

博士論文

堆積物底における底質硬度の測定と潜砂性底生生物の分布への応用

平成 29 年 9 月

国立大学法人広島大学大学院生物圏科学研究科環境循環系制御学専攻

梶原 直人

目 次

第 1 章. 研究の背景	4
1) はじめに	
2) 海底堆積物に関する研究	
3) 生物の生息場所としての海底堆積物の評価の意義	
4) 生物の生息場所としての海底堆積物の評価の問題点	
5) 新しい考え方に基づく生物の生息場所としての海底堆積物環境評価の事例	
第 2 章. 底質硬度の測定器具・方法とその特徴	12
2-1 貫入型機器	
1) バネ式の貫入機器	
2) 自重式及び自由落下式の貫入機器	
3) コーン形状のデジタルセンサー	
2-2 せん断型機器	
1) せん断型機器(未改造)	
2) せん断型機器(改造)	
2-3 底質硬度に関わる物理指標	
1) サクシヨン	
2) 地下水位	
3) 飽和度	
4) 粘着力	
第 3 章. 砂浜海岸汀線域におけるサクシヨンと飽和との関係	19
3-1. 緒言	
3-2. 材料及び方法	
3-3. 結果	
3-4. 考察	

第 4 章. 潮位の変動に伴う砂浜海岸汀線域における土砂環境と 小型甲殻類の分布域の変動	28
4 - 1. 緒言	
4 - 2. 材料及び方法	
4 - 3. 結果	
4 - 4. 考察	
第 5 章. 礫浜汀線域の土砂環境把握のための実験的研究	34
5 - 1. 緒言	
5 - 2. 材料及び方法	
5 - 3. 結果	
5 - 4. 考察	
1) 物理的性質の特性からみた礫粒径と砂粒径との比較	
2) 従来 of 堆積物海岸における知見との関連性	
第 6 章. 総合考察	42
謝辞	46
参考文献	47
図, 表, Appendix	

第1章. 研究の背景

1) はじめに

我が国の漁獲量は減少の一途をたどっている。その原因は地球温暖化に伴う海洋環境の変化，他国によるものを含めた広義の過剰漁獲に加え，近年では獲っても売れないといったような消費者の“魚介類離れ”も関与しているため，その背景は複雑である。わが国では，これまで漁獲量の減少に対し，長年，種苗放流による資源増大策が行われてきたが，その効果は必ずしも挙がっていない。その原因のひとつに，対象種の生態的特性やその生息環境，漁場を含めた海洋環境についてほとんど研究されていないにも関わらず，種苗放流だけを行ってきたことが指摘されている。放流効果を最大限に発揮するためには，生物および物理環境要因によって決定される場の生産力を正しく評価して，適切な放流を行う必要がある。しかし，水産対象種や漁業の研究者の多くが生物系研究者であるため，生息環境や漁場を含めた海洋環境の研究は生物側に偏っており，純粋な環境研究のアプローチは少ない。なかでも，比較的値段の高いヒラメやアマダイなどの底生性魚類，越前ガニのようなカニ類，甘エビ・車エビのようなエビ類，ナマコ類，そして多くの二枚貝類が生活の場としている重要な海洋環境のひとつである海底やその底質に関する研究はほとんどない。

2) 海底堆積物に関する研究

海底は，堆積物を擁するものとそれ以外に大別されるが，本稿で取り上げる堆積物底を構成する堆積物は極めて多様な由来と成因を持つ。一般に，海に沈積してゆく堆積物は，海洋の深さ，陸地からの距離，堆積物供給源の地質，海洋中の沈積の場における環境条件などによって様々に異なる（奈須，1976）。陸棚域以深では生物の遺骸由来あるいは水溶性物質の晶出沈殿物からなる堆積物が存在するが（奈須，1976），大陸棚の範囲には海浜堆積物，沿岸堆積物，陸棚堆積物，河口堆積物，ラグーン（潟湖）等の汽水堆積物，海谷堆積物，内湾浅海堆積物などが知られており，なかでも砂礫は，その存在が大陸棚以浅に限られている（中瀬，1984）。

これまでに、海洋底およびその堆積物に関する調査・研究の多くは地質学あるいは土質工学・土質力学の分野で取り扱われており、生物の生息環境としての知見は岩礁海岸と比較して大幅に少ないばかりか研究分野も偏在している。現在の堆積物底における研究は、干潟をフィールドとした環境保全を目的とするものが多いが、主に生物の多様性から干潟の希少性、重要性を強調するものが多く、堆積物海岸・堆積物底としての特性から生物の分布を解析した研究例は少ない。砂浜海岸に至っては、地球上の結氷しない海岸線の約3/4を占め（Brown and McLachlan, 2002）、堆積物底及び海岸線の代表的な存在であるにもかかわらず、我が国では海岸侵食に代表される国土保全や周辺住民の安全、あるいは親水空間創成のための研究しか行われおらず、そこに生息する生物種の分布を調べた事例は少ない。

3) 生物の生息場所としての海底堆積物の評価の意義

この原因のひとつとして、生物が固着・定着しやすい岩盤・岩礁域と異なり、堆積物で構成される干潟や砂浜海岸では、これらを構成する基質が容易に移動することから、生物の分布を把握しにくいことが挙げられる。岩盤・岩礁域では固着生物が多く、また、これらは移動しないためその生残に及ぼす生物学的要因（捕食・被捕食など）などを定量的に検証しやすいが、干潟や砂浜の生物は流動する堆積中に生息するため、定量調査が困難である。このことはそこに生息する生物にとっても大きな影響があると考えられる。粒径の細かい堆積物で構成された海底は、流動し易いため固着生物の生息には適していないし、小型の底生生物にとっては定位すらも容易ではない。それに対し、流動的であるがゆえに生物にとっては堆積物内部への侵入が比較的容易に行えることから、基質中への侵入（潜砂等）あるいは基質内での移動（砂中移動等）といった行動様式を持つ生物種にとっては競合する生物種が少なく、良い環境といえる。従って、干潟や砂浜の堆積物底の生物相はこのような特徴に沿ったスペシャリストが多い。しかしながら、このような生物種ではしばしば、同じような粒径で構成される堆積物中でも帯状分布を示すことがある。この現象を説明するために、生物分布の研究が先行していた岩礁域での結果を参考に進められてきたが（Brown and McLachlan, 2002）、上述のように岩礁と堆積物底とは基質としての基本的な性質が大

大きく異なっており、単純に岩礁域の結果を適用するには大きな問題がある。実際に、それらの研究例が堆積物海岸における底生生物の帯状分布を明瞭に説明することはできていない。このように、堆積物底の生物の分布を解明するにあたっては、基質の特性を考慮した分布の一般則の確立を検討すべきと考える。

そのうえで、干潟や砂浜などの生物の分布の検討するためには、このような環境の水産対象種、例えば、アサリ等二枚貝などを対象とする場合が考えられるが、本研究においてはマクロベントスに分類される小型甲殻類、とりわけフクロエビ上目に属するナミノリソコエビ *Eohaustorioides japonicas* 等の生物種を対象とすることとした。その利点としては、①潜砂性の小型甲殻類では、個体が小さいため堆積物の粒径とのスケールの比較において、感度の高い反応が期待できること、②二枚貝類のように大型で重い殻を持たないために、潜砂能力等の差が明瞭に現れると期待できること、③浮遊幼生期を持たず、分散・移動範囲が狭いため限られた調査地点において分布パターンが容易に調査できること、④日本各地の干潟や砂浜など堆積物海岸の沿岸域において、普通に見られるとともに個体密度が高いことが期待できる等が挙げられる。

一方、堆積物底における底生生物の分布や棲み分けに関する知見は生息する生物同士の相互作用を原因と解析されているものも多いが（竹門ら、1995；Holte, 2001；高橋ら、1991）、このような解析手法では、生物の種組成が極めて単調な場合や生息する生物の密度が低い場合において、その適用には限界がある。すなわち、これらは少なくとも生物同士の相互作用が確認されている2種以上の出現と、生物同士の相互作用が起こりえる密度が両立し、さらにそれらによる底質環境の改変等が確認された場合にのみ成立する解析手法である。しかし、例えばマクロベントス全体の密度が平均で2000個体/m²程度であり、泥底においては500個体/m²以下になることもある日本海陸棚域（梶原・藤井、2001）等ではこれらの解析を適用することは困難である。また、砂浜海岸汀線域に大量に生息するナミノリソコエビ *Eohaustorioides japonicas* では、帯状分布域内でほぼ独占的に出現しており（奥村ら、2001）、帯状分布域の成立を種間の生物学的相互作用では説明できない。一方で、移動し易い干潟や砂浜などの海底堆積物で潜砂や造巣を行う生物にとっては、種毎、体長毎にそれぞれ底質を掘削可能な能力の限界が存在するはずであり、それを超えると生息することが困難となる。従って、このような環境での生物分布は、底質の物理的環境と生物の潜砂能力等の行動

特性によって解析が可能と考えられる。

このような研究は、潜砂や管棲により底質への依存が高い生活様式を持つ小型の底生生物を用いて、その分布について底質を構成する堆積物、とりわけ砂質堆積物の粒径や粒度分布等の堆積型と関連づけられて解析されてきた (Biernbaum, 1979; Gray, 1974; Rhoads, 1974; Sanders, 1958; 東ら, 1985)。Kajihara (1999) は小型甲殻類を用い、近縁種との棲み分けについて、種毎の潜砂及び棲管作成能力の範囲とその差異によって説明できることや、各々の種の棲管作成能力の範囲を超えた分布は不可能であるということを報告している。さらに、潜砂する生物では海底堆積物との関連はより明瞭であり、海底堆積物の粒径・粒度と潜砂速度などを指標化し、二枚貝やエビ類などの水産有用種の好適放流環境や飼育環境を決めるための調査に用いられている (櫻井ら, 1996; 阪地, 1995; 野坂・近藤, 2001)。例えば、阿久津ら (1995) は、造成されたアサリ増殖場において稚貝の発生量と底質硬度の間に一定の関係があることを報告している。また、岩尾ら (1996) は、トリガイのコンテナ養殖において、トリガイ漁場の底質を使用してもへい死してしまう原因の一つに底質環境が関係していると考え、コンテナに入れた種々の基質について貫入抵抗の一種である「締まり度」を測定した。その結果、締まり度をベースとしたコンテナ内の底質環境がトリガイ漁場に最も近かったのは粗粒・軽量のアンストラサイトを用いた場合であることを明らかにし、これを養殖用資材として使用することを推奨している。この成果により、トリガイのコンテナ養殖が実用化されるなど、地域産業に貢献している。

4) 生物の生息場所としての海底堆積物の評価の問題点

生物分布と海底堆積物との関係は、対象となる生物の能力と海底堆積物の粒径（一粒の水中重量）や粒度組成との対比で決定されるといえる。そのため、底質の粒度組成が干潟や砂浜で生物分布を調べる際の環境指標として用いられてきた。しかし、日本海側で発達する砂浜海岸汀線域では、同様な粒径の海底堆積物で構成されるにもかかわらず、生物が明確な帯状分布を示す事例が多く、底質の粒径や粒度組成と生物分布は明瞭な相関を示さない場合があり、これらが生物分布の指標としては不適であることが証明されている (奥村ら, 2001; Brown and McLachlan, 2002)。このことは、

砂浜海岸汀線域において生物分布を決定するため、粒径や粒度組成以外の環境勾配が存在していることを示唆している。一方で、同じ堆積物底であっても泥底では粒径が非常に細かいため、粒径の差による種毎の潜砂及び棲管作成能力の範囲に基づく分布域の相違が説明できない事例であるが、このような環境でも小型底生生物の密度が場所によって大きく異なることが経験的に知られていた（林，1984；梶原・藤井，2001）。これもまた、泥底にも生物分布が粒径や粒度組成とは異なる大きな環境勾配が存在していることを示唆している。このように、堆積物底における埋在性小型底生生物の分布の解析に極めて有効であった底質の粒径や粒度組成が、堆積物の種類もしくは条件によって応用できない場合があり、粒径や粒度分布の適用の限界が明らかになってきた。しかし、これまで砂底・砂泥底において、堆積物底の生息環境として用いられる比較的簡単に測定できる物理的指標としては、粒径及び粒度分布以外になく、泥底においてはこのような物理的指標そのものが存在していない状態であった。前述したように、粒径や粒度組成では生物分布を説明できない事例もあり、これらに代わる海底堆積物の物理指標が必要である。

生物の生息環境を解析するうえで、例えば水塊については化学的な性質のみならず物理的な性質についても指標として利用されており、例えば、海底の堆積物の淘汰や底生生物の浮遊幼生の動態や着底に深く関与する流動環境などが挙げられる（奈須，1976；山本，1973）。また、岩盤に固着する生活型を持つ生物や岩礁域に生息する生物の生息環境を解析する場合においても、その生息基盤である岩盤や岩礁について潮汐・波当たりや傾斜、岩同士の間隙、あるいは構成される岩石の種類や表面粗さ等、基質の物理的性質が生息環境の良否を決定する指標として多用されている（星野，1984；山本，1973）。一方で、潜砂や管棲など堆積物底に依存して生息する生物の分布や生息環境の解析は、粒径や粒度分布が適用できない砂浜海岸汀線域においては生態研究そのものの遅れが指摘されている（Brown and McLachlan, 2002）。泥底に至っては貧酸素水塊や酸化還元電位、あるいは富栄養化や化学的な汚染に研究が集中しており、物理的性質のみならずその生息環境としての応用に関してはほぼ手つかずの状態であったといえる。

泥底を構成する泥質堆積物については、流動動態や化学的プロセスによる含水（自身の重量以上の含水）、粘着力の常時維持、構成される粘土鉱物によるこれらの性質

の差異，有機物の吸着等砂質堆積物及び礫とは基本的な性質が大きく異なることが知られており，これらのことも底生生物の生息環境を評価するための，一般的な物理的性質の探求の大きな隘路となっていたと考えられる。また，これまで海底を構成する堆積物の物理的性質については，もっぱら土木・土質工学的に解析され，その結果を構造物の建築やその適性に応用することを前提としているため，土砂環境として空間的に大きなマクロスケールでその成果が出されているものが多く，そのことは使用されている物理量の単位や測定レンジにおいてその傾向が顕著である。一方，海底に生息する生物において，その個体数の95%が底表から5cm深までに生息する(谷田・奥田，1958)ことを考慮すれば，土木・土質工学的な知見とはスケールが大きく異なるため，これらの成果や知見をそのまま底生生物の生息環境の指標とすることには大きな問題がある。つまり，堆積物底における底生生物のスケールに合った物理的指標（粒径及び粒度組成を除く）に関する研究がこれまでに殆ど行われてこなかったことを示している。

従って，堆積物底において①底生生物の大きさを考慮した空間スケールでの測定と単位，②汎用性が高く，③観測が容易でありながら，④生物の潜砂・管棲能力を超える分布は出来ないという原則(Kajihara, 1999)にも明瞭・簡潔に証明するための物理的指標の開発が切望されている。これらの条件を満たす堆積物底の物理指標として，底質の硬度が挙げられる。その理由としては，底質の硬度は粒径及び粒度分布が殆ど変化しない砂浜海岸汀線域において大きな環境傾度を持つと考えられること，粒径の変動の影響が極めて小さい泥底においても底質の硬度は含水比の幅広い範囲に同調することから指標化しやすいと考えられることが挙げられる。また，底質の硬度の増減は，潜砂・管棲能力の範囲との比較・検討において底生生物の分布域限界を規定するには合理的であると考えられる。しかし，海底及び砂浜の底質の硬度をどのような物理指標で代表し，どのように測定するのかという基準，手法及び器具については，確立されたものが存在していなかった。

そこで，著者および著者らを含めたグループではこのことに着目して研究を進めたため，堆積物底の硬度を測定し埋在性小型底生生物の潜砂，生息環境の指標とする手法はこの10年程度で急速に進歩し，多くの成果を上げるまでに至っている(阿久津ら，1995；岩尾ら，1996；梶原，2001；佐々・渡部，2006；佐々・渡部，2007；梶原・高田，

2008 ; 佐々ら, 2008 ; Sassa and Watabe, 2008 ; 中山ら, 2009 ; 佐々ら, 2009a ; 佐々ら, 2009b ; Sassa and Watabe, 2009 ; 梶原ら, 2010 ; 佐々ら, 2010b ; 梁ら, 2011 ; Sassa et al., 2011 ; Sassa et al., 2014) 。

5) 新しい考え方に基づく生物の生息場所としての海底堆積物環境評価の事例

このような考え方や方法論を取り入れた調査事例の一つに、能登半島西岸の砂浜海岸で物理環境と底生生物調査を行い、砂浜海岸汀線域に典型的な少数種による高密度のマクロベントス群集形成 (McLachlan, 1983) が同海域にも形成されていることを確認した奥村ら (2001) の研究がある。しかし、この研究では、同時に底質の粒度組成や海岸勾配はこれら帯状分布の成立を説明できるものではないことも解明した (奥村ら, 2001)。この現象を説明するために、梶原・高田 (2008) により、砂浜海岸汀線域において高密度分布を示すことがあるヨコエビ類ナミノリソコエビを用いて、同種が高密度分布している砂浜海岸汀線域の砂を用いた室内実験が行われた。この実験は、砂面と同一高さの水面から1cmずつ水位を下げてゆき、それぞれの水位でナミノリソコエビの潜砂の可否とデジタルフォースゲージ (以下DFG : **Appendix 1**) , ポケットベーンテスター (以下VT : **Appendix 2**) , 汚泥用硬度計 (以下PE : **Appendix 3**) による3種類の底質硬度指標を記録するものであった。その結果、砂面から水位が下がるにつれて3種類の底質硬度指標の値は直線的に増大し、ナミノリソコエビの潜砂出来る個体数は少なくなっていく。最終的には砂面から10cm下の水位でナミノリソコエビは1個体も潜砂することが出来なくなり、その底質硬度指標は汀線域において引き波により不飽和となった状態とほぼ一致した (梶原・高田, 2008)。また、砂浜海岸汀線域では飽和か、不飽和か、によって約4~8倍の底質硬度指標の変動が見られることも明らかとなり、潜砂性の底生生物にとって分布を決定する大きな環境勾配の一つとなりうるのではないかと示唆された。これらのことから、汀線から岸に向かって水位が下がることにより底質硬度指標が増大し、ナミノリソコエビの潜砂を阻害するために本種の帯状分布の上限が規定されていると考えられた。また、静水位-10cmにおいて土砂は実質飽和状態にあって、地下水位とサクシヨンの1対1の線形関係が成立しており (佐々ら, 2007) , 新潟県下の砂浜海岸におけるナミノリソコエビの分布ともよく一致して

いることが明らかとされた（佐々ら，2010a）。このように，ナミノリソコエビの帯状分布の岸側の上限は，サクシオン上昇に連動した底質硬度によって統一的に説明できることが解明され，砂浜海岸汀線域における帯状分布の成立要因の一部が初めて合理的に示されることとなった。

さらに，砂浜海岸において潮上帯を生息域とするヒゲナガハマトビムシ *Britorchestia brito* の分布域下限が，底質硬度の増加による造巣活動の阻害によって決定されていることも明らかとなり（*Sassa et al.*, 2014），砂浜海岸の不飽和域における底質の硬度の変動が，生息する生物の帯状分布に大きな役割を果たしていると考えられるようになった。また，佐々ら（2010a）及び *Sassa et al.*（2014）では，潮上帯におけるヒゲナガハマトビムシの分布域上限からナミノリソコエビ分布域上限までは，砂浜海岸の粒度組成や海岸勾配にかかわらず同じサクシオンの値で分布域を規定可能なことが明らかとなっている。このように，サクシオンは底質硬度も含めた砂浜海岸汀線域の生物分布に大きな役割を果たしていることが解明されつつある。

そこで，本論文ではこれまでに生物分布を規定すると考えられてきた粒径・粒度組成や硬度以外の物理環境指標としてサクシオンに着目し，これと飽和水面，飽和度，粘着力などを加えた総合的な物理指標が干潟や砂浜海岸の生物分布を証明することができるのか？ということについて研究を行うとともに，今後の野外調査のために客観的に測定することが困難であるサクシオンの簡易分析方法についても検証した。なお，本論文では，前述の本論に入る前に，普段，ほとんど目にする機会が少ない海底に関する研究例やこれまでの著者を含むグループが行ってきた研究例を第1章，本研究で使用した物理指標や測定原理を第2章で説明する。

第2章. 底質硬度の測定器具・方法とその特徴

本章では本論に入る前に底質の硬度やサクション等の測定方法を紹介・解説するとともに、その背景となる原理や測定する意義について解説する。さらに、底質硬度に対してこれらの物理指標がそれぞれどのような関係性を持つか、やその測定方法等について各々記述するとともに、底生生物の生息環境としての底質硬度に対する理解を多面的に深めることを目指した。

一般に、海洋調査において、広大な海底をボーリングとそれに伴う底質のサンプリングによって大量の試料を解析することは、非常に有効ではあっても特に深海域を対象とする場合非現実的である。そのような場合において、作業能率を向上させるため、ボーリングの一部をサウンディング(原位置調査)に置換する方法が開発・改良されてきた(中瀬, 1984)。海底地盤におけるサウンディングは主に粘性土に対してはベーンせん断, 砂質土と硬質粘性土に対しては静的貫入が用いられている(中瀬, 1984)。ベーンせん断, 静的貫入とも底質の硬度目安となる指標であり、後述する各手法とも基本的な測定原理は変わらない。なお、この静的貫入に対して動的貫入という測定方式もあるが、ハンマーの打撃・あるいは重量のあるコーンの落下によって地盤に打ち込み、貫入量と打撃回数から地盤の硬軟・締まり具合を調べるという硬質の地盤を対象としたものであるため、ここでは触れない。一般的には、サウンディングに用いられる機器は大型であり、特に測定深度のスケールが過大であるため、そのまま砂浜や干潟などの底生生物の生息環境としての底質硬度を測定する目的に転用するのは困難である。

