

— 論 文 —

多様な湿潤密度を有する 礫質土砂環境の硬度評価の研究*

梶原 直人^{1**}・佐々 真志²

要 旨

礫浜の潜砂環境としての底質硬度について、湿潤密度との関係は殆ど知見が存在しない。本研究では、粒径や形状が一定で、密度が異なる6種類の基質(細礫)を用いて、海水で飽和させた地盤の湿潤密度を測定した。同時に、4種のベーンと2種のトルク計によるベーンせん断抵抗及びデジタルフォースゲージによる貫入抵抗を測定し、礫底の硬度測定法としての適性を検討・考察すると共に、礫質硬度と湿潤密度の関係を明らかにした。湿潤密度と貫入抵抗との間に有意な相関は認められない一方、ベーン形状比が1以上では、湿潤密度とベーンせん断抵抗との間に高い相関があり、湿潤密度が高くなるにつれて、ベーンせん断抵抗が増加した。粒径が同等の礫で湿潤密度が異なる際の貫入抵抗とベーン形状比が1を下回る場合のベーンせん断抵抗は、礫浜の潜砂環境の測定法として不適であると考えられ、直径と同じ高さ程度以下のベーンを使用してせん断抵抗を測定する必要がある。

キーワード：礫, 湿潤密度, 硬度, 貫入抵抗, ベーン形状比

1. はじめに

筆者らは、砂浜海岸において、潜砂性小型甲殻類の生息環境として堆積物の物理的性質を解析した。その結果、潮上帯から潮下帯上部における潜砂性小型甲殻類の

帯状分布について、汀線域まではサクシヨンの変動とそれに伴う物理的な土砂環境の変動が、潮下帯においては砂漣・ステップの生成に代表される漂砂挙動の変化が帯状分布域の構成に寄与していることを明らかにした(佐々ら, 2010; Sassa *et al.*, 2014; 梶原・高田, 2008; 梶原・高田, 2013; 梶原・高田, 2014)。また、砂に分類される粒径であっても、粒径が大きくなるにつれて物理的性質は段階的に砂から礫へと移行し、貫入抵抗やベーンせん断抵抗、さらに測定に用いるベーンブレードの寸法によって物理的性質が砂から礫へと移行する粒径が異なることも明らかにした(梶原, 2016)。底質のベーンせん断強度は、多様な底生生物の巣穴発達条件や潜砂限界を支配していることが明らかになっており(Sassa and Watabe, 2008; Sassa *et al.*, 2011)、近年では、生物攪拌一土

* 2018年12月7日受理; 2019年4月25日受理
著作権: 日本海洋学会, 2019

1 国立研究開発法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所
〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

2 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

** 連絡著者: 梶原 直人

TEL: 0829-55-0666 FAX: 0829-54-1216
e-mail: naotok@affrc.go.jp

砂相互作用 (Seike *et al.*, 2018) ならびに生物間相互作用 (Tamaki *et al.*, 2018) の解明にも大きく貢献するなど、生態環境の特性化に重要な役割を担ってきている。一方、礫浜海岸における物理的な土砂環境に関する知見は、近年ようやく蓄積が始まりつつある (梶原, 2015)。筆者は礫相当の粒径の堆積物において、礫の粒径 (比重 2.5 のガラスビーズで統一したためほぼ一粒の重量) と飽和時には水中重量、不飽和時には空中重量によって、極めて単純な土砂環境を構成している可能性が高いことを明らかにした (梶原, 2015)。これは礫が砂と異なりサクシオンがほぼ作用しないためであり、砂浜とは土砂環境が大きく異なっている。また、礫浜と砂浜の物理的性状の違いに着目して潜砂生物の生息環境を解析した知見もみられ (梶原ら, 2017)、礫浜や礫底における土砂環境が生物の分布に与える影響の解明が今後一層、重要性を増すと考えられる。

礫底に依存して生活する生物の例として、瀬戸内海には産業上の重要魚種であるイカナゴが潜砂して夏眠することが知られているが、異なる密度の底質が混在している場合、粒径のみで生息環境を解析するには注意を要する。これまでの知見においてもイカナゴの夏眠場所となる底質の粒径は、海域ごとに差が認められ、最も広い範囲で 0.5 ~ 4 mm の間とされている (中村ら, 1997)。

礫底を構成する堆積物には種々の由来を持つものが考えられ、石英等の鉱物に由来するものをはじめ、貝殻により構成された貝殻礫や砕かれたサンゴに由来するサンゴ礫など、生物起源の礫も普遍的に存在する。また、環境再生でカキ殻等の各種リサイクル材料を用いる事例も増えているほか、水産増養殖に用いる基質としてもこれらの材料が多用されている実態があり (長谷川ら, 2012)、多様な基質の密度がイカナゴの潜砂の可否に与える影響の把握は重要である。

石英主体の鉱物と密度が異なる礫については、サンゴ礫や軽石、貝殻礫など堆積物の由来が多岐にわたる場合、底質硬度等の物理的性質に大きな差異が生ずる可能性がある。一方で、底質の硬度は潜砂性の生物の生息環境として大きな影響を持つことが知られているが、これまでの研究は代表的な堆積物の成分である石英の密度を基準として行われているため、堆積物の密度の差が底質の硬度にどのように反映されるのかは不明である。飽和

