砂が時々刻々どう移動し、どう地形を形成していくかについて調べた研究例はあまりみられない。そこで本研究では遡上域において底質が分級される過程を波の周期程度の時間スケールで調べることが目的とし現地観測と室内実験を行った。

2. 研究方法

(1) 現地観測

現地における遡上域の分級特性を調べるため、海浜地形変化と底質粒度の空間分布を現地観測により調べた。観測は平成21年2月22日、23日に神戸市舞子浜にて傾斜計を用いた地盤高測量を行った。また底質粒度は辻本ら (2008) の方法を用い写真による粒度解析を行った。どちらも干潮時汀線から岸向きに約10mの区間で実施した。

図-1は地形測量と表面粒度解析の現地観測の結果で、実線と点線が最干時の岸沖断面、●印と×印が底面表面の中央粒径 D_{50} を示す。また図中横軸のゼロが干潮時汀線である。当日は1日2回潮で、22日から23日にかけてそれぞれ20cm、40cm程度の潮位差が観測され、地形の侵食と堆積が交差する3m地点が満潮時汀線付近に相当する。3m～6m付近の堆積地形がこの満潮時の遡上波により形成されたと考えられ、さらには表面の粒度構成も変化し、粗粒化していた。

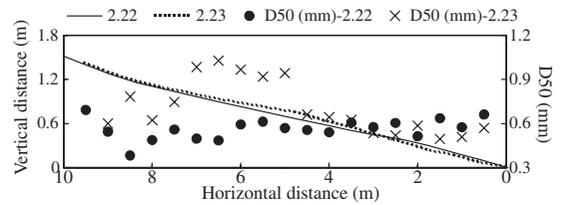


図-1 現地観測結果

(2) 室内実験

次に、2. (1) で示したように海浜地形が非平衡地形から平衡地形へ向けて変化する際、分級がどのように進行するのか調べるため、室内実験によりその過程を時系列を追って詳しく調べた。実験は長さ18m、幅0.6mの2次元造波水路に、現地の砂 (中央粒径0.46mm、淘汰係数1.31) を用いて、勾配1/15 (沖側) の斜面に勾配1/10 (岸側) の斜面を接続し、沖波波高10cm、周期2秒の規則波を作用させた。水深は実験中終始一定のものと、段階的に変化させるものの2通りのパターンを採用した。水深一定のケースでは実験中の遡上域の底面表面の粒度と形成された地形内部の粒度との関係を調べ、水位を変化させるケースでは、平均水位の変化が分級に与える影響を調べる。なお本論文では、水深一定のケースをCASE1、変化させるケースをCASE2と呼ぶ。CASE1の水深は0.35mで、CASE2の水深は1段階目0.35m (以降、CASE21と呼ぶ)、2段階目0.38m (CASE22)、3段階目0.35m (CASE23) と変化させた。それぞれの造波時間は、CASE1を60分、CASE2を50分+45分+45分=計150分とした。これで形成された地形が図-6、図-7で、堆積型となっている。また水平座標2.5m付近が碎波点であった。

a) 遡上域底面高のリアルタイム計測

分級過程を捉える際、どの粒径の砂がどう漂砂するのかを知ることが必要になる。それには何らかの方法で漂砂量を測る必要があるが、遡上域は水深が非常に浅く、

1 正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校准教授
2 フェロー 工博 神戸市立工業高等専門学校教授
3 学生会員 神戸市立工業高等専門学校専攻科

かつ底面が露出するため従来の手法では計測できない。そのため底面高を波1周期程度の周波数で地形を計測し、底面高保存式より間接的に漂砂量を見積ることを検討した。地形も漂砂量同様、遡上域の底面高を数秒程度で連続的に測るのは困難である。そこで容量式波高計の検出部を砂中に貫入し、底面高変化を計測することを試みた。