本稿で取り扱う底質硬度の測定方法は、既存の測定器具を転用もしくは防水処理など小改造したものから海底用に新規開発されたものまで様々であるが、基本的にはベーンせん断と静的貫入の測定原理に基づいている。ただし、小型・軽量で(片手で操作できることが目安)、比較的安価なものに限定している。以下には、主に生物の生息環境として底質硬度を測定した記録のある機器について、測定原理毎に分類しながらその特徴について解説する。これらを認識・理解することにより、底質硬度の測定器具や測定法の選択が調査の精度を高める一助となるよう考慮した。

2-1. 貫入型測定機器

このタイプの測定機器は、コーン(金属製の円錐)を測定したい底質に貫入させて

その貫入量を底質硬度の指標とするものが多い。貫入量を得るための機構として、コーン後部に装着されたバネの縮み量によるもの、コーンの自重で生じる貫入によるもの、コーン形状のデジタルセンサーなどさらにいくつかの原理に細分化できる。いずれも静的貫入の一種である。

1) バネ式の貫入機器

生物の生息環境として底質硬度を測定した記録が多く、おそらく硬度の測定方法としてもっとも一般的に用いられていると考えられるタイプの測定器具 (Appendix 4) である (阿久津ら, 1995; 奥宮ら, 2001; 水産庁・マリノフォーラム 21, 2007; 上田ら, 2003; 岩尾ら, 1996; 上月ら, 2000)。多くは山中式土壌硬度計やそれに準ずる原理のもので、後部にバネのついたコーンを底質面に垂直に貫入させ、バネの縮み量から底質硬度の指標を得るという測定法である。このタイプの機器のほとんどが陸上で使用する農業用あるいは土木用であり、主に土壌環境を測定する目的で製作されたものであるが、多くの場合そのまま水圏での測定に転用されている。小型・安価で操作が簡単なものも多いが、バネを使用する構造上あるいはコーンの自重が重いものもあって軟弱な底質、とりわけ小型の底生生物に重要と考えられる底表数cmレベルの硬度を測定するのは原理的に難しい。ただし、岩尾ら (1996) が製作した器具のように測定範囲に合わせたバネや器具の選定を行うことで、軟弱な底質において良好な結果を得た事例もある。

2) 自重式及び自由落下式の貫入機器

自重式及び自由落下式底質硬度計 (Appendix 3) は貫入型の機器としてはバネ式のものに次いで多用されている (辻本ら, 2007; 松井ら, 2011; 梶原・高田, 2008; 梶原ら, 2010)。主にコーンの貫入量から底質硬度の指標を求める点においてはバネ式の貫入機器と同じであるが、貫入は自重によるか、あるいは底表まで落下させることによるか(自由落下式)の違いがある。バネを使っていないため、一般的にバネ式の貫入機器に比べて相対的に軟弱な底質の測定に適している。また、コーン自体の角度や重量を調整することによって、さらに軟弱な底質での測定も可能となるが、貫入量に対する貫入抵抗値の変動が非線形に増大して行くので測定結果にばらつきが大きくなるというリスクを認識しておく必要がある。さらに、軟弱な底質に対応できるように

すればするほど、底表近くで異なる底質硬度の層が存在する場合に測定精度が著しく低下する。梶原ら（2010）では、泥底において原理が異なる複数の測定機での底質硬度測定を推奨しているが、それには上述のリスクを低減させる意味もある。

3) コーン形状のデジタルセンサー

市販のいわゆる「デジタルフォースゲージ（押したり引っ張ったりする力を測る測定器で、圧縮試験・引張試験に用いられる：以下 DFG とする）」の先端計測部に小型のコーン（Appendix 1）を取り付けたものである。筆者が関わった事例を除くと、底質硬度の測定方法として用いられていることはほとんど無い。前述の2種とのもっとも大きな違いは、デジタルタイプのフォースセンサーで測定を行っていることと、貫入量から底質硬度の指標を算出するのではなく、底表から一定の深度まで貫入させた際、どれだけの力がかかるかを検出して硬度の指標としていることである。デジタルセンサーながら小型・軽量であり、測定精度・範囲ともに前2種に劣らない。特に軟弱な底質の測定に強く、陸棚域での採泥サンプルから泥底における生物生息環境として好適な底質硬度を測定・解析した実績もある（梶原，2001）。ただし、高精度のセンサー故に非常に繊細であり、測定や取り扱いには習熟を要する。さらに、横方向の力も合力として加算して算出してしまうので、揺れる船上などでの測定には細心の注意が必要である。また、デジタル機器であるので基本的には耐水性がなく、海洋での調査に使用する場合には防水処理を施すことが不可欠となる。

2-2. せん断型測定機器

このタイプの測定機器は、ペーンを底表から垂直に貫入させ、底表上を水平に回転させるように負荷をかけた後、底質がせん断した際の力を底質硬度の指標とするものである。室内実験用の設置機器と土質調査などでよく使用される可搬式のものに大別され、広く使われている。測定値がペーンの直径と深さに大きく影響されるため、底表から迅速に硬度指標の変化を引き起こす砂浜海岸汀線域における測定に適している。ただし、本来の用途は土木工学的調査であるため、水圏の、とりわけ小型の潜砂性生物のスケールに合致する底表から数cmレベルにおける微細な底質環境を測定できるものは多くない。

1) せん断型機器(未改造)

先述のように、ベーンせん断抵抗の測定を目的として製作された機器の中には、水圏の底質環境の測定にそのまま転用できるものは多くない。オランダ Pocket vane tester (Eijkelkamp 社製:以下 VT とする。Appendix 2) を用いた底質硬度の測定結果が報告されている程度である(梶原・高田, 2008; 梶原ら, 2010)。本機は小型軽量で堅牢な造りであり、ベーンユニットの交換によってある程度の測定範囲に対応することが可能である。しかし、水圏の底質環境の測定、とりわけ軟弱な泥質の硬度を確実に測定するためには、もう一段階大型のベーンユニットが必要である。

2) せん断型機器(改造)

水圏における底質硬度の測定結果としては、現在もっとも多く知見が蓄積されている(佐々・渡部, 2006; 佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2007; 佐々ら, 2008; Sassa and Watabe, 2008; 佐々ら, 2009a; 佐々ら, 2009b; Sassa and Watabe, 2009; 佐々ら, 2010a; 佐々ら, 2010b; 梁ら, 2011; Sassa *et al.*, 2011; Sassa *et al.*, 2014)。その測定器具の多くは、小型のねじを締める際に適性トルクを計測するトルクメーターの先端へ、十字型のベーンを取り付けたものである(Appendix 5)。これらのユニットを一括して商品としているものもあれば、トルクメーターを購入して別途ベーンを組み合わせて使用している場合もある。いずれの場合も測定部はトルクメーターであり、それをベーンせん断の計測に転用している。特徴としては、トルクメーターの容量とベーンの深さ・直径との組み合わせで、極めて広範な測定が可能となることである。また、量産品を転用した測定部を持っているために、測定精度と比較してユニット全体のコストが低い。一方で、精度の良いデータを得るには、測定原理を理解した比較的習熟度の高い測定者が必要で、将来的な普及に対する大きな課題となっている。

2-3. 底質硬度に関わる物理指標

底質硬度を測定・解析するにあたって、関連の深い物理指標がいくつか存在する。その中で代表的なものについて簡単に解説するとともに、底質硬度との関係性についても述べる。

1) サクシオン

サクシオンとは、土質工学的には毛管水がその圧力差によって飽和水面以上に水を吸引する力、とされるが（久野，1966），もっともなじみ深いのはこれを常用対数として作物の根が利用できる水分の指標とした pF である（Schofield, 1935）。本稿では、主に不飽和状態の地盤が吸水する力を圧力で示した値として用いられている。そのため、基本的には地盤が飽和状態の場合にはサクシオンは消失するか極くわずかなものとなる。現在、サクシオンは国立研究開発法人港湾空港技術研究所（現国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所）を中心とした研究グループが、底生生物の生息環境として扱う物理指標の主力である（佐々・渡部，2006；佐々・渡部，2007；佐々ら，2008；Sassa and Watabe, 2008；佐々ら，2009a；佐々ら，2009b；Sassa and Watabe, 2009；佐々ら，2010b；梁ら，2011；Sassa *et al.*, 2011；Sassa *et al.*, 2014）。

測定原理は、素焼きのセラミックを土砂中に挿入し、土砂中の粒子間に働く表面張力（毛管力）によって生じるセラミック内（脱気水により満たされている）外の圧力差を感知し、セラミック内のピエゾ圧電素子によって電圧に変換してロガーに表示するものである。特徴としては極めて微細な測定が可能であり、特に透水性が大で不飽和状態が出現しやすい砂浜海岸汀線域における調査に適している。底質硬度はサクシオンにして2～4kPa程度までの実質飽和領域で連動しているが、それ以上ではサクシオンの上昇に伴い底質硬度は減少する（佐々ら，2010a）。サクシオンの測定には、主にセラミック製のセンサーを用いるが、前述の pF 測定用のものはサクシオンの常用対数が測定レンジとなっており、本稿のように微細なサクシオン（Pa～kPa）の観測が必要な目的には適さない。また、 pF 測定用のものはセンサーの深度が底表から10 cm以上のものが多く、底表の物理環境を精査するのにも適さない。底質の物理指標、とりわけ底表を測定できるサクシオンメーターは現在では入手経路が限定され、測定に習熟を要すること及び維持経費やメンテナンスの手間も相まって、現場レベルでの新規導入は難しいと考えられる。ただ、これまでの調査・研究において重要な成果を多数輩出してきたのも事実であり、代替の測定器具や測定法等について早急に検討し、具体化する必要がある。第3章では、砂浜海岸において現場の砂を用いた静水位0 cmの硬度を測定し、海岸の底質硬度の実測値と比較することによって飽和状態の推定が可能であることを確認しており、サクシオンが0となる地点については代替の測定が

可能といえる。

2) 地下水位

本稿では地下水位を飽和水面と同義で使用することとするが、これはいわゆる地下水面のことである。基本的にはこれより下層の堆積物の間隙は水によって飽和していることになるが、サクシヨンの項で述べた毛管力の影響によって、地下水位が下層に存在する状態でも飽和状態となることがある。サクシヨンの項で述べた実質飽和状態においては、サクシオンは地下水位とも 1 対 1 の線形関係が成り立つので（佐々ら、2008）、この場合、底質硬度の上昇、サクシヨンの上昇、地下水位の低下は連動していることになる。実際にこの範囲とされる-10 cmまでの静水位を実験的に設定すると、水位の低下に伴って 3 種類の硬度指標は直線的に増加するという結果もある（梶原・高田、2008）。測定法としては、底質を垂直に掘り進み、出現した水面と底表との差を計測するのが一般的である。ただし、先述のように地下水位は、底質の飽和・不飽和の境界やサクシオン 0 の境界とは必ずしも一致していないことに留意する必要がある。

3) 飽和度

飽和度は、底質を構成する 3 相（固相・気相・液相）の体積のうち、液相を気相と液相の総和で除して百分率で示したものである（松尾、1984）。従って冠水時の底質あるいは地下水位以深の底質においては、底質の間隙が液相のみ（水で飽和している）であって基本的に 100%を示す。つまり飽和度 100%はサクシオンが消失している状態であり、砂質土では底質硬度が低位安定する状態であるともいえる。ただし、底質硬度の傾向とは異なり、飽和状態や乾燥状態を除く広い範囲でほぼ一様にサクシヨンの上昇と飽和度の低下は連動している（佐々ら、2010a）。飽和度を測定するには現場の土砂を乱さずに採取するという土木・工学的な技術が必須であって、習熟を要する。さらに、採取した土砂を研究室において専用の解析装置で処理するのが主流であり、基本的に現場でこの値を知ることは出来ない。また、解析するための機材などのコストも高い。ただ、海水等の高い塩分を含む水環境下では原理上昨今の TDR 水分計はそのままでは使用できないため、含水比とともに海水の不飽和域において底質の水分量の目安を得ることが出来る数少ない指標として有用である。

4) 粘着力

泥底の場合，その底質は主に粘性土で構成されている。粘性土はその粒子の小ささのために粒子間に界面物理化学的な力が加わり，砂質土には見られない粘着力を有するとされている（松尾，1984）。砂質土では不飽和状態においてメニスカスによる見かけの粘着力が現れる（松尾，1984）。このことは砂浜海岸汀線域における飽和によるサクシジョンの消失と底質硬度の低位安定や（佐々ら，2010a），陸棚域泥底における底質硬度の多様さによく現れていると考えられる（梶原，2001；梶原ら，2010）。つまり冠水した環境ではサクシジョンが消失することにより砂底については見かけの粘着力も消失するため，その結果底質硬度の変動自体も小さくなりその重要度は汀線域に比べ低いと考えられるが，粘着力を有する泥質主体で構成される底質ではその硬度が冠水時にも維持されるので，埋在する生息環境に関するほぼ唯一の物理指標として活用が可能といえる。したがって，現時点では冠水時における泥質の硬度指標は，その粘着力とほぼ同義と解釈することが出来る。ただし，実際の底泥は層状の堆積をしていることもあり，その判断はせん断抵抗と貫入抵抗の併用など，複数の原理による硬度指標の測定結果に基づくことが望ましい。

これらの指標を砂浜海岸の不飽和域で測定する際には，天候の影響を考慮する必要がある。雨天時には，砂中の水分量が海水量と一致しないため，いずれの指標も正確に測ることは出来ない。同様に底質硬度の指標のいずれも正確に測定できない点に留意すべきである。現状では対策は不可能であるので，野外の測定調査を行う際には天候に十分配慮して調査を計画することが必要である。

第3章. 砂浜海岸汀線域におけるサクシオンと飽和との関係

3-1. 緒言

日本海沿岸において、砂浜海岸はもっとも普通に見られる海岸の一形態である。現在、各地の砂浜海岸では侵食が深刻化していることもあり、その対策として種々の保全あるいは回復措置が広く執り行われてきた。ところが、それらの対策は土木的・工学的見地に基づいて砂浜海岸の土砂の動態を制御あるいは土砂の量を維持・回復させようとするものであり、砂浜海岸が多くの生物が生息するフィールドであることを踏まえた対策ではない。実際に日本海沿岸の砂浜海岸においては、汀線域に膨大な個体数の底生生物が分布していることが知られているが、これらの生物の分布と底質の粒度や海岸勾配などの要素とは明瞭な相関が得られていない（奥村ら，2001）。そのため、このような場に生息する生物の好適生息環境とその成因が不明であり、砂浜生態系の保全・管理の隘路となっていた。梶原・高田（2008）は、砂浜海岸汀線域に生息する潜砂性の小型甲殻類の生息環境の調査を行い、底質硬度の変動が分布の制限要因として働いていることが明らかにしたが、その成因のひとつに、地盤が毛管現象によって水を吸い上げる力であるサクシオンの動態に伴うものであること（佐々ら，2010a）が挙げられる。著者を含むグループ（佐々・渡部，2007；Sassa and Watabe，2008；佐々ら，2010a）は、サクシオンの測定が砂浜海岸や干潟において極めて重要であることを明らかにしてきたが、これを現場に普及するには、サクシオンの測定には高価な機器類が必要であり、また、そのメンテナンスなどに習熟が必要なこと、などの問題点がある。また、サクシオン単独では生物の生息環境として直接作用していることが証明されたわけではなく、サクシオンに連動した物理的環境要因が作用機序として機能していることが明らかになりつつある（佐々ら，2010a）。したがって、サクシオンだけを独立した項目として直接評価するのではなく、いくつかの方法と組み合わせる必要がある。そのため、サクシオンを砂浜海岸汀線域における生態系の保全・管理へ応用・普及するに際し、まずは測定法及び項目をできる限り安価・簡便なものにすることが求められる。そこで、サクシオンの測定の代替法の開発が必要であり、そのひとつに観測項目を硬度と飽和・不飽和の組み合わせにするなどが考えられる。

一方、汀線付近では、底質が飽和状態になると底質硬度が低位安定するため、その把握は潜砂や砂中での移動・姿勢保持の可否等底生生物の好適生息環境を解析するうえで重要である。一般的には飽和水面（地下水面）と砂面が同等あるいは砂面が水没す

る位置関係において飽和状態と見なすことが出来るが、地下水面直上に働く毛管力によって飽和状態と見なされる毛管水縁(毛管水帯)が存在しており(山本, 1986), 飽和水面とは必ずしも一致しない。このような状態であってもサクシオンを測定すれば, 測定値 0 の検出をもって飽和状態と見なすことが出来る。そのため, サクシオンを砂浜海岸の現場で直接測定するもっとも大きな意義はこの点にあるが, サクシオンの測定を簡便化するには飽和状態を把握できる代替の手法を確立する必要がある。一方でサクシオンと底質硬度, とりわけベーンせん断強度との相関が高いことから(佐々ら, 2010a; Sassa and Watabe, 2008; 佐々・渡部, 2007), 底質硬度の測定値から飽和状態を推定することが可能と考えられる。これについてはベーンせん断強度以外の底質硬度指標とサクシオンとの関係について明らかにすることでより新たな代替法の開発可能となるかもしれない。したがって, 多くの砂浜海岸でサクシオン及び各種硬度指標を同時に測定した結果を増やす必要があるが, その事例は少ない。加えて, サクシオンの測定の代替法に関して野外だけではなく, 実験的手法も用いながら検討する必要がある。

そこで, 本章では, 新潟県の砂浜海岸汀線域におけるサクシオン及び4種類の底質硬度指標の把握により, 飽和水位と4種類の底質硬度指標との関係を明らかにするとともに, 飽和状態の推定法を検討し, サクシオンの安価かつ簡便な調査手法を開発することを目的として調査・研究を行った。

一方, 砂浜海岸汀線域でも汀線から潮下帯にかけては, ナミノリソコエビの帯状分布が認められるものの(佐々ら, 2011; 奥村ら, 2001), 常に底質の砂が海水で飽和している状態ではサクシオンは0もしくは0kPa近辺の微小な変動であり, サクシオンに連動している底質硬度の値やその変動も微小であって, 分布域岸側のような制限要因とはなり得ないことが推定される。従って, ナミノリソコエビの分布下限の制限要因は, 底質硬度やサクシオンの関与が小さいことが明らかになったものの, 依然不明である。

汀線から潮下帯にかけての帯状分布を形成する要因として, まず飽和状態においても傾度・変動が大きく, 分布域の沖側下限において顕著な衰退を示す物理環境に着目する必要がある。そのひとつには砂漣の有無などで示されている漂砂の挙動の変化が考えられる。砂漣ができるとその上の波による往復流が砂漣背後で砂漣表面から剥離して渦が発生し, その結果その付近の砂粒子が底面から巻き上げられ漂流する状態, つまり漂流漂砂が生じる状況になるとされる(酒井, 2001)。一方で, 砂漣形成域よりさらに岸側で底面流速が大きくなると, 砂漣は消滅して砂面は平坦になることが知

られている(鈴木, 2001)。また, 砂漣の大きさは流速が 1m/s になるまでは砂の粒径, 波高, 流速の増加とともに大きくなるが, それ以上の流速では砂漣は再び小さくなって海底が平坦になるとされている(鈴木, 2001)。同様に, 掃流漂砂域の沖側で段状の地形として観察されるステップについても, 砂粒子が底面から巻き上げられ漂砂の挙動が変化したことを示していると考えられる。これらのことから, 潮下帯付近の汀線域はステップや砂漣の生成を境界として岸側の, 漂砂がほぼ岸沖方向の平面的な挙動となる掃流漂砂域と, 沖側で立体的な漂砂の挙動となる漂流漂砂域に大別することが出来ると考えられる (Fig. 1)。現象としては砂漣やステップの生成が漂砂挙動の相違の境界を示していると考えられるが, これらの境界を安価・簡便に定量的な測定値により定義する方法はこれまでになく, 実際の生物の分布との対応も検討されていない。しかし上述の知見からは, ごく底層の漂砂量の変動を砂漣生成の境界の定義に応用できることが推察される。さらに, 砂漣の生成は流速の変動に起因することから, 汀線に垂直な岸沖方向における底層の流速の変動を測定することによって両者の境界を定義できる可能性もある。

そこで, 本章では潮汐の影響が少ない日本海沿岸の砂浜海岸において, 砂浜管理現場での導入も可能である安価で簡便な小型流速計を用い, 底層における岸沖方向の流速の変化を実測することで掃流漂砂域と漂流漂砂域の定義を試みた。また, 極底層の漂砂を捕捉するトラップを用いて, 底層の漂砂量の変動からも掃流漂砂域と漂流漂砂域の境界が定義出来るか試みた。それらの結果から, 砂浜海岸汀線域の底層表面に高密度で分布する潜砂性の小型甲殻類ナミノリソコエビの沖側の分布下限と漂砂挙動域との位置関係を明らかにし, 汀線から潮下帯の生物分布構造の解明につなげることを目的とした。

3-2. 材料及び方法

調査は, 新潟県佐渡島の真野湾に面する砂浜海岸の沢根, 佐和田, 長石 (Fig. 2) の三ヶ所で, 2010年6月~2012年2月までの期間に, 新潟市西部の四ツ郷屋浜 (Fig. 3) においては2010年6月~2011年7月に行った。各種項目の測定は, 各砂浜海岸の汀線から陸側の最初の打ち上げ帯を起点に1m間隔で定点を設定し, 常時水没するエリアまで行った。サクシヨンの測定には, テンシオメータ (SK-5500AET; 株サンケイ理化製) を用い, 砂面から2cm深まで測定した (Appendix 6)。サクシヨンの測定結果については, 0に達した時点で飽和とみなした。底質硬度の測定には, 防水改造を施

したデジタルフォースゲージ (DFG ; 日本電産シンボ社製) , Pocket vane tester (オランダ Eijkelkamp 社製, 以下 VT と略する) , 汚泥用硬度計 (大起理化学工業社製, 以下 PE と略する) , ハンドベーン (D0-1018, トルクメーター部 : FTD5CN-S, 誠研舎製, 以下 HV と略する) の 4 種類の硬度計を用いた。DFG では表層 50 mm 深までの貫入に必要とする力のピークを, VT では表層 5 mm 深のせん断抵抗を, PE では 55 mm, 107g のコーン貫入量から貫入抵抗を, HV では ϕ 30 mm, 高さ 10 mm のベーンを用いた底表のせん断抵抗をそれぞれ測定し, 底質の硬度指標とした。