時の礫においては、上述のように礫の粒径と水中重量によって、極めて単純な土砂環境を構成している可能性が高い (梶原, 2015)。また、砂の粒径によって潜砂性小型甲殻類の近縁種が棲み分けているという結果 (梶原, 1999) も考え合わせると、密度と粒径から礫一粒あたりの重量を計算し、比較することによって、密度の異なる礫相当の粒径における堆積物の物理的性質とその変動傾向が推定・解明できる可能性があるが、これまでにそのような解析が行われた事例はない。

密度の差が礫の物理的性質に与える影響は全く知られていないため、その解明にあたっては、最初の段階として実験的手法を用いることで密度が底質硬度に与える影響の一般則を明らかにする必要がある。そのためには実験に用いる基質について、密度以外に物理的性質に影響を与えると推察される要素をできる限り無効化する必要がある。具体的には粒子の形状及び粒径をできるだけ統一するとともに、密度のみが異なる複数の基質を用いて種々の硬度指標を測定することで、密度の差による底質硬度への影響のみを抽出することが肝要である。

そこで本研究では、まず粒径や形状を一定の範囲とし、密度が異なる 6 種類の基質を用いて、海水で飽和させて地盤の湿潤密度を測定すると共に、同時に底質硬度を測定することにより、密度の変化が地盤の底質硬度の変動、礫底における生物の潜砂しやすさにどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを試みた。また、底質硬度の指標として貫入抵抗及びせん断抵抗を測定することにより、密度の異なる礫における海底地盤の底質硬度の測定法の適性を検討・考察した。また、これらの結果をふまえて、礫底におけるイカナゴ夏眠場の好適な潜砂環境の詳細な解析につなげることを目的とした。

2. 材料及び方法

最下部に目合 63 μm のふるいを装着した $\phi 15\text{ cm}$ 、高さ 30 cm の塩ビ管に球形で密度が異なる 6 種類の礫に相当する基質を投入したうえでトスロンバケツ内に設置した。基質の粒径は、イカナゴの好適な潜砂環境が粒径 4 mm までであること (中村ら, 1997)、粒径 2 mm 以下では底質区分が砂となってしまう、礫とは異なる物理的性質によって礫と密度の関係を解明するうえでの支障と

Table 1 Grain, wet density (g/cm^3), mean grain size (mm) and mean circularity of six materials for substrate.

	Neo coal	Care shell	Glass beads	Almina	Zirconium 4	Zirconium 6
Grain	1.44	2.10	2.50	3.60	4.00	6.00
Wet	1.30	1.52	1.93	2.67	2.92	4.30
Wet(packed)	1.37	1.56	1.98	2.74	2.99	4.31
Mean grain size	3.97	2.97	2.92	3.06	3.21	2.92
Mean circularity	0.93	0.91	0.90	0.94	0.89	0.94

なることが危惧されることから、粒径 3 mm 程度を中心に 2 ~ 4 mm の範囲に収めた (Table 1)。バケツに各基質が飽和するまで海水を注水した後、飽和水位を基質表面に合わせて硬度測定を行った。硬度測定に用いた基質は、園芸培養土として市販されている東洋電化工業株式会社製「ネオコール小粒」(以下ネオコール)、カキ殻粉末を原料としてアサリ増殖用基質として市販されているケアシェル株式会社製「ケアシェル小粒品」(以下ケアシェル)、ガラスビーズ ($\phi 2.500 \sim 3.500 \text{ mm}$)、アルミナボール (以下アルミナ)、ジルコニアボール (以下 Zi4)、ジルコニアトレセラムボール (以下 Zi6) を用いた。各基質の密度は製造・販売会社の諸元からそれぞれ 1.4 ~ 1.47 (以下 1.44 とする)、2.1 (長谷川ら, 2012)、2.5、3.6、4.0、6.0 g/cm^3 である。アルミナ、Zi4、Zi6 については実際の海岸・海底における底質の粒子の密度の範囲を超えていると考えられるが、飽和状態において基質の密度が底質硬度に与える影響を広範に把握するために設定した。また、基質を自然に落下させ海水に飽和させた状態での湿潤密度を基質ごとに測定した。湿潤密度は、100 ml のステンレス製採集筒に基質を乱さずに採集して測定した。本実験で用いる基質は、粒径 3 mm 程度で球形と密度以外の粒径・形状はほぼ同等にしているが、各基質が球形であることを確認する目的で、吉村・小川 (1993; 1994a; 1994b) において提唱・利用されている凹凸係数 FU (円形度と同じ算出法 $4\pi \times (\text{粒子の投影面積}) \div (\text{粒子の周囲長})^2$ で算出されるため、以下は円形度と表記する) を算出した。円形度の算出には画像測量アプリケーション Touch De Measure Ver. 0.5 の円形度測量機能を使用し、吉村・小川 (1993) に従って基質ごとの測量数を 20 とした。また、基質ごとの摩擦抵抗に差が生じて底質硬度に影響を与える可能性がある。そこで摩擦