使用した波高計はケネック社製、容量式波高計CH-601型(本体部)・CHT6-10~100型(検出部)で、最大測定波高10cm~100cm、直線性誤差 $\pm 0.3\%$ /FS、応答性10Hzのものである。この容量式波高計の動作原理は次のとおりである。芯線が導体である絶縁被覆線を水中に入れて電流を流すと、この線と水との間に一種のコンデンサが形成され、その静電容量は水深に比例する。この静電容量の変化を検出器内で、それに比例した電圧に変換し、波高の変化に応じた電圧の変化量として出力する。ここで、砂の誘電率は水に比べて十分に大きく、容量式波高計の原理からすれば、砂と水が混在する状況でも特に問題なく水が存在する部分を検出すると考えられる。今、対象としている遡上域は周期数秒程度で水没するため、基本的に間隙水は飽和状態であるとしてよく、砂が存在する高さまで水も同様に存在する。こうして遡上域において底面が露出する瞬間の底面の位置を容量式波高計により検出できれば、間欠的ではあるが底面の位置を従来よりも高い周波数で測定できる。

図-2は検出部を砂に埋めた波高計の動作試験の模式図である。直径10cm程度のアクリル製の円筒に砂と水を入れ、そこに容量式波高計を貫入する。この時、砂面一定で水位を増加させるTest1と、水位一定で砂面を増加させるTest2を行い、遡上域で起こりうる状況を試験した。その結果を図-3に示す。グラフの横軸は水面もしくは砂面の位置で、縦軸は波高計より出力される電圧の値である。これを見ると、Test1の砂面一定の場合、水面と電圧に線形の関係があり、水面の位置を電圧から読み取ることができるのが分かる。一方、Test2の水面が一定で砂面が変化する場合、電圧値は一定であることから、出力電圧は砂に依存しない。従って、砂面の位置に関係なく水位を読み取ることができる。以上より、遡上域での水位と露出した砂面の位置を計測できることを確認した。なお、砂面より水位が下にある場合についても実験を行い、砂の飽和度に応じた電圧が出力されていることは確認できたが、上記2つの様な明確な関係を見出すまでには至らなかった。従って、今回示す手法の適用範囲は、周期がそれほど長くなく、露出した底面の砂の飽和度があまり低下しないケースに限定される。

図-4は波高計の出力結果のサンプルであり、電圧から距離に変換したものである。図は横軸が時間で縦軸が距離であり、灰色のグラフが水位変動で、灰色のグラフに

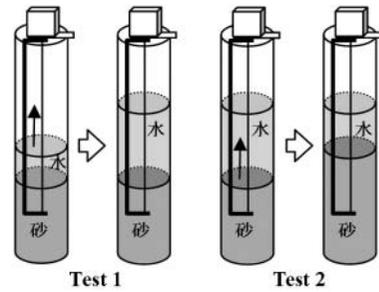


図-2 検出部を砂に埋めた波高計の動作確認方法

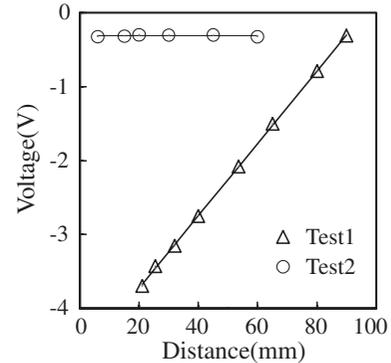


図-3 検出部を砂に埋めた波高計の出力結果

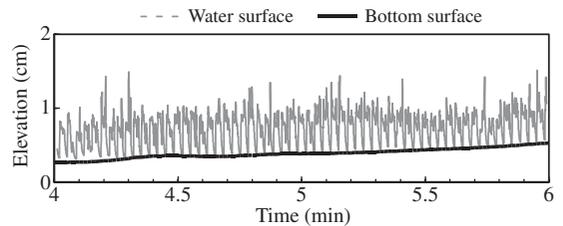


図-4 水位と底面位置の時系列

接した黒色の太線は水位変動の下側の包絡線で、つまり底面を表す。なおこの包絡線はゼロアップクロス法で波を1波ごとに分離し、波谷を決め、それら波谷をつなぐことで求め、これを底面の位置とした。本研究ではこのようにして底面高の推移を捉えることとした。