新潟県佐渡島の 3 海岸 (沢根, 佐和田, 長石) 及び四ツ郷屋浜の計 4 カ所で, 2010 年 6 月に汀線域の砂を採集し粒度分析に供した。粒度分析は Wentworth (1922) の粒径区分及び Krumbein (1934) によって定義された ϕ スケールに従い, 粒径 2mm 以上を礫 ($\phi < -1$), 2~1mm を極粗砂 ($\phi -1 \sim 0$), 1~1/2mm を粗砂 ($\phi 0 \sim 1$), 1/2~1/4 mm を中砂 ($\phi 1 \sim 2$), 1/4~1/8mm を細砂 ($\phi 2 \sim 3$), 1/8~1/16mm を極細砂 ($\phi 3 \sim 4$), 1/16~1/256mm をシルト ($\phi 4 \sim 8$), それ以下を粘土とし ($\phi > 8$), 各分画について重量百分率を算出した。また, サクシオンに関連する透水係数の目安となる D_{10} (松尾, 1984) を算出した。一般に, 砂の透水係数 k と土壌粒子の直径 D_s との間には $k = C \times D_s^2$ の関係があるとされている。ハーゼンの求めた実験式は $k [\text{cm/sec}] = C \times D_{10}^2$ で, D_{10} は砂の有効径をセンチメートル単位で表した値, C は 100~150 とされている。

飽和水位と 4 種類の底質硬度指標との関係を明らかにするため, 四ツ郷屋浜の汀線域の砂を採集して研究室に持ち帰り, 最下部に $63 \mu\text{m}$ の篩を装着した $\phi 15 \times 65 \text{cm}$ の塩ビ管に投入した。この塩ビ管を水槽内に設置して海水を注入して飽和させた後, 水面を砂面と同じ位置として静水位 0 cm に設定し, ここから 5 cm ずつ静水位を低下させ, -50 cm まで静水位毎に上述の 4 種類の底質硬度を 3 回ずつ測定した。同じ海岸で測定回数が多い新潟県佐渡島の 3 海岸 (沢根, 佐和田, 長石) については, サクシオンと各種底質硬度指標との関係に関して海岸単位での特性の有無を解析することとし, 四ツ郷屋浜については, 砂浜海岸における各種底質硬度指標から飽和状態を推定するための解析を行った。

流速は, 流速測定用インペラーユニットを装着した FLOWATCH (スイス JDC 社 : **Appendix 7**, 上) によって測定した。装着した流速インペラーは $\Phi 60 \text{mm}$ で, 0.1~999cm/s の流速を測定可能である。底層の漂砂については, 外寸 $W126 \times H16 \times D80 \text{mm}$, 内寸 $W120 \times H10 \times D80 \text{mm}$ のアクリル製枠の後部に, 目合 $63 \mu\text{m}$, 長さ 1m のネットを装着したトラップを独自に製作して採集した (**Appendix 7**, 下)。測定点は, 各砂浜海岸汀線付近のステップや砂漣が生成された部分を中心として, 1m の間隔でポールを設

置し、岸側ではナミノリソコエビが採集されなくなるまでポール上に定点を設定し、岸沖方向の流速を測定した (Fig. 1)。ただし、水深が 60 mm 以浅や、砂漣生成域以深で離岸堤等海岸構造物に近いエリアでは正確な測定結果が得られないことや安全上の問題から測定を行わなかった。また、調査の安全を考慮して測定・採集は水深 1m 以浅で行った。流速の測定にあたって、波の駆け上がりが到達した部分がほぼ同じ位置の波を選ぶ必要があるため、1m 間隔で設置されたポールを目安として波が最も岸に打ち寄せた位置がほぼ同じの波を選んだ。流速は波が最も岸に打ち寄せた瞬間から最も沖に引くまでの間の引き波 1 ストロークで測定することとし、測定器をピークホールモードに設定して定点の底層 (ほぼ底面) における流速の最高値を記録した。同様に、底層の漂砂についても波が最も岸に打ち寄せた瞬間から最も沖に引くまでの間の引き波 1 ストロークで採集することとし、波が最も岸に打ち寄せた瞬間に底面にトラップを置き、最も沖に引いた時点でトラップを水面上に引き上げた。漂砂の採集は、砂漣の有無と底層の漂砂量との関係をまず明らかにするため、砂漣に隣接した岸側と沖側のポールで行い、採集された漂砂は、研究室に持ち帰って水洗の後、110°C で 6 時間乾燥させた。漂砂に混入している大型の有機物を除去した後、重量を測定した。ナミノリソコエビの採集は、各砂浜海岸汀線付近のステップや砂漣が生成された部分を挟んで直径 10 cm のコアサンプラーで 10 cm 深の採集を各ポールで 3 回行い、内容物を 1 mm 目合の篩で処理した後、出現の有無や個体数を記録した。さらに、各海岸では基礎的な資料として、汀線域における角度計による海岸勾配の測定や、 Φ スケールによる砂の粒度分析も行った。

3-3. 結果

Fig. 4~7 に佐渡島の 3 カ所の砂浜海岸におけるサクシヨンと 4 種類の底質硬度指標との関係を示す。佐渡島の 3 カ所全ての砂浜において、サクシヨンの上昇に伴って底質硬度指標が増大する傾向があり、いずれも高い正の相関が得られた。また、サクシヨンが 0 (飽和状態) の場合、いずれの海岸においても底質硬度指標は一定の範囲で低位安定する傾向があった。海岸間の比較では、DFG と VT では沢根が、PE と HV については長石の決定係数が最も高かった。底質硬度指標毎の比較では、DFG と VT の決定係数が高く、次いで HV, PE の順であった。佐和田ではいずれの硬度も決定係数は低かった。

四ツ郷屋浜の砂を用いた静水位と底質硬度指標との関係を Fig. 8 に示す。静水位が

-10 cm程度まではどの底質硬度指標も水位の低下に伴って直線的に増大した。さらに静水位が低下すると測定値のばらつきが大きくなり、DFGとPEでは静水位が-40 cm程度から、VTとHVについては-30 cm程度から値が減少傾向となった。静水位 0 cmにおける各底質硬度指標を Fig. 9~12 の○で、四ツ郷屋浜におけるサクシヨンと各底質硬度指標との関係を Fig. 9~12 の●で示す。四ツ郷屋浜においても、佐渡島の3カ所の砂浜と同じくサクシヨンの上昇に伴っていずれの底質硬度指標も増大し、サクシヨンと4種類の底質硬度指標との間に正の相関があり、サクシヨンが0（飽和状態）の場合、いずれの底質硬度指標においても一定の範囲で低位安定する傾向がある点も同様であった。四ツ郷屋浜で測定された底質硬度指標値の範囲は、静水位が-10 cm付近までの各底質硬度指標値と概ね一致していた。静水位 0 cmの各底質硬度指標については、四ツ郷屋浜で実測して求められた底質硬度指標毎の各回帰直線の切片より概ね低位で安定していた。

Table 1 に佐渡島の3カ所の砂浜海岸及び四ツ郷屋浜における汀線域の砂の粒度分布とサクシヨンに関連する透水係数の目安となる D_{10} を示す。砂の粒度は、佐渡島の佐和田で他の3カ所よりも粗かった。他の3カ所については沢根、長石、四ツ郷屋浜の順に細粒分が多い組成を示した。 D_{10} については佐和田が最も大きく、四ツ郷屋浜、長石、沢根、の順であった。Fig. 13, 14 に各砂浜海岸での底層の引き波の流速及び底層で採集された漂砂の重量とナミノリソコエビのコアあたり平均採集個体数と流速との関係を示す。*印は、砂漣が生成されたすぐ沖側(1m以内)のポールであることを示している。各砂浜海岸とも砂漣の生成を境界として底層における引き波の流速が半分程度に低下していた。漂砂の重量についても、各砂浜海岸において砂漣の生成を境界に著しく減少していた。ナミノリソコエビの平均出現個体数は、3カ所の砂浜海岸のうち、佐和田でナミノリソコエビの分布自体が少なく、明瞭な傾向が認められなかったが、他の2カ所の砂浜海岸では、砂漣の生成されたすぐ沖側のポールでナミノリソコエビのコアあたり平均採集個体数が減少した。また、海岸勾配は佐和田で約 1/10、沢根、長石で約 1/16 であり、海岸が緩勾配であると底質の細粒成分が多くなる傾向が見られた。

3-4. 考察

佐渡島真野湾における3カ所の砂浜海岸において、サクシヨンと硬度の同時測定データから、それらの関係や海岸毎の特性について考察する。サクシヨンと硬度の関係

については、四ツ郷屋浜を含む4カ所の砂浜海岸で直線回帰が可能であった。また、四ツ郷屋浜の砂を用いた静水位と底質硬度指標及び砂浜海岸における底質硬度指標との関係から、本調査における海岸の測定範囲はすべての底質硬度指標が直線的に増加する四ツ郷屋浜における静水位-10 cm付近までに相当すると考えられた。静水位-10 cmにおいて土砂は実質飽和状態にあって、地下水位とサクシヨンの1対1の線形関係が成り立っており（佐々ら，2008），さらに実質飽和状態においてはサクシヨンの増加とともにベーンせん断強度も増大することから（佐々ら，2010a），今回の結果はこれらの知見とよく一致し、汀線域の物理的指標の変動の実態をよく示していることが解る。佐渡島の佐和田については、佐渡島の他の定点よりもサクシヨンと硬度との決定係数が低い傾向が見られた。これは、佐和田の粒度分布が沢根や長石よりも明らかに粗く、 D_{10} が大きいことによる透水性の増大が測定値のばらつきを大きくする方向に働いていることによると考えられる。これらのことは本調査における佐渡島の3カ所の海岸について、同じ砂浜での季節変動よりも砂浜毎の粒度分布、特に粗粒成分による差が大きいことも示している。本調査における佐和田と同じ程度の粒度分布を示す砂浜海岸においては、本調査で行ったサクシヨンと底質硬度指標との関係を解析する手法の適用には慎重を期すべきである（第5章参照）。また、佐渡島の3カ所の海岸における底質硬度指標毎の傾向としては、PEの決定係数がやや低い傾向が見られたが、これはPEの貫入量と算出される貫入抵抗が非線形の関係であるために、測定誤差によるばらつきが他の測定機器より大きくなる可能性があることに起因していると考えられる。ただし、四ツ郷屋浜においてはPEの決定係数が低い傾向は認められなかった。また、四ツ郷屋浜を含む4海岸では、PEの回帰直線における切片、つまり飽和状態における海岸毎のばらつきは小さいため、測定の精度自体に問題があるわけではないと判断できる。底表のせん断抵抗を底質硬度指標としているVT、HVについては、静水位の低下に伴う値の低下がDFGやPEに先んじており、飽和水面の低下によって砂面表層から先に始まる硬度の変動をよく捉えていると判断できる。これらを考え合わせると、サクシヨンと硬度の同時測定データが蓄積されているところではその回帰式を求め、算出された切片を飽和状態の硬度の推定に応用できると考えられる。しかし、新たに調査を開始する砂浜海岸ではサクシヨンと硬度指標の関係は不明であり、上述の方法で飽和状態を推定することは困難となる。そのため、より汎用性・実用性の高い手法として、サクシヨンの測定結果によらない飽和状態の推定方法について検討・試行する必要がある。例えば、実験室内で設定した静的な飽和水位（以下静水位）と底質硬度の間には直線的な関係があることが知られており（梶原・高田，2008），砂浜

海岸の汀線付近における飽和・不飽和の状態を実験的に補完できる(梶原・高田, 2008)。この関係を用いれば、サクシヨンの測定値によらない飽和状態の推定が可能となる。今回、四ツ郷屋浜での結果で見られたように静水位 0 cmの硬度を現場の砂を用いて測定し、現場の砂浜海岸における硬度に対応させることによって、このような状況においても飽和状態の推定が可能であった。浅場の干潟や砂州において、地下水位の動態がサクシオン及び土砂の強度の状態に大きく影響することが知られており(佐々ら, 2011)、静水位における飽和水面と底質硬度指標の關係に着目することで、底質硬度指標が低位安定する飽和状態を推定できるという今回の結果は妥当であるといえる。本調査では、砂面が飽和している状態を含め、静水位での砂面と飽和水面の乖離による底質硬度指標との一般的な關係性を把握する必要があったために、実験室における検証を行った。しかし、静水位 0 cmの硬度を現場の砂を用いて測定するだけであれば、目合 63 μ m の篩とそれを収納可能な容器を現場に持ち込むことで可能であり、実際の作業としては現場でより簡便・短時間に飽和状態の推定が可能となる。また、Fig. 9 ~12 において、いずれの底質硬度指標においてもサクシオン 0 における最大値が静水位 0 cmより実測値で上回っており、繰り返し弾塑性変形による締め固め効果(Sassa and Watabe, 2007)が発現していると考えられる。しかし、前述した手法では砂浜海岸汀線域における繰り返し弾塑性変形による締め固め効果の影響を回避できることから、飽和状態の位置を現場でより正確に捉えることが出来る可能性もある。今後、各地の砂浜海岸においても知見を蓄積し、今回と同様の結果が得られること、さらには目合 63 μ m の篩を用いて得られた現場における静水位 0 cmの底質硬度指標からの飽和状態の推定の妥当性を検証することによって、本手法の汎用性を確立してゆく必要がある。

加えて、今回の結果から、底層における引き波の流速の大幅な減少により砂漣の生成、および極底層の漂砂採集量は砂漣の形成を境に沖側で大幅に減少するため、どちらも掃流漂砂域と漂流漂砂域の境界を定義する指標となると考えられた。ナミノリソコエビの分布との關係では、砂漣が形成される地点は主分布域とはならないため、そこが沖側の分布下限となることが明らかとなった。

ナミノリソコエビは、波に反応してそれを積極的に利用した生活行動により潮間帯に生息しており、汀線域の摂餌行動において海底表面での潜砂状態を変えている(上平, 1992)。その摂餌行動は、潜砂しながらも寄せ波あるいは引き波に向かって頭胸部を露出し、懸濁物を捕食するフィルターフィーディングであり、掃流漂砂域に適応したものといえる。漂流漂砂域では、潜砂の姿勢が不安定で制御困難になること、フ

フィルターフィーディングが非効率的になること、ナミノリソコエビを捕食可能な魚類が侵入可能なこと、より沖合に漂流し、汀線域に復帰できない等のリスクが考えられ、漂流漂砂域以深でナミノリソコエビの出現個体数が減少するという今回の結果は合理的であるといえる。本結果を、佐々ら (2010a) , Sassa *et al.* (2014) 及び梶原・高田 (2008) の結果と考え合わせれば、ナミノリソコエビの沖側の分布限界は、上述の理由で砂漣の生成点付近に決定され、岸側の分布限界は、底質の不飽和に連動する硬度の上昇により潜砂が不可能になること及びそれに付随する乾燥、陸生の生物による食害、夏では高温等の死亡リスクが高まることから決定されていると解釈することができ、ナミノリソコエビの帯状分布が成立する環境要因が説明できる。

本研究では安価な流速計を用いて、底層における引き波の流速の大幅な減少を捉えることにより、掃流漂砂と漂流漂砂の境界である、砂漣の生成を指標として活用できる可能性が示された。また、底層における引き波の流速の測定では、その場で測定結果が得られることから、それに基づく調査計画の変更にも活用できるという利点がある。一方で、多くの海岸構造物が設置されている砂浜海岸では、特に漂流漂砂域において様々な方向からの波が押し寄せるため単純な岸沖方向の流速の測定が困難なこと、流速インペラーが 60 mm 径のため、それ以浅の水深では測定が不可能なこと等の問題点も明らかとなった。さらに、海岸勾配や測定時における波浪の違いによる流速の減少について一定の傾向を得ることが出来なかった。今後、測定結果の蓄積をはかるとともに、これらの問題点への対処も講ずる必要がある。さらに、今回使用した簡便な漂砂トラップによる極底層漂砂の直接採集法は、底層の漂砂量の変動から砂漣を挟んだ掃流漂砂域と漂流漂砂域の指標として活用できると考えられた。今回使用した漂砂トラップは 20 mm 程度の水深があれば採集が可能であり、流速計に比べ広い範囲の使用が可能である。また、極底層の掃流漂砂を選択的に採集することによる直接比較が可能であるため、間接的に漂砂の動きを捉えた流速のデータよりも信頼性は高い。その一方で、流速計のようにその場で測定結果を得ることが出来ず、サンプルの処理・測定等に手間と時間を要すること、汎用品でないため専用の器具を作製しなければならないという問題点がある。これらの特性をよく踏まえて、用途に応じた機器の使い分けを行うとともに、場合によってはこれら機器の併用や改良も視野に入れる必要がある。今後も安価・簡便な方法による正確な漂砂挙動の把握に努めるとともに、漂流漂砂域以深で卓越する物理環境要因についても検討・考察する必要がある。

第4章．潮位の変動に伴う砂浜海岸汀線域における土砂環境と小型甲殻類の分布域の変動

4-1．緒言

前章での結果を踏まえて、砂浜海岸において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を解析し、汀線域の潮上帯まではサクシヨンの変動とそれに伴う土砂環境の変動が、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が明らかになった。その成因は、サクシヨンに連動する底質硬度の変動や漂砂の挙動が三次元的になることによる潜砂時の摂餌姿勢の阻害、あるいは潜砂状態そのものの維持が困難となることにより潜砂性小型甲殻類の分布域が規定されているためと考えられた（梶原・高田，2008；佐々ら，2010；Sassa *et al.*，2014）。上述の知見は、対象とする砂浜の粒度組成や海岸勾配によらず成立しており、砂浜海岸汀線域に生息する潜砂性小型甲殻類にとって極めて普遍的な分布要因であるといえる。

しかし、これらの知見は潮汐の極めて小さい日本海側の砂浜海岸において得られたものであり、潮位の変動による帯状分布域への影響については不明のままである。一般的な概念としては、潮位の変動に伴って底質硬度や漂砂の挙動など土砂環境の範囲も変動するため、それに連動した帯状分布域の移行が予想される。また、実際の砂浜海岸汀線域においては、潮汐に伴う潮位の変動の他に海岸勾配の変化等、潮位以外の要素が複合して影響することも考えられる。

日本の沿岸域の約半分を占める太平洋側では潮汐による潮位の変動が生じ、なかでも有明海や瀬戸内海では干満差が大きい。したがって、日本海側の砂浜海岸で得られた上述の知見が、このような状況下でも適用可能な高い普遍性を示すか否かは、今後の砂浜海岸における潜砂性小型甲殻類の帯状分布域の解析を進展させるにあたって極めて重要な意味を持つ。また、潮汐が動的に推移する中で各々の土砂環境が帯状分布域の変動に与える影響の重要性の序列やその変化の有無が明らかになれば、更に普遍性を高めた砂浜海岸汀線域における潜砂性小型甲殻類の分布の一般則を確立させることに繋がる。

このように、砂浜海岸汀線域における潜砂性小型甲殻類の分布域の研究に関しては、潮汐との関連を明らかにすることも重要であると考えられる。その解決のためには日本海側と比較して潮位差の大きい海岸において調査を行い、潮位の変動と帯状分布域

及び土砂環境との対応について明らかにすることが不可欠となる。そこで、本章では潮位の変動が観察される砂浜海岸において、汀線域に分布域を持つ潜砂性小型甲殻類の満潮時から干潮時までの潮位毎の出現や土砂環境を明らかにするとともに、これまでに日本海側の砂浜海岸汀線域で得られている同様の知見と比較・検討することによって、砂浜海岸汀線域における潜砂性小型甲殻類の分布に関するより普遍性の高い一般則の確立を目指した。

なお、このような調査には瀬戸内海は良いフィールドと考えられたので、調査に先立ちこれまで著者がモデル生物として扱ってきたナミノリソコエビの分布を文献および現地調査で調べたが、本種が高密度で生息している場所は見つからなかった。その原因の一つに、瀬戸内海、特に東部海域は埋め立て等的人為的開発によって本種の生息に適した白砂青松の砂浜が失われたためと考えられる。また、中津干潟のように開発を免れた広大な干潟域では、干潟の規模が大きすぎて本種が高密度で分布している状況は確認できなかった。そこで、本種が高密度で生息しており、潮汐による潮位の変動が生じる山口県西部の海岸を選定した。

4-2. 材料及び方法

調査海域は、山口県西部の下関市に位置する安岡海水浴場の汀線域である (Fig. 15)。調査は、2014年11月21日午前8:50の満潮時(潮位216.6 cm)から午後2:42(便宜上、以下では14:50と表記する)の干潮時(潮位64.5 cm)の間で1時間毎に行った。調査時間毎にサクションが2kPaを超える点から、水没して砂漣を生じる点までを1m毎に区切って定点を設定するとともに、砂漣を生じる点から1m沖側を含めて測定範囲とした。定点のうち、最初の満潮時に砂漣が出現した定点をStn.0と設定し、陸側に1m進む毎にStn.1, Stn.2, Stn.3..., 沖側に1m進む毎にStn.-1, Stn.-2, Stn.-3...と設定した (Fig. 16)。これに従って、調査は、午前8:50~10:50ではStn.4~-1, 11:50ではStn.2~-3, 12:50以降はStn.1~-8の定点で行った。潜砂性小型甲殻類の採集は、Φ6 cm, 10 cm深コアによる定量採集を1定点に4回行い、目合1 mmの篩にかけた後、その残余から生物を計数した。土砂環境としては、サクション及び底質硬度の測定を行った。サクションの測定にはテンシオメータ (SK-5500AET; 株式会社サンケイ理化製) を用い、砂面から2 cm深までのサクションを測定した。底質硬度の測定には、防水改造を施したデジタルフォースゲージ (FGC-5B, 日本電産シンポ社製, 以下DFGと略する) とハンドペーン (D0-1018, トルクメーター部: FTD5CN-S, 誠研舎製, 以下HVと略する) の