抵抗の差を確認する目的で、摩擦係数及び内部摩擦角の目安となる安息角 (松尾, 1984) を JIS R 9301-2-2 に準じた注入法で測定した。安息角は、アクリル製の箱に台を設置した状態に上方の漏斗から基質を落下させて堆積した基質の山の頂角以外とし、各基質 5 回ずつ左右とも測定しそれらの平均を内部摩擦角 Φ とみなすと共に、 $\tan \Phi$ を摩擦係数として算出した。

底質の硬度指標には、日本電産シンボ社製デジタルフォースゲージ FGC-5B の防水改造型 (以下 DFG: Photo. 1) による表層 5 cm 深までの貫入抵抗の測定値を用いた。また、東日 FTD2CN-S (容量 2 $\text{cN}\cdot\text{m}$: 精度 0.05 $\text{cN}\cdot\text{m}$)、東日 FTD5CN-S (容量 5 $\text{cN}\cdot\text{m}$: 精度 0.1 $\text{cN}\cdot\text{m}$) の 2 種の容量が異なるトルクメーターに、 $\phi 30 \text{ mm}$ 、高さ 10 mm、20 mm、30 mm、60 mm (梶原, 2016) の高さが異なる 4 種のペーンをそれぞれ組み合わせてそれぞれのペーンの深度で最大せん断抵抗を測定し、水平方向の硬度指標とした (Photo. 2)。底表の何れの硬度指標についてもそれぞれ



Photo. 1 Device for measurement of penetration resistance.



Photo. 2 Four-type vanes for measurement of vane shearing.

れ5回ずつ測定した。

また、底質硬度や湿潤密度測定値における間隙比の影響を確認するため、実験容器内で各基質の体積が減少しなくなることが容器内のメジャーで確認できるまで振とうさせた状態においても上述の方法で底質硬度や湿潤密度を測定した。

3. 結果

各基質の平均粒径、円形度、粒子密度、湿潤密度をTable 1に示す。湿潤密度は1.30から4.30 g/cm³を示した。基質震とう後の湿潤密度は1.37から4.31 g/cm³を示し、最大で0.07 g/cm³上昇した。各基質の平均粒径は2.92～3.97 mmの範囲であった。各基質の円形度は0.89から0.94の範囲であった。算出された円形度についてKruskal-Wallisの検定(ノンパラメトリック1元配置)を

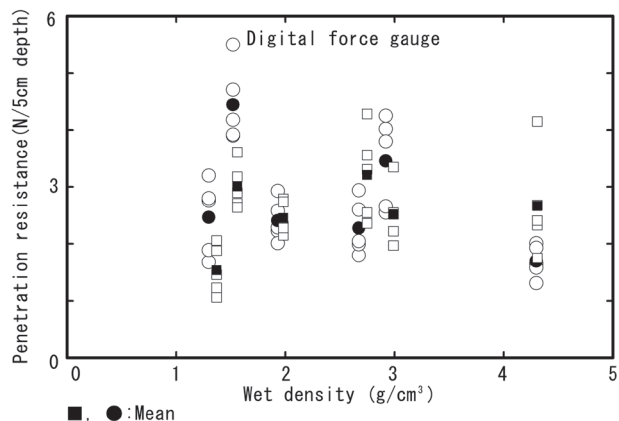


Fig. 1 Digital force gauge (DFG) measurement for each wet density.

○: Natural deposition, □: Packed material.

行った結果、各基質の円形度の平均値に差があるとはいえないと検定された。湿潤密度ごとのDFG測定値をFig. 1に示す。DFG測定値と基質の湿潤密度との間には明瞭な傾向が認められず、最小二乗法による線形回帰分析では95%水準で有意な相関は認められなかった。特に、比較的湿潤密度が低いケアシェルの測定値が高かった。

各基質の安息角と、そこから算出された摩擦係数 $\tan\Phi$ をTable 2に示す。安息角、摩擦係数ともネオコールとケアシェルで突出して高かったが、その他の基質では粒子が平滑なため2層以上に積み上がることがなく、安息角及び摩擦係数の測定・算出が出来なかった。

基質の湿潤密度ごとの、各ベーンにおける測定値をFig. 2～5に示す。高さ10～30 mmのベーンにおいて基質の湿潤密度との間に最小二乗法による線形回帰分析において95%水準で有意な相関が認められた。高さ

Table 2 Repose angle and coefficient of friction($\tan\Phi$) in six types of substrates.