図-8~図-11は遡上域の地形変化の時系列で、波高計の設置位置は凡例に示す通りである。なお本論文中で水路方向の地点名は統一してあり、距離で示す。

b) 画像を用いた底面表面と内部の粒度解析

従来法では波を止め排水した後、底面から砂を採取して粒度解析する。しかし遡上域に波が作用する間、移動している砂と底面より下を構成する砂の粒度が一致するのかが計測例が乏しいため不明である。遡上域における分級の過程を知る上では、移動中の底質と底面より下を構成している底質の粒度が必要である。本研究では斜面の鉛直上方から引き波通過後、露出した底面をデジタルカ

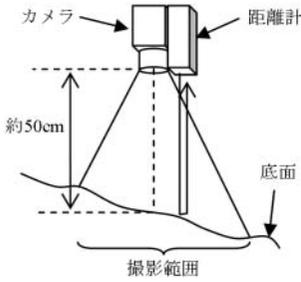


図-5 撮影方法

メラにて撮影し、その画像を辻本ら（2008）の手法により画像解析し、底面表面の粒度の時系列を求めた。図-5に撮影方法を示す。撮影に用いたカメラはデジタルカメラ Panasonic DMC-FX7とデジタルビデオカメラ Sony HDR-SR11（静止画機能を使用）である。被写体（底面）との距離は画像の解像度をなるべく高く保つため、カメラの焦点距離の最小値付近の37～50cm程度とし、解像度はデジタルカメラが2560×1920ピクセル、ビデオカメラの静止画が3680×2760ピクセルで、1ピクセルあたりの実距離は0.01mmである。撮影角度は画像のひずみをなるべく抑えるため被写体に斜面に垂直にするのが良いが、波高計の設置や水槽の寸法の制約などから鉛直上方より撮影した。また、画像から粒径を決める際、画像中のピクセルと実距離とのレートが分かる情報を必要とするが、本実験では遡上域の露出した底面を、波が引いたわずかの時間で撮影しなければならないし、底面高さも時々刻々変化するため、キャリブレーションが出来ない。そこで今回はカメラのピントを固定し、底面高さの変化に伴い、カメラと被写体の距離を微調整しながら撮影することで対応した。なお、カメラと被写体との距離はカメラに取り付けたレーザー距離計により周波数1Hzで測定した。また、撮影地点は静水汀線付近とした。

3. 研究結果と考察

(1) 地形

図-6、図-7は初期地形と実験後の地形を示す図で、図面の右側が沖向き、左側が岸向きである。図中の1点鎖線が静水面、点線が初期断面、実線が実験終了後の地形である。なお、CASE2は3段階（35cm→38cm→35cm）、水深を変更して実験を行っているため、その都度計測した地形も合わせて記しており、図の下段からCASE21、CASE22、CASE23である。なお、CASE21とCASE22の終了時には排水していないため、汀線までしか地形計測していない。これをみると、CASE1とCASE21の結果はほぼ同様であり、堆積型の地形であることが分かる。また、CASE21からCASE23に向かい、バーム頂の岸側に堆積が見られる。

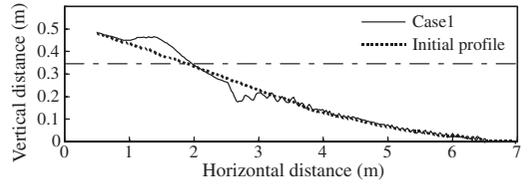


図-6 CASE1の初期地形と造波後の地形

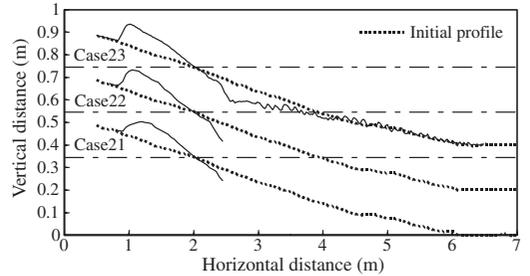


図-7 CASE2の初期地形と造波後の地形

(2) 底面高変化の時系列

図-8～図-11は波高計を用いた底面高さ計測により得られた底面高さ変化の時系列の結果で、図-8がCASE1、図-9～図-11がCASE21～CASE23の結果である。図の縦軸は、計測を始めてからの変化量を示し、正が鉛直上方、つまり堆積していることを示す。なお図上部に示す地点名は水路方向の基準からの距離で、図-6、図-7の横軸の数値と同じものである。また、2m付近が静水汀線付近である。なお、図-8のCASE1の結果は途中で途切れているがこれは水位の計測を地形変化が大きかった25分間しか行っていなかったためで、造波と粒度の計測は60分間継続している。