2種類の硬度計を用いた（Appendix 1, 5）。DFGでは表層50mm深までの貫入に必要とする力のピークを、HVではφ30mm、高さ10mmのベーンを用いた底表のせん断抵抗をそれぞれ測定し、底質の硬度指標とした。いずれの硬度指標についても各定点で4回測定した。また、角度計を用いた海岸勾配の測定をおこなうとともに（Fig. 16）、各定点において砂を掘削し砂面と水面との差をスケールで計測することによって飽和水位も測定した。さらに、8:50、11:50、14:50の3時間毎に、最も岸側、最も沖側、汀線の3定点において砂を採集して粒度分析に供した。粒度分析はWentworth（1922）の粒径区分及びKrumbein（1934）によって定義されたφスケールに従い、粒径2mm以上を礫（φ<-1）、2~1mmを極粗砂（φ=-1~0）、1~1/2mmを粗砂（φ=0~1）、1/2~1/4mmを中砂（φ=1~2）、1/4~1/8mmを細砂（φ=2~3）、1/8~1/16mmを極細砂（φ=3~4）、1/16~1/256mmをシルト（φ=4~8）、それ以下を粘土とし（φ>8）、各分画について重量百分率を算出した。また、粒度分析の他、強熱減量（550℃、6時間）、含水比についても算出した。

4-3. 結果

Fig. 16に示すように、当該海域では3段階の海岸勾配が計測され、Stn. 4より岸側で0.9°、Stn. 4~-2で6.3°、Stn. -2より沖側で1.7°であった。本調査で出現した潜砂性小型甲殻類はナミノリソコエビ *Eohaustorioides japonicus* とヒメスナホリムシ *Excirolana chiltoni* の2種であった。それぞれの定点毎のコアあたり平均出現個体数とサクシヨンとの関係をFig. 17~19に示す。ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシともに潮位が下がると出現する定点が沖側に移動した。しかし、海岸が緩勾配化するStn. -2より沖側の定点ではその傾向は不明瞭となった。一方で、ナミノリソコエビは沖側の定点では高密度分布域が観察されなくなるとともに、出現する定点が増加した。また、砂漣が生成される定点についても、午前8:50~10:50ではStn. 0、11:50ではStn. -2、12:50以降はStn. -7で変化せず、海岸の緩勾配化に対応していた。ナミノリソコエビ分布域の岸沖方向の幅は、午前8:50~10:50では2~3m、11:50では4m、12:50以降は6~8mであった。ナミノリソコエビとヒメスナホリムシのコアあたり平均出現個体数とサクシヨンとの関係をFig. 20に示す。ナミノリソコエビは潮位にかかわらずサクシヨンが2kPa以上では殆ど出現しなかったのに対し、ヒメスナホリムシはサクシヨンが2kPa以上でも出現した。土砂環境についてDFG測定値、HV測定値及び飽和水位とサクシヨンとの関係をFig. 21~23に示す。いずれの土砂環境とサクシヨンの組み合わせについても95%水準で有意な正の相関

が認められた。各々の組み合わせでは、飽和水位とサクシヨンとの決定係数が最も高く、次いでHV測定値とサクシヨン、DFG測定値とサクシヨンの順であった。採集された砂の粒度については、どの採集時刻や定点においても細砂がほぼ3/4以上で構成され、中砂・極細砂を加えて粒度分布の殆どを占めるといふ点で共通しており (Fig. 24) , 大きな変動はなかった。また、強熱減量・含水比とも、砂浜海岸で一般的に認められる値の範囲であり (梶原ら, 2010 ; 本稿第3章) , 採集時刻や定点で値に大きな変動は見られなかった (Table 2) 。

4-4. 考察

本調査によって得られたサクシヨンと底質硬度の関係は95%水準で有意な正の相関があったが、この結果は前章で調べた潮汐が殆ど無い日本海側の砂浜海岸における結果と一致した。そのため、潮位や海岸勾配の違いはあるもののこれまでに明らかにしてきた砂浜海岸汀線域におけるサクシヨンと底質硬度との関係は、砂浜海岸汀線域の土砂環境として普遍性が高いのではないかと考えられた。さらに、本調査ではサクシヨンと飽和水位の関係も新たに解析した結果、底質硬度よりも決定係数が高いことが明らかとなった。これは、サクシヨンが砂粒子の間隙水に働く表面張力であること、砂粒子の間隙が飽和するとサクシヨンは0となる等 (第3章) , 硬度よりも間隙水の動態を直接的にとらえていることを考え合わせると合理的な結果である。このように、サクシヨンは砂浜海岸汀線域において様々な土砂環境の指標として有効であることが証明された。

砂浜海岸汀線域に生息する潜砂性小型甲殻類の分布については、日本海側においてナミノリソコエビがサクシヨン2kPa以上で底質硬度の上昇により、潜砂が不可能となって生息できなくなることが明らかとなっている (佐々ら, 2010a ; Sassa *et al.*, 2014 ; 梶原・高田, 2008) 。また、ヒメスナホリムシについてはサクシヨン2kPa以上でも出現し、底質硬度のピークを超えた5kPa以上のサクシヨンで出現しないことが明らかとなっている (佐々ら, 2010a ; Sassa *et al.*, 2014) 。本調査の結果、ナミノリソコエビの殆どは潮位の下降に伴い、サクシヨン2kPa以下に分布域を移動させており、これまで得られた本種の分布がサクシヨンに連動する土砂環境への応答という点では日本海側の砂浜海岸における知見を支持する結果となった (Fig. 20) 。本調査では一般的な土砂環境の要素として、粒度組成や強熱減量の値も算出しているが、これらの潮位毎・定点毎の変動はサクシヨン・底質硬度及び飽和水位の変動と比較すると非常に小さい。これらについても、日本海側の砂浜海岸でナミノリソコエビの分布域と砂浜の粒度組

成との間に明瞭な関連が認められなかった奥村ら（2001）の結果と一致する。ヒメスナホリムシについても本調査ではサクシオン 2kPa 以上でも分布しており、日本海側の砂浜海岸における知見と一致していた。また、ナミノリソコエビについては、海岸勾配が同等であれば潮位の下降とともに分布域が沖側に平行移動する傾向が見られたが、沖側で海岸が緩勾配になるためサクシオンの変動が小さくなり、帯状分布域が拡大した。これにより高密度の分布域は見られなくなり、広がった分布域の中にナミノリソコエビが分散して分布していることが窺える。また、海岸勾配の減少によってみられた現象に砂漣生成点の固定化が挙げられる。これは、海岸が緩勾配化することによって漂砂の挙動が静穏化し、砂漣の生成域を沖側へ移動させる応力を失ったからと考えられる。前章の日本海側の砂浜海岸における知見では、ナミノリソコエビの分布下限は砂漣やステップの生成域とほぼ一致することを明らかにした。本調査において 12:50 以降干潮まで砂漣生成点より沖側の Stn. -8 では、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシとも全く出現しておらず、これについても日本海側の砂浜海岸における知見と一致している。一方で満潮時の 8:50 から 11:50 までは、ナミノリソコエビの出現する最も沖側の定点は Stn. 0 から -3 まで、砂漣の生成点は Stn. 0 から -2 までとほぼ連動していることが明らかとなり、潮位や砂漣の生成域の変動とナミノリソコエビの分布下限が良く対応している。以上の結果から、潮汐のある砂浜海岸における汀線域の潜砂性小型甲殻類の分布は、潮位・砂漣生成域・海岸勾配の変動に良く連動しているが、これらは日本海側で得られた分布域の範囲内での変動であると結論づけられた。

今回の調査では、Stn. -2 を境界として海岸勾配が 6.3° から 1.7° へと減少した。これによるナミノリソコエビの帯状分布域の拡大とナミノリソコエビの密度の低下を海岸勾配の減少から推定した場合、海岸勾配の変動による高さ方向の変動は、計算上 $\text{Sin}6.3 \doteq 0.1097$ と $\text{Sin}1.7 \doteq 0.0297$ であり、この比率で補正すれば良いということになる。すなわち、拡大した帯状分布域は、 $(0.1097/0.0297) * (\text{満潮時の帯状分布域の幅})$ となり、ナミノリソコエビの密度の低下は、 $(0.0297/0.1097) * (\text{満潮時の密度})$ から推定できる。ただし、帯状分布域の幅については岸沖方向の物理環境のみで決定されるのに対し、ナミノリソコエビの密度は個体の水平方向からの増減も考えられるため、精度が低下すると考えられる点に注意が必要となる。今回の調査結果における、実際の帯状分布域及びナミノリソコエビ密度の変動と上述の補正による推定値を比較したのが **Table 3** である。帯状分布域の幅については実際の帯状分布域の幅と推定値が比較的近似しているのに対し、ナミノリソコエビの密度については実数と推定値が近似しているとは言いがたい。この理由としては、水平方向からの増減に加え、帯状

分布域が拡大したことによってサクシオン勾配も緩和したため、他の比較的勾配の強い環境要因が台頭し、分布に偏りが生じた可能性も考えられる。今後は帯状分布域が拡大した際に分布域内の生息環境に影響を与える要因について、サクシオンとは別の視点から解明する必要がある。

本研究では、満潮から干潮までの下げ潮時に調査を行った。一方で、今後は干潮から満潮にかけて同様の調査を行う必要もあると考えられる。例えば Sassa and Watabe (2007) で示された底質の繰り返し弾塑性収縮は、砂浜海岸汀線域でも認められており、底質の硬度にも大きく影響を与える現象である。しかし、繰り返し弾塑性収縮は寄せ波による影響と引き波による影響が可逆的ではないために引き起こされる現象であり、上げ潮時と下げ潮時では土砂環境の推移が異なる可能性がある。また、海岸勾配の変動による帯状分布域の幅の補正についても、今回のように拡大方向に補正する場合に比べて干潮時を基準とした縮小方向に補正する場合では精度が異なる可能性もあり、検証が必要であろう。

これらを総合すると、日本海側の砂浜海岸汀線域で得られた潜砂性小型甲殻類の帯状分布の成立要因は、基本的に潮汐のある海域でも適用できると考えられ、潮位や海岸勾配の変動を考慮することにより対応が可能と結論づけられた。また、海岸の緩勾配化によって帯状分布域の拡幅や見かけ上の密度の低下が観察されるとともに、分布の下限である砂漣の生成点が固定されることも明らかとなった。今後は、サクシオン測定の代替としての透水率及び飽和水位の活用法の確立や、生息する小型甲殻類の分布域内における好適生息環境の解明、さらには干潮から上げ潮時における同様の調査の実施により、砂浜海岸汀線域における生態系のさらなる解明を進める必要がある。

第5章．礫浜汀線域の土砂環境把握のための実験的研究

5-1．緒言

これまでの結果から、砂浜海岸汀線域においては、サクシオン（砂粒子間に働く表面張力）に連動する種々の土砂環境によって潜砂性小型底生生物の分布が規定されていることが明らかとなった。一方、堆積物海岸には砂浜の他に泥浜や礫浜があり、なかでも砂浜と礫浜は各地で普通に見られる（星野，1984）。前章で説明したように、瀬戸内海ではナミノリソコエビの生息に適した砂浜や干潟域が減少しており（瀬戸内海環境保全協会，2004），その傾向は大都市が多い瀬戸内海東部で顕著である。そのため、瀬戸内海の自然海岸は西部の周防灘沿岸か、島嶼部に限られている。

瀬戸内海の島嶼部には礫相当の粒径で構成された浜が多くみられ、瀬戸内海の堆積物海岸の中でも重要な位置を占めると考えられる。しかし、礫浜の物理的特性に関する知見に関しては砂浜のそれよりも更に少なく、さらに、それらと生物分布の関係を調べた知見は殆どない。一般に砂と礫は粒径によって区分されており、その粒径区分にはいくつかの規格が存在するが、国際土壌学会、日本農学会、日本工業規格、アメリカ土壌局が定める規格では粒径2 mm以上を礫と定義している。粒径2 mm以上が礫と定義する規格が多いことについては、粒径2 mm以上を境に、それ以上と以下では明確な物理的性質の違いが存在することが推察される。国際土壌学会によれば、粒径2 mm以上を礫とする根拠として、粒子間の間隙に保水ができなくなることを挙げており、これは土壌の農地利用における適性の参考として活用されている（新潟県農林水産部，2005）。このように、礫において粒子間の間隙に保水ができない性質が特徴であるならば、砂浜に関する先述のような事象は礫浜において殆ど応用できなくなることも意味している。すなわち、粒子間の間隙が大きな礫浜海岸汀線域においてはサクシオンの発生そのものが弱いと考えられ、砂浜海岸汀線域のようにサクシオン動態に連動した土砂環境が潜砂性生物の分布を規定するような激変を生じず、全く異なった土砂環境を構築している可能性がある。また、礫では粒子間の間隙に保水ができない性質であるとしても、海岸線の汀線域においては陸上と異なり、間隙が飽和・不飽和を繰り返す極めて特殊な状態となることから、その際にどのような土砂環境の動態が観察されるのかは不明である。一方、砂浜と礫浜は同じ海岸線において連続的に分布する場合もあり、位置的に連続していても土砂環境は劇的に変動する可能性も示唆している。このように、礫浜の土砂環境を明らかにすることは単に礫浜に関する知見が殆どないという現

状の打破だけでなく、砂浜海岸の土砂環境を明確に定義する意味でも喫緊の課題であるといえる。本章では、礫浜における汀線域での基本的な物理的性質が砂浜とどのように異なるのかを解明するための最初のプロセスとして、まず粒径や形状が一定である礫相当の粒径のガラスビーズを用いて実験下で飽和水位を変動させ、サクションを測定した。また、同時に4種類の測定器を用いて硬度指標も測定し、礫浜の汀線域における基本的な物理的性質も検討した。それらの結果をこれまでに得られた砂浜海岸汀線域における同様の結果とも比較しながら、礫浜海岸汀線域における基本的な物理的性質の把握を試みた。これらの知見を応用して礫浜海岸汀線域における生物分布構造のさらなる解明につなげることを目的として実験を行った。

さらに、砂浜から礫浜へ移行するにあたっての物理的な土砂環境の変動が連続的であるか、どのような粒径からどの物理的な土砂環境の変動が認められるか、は全く不明のままである。また、実際の砂浜・礫浜においては複雑な粒度組成の堆積物によって成立しており、そのような場合に得られた物理的な土砂環境の値がどの粒径に相当するかなど、解析への応用に必要な知見も得られていない。これらの知見は、今後堆積物海岸汀線域において、とりわけ潜砂性生物の生態系を解析するためには必要不可欠であると考えられる。そこで、本章では汀線域における砂礫間の物理的な土砂環境の変動が、どの粒径から認められるかを明らかにすることを目的とした室内実験を行った。具体的には、粒径が一定の範囲で、真球に近い形状で揃っている種々の規格のガラスビーズを用いて実験下で飽和水位を変動させ、サクションを測定した。また、同時に3種の測定器を用いて硬度指標も測定し、その変動をとらえることによって礫浜から砂浜、及び砂の粒径の移行時における汀線域での基本的な物理的性質の変動を調べた。これにより物理的性質における砂礫の境界及び様式を解明するほか、実際の連続した砂浜及び礫浜における土砂環境の解析に資するための指標を作成することを試みた。

5-2. 材料及び方法

最下部に目合 63 μm の篩を装着した ϕ 15 cm、高さ 30cm の塩ビ管に粒径の異なる 6 種類 (6.300~7.800 mm, 5.613~6.680 mm, 4.699~5.613 mm, 3.962~4.699 mm, 2.500~3.500 mm, 1.500~2.500 mm) の礫に相当するガラスビーズを投入したうえでバケツ内に設置した。バケツにガラスビーズが飽和するまで海水を注水した後、飽和水位を砂面から 0 cm, -5 cm, -10 cm, -15 cm の 4 段階に設定した (Appendix 8)。設定され

た粒径及び飽和水位においてサクシオンと4種類の硬度指標を各々測定した。サクシオンの測定には、テンシオメータ (SK-5500AET; サンケイ理化社製) を用い、砂面から2 cm深までを測定した (Appendix 8)。底質硬度の測定には、防水改造を施したデジタルフォースゲージ (FGC-5B; 日本電産シンポ社製), Pocket vane tester (オランダ Eijkelkamp 社製, 以下 VT と略する), 汚泥用硬度計 (大起理化工業社製, 以下 PE と略する), ハンドベーン (D0-1018, トルクメーター部: FTD5CN-S, 誠研舎製, 以下 HV と略する) の4種類の硬度計を用いた (Appendix 9)。DFG では表層 50 mm 深までの貫入に必要とする力のピークを, VT では表層 5 mm 深のせん断抵抗を, PE では 55 mm, 107 g のコーン貫入量から貫入抵抗を, HV では ϕ 30 mm, 高さ 10 mm のベーンを用いた底表のせん断抵抗をそれぞれ測定し, グラスビーズの硬度指標とした。何れの硬度指標についても各飽和水位で5回ずつ測定した。

また, グラスビーズにおいても砂相当の粒径では飽和水位によってサクシオン動態が大幅に変動することを確認するとともに, 同一条件で砂相当の粒径の動態を比較する目的で, 粒径の異なる6種類 (0.993~1.397 mm, 0.710~0.990 mm, 0.500~0.710 mm, 0.350~0.500 mm, 0.255~0.355 mm, 0.177~0.250 mm) の砂に相当するガラスビーズにおいてサクシオンと DFG と HV の2種の硬度指標を各々5回ずつ測定した。粒径 0.177~0.250 mm については, 上述の礫相当の粒径の対照として, 礫相当の粒径と全く同じ測定を行った。

また, これまでの知見では DFG 測定値について粒径 0.5 mm 以上が主体の砂で構成される砂浜において, さらに細かい粒径の砂を主体として構成される砂浜よりもサクシオンと底質硬度との間の決定係数が低くなることが知られていることから (第3章), 粒径 0.5 mm 以上における測定精度を比較する目的で ϕ 30 mm, 高さ 60 mm のベーンをトルクメーター (STC50cN 東日社製) と組み合わせた HV (以下 DHV と略する) を別途作製し, せん断抵抗を測定した (Appendix 10)。DHV においても, DFG 及び HV と全く同じ測定を行った。

5-3. 結果

各飽和水位におけるサクシオンと4種類の硬度指標の測定結果について, サクシオンと硬度指標毎に Fig. 25 (サクシオン), Fig. 26 (DFG), Fig. 27 (VT), Fig. 28 (PE), Fig. 29 (HV) と分けて示す。礫相当の粒径におけるサクシオンでは, 不飽和状態におけるいずれの水位においても, 粒径が小さいほど大きい傾向が見られた。しかし, その値は第3章に

において砂浜海岸汀線域でみられる値より大幅に小さかった。一方で細砂相当の粒径 0.177～0.250 mmのガラスビーズでは、飽和水位の低下とともにサクシオンはほぼ直線的に増加し、変動の範囲やサクシオンの値が礫相当の粒径より大幅に大きかった。これは、第3章で調べた砂浜海岸汀線域でみられる傾向と良く一致していた。また、礫相当の粒径では第3章で調べた砂浜海岸汀線域や細砂相当の粒径 0.177～0.250 mmのガラスビーズで見られるような不飽和状態における飽和水位の変動に伴うサクシオンの大幅な変動は見られず、不飽和状態になると飽和水位の変動に関わらずほぼ一定の値であった。4種類の硬度指標については、いずれの測定値においても礫相当の粒径においては飽和・不飽和に関わらず、粒径が大きいほど測定値も大きい傾向が見られた。また、不飽和状態では礫相当の粒径における4種類の硬度指標は、サクシオンの変動と同様に、飽和水位が変動してもほぼ一定の値であるという共通の傾向が見られた。一方で細砂相当の粒径 0.177～0.250 mmのガラスビーズでは、4種類の硬度指標とも飽和水位の低下とともに増加する傾向がみられ、サクシオンの増加とも良く一致していた。DFG測定値においては、飽和水位の低下とともに礫相当の粒径 5.613～6.680 mmと同等の値までに増加した。また、VT, PE, HVの各測定値についても飽和水位の低下とともに直線的に増加し、礫相当の粒径全てにおける測定値と比較して大幅に高い値を示した。このような、飽和水位の低下と硬度指標測定値の増加についても、第3章で調べた砂浜海岸汀線域でみられる傾向と良く一致していた。

砂粒径相当のガラスビーズについて測定項目のうちサクシオンについては、全ての粒径において飽和水位の低下に伴い増加した (Fig. 30)。また、サクシオンは粒径が小さいほど増加が顕著となる傾向があった。DFG測定値では、粒径 0.993～1.397 mm及び 0.710～0.990 mmのガラスビーズにおいて、飽和/不飽和に対応した値の増加が見られたものの、不飽和領域での飽和水位に対応した値の増加は認められなかった (Fig. 31)。粒径 0.500～0.710 mmにおいて、DFG測定値では飽和水位-10 cmまで、粒径 0.350～0.500 mm及び 0.255～0.355 mmでは-15 cmまで測定値の増加が認められた。HV測定値については、DFG測定値と同じく粒径 0.993～1.397 mmのガラスビーズにおいて、各飽和/不飽和に対応した値の増加が見られたが、粒径 0.710～0.990 mm及び 0.500～0.710 mmでは、飽和水位の低下に伴い測定値が緩やかに増加した (Fig. 32)。粒径 0.350～0.500 mm及び 0.255～0.355 mmでは、DFG測定値と同じく飽和水位の低下に伴う HV測定値の増加が顕著となった。DHVについては、礫相当の粒径で物理的性質が DFG及び HVと同様の傾向が見られた (Fig. 33)。また、砂相当の粒径では 0.993～1.397 mm及び 0.710～0.990 mmのガラスビーズにおいて、礫相当の粒径と同じ飽和/不飽和に対応した値の増加が見られたが、不飽和領域での飽和水位に対応した値の増加は認められなかった。

粒径 0.710 mm 以下では飽和水位の低下に伴い測定値が増加し、粒径の細粒化に伴って測定値の増加が顕著となった。

このように、測定する物理的性質と測定法によって飽和水位に対応した変動が見られる砂相当の粒径と、飽和/不飽和にのみ対応する礫相当の粒径との境界が異なること、粒径による砂の区分は必ずしもその物理的性質とは一致していないことが明らかとなった。