Angle of repose(°)	Neo coal		Care shell		Glass beads		Almina		Zirconium 4		Zirconium 6	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
30	30	35	35	35	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
30	25	30	30	30	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
40	35	30	30	30	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
30	35	30	30	30	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
30	25	30	30	30	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
Average	32	30	31	31	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0	≒0
Average(Φ)	31		31		≒0		≒0		≒0		≒0	
$\tan\Phi$	0.5709		0.5709		≒0		≒0		≒0		≒0	

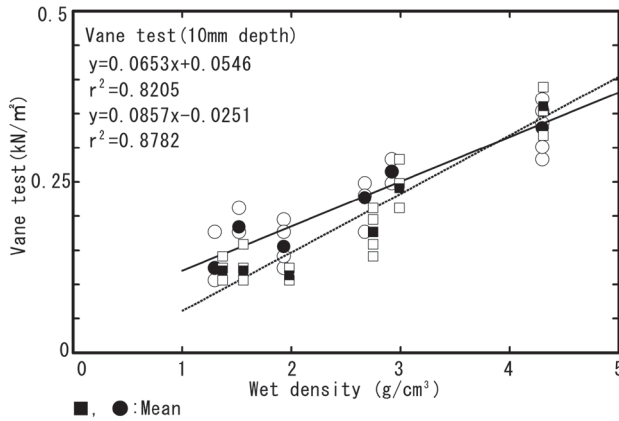


Fig. 2 Hand vane (HV/D: 30 mm, H: 10 mm) measurement for each wet density.
○: Natural deposition, □: Packed material.

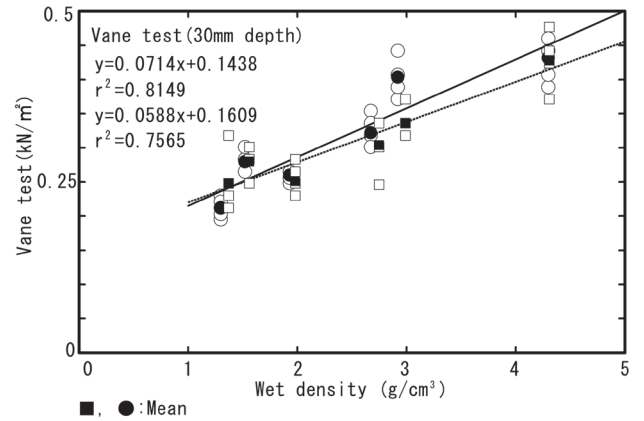


Fig. 4 Hand vane (HV/D: 30 mm, H: 30 mm) measurement for each wet density.
○: Natural deposition, □: Packed material.

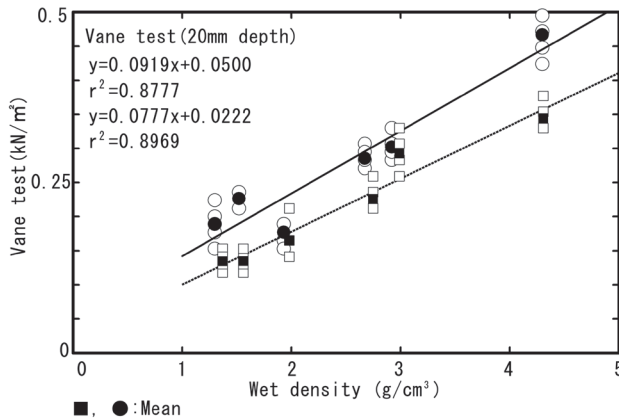


Fig. 3 Hand vane (HV/D: 30 mm, H: 20 mm) measurement for each wet density.
○: Natural deposition, □: Packed material.

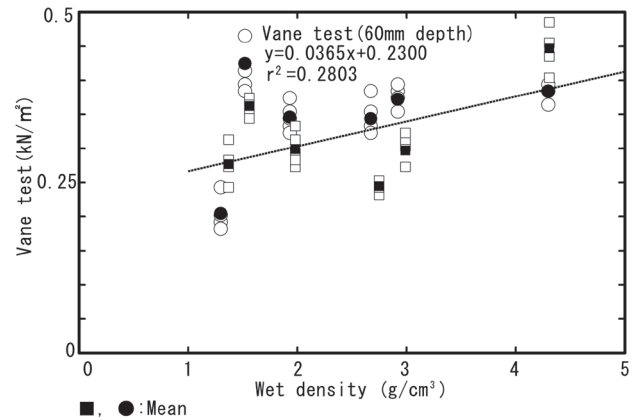


Fig. 5 Hand vane (HV/D: 30 mm, H: 60 mm) measurement for each wet density.
○: Natural deposition, □: Packed material.

60 mm のベーンにおいては基質を震とうした場合のみ 95%水準で有意な相関が認められたが、 r^2 は 0.3 以下であった。その一方で、95%水準で有意な相関が認められた場合には、その r^2 が全て 0.7 以上の決定係数であった。Fig. 6 ~ 11 に、基質ごとのベーン高さによるせん断抵抗値の変動を示す。ケアシエルにおいてはベーンの高さの増加にともなって、ほぼ直線的にせん断抵抗値が上昇する傾向が見られたが (Fig. 7)、その他の基質ではベーンの高さが 30 mm まではほぼ直線的にせん断抵抗値が上昇するものの、高さ 60 mm のベーンにおいてはせん断抵

抗値の上昇が鈍化する (Fig. 8, 9)、もしくは下降に転じる傾向が認められた (Fig. 6, 10)。

4. 考察

本実験の結果から、湿潤密度以外の条件を統一した礫相当の基質では、湿潤密度と底質硬度との間に直線的な高い相関が認められることが明らかとなった (Fig. 2 ~ 4)。ただし、DFG で測定した貫入抵抗を底質硬度の指標とする測量法や、ベーン形状比 (ベーン径 / 高さの比) が