いずれのケースも静水汀線に近い1.8m、2.0mでは地形は殆ど変化せず、それよりも岸側の地点で最大6cm～7cm程度変化しているのが分かる。この結果を図-6、図-7と照らし合わせると、波高計により計測された最終的な変化量と通常地形測量の結果が近似していることから、波高計を用いた地形計測が正常に機能し、かつリアルタイムの地形変化を計測できたことを示す。

各ケースの結果を個別にみると、CASE1とCASE21の結果はほぼ同様の傾向であるが、CASE21の地形変化の割合がCASE1に比べて若干大きい。その後は、ほぼ定常であることから、平衡状態に入ったと考えられる。

図-10は水深35cmでの実験終了後、水深を38cmに増やし改めて造波したCASE22であるが、こちらは図-8、図-9と比べて傾向が大きく異なる。まず、1.6m地点の地形が不規則に変化しており、その振幅の幅は2cm程度であることが分かる。CASE21ではあまり変化の見られなかった1.2m地点においても徐々に底面高さが上昇している。これは静水深を3cm上げたことで碎波点が岸側に移動し、

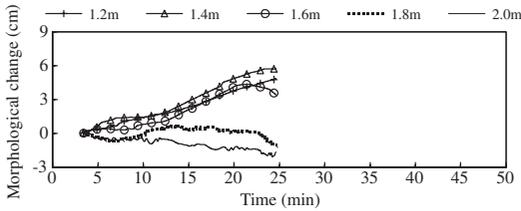


図-8 CASE1の底面高変化の時系列

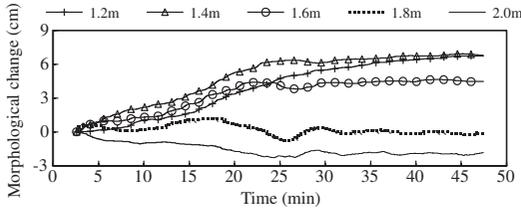


図-9 CASE21の底面高変化の時系列

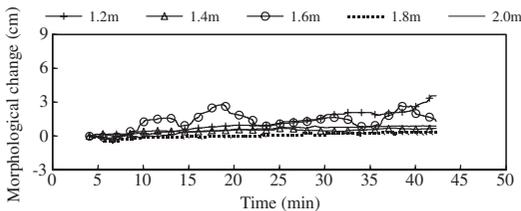


図-10 CASE22の底面高変化の時系列

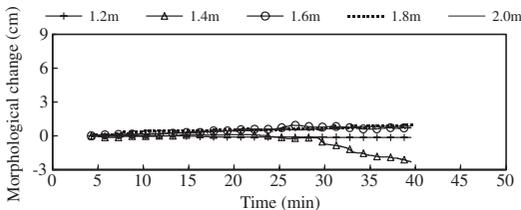


図-11 CASE23の底面高変化の時系列

その結果生じた変化で、新たな水深のもとでの平衡断面に向かって地形が動き出す様子が捉えられたものである。図-11はCASE23の結果であるが、CASE22で地形が若干変化したとはいえ部分的に数センチ程度であり、大まかにはほぼ平衡断面に近い地形をしているため、地形変化量は1cm未満と小さい。

(3) 表面粒度と漂砂量の時系列

図-12～図-15は1.6～1.8m地点の表面粒度と漂砂量の時系列で、図-12がCASE1、図-13～図-15がCASE21～CASE23である。図中の左縦軸が粒径、右縦軸が漂砂量で、漂砂量は正が沖向き漂砂である。また、漂砂量は図-8～図-11の底面高さの時系列をもとに、次式で求めた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_x}{\partial x} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 h は水深、 t は時間、 λ は空隙率、 q_x は岸沖方