5-4. 考察

1) 物理的性質の特性からみた礫粒径と砂粒径との比較

一般に 0.1 mm 以上の粒径の堆積物では、粒径の増大に伴って粒子の初動速度や沈降速度も増大することが知られている(星野, 1984)。つまり、砂浜や礫浜ではその粒径が大きいほど強い波浪や流れの影響を受けていることになる。礫浜では特に強い流れや波浪による粒子の移送する力の大きさと同時に、粒子間の間隙の大きさによる排水量及びその速さの両立が相まって、礫を汀線域にとどめて浜を形成していると考えられることができる。同様の力が砂浜海岸に働いた場合、砂は漂砂となって移動を余儀無くされるであろう。これらのことから、砂浜と礫浜では恒常的に加わる外力の規模が相当に異なり、その性質や動態にはかなりの相違があると予想される。今回、礫相当の粒径では、粒径が小さいほど間隙が小さくなりサクシヨンの値がやや上昇したが、その値は第3章で調べた砂浜のそれに比べて非常に小さかった。本研究では、細砂相当の粒径 0.177~0.250 mm のガラスビーズでも同様に測定を行っているが、その結果は礫相当の粒径とは大きく異なり、飽和水位の低下に伴い直線的にサクシオンが増加するなど第3章における砂浜海岸における結果と良く一致している。また、実際に砂浜海岸汀線域において潜砂性小型甲殻類の分布を規定するサクシヨンの境界はそれぞれ 2kPa, 3kPa, 5kPa, 10kPa であることが明らかとなっており (Sassa *et al.*, 2014), 本研究で計測された礫相当の粒径におけるサクシヨンの値はこれらよりもはるかに小さい。Fig. 26 では飽和水位-15cm において粒径 0.177~0.250 mm のガラスビーズの DFG 測定値は、約 20 倍の粒径である 5.613~6.680 mm と同等であり、それ以外の VT, PE, HV (Fig. 27~29) では更に大幅に上回ることから、砂浜海岸汀線域における土砂環境、なかでも潜砂性小型甲殻類の生息環境としてのサクシヨンの重要性が確認された。これらの結果から、礫浜における生息環境としてのサクシヨンの寄与は砂浜と異なり非常に小さく、底質の硬度指標にも殆ど影響を与えていなかった。

た。礫浜において礫に働く力のバランスを考えれば、粒径が砂浜より大きいため底質硬度を増大させるにはより大きなサクシオンが必要であるのに対し、実際には間隙に保水できないためサクシオンが小さいうえに、礫における一粒の重量が飛躍的に増加しているため、サクシオンの影響は相対的に小さくなると考えられ、礫においてサクシオンは、土砂環境の指標とはなり得ないと考えられる。このように、礫浜では、砂浜相当の粒径で見られるようなサクシオン動態に連動した土砂環境の変動は観察されず、粒子間に水が保持できない状態が大きく影響していると結論づけられる。

2) 従来の堆積物海岸における知見との関連性

第3章では、本研究と同じく常時冠水しているためにサクシオン動態が変動に乏しい砂浜海岸の汀線から潮下帯にかけての土砂環境について調査・考察しているが、ここでは漂砂の挙動の変化が起きており、これが土砂環境の変動の主体となっていることが明らかとなっていて、本実験結果との共通点はみられない。むしろ底質が攪乱されない飽和条件の砂でみられた粒径や一粒の重量と生物の潜砂及び棲管作成能力との関係に共通する部分を見いだすことができる (Kajihara, 1999)。ただし、このような事例では底質が攪乱されない静穏な流動環境を対象にしており、生物についても定在型の管棲性ヨコエビ類を対象にしているため、激しい流動環境が想定される礫浜海岸汀線域の事例とは基本的な状況が大きく異なると考えられる。さらに、本実験結果では礫相当の粒径において飽和水位にかかわらず飽和/不飽和にのみサクシオンや底質硬度の測定値が対応する傾向があった。これに先述の礫における粒径の重要性を考え合わせると、礫浜海岸汀線域においては水中/空中重量の転換点としての飽和/不飽和と礫の粒径や一粒の重量が強い影響力を持つ、極めて単純な土砂環境を構成している可能性が高い。これは、現在までに解明されてきた砂浜海岸における土砂環境とは大きく異なるものである。また、今回取り上げた他にも砂浜海岸汀線域に見られる特徴的な現象の一つとして、繰り返し弾塑性収縮が挙げられる (Sassa and Watabe, 2007)。繰り返し弾塑性収縮については、砂浜海岸汀線域の土砂環境、ひいては砂浜海岸汀線域でみられる潜砂性小型甲殻類の生息環境として極めて重要な要素である。しかし、飽和・不飽和の繰り返しによるサクシオン変動が砂粒子のパッキングを緻密化するという原理から考えて、礫浜で同様の現象が起こるとは考えにくく、これについては今後の課題として調査・検証する必要がある。

3) 砂相当の粒径における結果との比較

砂相当の粒径における結果から、砂と分画されている粒径においては、飽和水位の低下とともにサクションが直線的に増加する共通の傾向が認められた。これは、山口県下の砂浜海岸で調査した第4章で得られた、サクションに対し最も決定係数が高い物理的指標は飽和水位であるという知見とよく一致している。また、粒径の細粒化に伴い、同じ飽和水位でもサクションが上昇する傾向も認められた。これは、サクションが不飽和状態で粒子間に働く毛管力（久野，1966）であることを考えると合理的な結果である。測定されたサクションの値についても、礫相当の粒径で行われた実験結果の上位に粒径順に位置しており（Fig. 30），堆積物の粒径，サクション及び飽和水位が極めて密接な関係にあることが改めて示された結果といえる。一方、硬度指標である DFG，HV 及び DHV 測定値についてはサクションの傾向とは完全には一致・同調していないことが明らかとなった。粒径 1 mm 程度までは，DFG，HV 及び DHV 測定値とも飽和/不飽和に対応した値の増加が見られ，不飽和時では飽和水位によらず測定値がほぼ一定となるという，礫における実験結果と同じ傾向が認められた。また，DFG 測定値については，この傾向が粒径 0.7 mm 程度まで認められ，粒径 0.990 mm 以下からは飽和水位の低下とともに緩やかながら増加する HV 測定値とも傾向が異なっていた。粒径 0.5 mm 程度においては，極表層を測定する HV 測定値については飽和水位の低下，サクションの増加と対応していたが，DFG では飽和水位-10 cm までしか対応していなかった。これは，粒径 0.5 mm 程度までは透水性が良好なことにより不飽和時における空隙に占める空気の割合が大きいため，底表から垂直に測定する DFG では HV よりも空隙の影響を強く受けることによると考えられる。また，DFG では，土塊中の水分のばらつきによる影響を，HV より原理的に受けやすいことも関係している可能性がある。実際の砂浜においても，粒径 0.5 mm 以上が主体の砂で構成される砂浜では，さらに細かい粒径の砂を主体として構成される砂浜よりもサクションと底質硬度との間の決定係数が低くなることが知られており（第3章），本実験結果もその傾向に沿ったものといえる。DHV については，このような粒径 0.5 mm 以上が主体の砂について，HV と同様の測定原理ながら，ベーンを 6 cm 深まで差し込むことによって DFG と同等の深度においても HV の特徴であるばらつきの少ない測定結果を得る目的で導入したものである。DHV 測定値から得られた礫における飽和水位と底質硬度との関係は，礫相当の粒径で示された DFG 及び HV 測定値と同様の傾向であった（Fig. 33）。すなわち，飽和水位の変動によるサクションや底質硬度の値や変動は小さく，飽和/不飽和と粒径（一粒の

重量) が基本的かつ大きな影響力を持つ状態である。砂相当の粒径による比較では、飽和水位の低下と底質硬度の値が直線的に上昇し始める粒径が、0.710 mm以下と DFG 測定値と HV 測定値における中間であったことから、粒径 0.5 mm以上の測定においては導入に一定の効果があったと判断できる。DFG のように空隙が多い土壌を垂直に貫入させて測定するよりも測定結果のばらつきが少なくなるものの、同じ測定原理の HV よりもはるかに厚い層を測定しているために精度が低下していると考えられる。さらに、粒径が 0.5 mmより細かくなると、飽和水位の低下とサクシジョンの増加、DFG 及び HV・DHV 測定値の増加が全て対応し、硬度指標においても砂の物理的性質を完全に示していることが明らかとなった。このように、礫から砂への物理的性質の変化は、粒径の細粒化に伴いサクシジョン、HV 測定値、DHV 測定値、DFG 測定値の順で段階的に移行し、0.5 mm以下の粒径で測定した全ての物理的性質が飽和水位と対応する、すなわち完全に砂の性質へと移行すると結論づけられた。今回明らかとなった粒径の細粒化による物理的性質毎の変動のずれを利用することで、例えば透水率における有効径 D_{10} に相当する、多様な粒度組成からなる実際の砂浜・礫浜海岸における実質的な粒径を代表させる指標に応用することが可能であると考えられる。礫相当の粒径の結果及び本実験結果を総合すると、サクシジョンが飽和水位と対応せず、飽和／不飽和にのみ対応する状態を礫（粒径 2 mm以上）、サクシジョンだけが飽和水位と対応している状態を粒径 1 mm程度まで、サクシジョンと HV 測定値が飽和水位と対応している状態を粒径 0.7 mm程度まで、サクシジョンと HV、DHV 測定値が飽和水位と対応している状態を粒径 0.5 mm程度まで、飽和水位 - 15 cmで DFG、DHV、HV 測定値とも対応している状態を粒径 0.5 mm以下相当と区分することができる。また、これより細かい粒径に関しては、複数の飽和水位における各測定値の上昇の傾きを概算することで推定できる可能性もある。これにより、粒度組成の分析を待つことなく現場で物理的な土砂環境の概要を把握することや、その海岸を構成する堆積物の構成によらず機能的に当てはめた粒径を推定することが可能となる。今後は実際の海岸における実態の把握と検証を行い、上述の指標が実用性を伴う妥当な水準であるかを評価する必要がある。

以上のように堆積物海岸の汀線域においては、砂と礫における粒径の大きさの相違だけにとどまらず、間隙における保水の可否によって、また飽和/不飽和に対応した水中/空中重量の転換が汀線域の土砂環境の大きな相違として特徴付けられることが明らかとなった。今後、実際の礫浜において土砂環境や生物の分布調査を行い、本結果との比較から整合性を明らかにするとともに、生物の生息場所としての礫浜についての位置づけを解明する必要がある。

第6章. 総合考察

本研究により、堆積物海岸における物理的性質が、生息する潜砂性小型甲殻類の分布に極めて重要な影響を与えていることが解明され、特に砂浜海岸汀線域の潮上帯から潮下帯上部の帯状分布域の全てが堆積物の物理的性質によって規定されていることが明らかとなった。この堆積物の物理的性質については、従来多用されてきた粒径や硬度ではなく、サクシオンによって統一的に表すことが可能であった。ただし、サクシオンはあくまで砂中の表面張力の値であって、潜砂性小型甲殻類の分布域の成立に対する作用機序については、最も底質硬度が上昇する2~3kPa付近では底質硬度が、5kPa付近では水中呼吸者の呼吸の阻害が、10kPa以上では砂が乾燥によって弾性から塑性を示すことがヒゲナガハマトビムシの営巣を阻害する（佐々ら, 2010a; Sassa *et al.*, 2014）などそれぞれ異なる。このことは、底質の硬度が従来考えられてきた粒径といった一つの物理量で決定されているものではないということを示している（梶原, 2015; 2016）。結局、底質の硬度やサクシオンは、飽和度、間隙比、粒径、飽和水位、粘着力（泥底のみ）等の総合的な指標であって、従来の生息環境と生物との関係を解析する際に用いられてきた、環境要因を個々の要素に細分化し、生物分布を説明するために統計学的に最もフィットする要素を探し出す、という手法とは大きく異なる（梶原, 2017）。

一方で、沿岸の干潟や砂浜より深度が深く、堆積傾向が勝る底質の移動限界以深でも底質の粒径と生息する種の潜砂・営巣能力によって分布域が決定されており

（Kajihara, 1999）、海岸から陸棚域までの広大な範囲の主要な堆積物である泥底においても底質の硬度がマクロベントスの密度に影響を与えていると考えられるなど

（梶原, 2001）、情報が殆ど無い砕波帯域を除けば、堆積物の物理的性質が潜砂性の底生生物の分布に大きな影響を与えていることになる。サクシオンについては本稿においても0となる潮下帯までの動態が明らかとなり、潮位の変動による影響も含め（梶原ら, 2015）、ほぼ潜砂性小型甲殻類の分布に与える影響を網羅できたと考えられる（梶原・高田, 2014）。

しかしながら、本研究によってサクシオンは生物分布を決定する一つの重要な物理環境項目であることが証明されたが、測定するための機材が高価であること、その維持管理に手間と人手がかかること、乾燥している部分を測定するためには膨大な時間が必要なこと等の問題点がある。そして、このことがサクシオンの測定とその応用事

例を増やすことの隘路となっている。これを解決するためにはサクシオンを高価な専用機で測定するのではなく、より安価で使いやすい機器類で評価する手法を開発することが必要となるため、本研究ではそのことについても取り組んだ。サクシオンを測定するうえで最も重要な砂浜海岸汀線域における飽和状態の推定については、第3章で示した手法で安価・簡便に行うことが出来るものの、不飽和域でのサクシオン測定における安価・簡便な手法はこれまでに存在しなかった。そこで、著者らのグループではその開発を進め、真空採血管を応用した土壌採水器を砂浜海岸の表面に用い、10分程度で得られた採水量が、測定した砂表面における飽和度の測定結果と極めて良く対応していることを明らかにした(梁ら, 2017)。第2章で記述したとおり、底質の飽和度を安価・簡便に推定する手法はこれまでに無く、そのような方法が開発できれば画期的であるが、飽和度はサクシオンとも密接な関連があることが明らかであるため、飽和水位等の測定と併用することによって、サクシオン測定値を推定することが可能となると考えられる。実際に砂浜海岸汀線域において潜砂性小型甲殻類の分布を規制するサクシオンは、生物種によって異なるが2, 3, 5, および10kPaに境界域があることが明らかとなっており(Sassa *et al.*, 2014), このような精度であれば飽和水位と併用することで簡便にサクシオンの推定が行えるようになった。また、真空採血管を応用した土壌採水器については、安価で入手しやすく、かつ、操作が容易であるため操作者による差が生じにくく、広大な干潟や砂浜でも同時に複数の定点において試料を採取することが可能であり、短時間に効率的な調査を実現できる。加えて、可搬式の天秤を併用し、採水重量を測量することで現場での測量結果の概要を知ることが可能となり、調査の冗長性を大幅に高めることも出来る。このように、従来、高価な測定器が必要であったサクシオンをより簡便な手法で評価できるようになった点は本研究の成果の一つであるが、さらに簡便にするためには今後の課題として引き続き取り組みを進めてゆく予定である。

一方で、底質硬度が低位安定してサクシオンが消失した飽和水面以下でも帯状分布が認められていることから(奥村ら, 2001), サクシオン以外の漂砂の挙動などよりその場で傾度の高い物理環境など底質硬度とは異なる物理指標の検討を行うべきであることが明らかとなった。漂砂の動態は、ほぼ岸沖方向の水平的な動きである掃流漂砂域と、鉛直方向にも漂砂が動いて砂漣を生成する漂流漂砂域とに大別できる。砂中から頭部を出し、波の方向に応じて体の向きを変えてフィルターフィーディングを行うというナミノリソコエビ(上平, 1992)では、漂流漂砂域でこのような行動が困難で

あることを考えると、漂砂の動態が分布域の境界を決定している可能性が高い(梶原・高田, 2014)。また上述のヒメスナホリムシ *Excirologa chiltoni* の帯状分布の下限はナミノリソコエビとほぼ同一であるため(佐々ら, 2010a; Sassa *et al.*, 2014), ヒメスナホリムシについても同様に漂砂の動態の影響を調べる必要がある。その要因としては、生物の行動特性, 例えば, 潜砂しながらも体の一部を砂表面に露出したり, 素面から極浅い部分に潜砂したりする生活様式を持つ生物では, 漂砂の動態が帯状分布の下限として機能している可能性がある。このように, サクション(底質硬度など)とも, 粒径・粒度分布とも異なる物理的指標によって潜砂性小型甲殻類の分布が規定された事例は前例がない。また, これらの成果は第4章で潮位の変動やそれにとともなう海岸勾配の変動においても応用が可能であることが明らかとなり, 砂浜海岸汀線域における潜砂性小型甲殻類の帯状分布の解析には極めて普遍性・汎用性の高いことが示された。今後は海岸勾配の変動による帯状分布域内の密度の正確な推定と, 現状で帯状分布域の変動とは一致しない密度の変動要因の解明について取り組む必要がある。

同様に, サクションが 10kPa 以上ではヒゲナガハマトビムシのみならず, 造巣を伴う生活型の生物の分布に対する原則的な限界をも示している普遍性・汎用性が高い物理的指標である可能性が高く, 体長や潜砂能力が異なると考えられる他のハマトビムシ類による事例の蓄積を進めるなど今後の検証が必要である。

さらに, 砕波帯より沖側においても潜砂する生物や管棲生物の帯状分布が確認されており(梶原, 1995; 梶原, 1996), 掃流漂砂域と砕波帯に挟まれた漂流漂砂域においても, 何らかの帯状分布域が存在すると考えられる。これまでの砂浜海岸における帯状分布の成立要因は, 全て堆積物の物理環境と分布する生物の能力や生活様式との関係において決定されていることから, 漂流漂砂域の生物の帯状分布域についても同様なメカニズムで成立していると推測される。そこで, 漂流漂砂域に生息するために必要な能力と環境との関係を考察すると, まず, 三次元的な移動をする砂中で安定した潜砂状態を保つ能力が不可欠と考えられる。そのひとつに潜砂能力が挙げられるが, 漂流漂砂域では砂の巻き上げが頻繁に起こることを考えると, 短時間で深く潜砂する能力が必要であると推測される。つまり, 「潜砂する速さ」が重要である可能性があり, 生物側の要因として潜砂能力について評価する必要があると考えられる。

一方で, 本研究によりサクションの限界点も明らかとなった。例えば, 礫浜においては, これまで述べてきたサクション動態を中心とした生物の帯状分布域の成立するロジックが全く適用できないことが明らかとなった。礫浜は砂浜と連続して存在する場合も多いため, 礫粒径から砂粒径への移行に伴い底質硬度他の物理的性質がどのよ

うに変動してゆくかを調べたが、粒径が 0.5 mm～2 mmまでは土木工学では砂に分類されるものの、サクシオンという観点からは礫から砂への移行段階となることが判った（梶原，2016）。加えて、梶原ら（2017）は、礫干潟が粒子間に水を保持しない性質であることから、周辺の砂干潟と比較して夏季干出時の地温が高くなり、アサリ着底稚貝の生残に悪影響を及ぼすことを報告している。このように、礫浜においてはサクシオン動態や砂浜・泥底とは全く異なる状況を想定して生物の生息環境を検討する必要がある。

これまで述べてきたように、底質硬度は主に潜砂性底生生物の生息の可否を判断する指標として利用されており、他の環境要因との関連性を述べた知見は少ないが、泥底における底質硬度と、底生生物の餌料となり得る有機物量との関係についての知見がある。上田ら（2003）は、吉野川河口の干潟において山中式土壤硬度計で測定した貫入抵抗値を各種環境指標と比較した。その結果、貫入抵抗値はシルト・クレイ率、含水率、最潮時水位からの比高といった物理的な指標だけでなく、強熱減量、全有機炭素、全窒素など有機物量の目安となる化学的指標とも有意な相関があることを報告している。この報告と同様に、梶原ら（2010）は新潟県の陸棚域では、泥底におけるデジタルフォースゲージ（DFG）の測定値と強熱減量との間に、ポケットベーンテスター（VT）の測定値と含泥率（もしくは強熱減量）との間にそれぞれ有意な相関が見られたことを報告している。しかしながら、表層 5 mmのごく浅い層を測定する VT では、通常含水比と底泥の底質硬度との間に認められる相関が見られなかったが、その原因として底泥の物理的性質というよりも底表に堆積した有機物の物理的性質を測定していることに起因すると考察されている（梶原ら，2010）。これらの結果は、いずれも有機物量の堆積によって底質硬度が減少することを示しており、有機物の底表への堆積を硬度指標から間接的に推定できる可能性を示している。とりわけ、底生生物の中でも堆積物食者に関しては、硬度指標から生息環境だけでなく餌料環境も解析できる可能性があり、今後の発展と展開が期待される。

底生生物が潜砂や営巣のために有している能力及びその生活様式と、底質の状態とのマッチングの解明は、その生息環境を解析するうえで極めて単純・明快ながら説得力のある手法である。このような手法の代表的なものとして、底質硬度の測定と関連する知見及び情勢について様々な角度から取り上げた。今後も、底質硬度の測定を通じて底生生物の生息環境の解明に努めるとともに、底生生物の生息環境に関わる新たな物理指標の探求にも邁進してゆく必要があると考える。

謝辞

本稿を終えるにあたり，在学中にわたる終始丁寧で根気強いご指導と激励をいただき，貴重な批評と校閲の労を賜った国立大学法人広島大学大学院生物圏科学研究科環境循環系制御学環境評価論講座浜口昌巳教授，小池一彦教授，環境予測制御論講座中坪孝之教授に対し心より感謝の意を表します。また，調査および解析にご助力いただいた水産庁日本海区水産研究所（独立研究開発法人水産総合研究センター日本海区水産研究所を経て，現・国立研究開発法人水産研究・教育機構日本海区水産研究所）各位，独立研究開発法人水産大学校（現国立研究開発法人水産研究・教育機構水産大学校生物生産学科）生物環境学講座須田有輔教授及び生物環境学講座学生各位，独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（現・国立研究開発法人水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所）生産環境部各位，独立研究開発法人港湾空港技術研究所（現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）地盤研究領域動土質研究グループ佐々真志グループ長及び動土質研究グループ各位に深い謝意を表してここに記すものである。

参考文献

- 阿久津孝夫・山田俊郎・佐藤仁・明田定満・谷野賢二（1995）：アサリの生息と底質の硬度，粒度との関係について．開発土木研究所月報，**503**，22-30.
- 東 幹夫， 把野 義博， 把野 裕子（1985）：平戸島志々伎湾の底生動物群集—II ヨコエビ類と堆積型による生息場所分析．日本ベントス研究会誌 **28**，1-11.
- Biernbaum, C. K. (1979) : Influence of sedimentary factors on the distribution of benthic amphipods of Fishers Island Sound, Connecticut. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, **38**, 201-223.
- Brown, A. C. and McLachlan A. (2002) : 砂浜海岸の生態学. 須田有輔・早川康博訳，東海大学出版会，東京，427pp.
- Gray, J. S. (1974) : Animal-sediment relationships. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **12**, 223-261.
- 林 勇夫（1984）：II-1-4 新潟北部沿岸のマクロベントス．海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究北陸地域調査成果報告，水産庁日本海区水産研究所，115-120.
- Holte, B. (2001) : Possible ecological effects from Maldanid (Annelida, Polychaeta) “super-dominance” in a small north Norwegian sill system. *Ophelia*, **55** , 69-75.
- 星野通平（1984）：浅海地質学．海洋科学基礎講座 7，東海大学出版会，東京，445pp.
- 岩尾敦志・西広富夫・藤原正夢（1996）：トリガイ養殖に関する研究—II—トリガイ養殖器内に敷く基質について—．京都府立海洋センター研究報告，**18**，57-61.
- 梶原直人（1995）：新潟市の開放型砂浜海岸浅海域におけるヨコエビ類 *Ampelisca* 属

の分布とその変動, 海の研究, 4, 399 - 406.