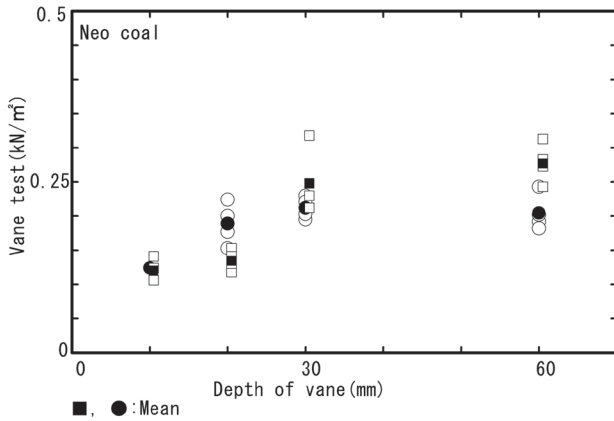


Fig. 6 Hand vane measurement in neo coal.
 ○: Natural deposition (wet density: 1.30 g/cm³),
 □: Packed material (wet density: 1.37 g/cm³).

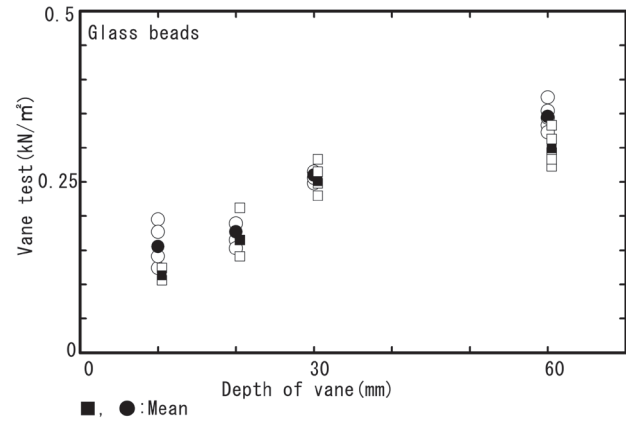


Fig. 8 Hand vane measurement in glass beads.
 ○: Natural deposition (wet density: 1.93 g/cm³),
 □: Packed material (wet density: 1.98 g/cm³).

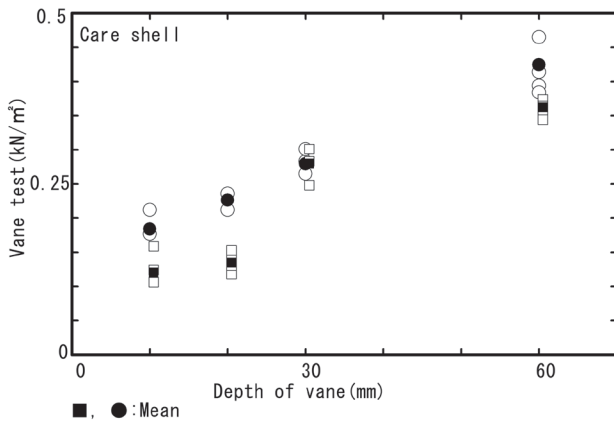


Fig. 7 Hand vane measurement in care shell.
 ○: Natural deposition (wet density: 1.52 g/cm³),
 □: Packed material (wet density: 1.56 g/cm³).

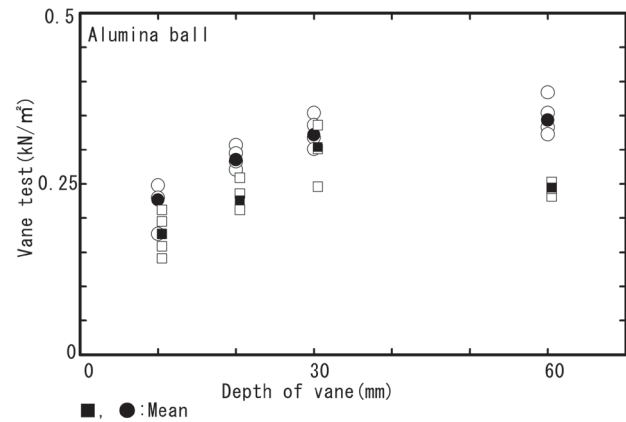


Fig. 9 Hand vane measurement in alumina ball.
 ○: Natural deposition (wet density: 2.67 g/cm³),
 □: Packed material (wet density: 2.74 g/cm³).