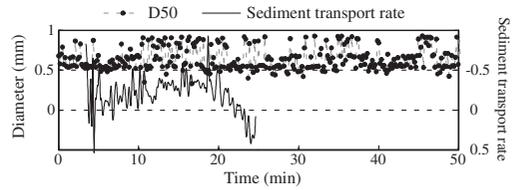


図-12 CASE1の表面粒度と漂砂量の時系列

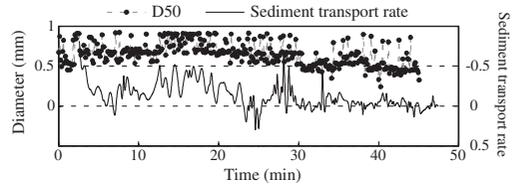


図-13 CASE21の表面粒度と漂砂量の時系列

向の漂砂量、 x は岸沖方向水平座標である。

図-12はCASE1の結果だが、造波開始10分頃から20分頃にかけて中央粒径が0.6mm～0.9mm程度に高い頻度で振れることから、粗粒径の砂が活発に動き出すことが分かる。一方、この期間に漂砂量のグラフは大きく負の方へ湾曲する。つまり、この期間には粒径の大きい砂が岸向きに運ばれていることが分かる。その結果、粗い砂が最遡上点付近に堆積することが考えられる。

次に、図-13はCASE21の結果で、静水深以外の条件はCASE1と全く同じである。ただし斜面は、実験開始前に砂を良く乱すなどして粒度の分布を一樣にするようにはしているが、若干の違いはある。実験開始12、3分頃から $D_{50} = 0.7\text{mm} \sim 0.9\text{mm}$ 程度の粒径の大きな砂が主体となって移動を始め、漂砂量もCASE1同様、20分を過ぎるころまで岸向きに大きく偏るようになる。その後、 D_{50} は徐々に小さくなり、30分あたりで段落ちがあり0.7mmから低下して、0.5mmあたりで落ち着くようになる。それと同時に漂砂量も造波前半に比べると小さくなる。

図-14はCASE22の結果で、CASE21から水深を35cmから3cm増加したケースであり、波の諸元は変更していない。漂砂量は周期的に岸向きと沖向きに変化するが、 D_{50} は間欠的に0.8mm～0.9mmの砂が出現するものの底質の $D_{50} = 0.46$ に近い0.5mmを軸に推移している。これは水位が3cm上がったことで、平衡断面が若干変化したためで、これに伴い、粗い粒径の砂が岸に運ばれ、その一部は最遡上点付近に堆積する。この様にして、一旦形成されたバーム地形の岸側により粗い粒径の層が出来ると考えられる。

図-15は3cm上げた水位を元に戻して、さらに造波した結果だが、地形が殆ど平衡状態であるため、漂砂量は小さい。一方で、 D_{50} はいずれのケースよりも変化が激しい。これは、ステップ周辺に捕捉された粗粒子が遡上域

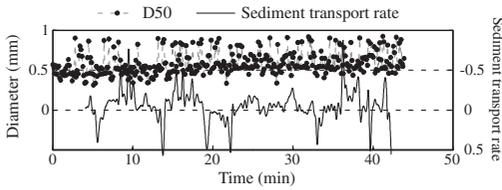


図-14 CASE22の表面粒度と漂砂量の時系列

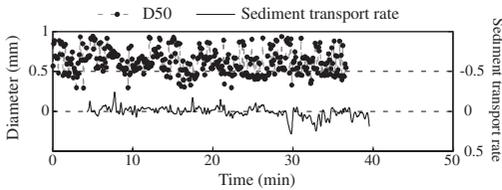


図-15 CASE23の表面粒度と漂砂量の時系列

の表面を波運動に伴って間欠的に行き来しているものを捉えたものだが、地形形成にはあまり寄与していない。

(4) 底面内部の粒度

図-16～図-21は底面内部の砂の中央粒径と淘汰係数の鉛直分布の結果で、図-16～図-18がCASE1、図-19～図-21がCASE2の結果である。粒度の測定方法は表面粒度の測定と同様、写真による粒度解析を用いた。