梶原直人 (1996) : 五十嵐浜において波浪がマクロベントスの分布とその季節変動に与える影響, 日本海ブロック試験研究集録, 33, 47 - 55.

Kajihara, N. (1999) : Experimental study on the tube building capability of Ampeliscid Amphipods. *Fisheries Engineering*, 35, 223-227.

梶原直人 (2001) : デジタルフォースゲージを用いた新潟県沿岸域における海底泥の硬度測定結果について. 水産工学, 38, 179-184.

梶原直人・藤井徹生 (2001) : マガレイ成育場の評価手法の開発. 平成11年度沿岸漁場整備開発調査(直轄)報告書, 水産庁漁港漁場整備部計画課, 137-142.

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・井関智明・高田宜武・藤井徹生 (2010) : 新潟県下越陸棚域海底における泥底及び砂底の底質硬度と物性指標の関係. 水産工学 47, 63 - 68.

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) : 新潟県の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* (端脚目: ナミノリソコエビ科)分布域の推定. 水産工学, 51, 129-132.

梶原直人・浅井貴恵・鈴木雄太・石山雄大・須田有輔 (2015) : 潮位の変動に伴う砂浜海岸汀線域における土砂環境と小型甲殻類の分布域の変動. 水産工学, 52, 133-139.

- 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.
- 梶原直人 (2017) : 第4章 砂浜海岸のマクロファウナ. 砂浜海岸の自然と保全, 須田有輔編著, 生物研究社, 東京.
- 上平幸好 (1992) : 北海道南西部の砂質海岸に生息する端脚類 *Haustorioides japonicus* (Dogielinotidae) の生態学的研究. 函館大学論究特別号, **1**, 72pp. + x x x iii Appendix.
- 上月康則・倉田健悟・村上仁士・鎌田磨人・上田薫利・福崎亮 (2000) : スナガニ類の生息場からみた吉野川汽水域干潟・ワンドの環境評価, 海岸工学論文集, **47**, 1116-1120.
- Krumbein, W. C. (1934) : Size frequency distribution of sediments. *J. of Sed. Petrol.*, **4**, 65-77.
- 久野五郎 (1966) : 解説土質工学. 理工図書, 東京, 195pp.
- McLachlan, A. (1983) : Sandy beach ecology- a review. *Sandy beach as Ecosystem*, The Hague, Boston, 321-380.
- 松井章弘・土田孝・川崎大輔・森宏美 (2011) : 軽量動的コーン貫入試験を用いた干潟地盤の調査. 地盤と建設, **28**, 55-62.
- 松尾新一郎 (1984) : 新稿土質工学. 山海堂, 東京, 253pp.

- 中瀬明男 (1984) : 海洋土質. 新体系土木工学 84, 技報堂出版, 東京, 174pp.
- 中山威尉・福田裕毅・秦安史・阿部英治・櫻井泉 (2009) : 底質の貫入抵抗がアサリの潜砂行動に及ぼす影響. 水産工学, **46**, 29-36.
- 奈須紀之 (1976) : 海洋地質, 海洋学講座 5. 東京大学出版会, 東京, 215pp.
- 新潟県農林水産部 (2005) : I 土壌の基礎知識. 新潟県における土づくりのすすめ方, 1-17.
- 新潟県水産試験場 (1978) : 沿岸漁場環境適性調査報告書 (新潟県越後側沿岸海域). 277pp.
- 野坂元道・近藤正美 (2001) : マコガレイの潜砂試験. 岡山県水産試験場報告, **16**, 37-43.
- 奥宮英治・桑江朝比呂・萩本幸将・小沼晋・三好英一・野村宗弘・中村由行 (2001) : 干潟底泥の強度特性と環境要因との関係ーコーン貫入試験を用いた調査ー. 港湾空港技術研究所資料, **1002**, 22pp.
- 奥村卓二・梶原直人・長澤トシ子 (2001) : 福井県浜地から石川県千里浜の砂浜海岸におけるマクロ及びメガベントスの分布. 日本海区水産研究所研究報告, **51**, 133-140.
- Rhoads, D. C. (1974) : Organism -sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **12**, 263-300.
- 酒井哲郎 (2001) : 海岸工学入門. 森北出版株式会社, 東京, 142pp.
- 阪地英男 (1995) : トラエビ *Metapenaeopsis acclivis* (Rathbun), アカエビ *M. barbata* (De Haan), キシエビ *M. dalei* (Rathbun) 及びサルエビ *Trachypenaeus curvirostris* (Stimpson) の潜砂能力. 南西海区水産研究所研究報告, **28**, 1-7.

櫻井 泉・瀬戸雅文・中尾 繁(1996)：ウバガイ, バカガイおよびアサリの潜砂行動に及ぼす水温, 塩分および底質粒径の影響. 日本水産学会誌, **62**(6), 878-885.

Sanders, H. L. (1958) : Benthic studies in Buzzards Bay. I. Animal-sediment relationships. *Limnol. Oceanogr.*, **3**, 245-258.

佐々真志・渡部要一 (2006) : 干潟底生生物の住活動における臨界現象と適合土砂環境場の解明. 海岸工学論文集, **53**, 1061-1065.

佐々真志・渡部要一 (2007) : アサリの潜砂限界強度について. 海岸工学論文集, **54**, 1196-1200.

佐々真志・渡部要一・石井嘉一 (2007) : 干潟と砂浜の保水動態機構と許容地下水位の解明. 海岸工学論文集, **54**, 1151-1155.

Sassa, S. and Watabe, Y. (2007) : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. *Journal of Geophysical Research* **112**, F01003, doi:10.1029/2006JF000575.

佐々真志・渡部要一・桑江朝比呂 (2008) : 鳥と地盤と底生生物の関係に果たす水際土砂環境の役割. 海岸工学論文集, **55**, 1171-1175.

Sassa, S. and Y. Watabe (2008) : Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **354**, 191- 199.

佐々真志・渡部要一・梁順普 (2009a) : 生態地盤学の展開によるアサリの潜砂性能の系統的解明, 土木学会論文集, **B2-65**, 1116-1120 .

佐々真志・渡部要一・梁順普 (2009b) : 多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係, 土木学会論文集, **B2-65**, 1226-1230.

Sassa, S. and Y. Watabe (2009) : Ecological Geotechnics: Performance of benthos activities controlled by suction, voids and shear strength in tidal flat soils. *Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Egypt*, 316-319.

佐々真志・梁 順普・渡部要一・梶原直人・高田宜武 (2010a) : 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 **B2-66**, No. 1, 1126-1130.

佐々真志・渡部要一・梁順普 (2010b) : 巣穴底生生物の最適住活動モデルによる土砂環境選択行動とパッチ形成の実証, 土木学会論文集, **B2-66**, 1096-1100 .

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**, :e25041, doi:10.1371/journal.pone.0025041.

佐々真志・渡部要一・梁順普・白井一洋 (2011) : 漂砂-サクシヨン動態効果の連成による生物生息砂州の自立安定と浅場造成高の最適設計. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , **67**, 1131-1135, .

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.

Schofield, R. K. (1935): The pF of the water in soil. *Trans. Intern. Cong. Soil Sci.*, **2**, 37-48.

瀬戸内海環境保全協会編 (2004) 生きてきた瀬戸内海-瀬戸内法三〇年-. 瀬戸内海環境保全協会, 神戸, 301pp.

水産庁・マリノフォーラム 21 (2007) : 砂質系干潟の健全度評価手法マニュアル.
29pp.

鈴木高二朗 (2001) : 砂漣内の浸透流について. 港湾技術研究所報告, **40**, 31-46.

高橋豊美・河村卓・藤岡崇 (1991) : 陸奥湾における夏季のマクロベントスの密度と群
集型の経年変動. 日本ベントス学会誌, **41**, 15-27.

竹門 康弘・玉置 昭夫・川端 善一郎・谷田 一三・向井 宏 (1995) : 棲み場所の
生態学. 平凡社, 東京, 279pp.

谷田専治・奥田泰造 (1958) : 松島湾の水産資源に関する基礎研究, 第7報底棲生物
の垂直分布とその季節遷移. 東北区水産研究所研究報告, **11**, 112-126.

辻本良・浦邊清治・小谷口正樹 (2007) : 富山湾の漁場環境(2006)－水質・底質・藻
場・餌料環境－. 平成18年度富山湾漁場環境総合調査報告, 富山県水産試験場,
204pp.

上田薫利・上月康則・倉田健悟・大谷壮介・桂義教・東和之・堅田哲司・村上仁士 (2003) :
貫入抵抗値を用いた簡便的な干潟底生生物調査地点の選定手法に関する基礎的研
究. 海岸工学論文集, **50**, 1056-1060.

運輸省港湾局 (1994) : 環境と共生する港湾エコポート<新たな港湾環境政策>. 大
蔵省印刷局, 87pp.

Wentworth, C. K. (1922) : A scale of grade and class terms for clastic sediments.
J. of Geology, **30**, 377-392.

山本護太郎 (1973) : 海洋生態学. 海洋学講座 9, 東京大学出版会, 東京, 213pp.

山本莊毅 (1986) : 地下水学用語辞典. 古今書院, 東京, 141pp .

梁順普・佐々真志・渡部要一・岩本裕之・中瀬浩太（2011）：生物住活動性能チャートによる自然・造成干潟の住み分け評価分析と検証．土木学会論文集 **B2-67**, 986-990.

梁順普・佐々真志・梶原直人・渡辺啓太（2017）：砂浜及び干潟における実質飽和近傍域の簡易検定・評価手法の構築．土木学会論文集 **B3-73**.

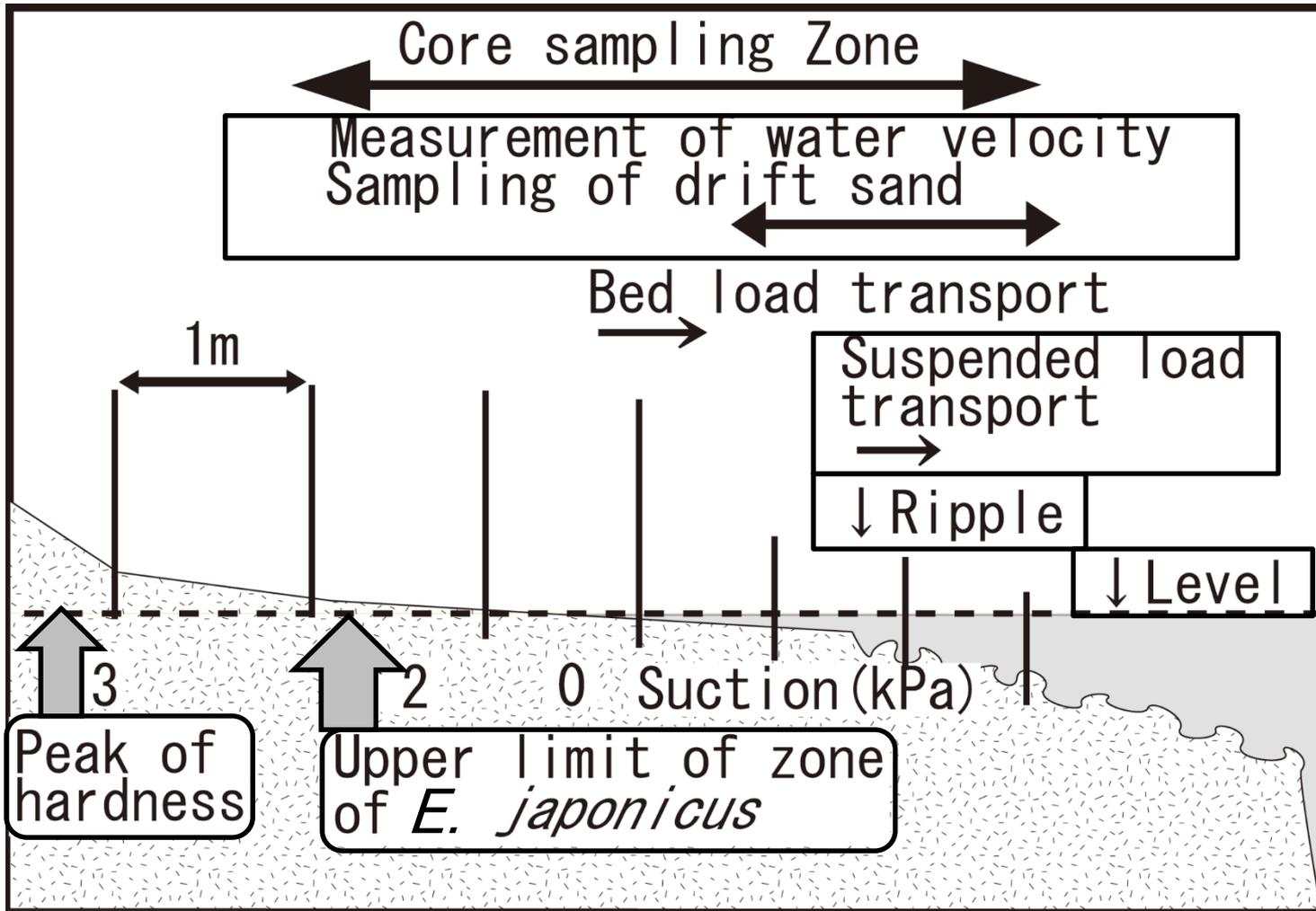


Fig. 1. Chart of sampling and measurement of shore line zone.

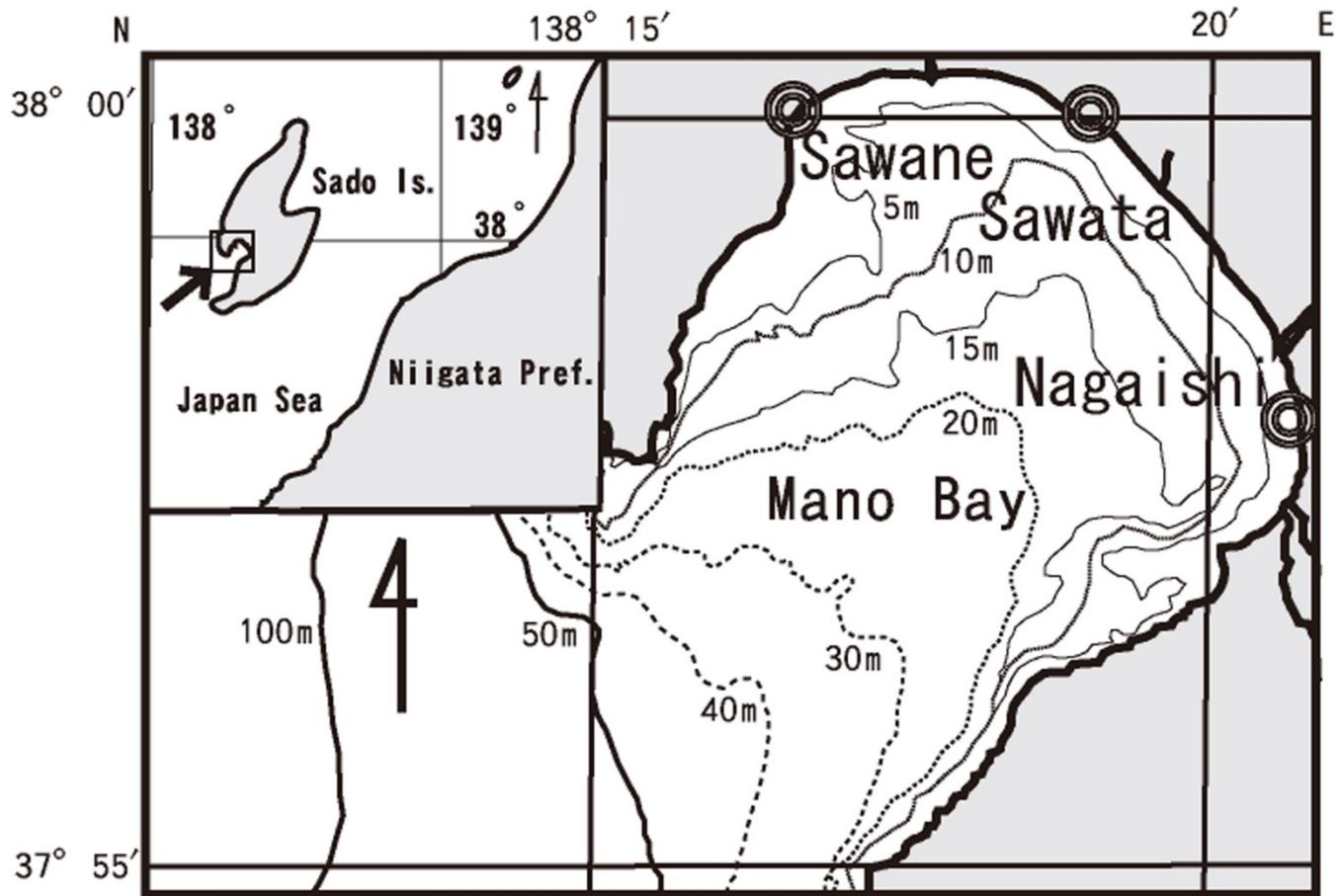


Fig. 2. Sampling location at the Mano Bay of Sado Island.

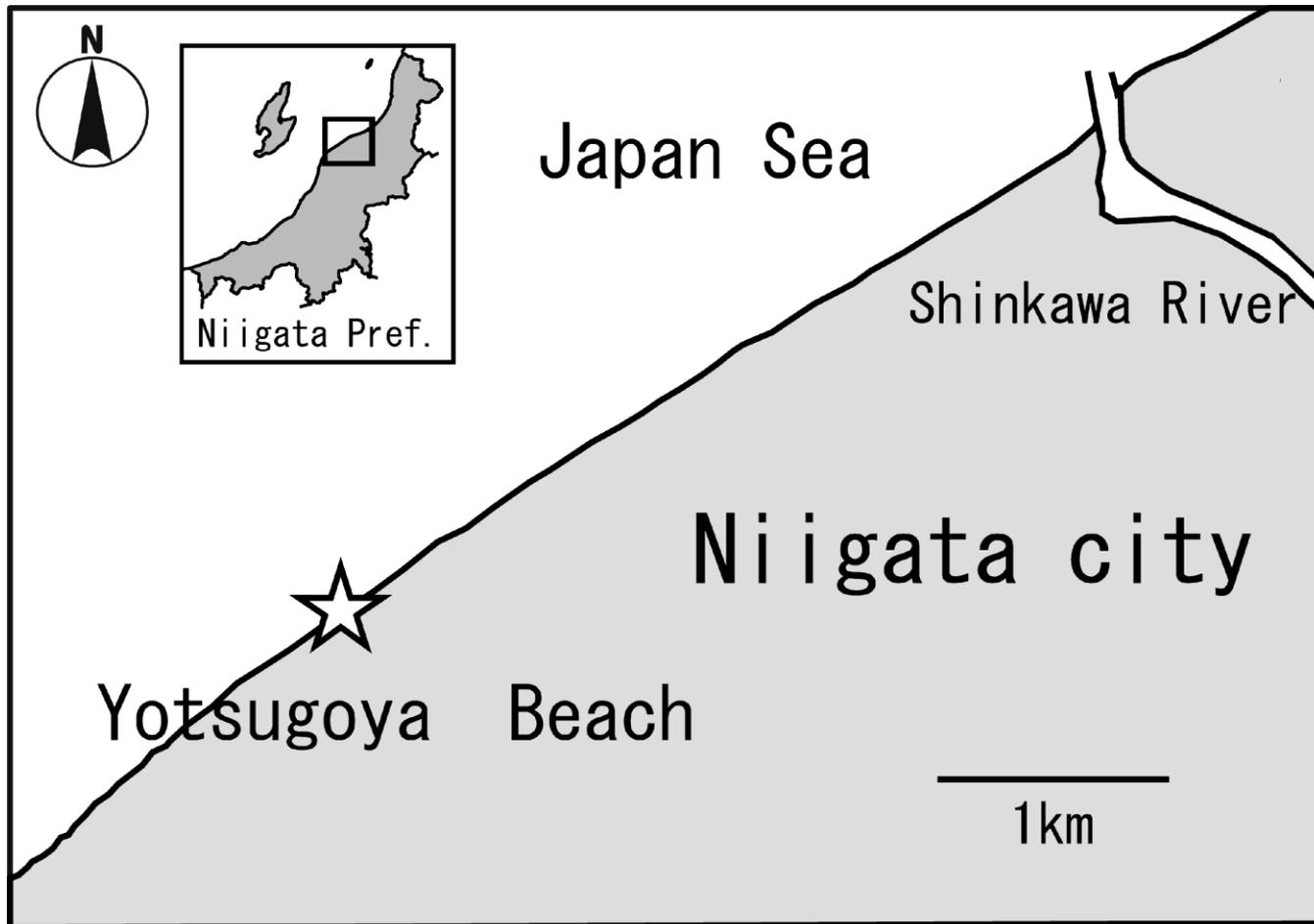


Fig. 3. Sampling location at the Yotsugoya Beach of Niigata City.