1を大きく下回るベーン(30×60mm)を用いたせん断抵抗の測定では有意な相関が認められなかった(Fig. 1, 5)。基質の摩擦係数は、ネオコールとケアシェルのみで高く(Table 2)、これらのDFG測定値がより密度の高い基質よりも同等かそれ以上となっていることを合理的に説明できるが、摩擦係数が無視できる程度で共通している他の4種の基質におけるDFG測定値について、基質の湿潤密度との関連が乏しいことを説明できない。また、ベーンせん断抵抗の測定結果では、高さ60mmのベーン以外でネオコールとケアシェルの測定結果を含めても高

い決定係数が得られている。本実験の結果だけからでは摩擦係数の差が底質硬度に与える影響は不明瞭であり、今後の課題として摩擦係数の差に重点を置いた研究を行う必要がある。DFG測定値については、0.5mm程度以上の粒径に対して用いた場合、実験下でも実際の砂浜においても測定値のばらつきが大きくなることが明らかとなっており、これは主に粒子間の間隙が大きくなることによると考えられているが(梶原・高田, 2013; 梶原, 2016)、本実験ではそれに加えて密度を変動させたことで、さらに測定値がばらつく要素を与えてしまったため

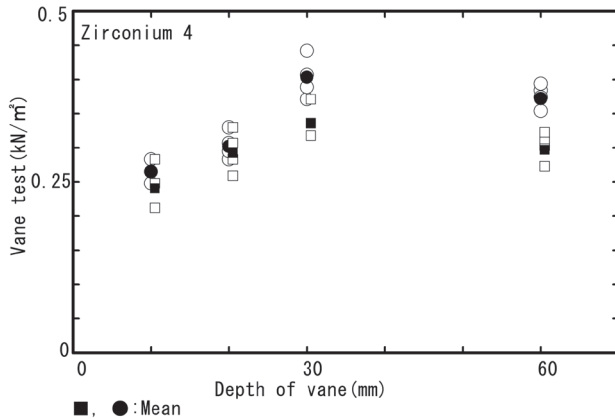


Fig. 10 Hand vane measurement in zirconium 4.
 ○ : Natural deposition (wet density: 2.92 g/cm³),
 □ : Packed material (wet density: 2.99 g/cm³).

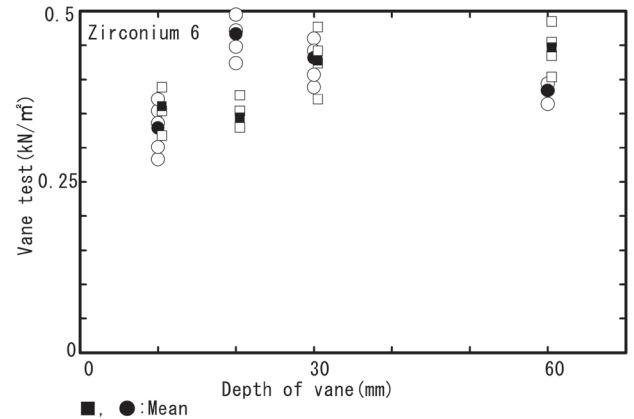


Fig. 11 Hand vane measurement in zirconium 6.
 ○ : Natural deposition (wet density: 4.30 g/cm³),
 □ : Packed material (wet density: 4.31 g/cm³).

有意な相関が認められなかったと考えられる。このような粗粒堆積物の測定に対するDFGの欠点を克服するために、本実験と同じペーン径/高さ比(30×60mm)を持つペーン(DHV)によって種々の粒径のガラスビーズにおけるペーンせん断抵抗が測定されている(梶原, 2016)。DFGとの測定結果の比較では、測定値のばらつきは小さく、得られた相関の決定係数も高かったが、30×10mmのペーンと比較するとこと測定値のばらつきは大きく、得られた相関の決定係数も低いことが明らかとなっている(梶原, 2016)。実際にFig. 1とFig. 5の比較では、DFGよりも高さ60mmのペーンで相関が高いといえ、測定値の精度については梶原(2016)の実験結果と一致しており、この現象について合理的に説明できる。ペーン形状比については、同じ基質ではペーン径に対する高さが大きくなるほどペーンせん断測定値が増加するものの、ペーン形状比が最も小さい高さ60mmのペーンではその傾向が鈍化している(Table 1)(Fig. 9~11)。一般にペーン形状比はペーンせん断抵抗に種々の影響を与えることが知られているが(藤村・勝見, 1980; 柴田, 1967; 能登, 1982)、その影響はペーンの寸法を記述していないものもあって一様ではない。本実験結果においては、最もペーン形状比が小さい高さ60mmのペーンにおいて、とりわけ密度の高い基質におけるペーンせん断抵抗測定値の低下が顕著となり決定係数の低下や有意な相関が得られなかったことがわかる。しかし、本実験結果