図-16は深さ方向60mm付近が初期底面で、造波初期に粗粒子が堆積し、その後、徐々に細かい砂が堆積している。深さ方向30mm付近は初期底面から約3cm堆積した点だが、図-8の底面高変化の時系列を参照すると、造波開始から約15分頃である。一方、その頃の表面粒度は図-12をみると、最大で0.9mm程度の砂が動いているが、図-16の結果をみると、実際に地形を形成するのは底質のD₅₀付近の0.5mm程度の砂である。つまり遡上域の表面を移動状態にある砂は中央粒径とは限らないことと、地形形成の段階に応じ、時間変化している。

CASE2もCASE1同様の傾向があり、地形が非平衡状態の間、特に初期の段階においては大きめの砂が堆積し、それを過ぎて地形が平衡状態に近づくにつれてほぼD₅₀の砂が堆積する。ただ今回の実験ケースでは、この堆積過程はCASE21の間に殆どが終了したため、CASE21～CASE23で形成された地形について、水深一定のCASE1と明確な相違を見るには至らなかった。

4. 結論

遡上域において底質が分級される過程を波の周期程度の時間スケールで調べることを目的とし現地観測と室内実験を行った。その結果、本手法を用いることで、遡上域の底面表面の砂の粒度を波の周期の時間スケールで計測できることが分かった。特に、粒径に関して砂が選択的に漂砂されることや、平衡地形に達するまでは、移動

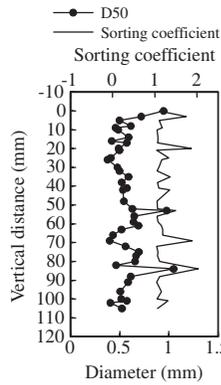


図-16 1.2m地点 (CASE1)

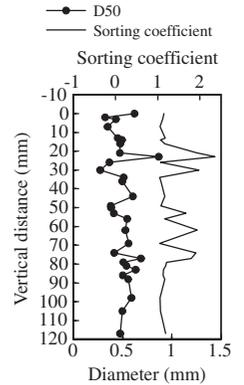


図-17 1.4m地点 (CASE1)

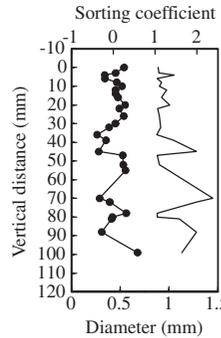


図-18 1.6m地点 (CASE1)

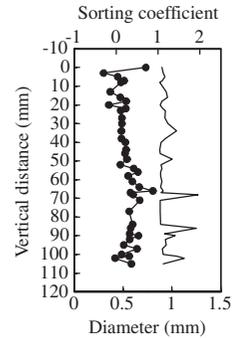


図-19 1.2m地点 (CASE2)

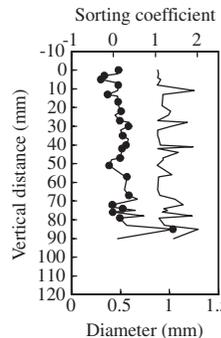


図-20 1.4m地点 (CASE2)

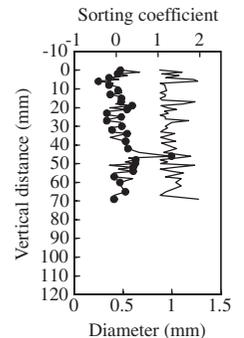


図-21 1.6m地点 (CASE2)

状態にある底面表面の砂の粒度と地形を構成している砂の粒度は必ずしも一致しないことを実測して確かめた。

参考文献

辻本剛三・細山田得三・柿木哲哉・宇野宏司 (2008) : 不規則波によるフィルター層を有する海浜断面の可逆性からみた安全性について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.746-750.
 Bascom, W. N. (1951): The relationship between sand-size and beach-face slope, Transactions American Geophysical Union 32, pp. 866-874.
 Fox, W. T., J. W. Ladd, and M. K. Martin (1951): A profile of the four movement measures perpendicular to a shore line, South Haven, Michigan, J. of Sedimentary Petrology 36, pp. 1126-1130.