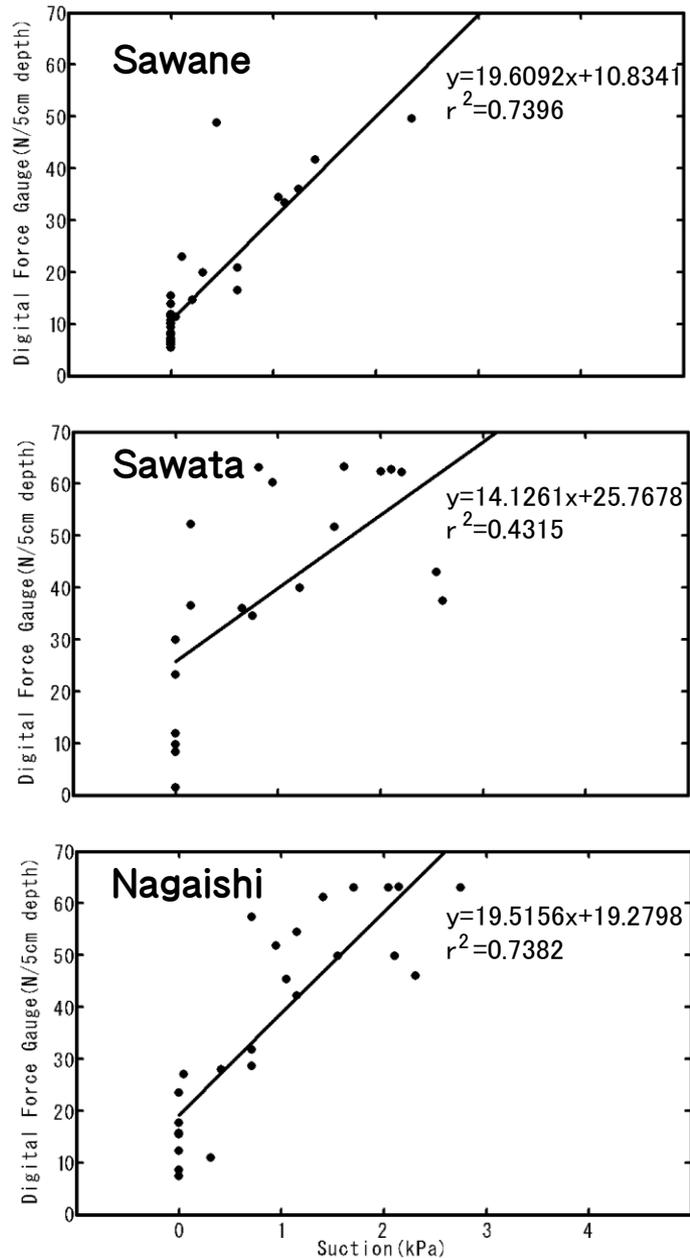


Fig. 4. Relationship between DFG measurement and suction in three sites of Sado Island.

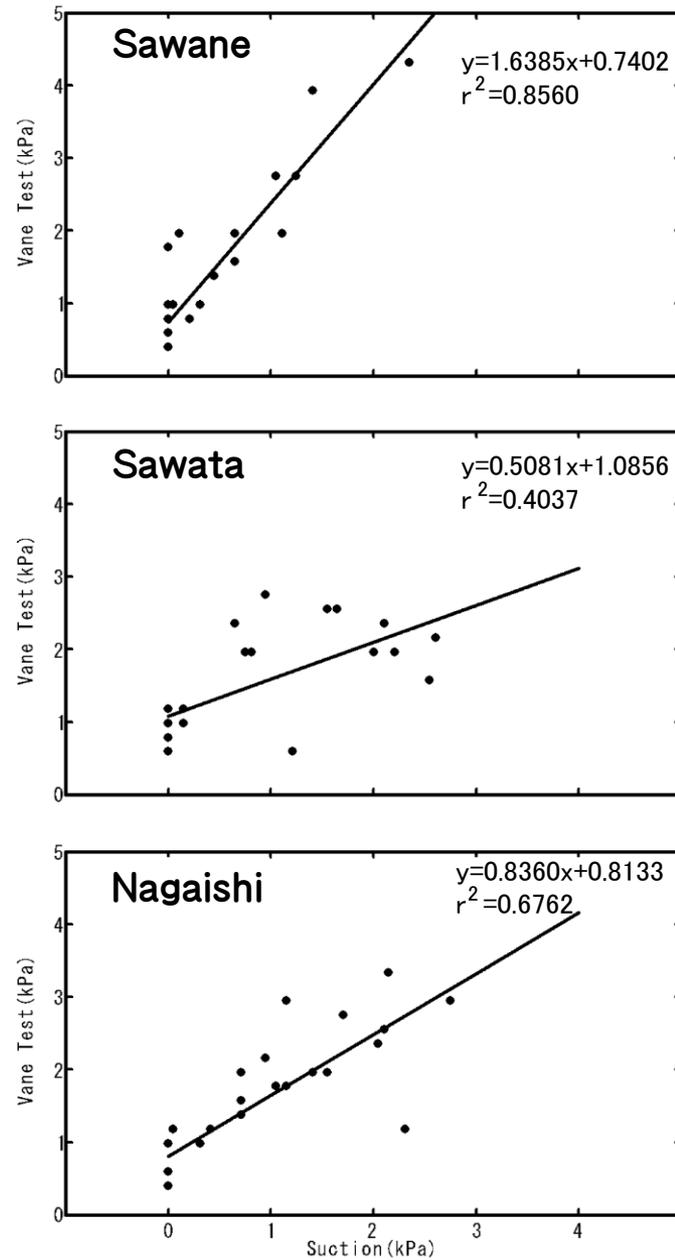


Fig. 5. Relationship between VT measurement and suction in three sites of Sado Island.

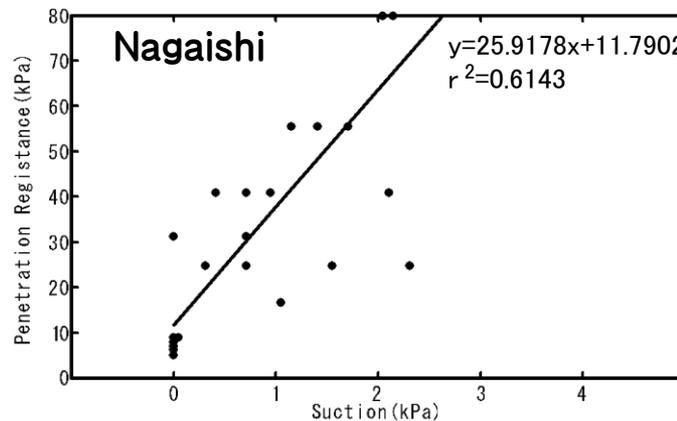
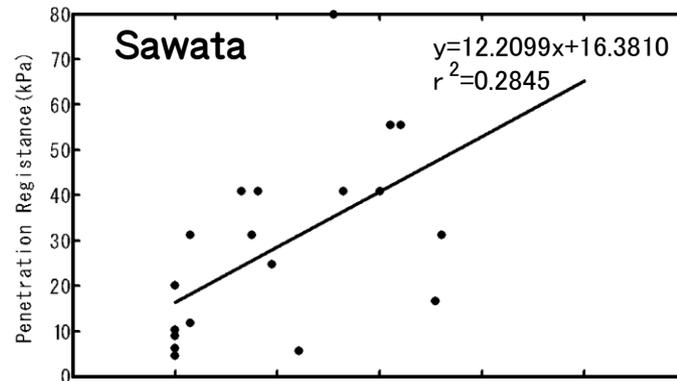
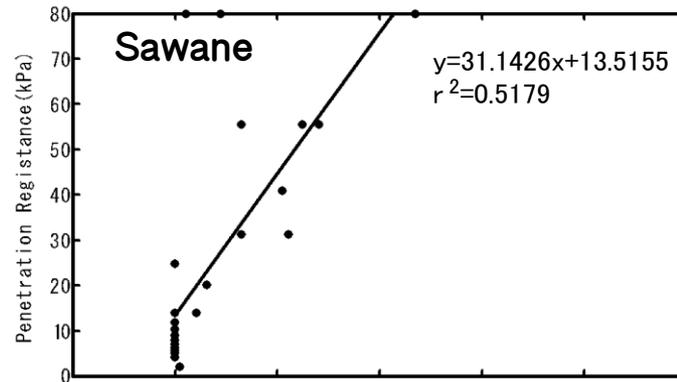


Fig. 6. Relationship between PE measurement and suction in three sites of Sado Island.

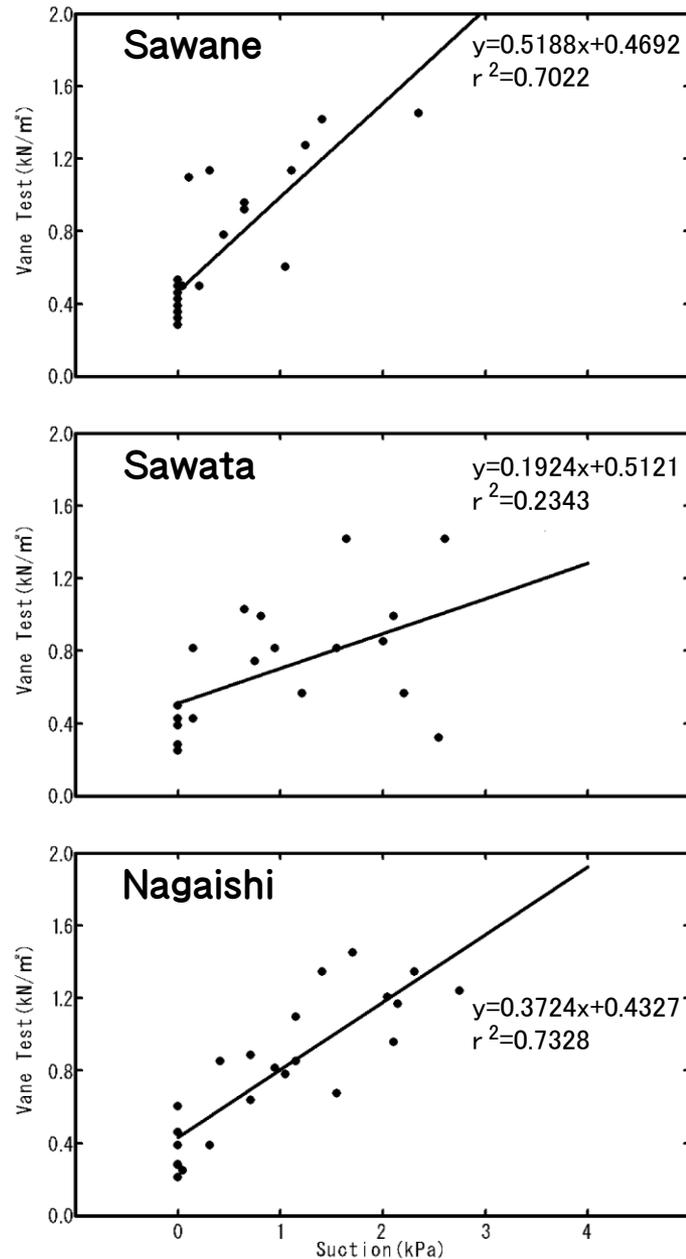


Fig. 7. Relationship between HV measurement and suction in three sites of Sado Island.

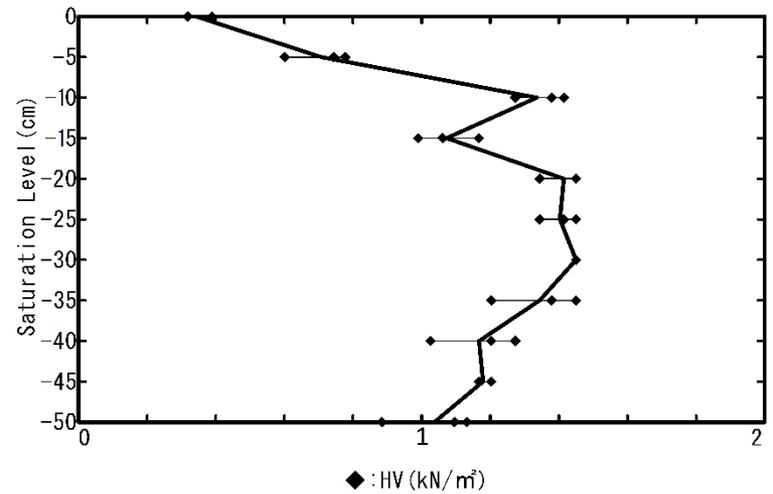
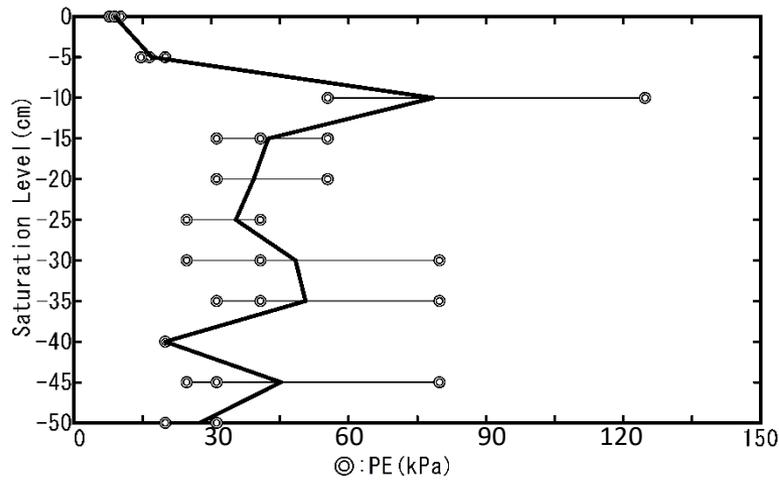
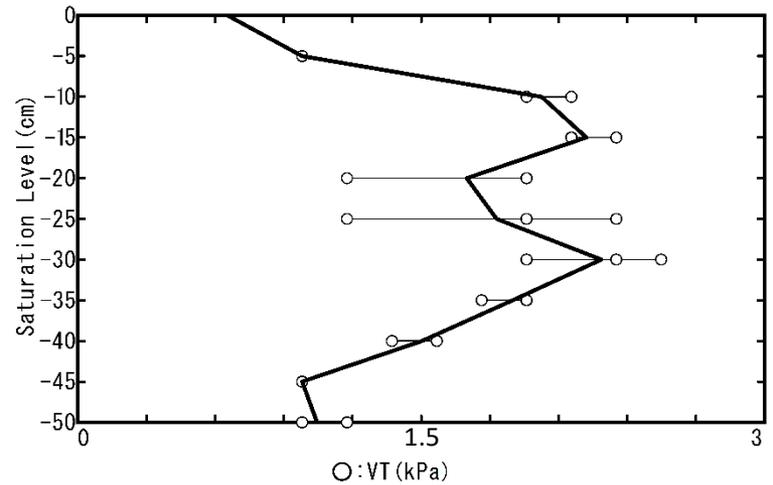
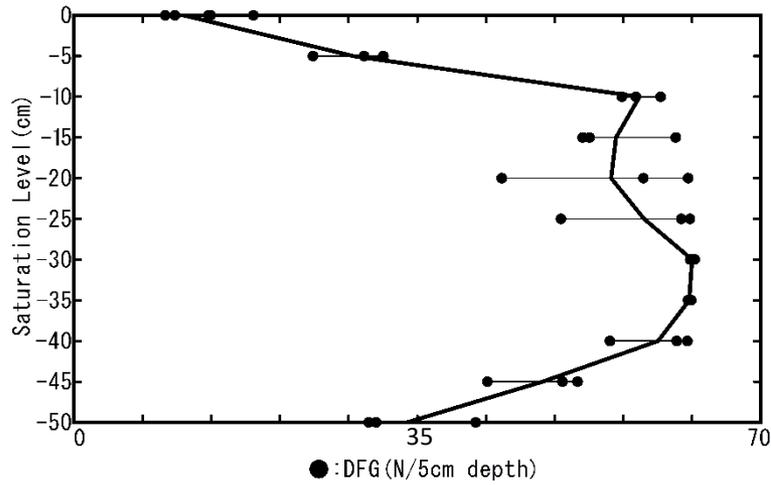


Fig. 8. Relationships between static saturation level and DFG, VT, PE and HV measurement in laboratory. Line shows mean measurement of each devices.

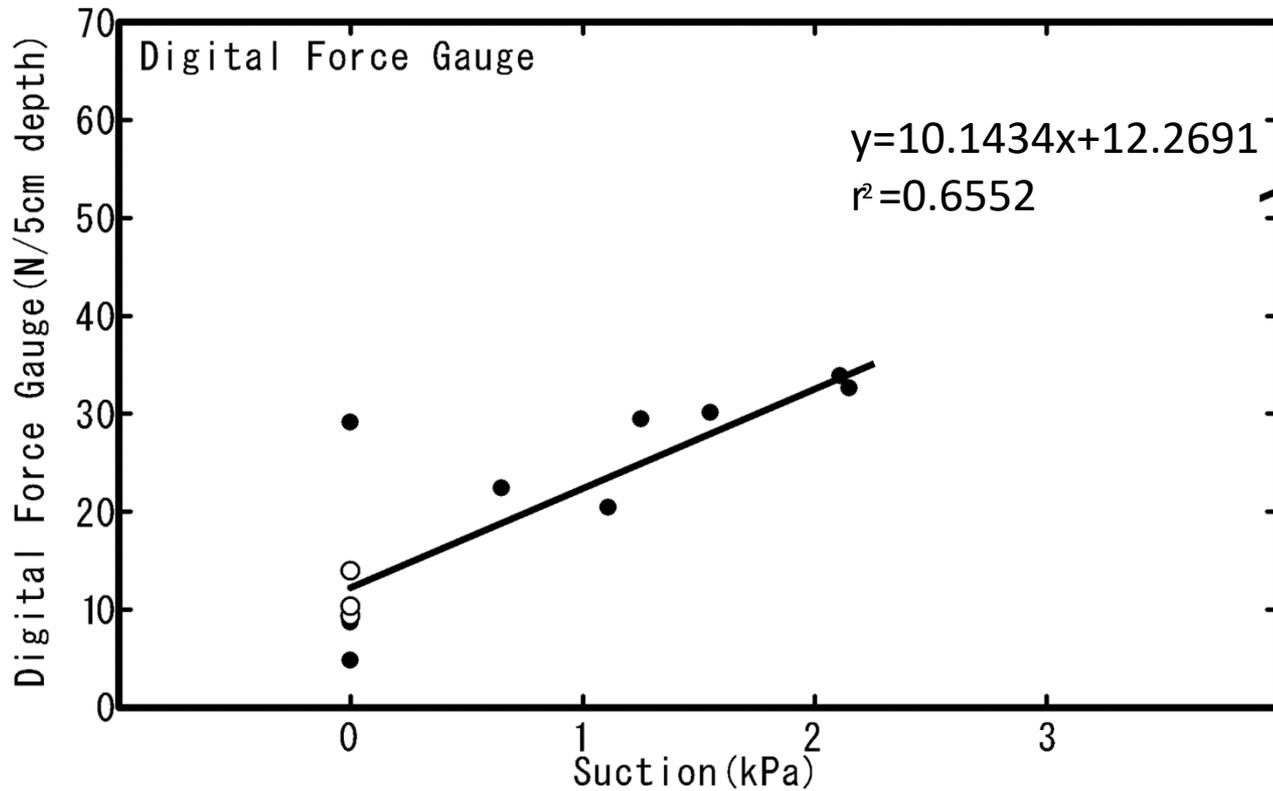


Fig. 9. Relationship between DFG measurement and suction in Yotsugoya Beach. Open circle showed DFG measurement in 0cm of static saturation level (see **Fig. 8**).