では、ペーン形状比が1~3(高さ30~10mm)の間では決定係数の大幅な変動や測定精度の低下は認められない。近年、解析技術の進歩によってペーンせん断抵抗について詳細な解析や実験が行われ、ペーンせん断抵抗測定時における応力分布が一様でないことが明らかとなっている(杉江ら, 1994; Donald *et al.*, 1978; Menzies and Merrifield, 1980)。これらの結果は、ペーンせん断応力分布がペーンブレードの上下端で最大となり、中央部で最小となることで一致しており、ペーンせん断試験をCTスキャンで詳細に解析した結果もこれを支持している(川尻ら, 2017)。また、これらの知見はペーンせん断抵抗測定時におけるペーンブレードの力学的な分布の差に由来していることから、粘着力やサクションが働かない条件、例えば本実験のような飽和状態や乾燥状態の礫や砂質土においても発現する普遍的な現象と考えられ、本実験結果の考察にも応用可能と考えられる。このことをふまえると、ペーン径が同じでペーン形状比が1を大きく下回る場合、せん断応力の小さい部分が増大していくと考えられ、高さ60mmのペーンせん断測定値増加量が小さくなる本実験結果を合理的に説明できる。一方、本実験ではペーン形状比1~3までは湿潤密度の変動に対し決定係数の高い相関が得られている。この理由についても先述の通り、ペーンブレードの上下端が最もせん断応力が大きいいため、ペーン高さが低ければペーンせん断応力の小さい中央部の比率は低い、もしくは上下端の

ベーンせん断応力の大きい部分が重複するなどの理由によって相対的にベーンせん断測定値が大きくなまま安定することによるものと考えられる。

本実験結果より、異なる密度の礫が混在した底質硬度の測定にあたっては、DFGによる貫入抵抗は不適であると結論づけられた。また、ベーンせん断抵抗は概ね良好な結果を示したが、礫質地盤ではベーン形状比が1を大きく下回るとベーンせん断測定値が低くなることによって測定精度が低下することも明らかとなった。実際に現場で測定する場合においても、潜砂生物は底表から潜砂するので底表の底質硬度の把握が重要であること、対象となる潜砂生物が小型である場合を考慮すれば精度の高い測定値が必要となることから、異なる密度の礫が混在した底質におけるベーンせん断抵抗の測定は、ベーン形状比が1以上の比較的底表の測定を主体としたベーンブレードが望ましいと結論づけられる。また、今回明らかとなった礫の密度の変動による底質硬度の応答は、同じく一粒の重量の変動である粒径の変動によるものとは全く異なり、粒径を1.5～8 mmまでの間で6段階変動させた場合でもDFG測定値は粒径に対応している(梶原, 2015)。一方で、基質の密度変動が底質硬度に与える影響は粒径の変動時のように一様な傾向ではないことが明らかとなった。また、本実験で使用した基質の密度の範囲は、実際の海底堆積物の密度を超えていることから、礫の密度変化が潜砂性の生物の潜りやすさに与える影響は限定的であると結論づけられる。さらに、今後の課題として礫粒子の基質の密度や粒径を一定の範囲に設定し、摩擦係数、あるいは摩擦係数に影響を与える要因、たとえば粒子形状を段階的に変動させた場合の底質硬度の変動について知見を得る必要がある。

今回の実験結果から、生物生息環境としての礫の物理的性質について、密度の影響について検討・考察を加えることが出来た。今後は礫の形状も測定・評価の対象とすることで、礫の物理的要素がその性質に与える影響を総合的に評価する必要がある。これにより、現時点では各地で粒径の範囲が異なるイカナゴの好適な夏眠場について、貝殻礫など密度の異なる礫や礫の形状の影響を含めたベーンせん断抵抗測定値でより正確に、統一的に定義出来る可能性がある。

謝辞

この研究の一部はJSPS 科学研究費補助金基盤研究(A)「沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発(課題番号: JP15H02265)」の助成を受けた成果の一環である。ここに記して謝意を表すものである。

また、円形度の測定には滋賀県立大学榎本洗一郎、熊本大学戸田真志両先生が作成された測量アプリケーション「Touch De Measure Ver. 0.5」を使用させていただいた。ここに記して謝意を示すものである。

References

- Donald, I.B., D.O. Jordan, R.J. Parker, and C.T. Toh (1978): The vane test - a critical appraisal, *Proc. of the 9th international conference on soil mechanics and foundations engineering*, 1, 81-88.
- 藤村尚・勝見雅 (1980): 黒ぼくのベーンせん断強度について, 鳥取大学工学部研究報告, 11, 204-213.
- 長谷川夏樹・日向野純也・井上誠章・藤岡義三・小林節夫・今井芳多賀・山口恵 (2012): アサリ増殖基質としてのカキ殻加工固形物「ケアシエル」の利用, *水産技術*, 5, 97-105.
- 梶原直人 (1999): スガメソコエビ科ヨコエビ類の棲管作成能力に関する研究, *水産工学*, 35, 223-227.
- 梶原直人・高田宜武 (2008): ナミノリソコエビ *Haustorioides japonicus* (端脚目: ナミノリソコエビ科) の潜砂行動に及ぼす、飽和水位の影響に関する実験的研究, *水産工学*, 45, 151-156.
- 梶原直人・高田宜武 (2013): 新潟県の砂浜海岸汀線域における底質硬度と飽和状態との関係, *水産工学*, 50, 131-137.
- 梶原直人・高田宜武 (2014): 砂浜海岸汀線域における簡便な漂砂挙動判別法によるナミノリソコエビ *Haustorioides japonicus* 分布沖側下限の推定, *水産工学*, 51, 129-132.
- 梶原直人 (2015): 礫浜汀線域の土砂環境把握のための基礎的実験的研究, *水産工学*, 52, 127-131.
- 梶原直人 (2016): 砂相当の粒径の細粒化に伴う堆積物の物理的性質における変動特性, *水産工学*, 53, 99-103.
- 梶原直人・手塚尚明・浜口昌巳 (2017): 大分県中津干潟における地温とアサリ着底稚貝個体数の変動特性, *水産工学*, 53, 149-157.
- 川尻峻三・田中政典・川口貴之・猶原有希子・平林弘・中村大・山下聡 (2017): X線CTスキャンによるベーンせん断試験時のせん断機構の解釈, *地盤工学ジャーナル*, 12, No.1, 79-90.
- 松尾新一郎 (1984): 新稿土質工学, 山海堂, 東京, 253pp.
- Menzies, B.K. and C.M. Merrifield (1980): Measurement of shear stress distribution on the edges of a shear vane blade, *Géotechnique*, 30, No.3, 314-318.
- 中村元彦・船越茂雄・向井良吉・家田喜一・石川雅章・柳橋茂昭 (1997): 伊勢湾産イカナゴの夏眠場所, 愛知県水産試験場研究報告, 4, 1-9.
- 能登繁幸 (1982): 泥炭地におけるベーン試験の方法と結果の利用についてのレビュー, *土木試験所月報*, 346, 1-10.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2008): Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab

- Scopimera globosa*. *Marine Ecology Progress Series*, **354**, 191-199.
- 佐々真志・梁順普・渡部要一・梶原直人・高田宜武 (2010): 砂浜海岸における水産有用魚類の餌資源生物分布に果たすサクシヨンの役割. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **66**, No.1, 1126-1130.
- Sassa, S., Y. Watabe, S. Yang, and T. Kuwae (2011): Burrowing criteria and burrowing mode adjustment in bivalves to varying geoenvironmental conditions in intertidal flats and beaches. *PLOS ONE*, **6**(9), e25041, doi:10.1371/journal.pone.0025041.
- Sassa, S., S. Yang, Y. Watabe, N. Kajihara and Y. Takada (2014): Role of suction in sandy beach habitats and the distributions of three amphipod and isopod species. *Journal of Sea Research*, **85**, 336-342.
- Seike, K., S. Sassa, K. Shirai, K. Kubota (2018): Lasting Impact of a Tsunami Event on Sediment-Organism Interactions in the Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **123**, (2), 1376-1392.
- 柴田徹 (1967): 粘土のペーンセン断強度に関する研究. 土木学会論文集, **138**, 39-48.
- 杉江茂彦・飯塚敦・太田秀樹 (1994): 粘土地盤におけるペーンセン断強度の発現メカニズム, 土木学会論文集, **487/III-26**, 227-236.
- Tamaki, A., T. Kagesawa, S. Takeuchi, H. Ohashi, S. Yang and S. Sassa (2018): Facultative commensalism of a free-burrowing urothoid amphipod with a deep burrow-dwelling callianassid shrimp in intertidal sand. *Marine Biology*, **165**, 36. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3296-0>.
- 吉村優治・小川正二 (1993): 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法. 土木学会論文集, **463/III-22**, 95-103.
- 吉村優治・小川正二 (1994a): 粒状体の間隙比及びせん断特性に及ぼす一次性質の影響. 土木学会論文集, **487/III-26**, 99-108.
- 吉村優治・小川正二 (1994b): 砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響. 土木学会論文集, **487/III-26**, 187-196.

Laboratory simulation of gravel-type sediment environments with different wet density by means of sediment hardness

Naoto Kajihara^{1*} and Shinji Sassa²

Abstract

Very little information is available about the physical properties of gravel beaches and in particular, about their relationship with the wet density of gravel. To elucidate differences in the physical properties in shoreline areas of gravel bottoms, the sediment hardness and the wet densities of six different gravel-type sediments with a particle size of approximately 3 mm were measured. The sediment hardness was measured using two torque meters with four different vanes and digital force gages to understand the basic physical properties of gravel beach shoreline areas. There was no significant relationship between the wet density and penetration resistance. However, there was high correlation between the wet density and vane shearing for vanes with diameter-to-height ratios greater than or equal to unity. The vane shear strengths for three types of vanes satisfying this criterion increased with the wet density. The penetration resistance and vane shear strength for a vane with the diameter-to-height ratio less than unity are considered inadequate for the measurement of physical properties at different densities for gravel-type sediments of an equivalent diameter about 3 mm. Therefore, it is necessary to use vanes with height less than or equal to the diameter.

Key words: Gravel, Wet density, Hardness, Penetration resistance, Diameter-to-height ratio of vanes

(Corresponding author's e-mail address: naotok@affrc.go.jp)

(Received on 7 December 2018; accepted on 25 April 2019)

(doi: 10.5928/kaiyou.28.3_41)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2019)

1 National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Maruishi 2-17-5, Hatsukaichi Hiroshima, 739-0452, Japan.

2 Port and Airport Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Nagase 3-1-1, Yokosuka Kanagawa, 239-0826, Japan.

* Corresponding author : Naoto Kajihara
TEL : +81829550666 FAX : +81829541216
e-mail : naotok@affrc.go.jp