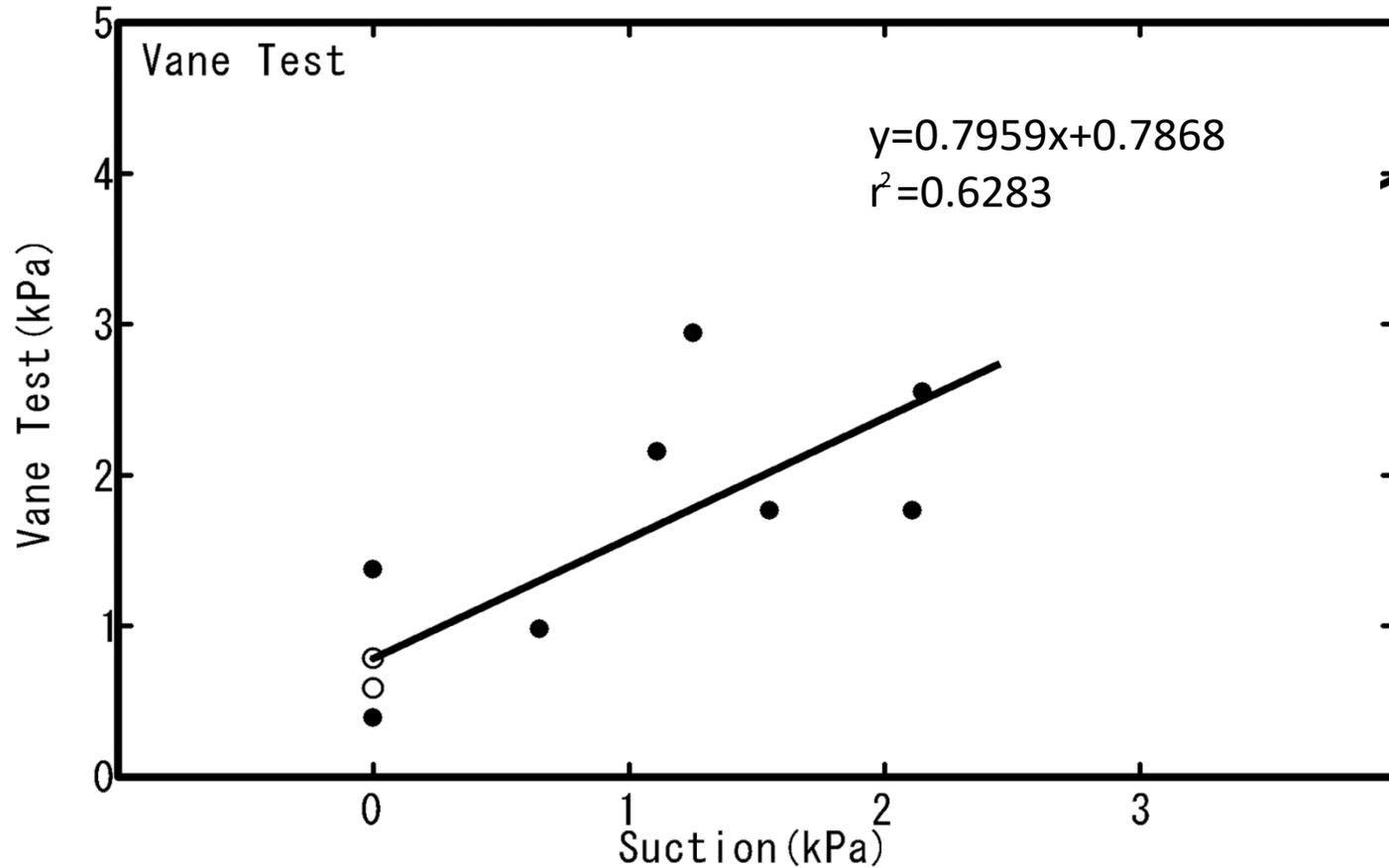


Fig. 10. Relationship between VT measurement and suction in Yotsugoya Beach. Open circle showed VT measurement in 0cm of static saturation level (see **Fig. 8**).

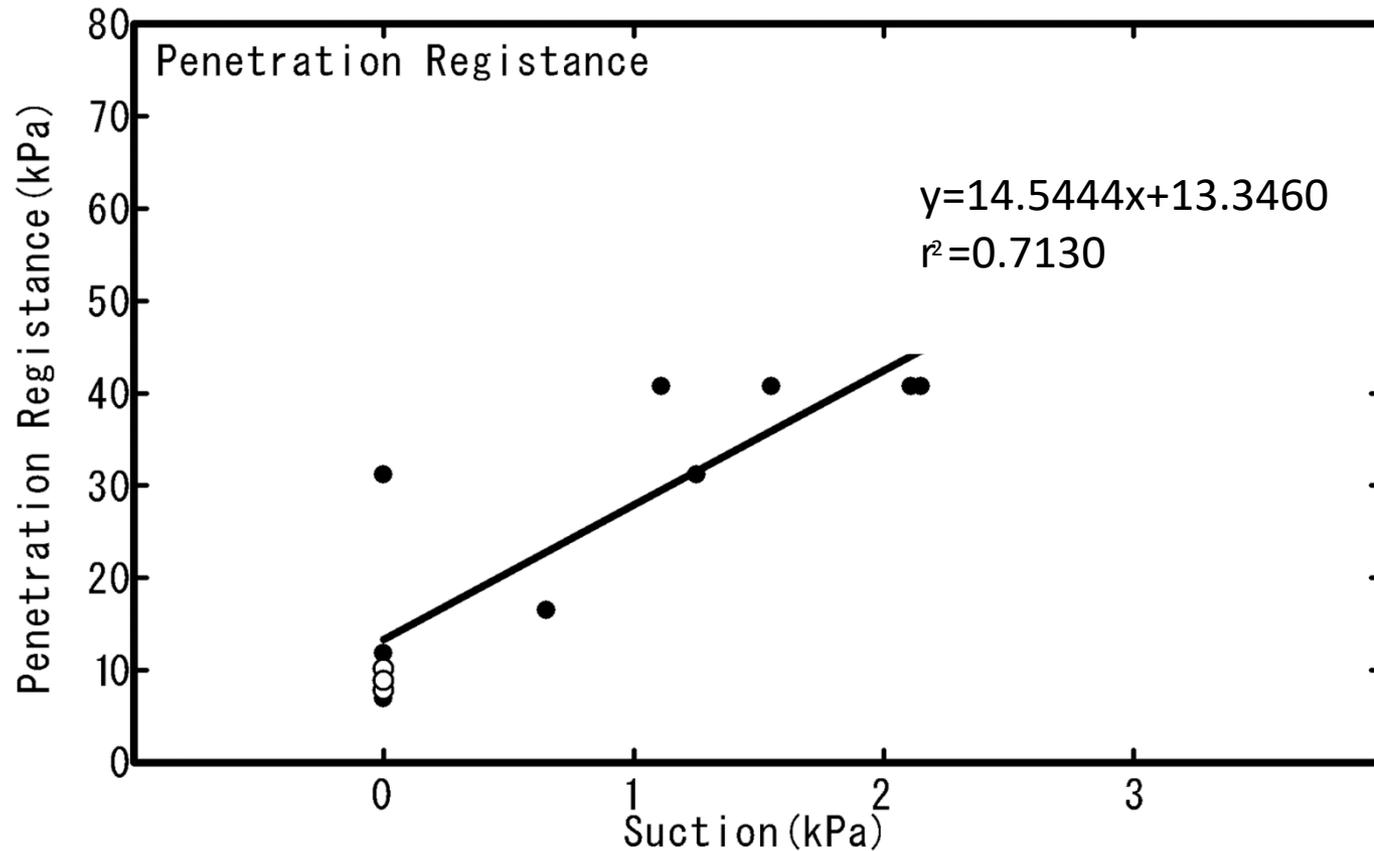


Fig. 11. Relationship between PE measurement and suction in Yotsugoya Beach. Open circle showed PE measurement in 0cm of static saturation level (see **Fig. 8**).

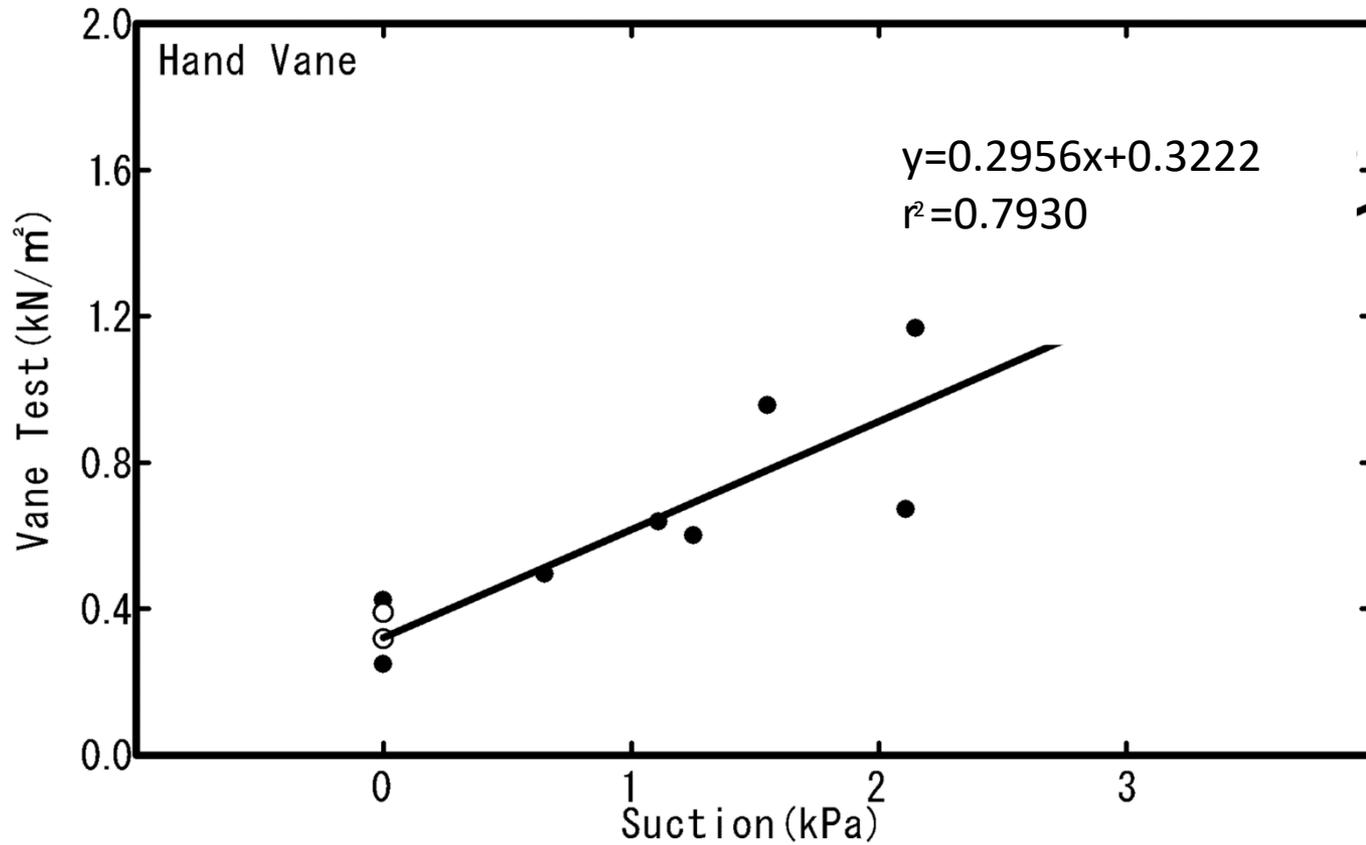


Fig. 12. Relationship between HV measurement and suction in Yotsugoya Beach. Open circle showed HV measurement in 0cm of static saturation level (see **Fig. 8**).

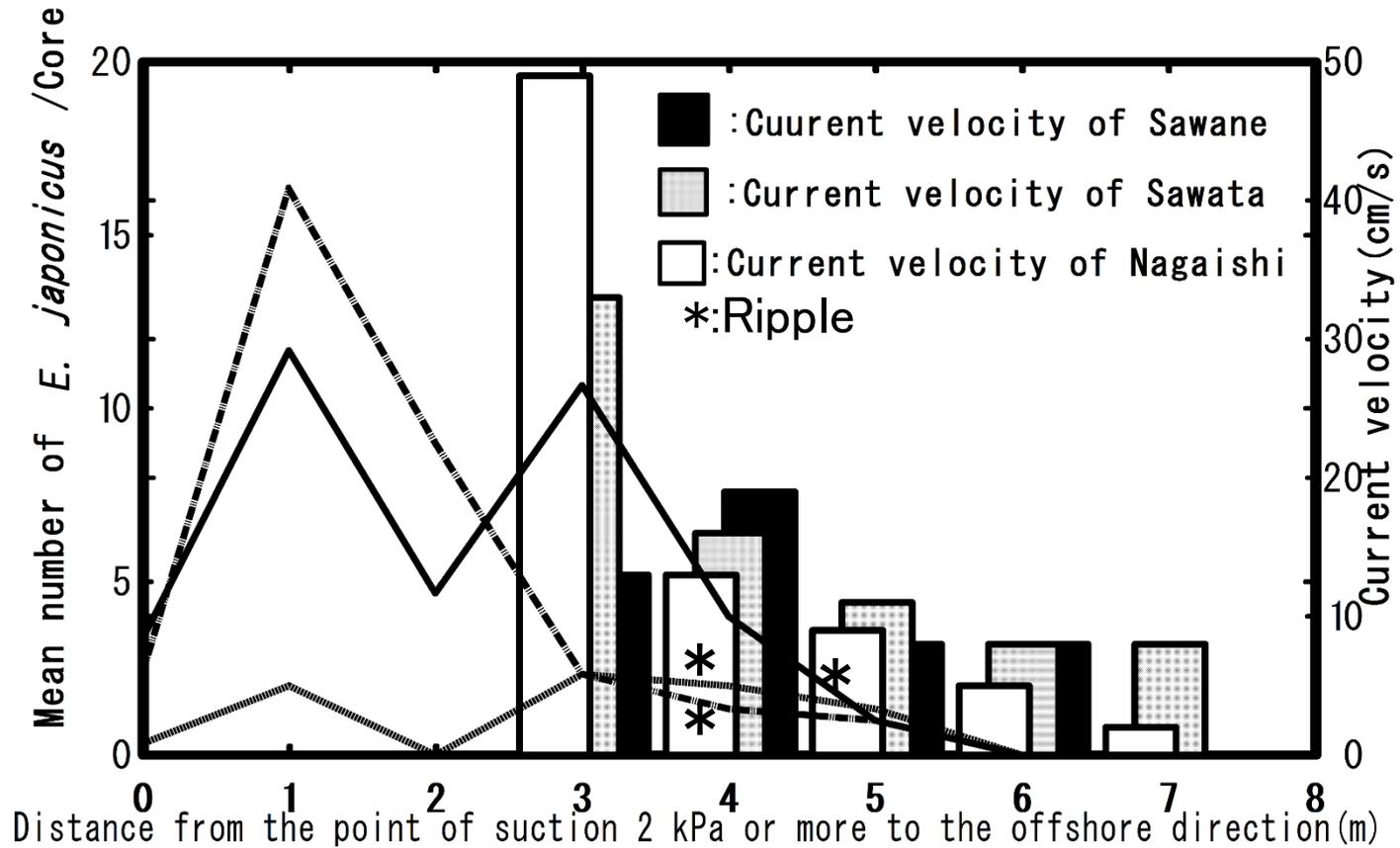


Fig. 13. Mean numbers of *Eohaustrioides japonicus* and current velocity in three coast of Sado Is.
 —: Sawane, ...: Sawata, ..._: Nagaishi.

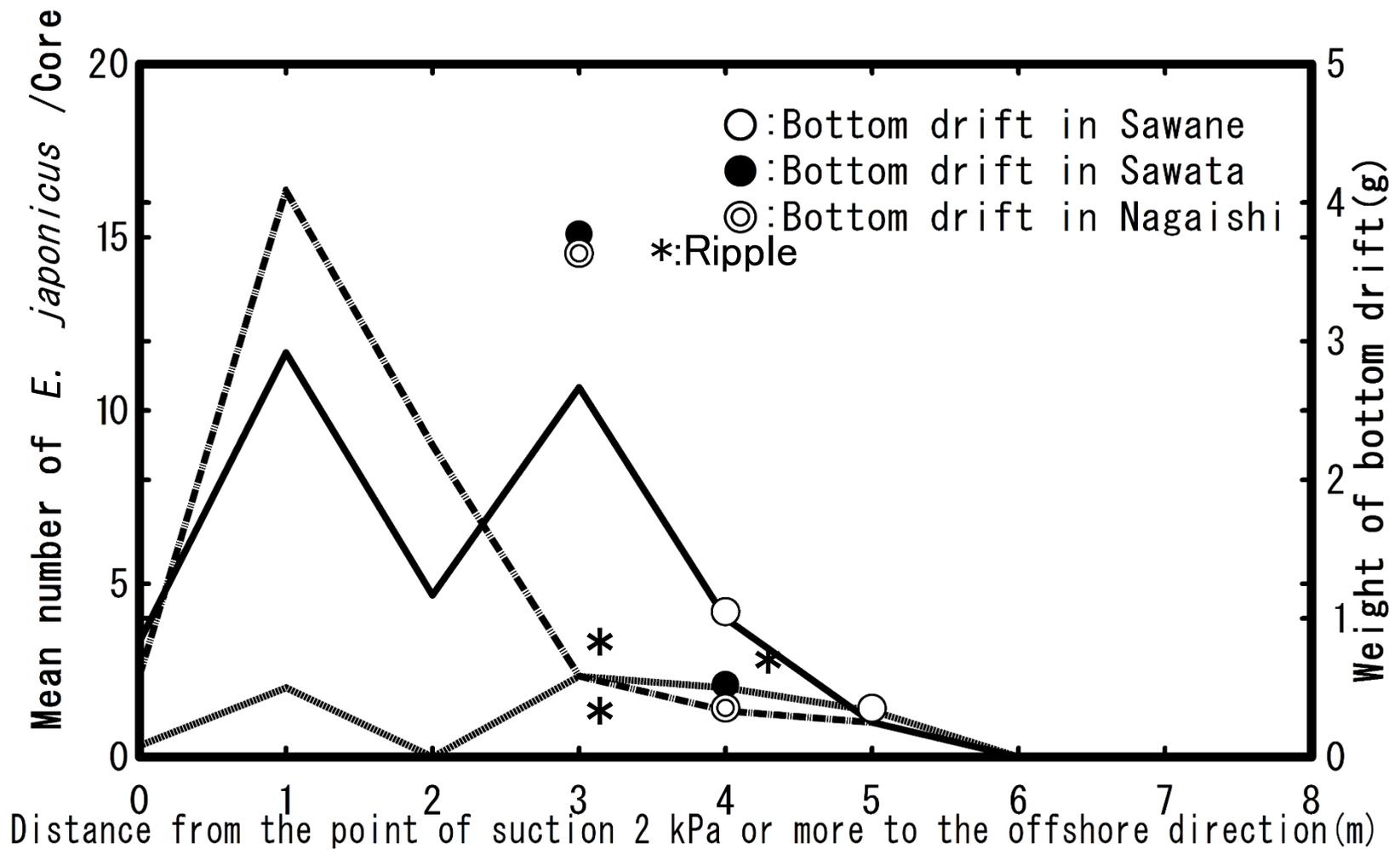


Fig. 14. Mean numbers of *Eohaustrioides japonicus* and weight of bottom drift in three coasts of Sado Is.
 —: Sawane, ...: Sawata, ..._: Nagaishi.



Fig. 15. Location of the survey site on Yasuoka Beach, Yamaguchi Prefecture.

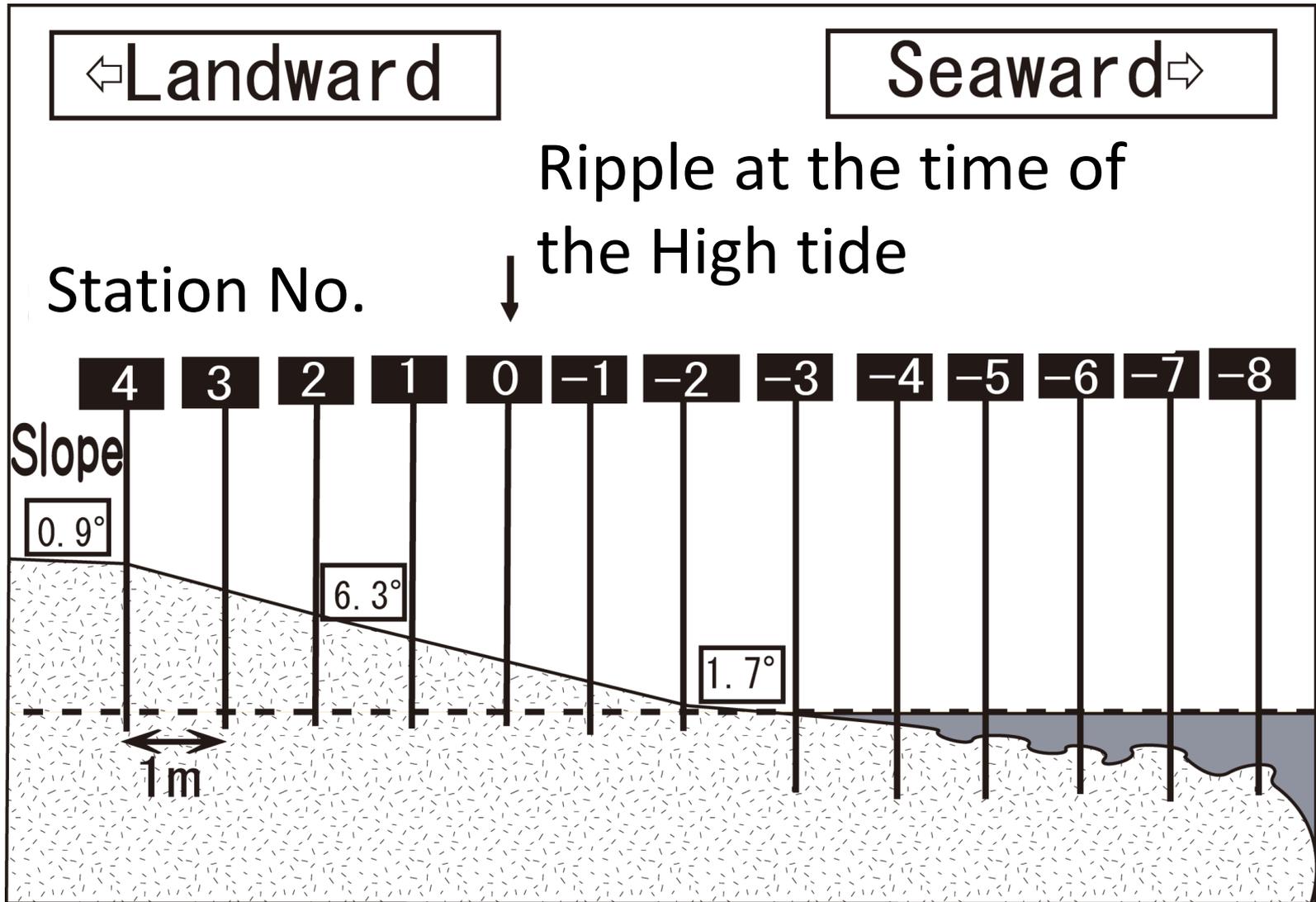


Fig. 16. Stations and slope of the survey location.

Eohaustorioides japonicus

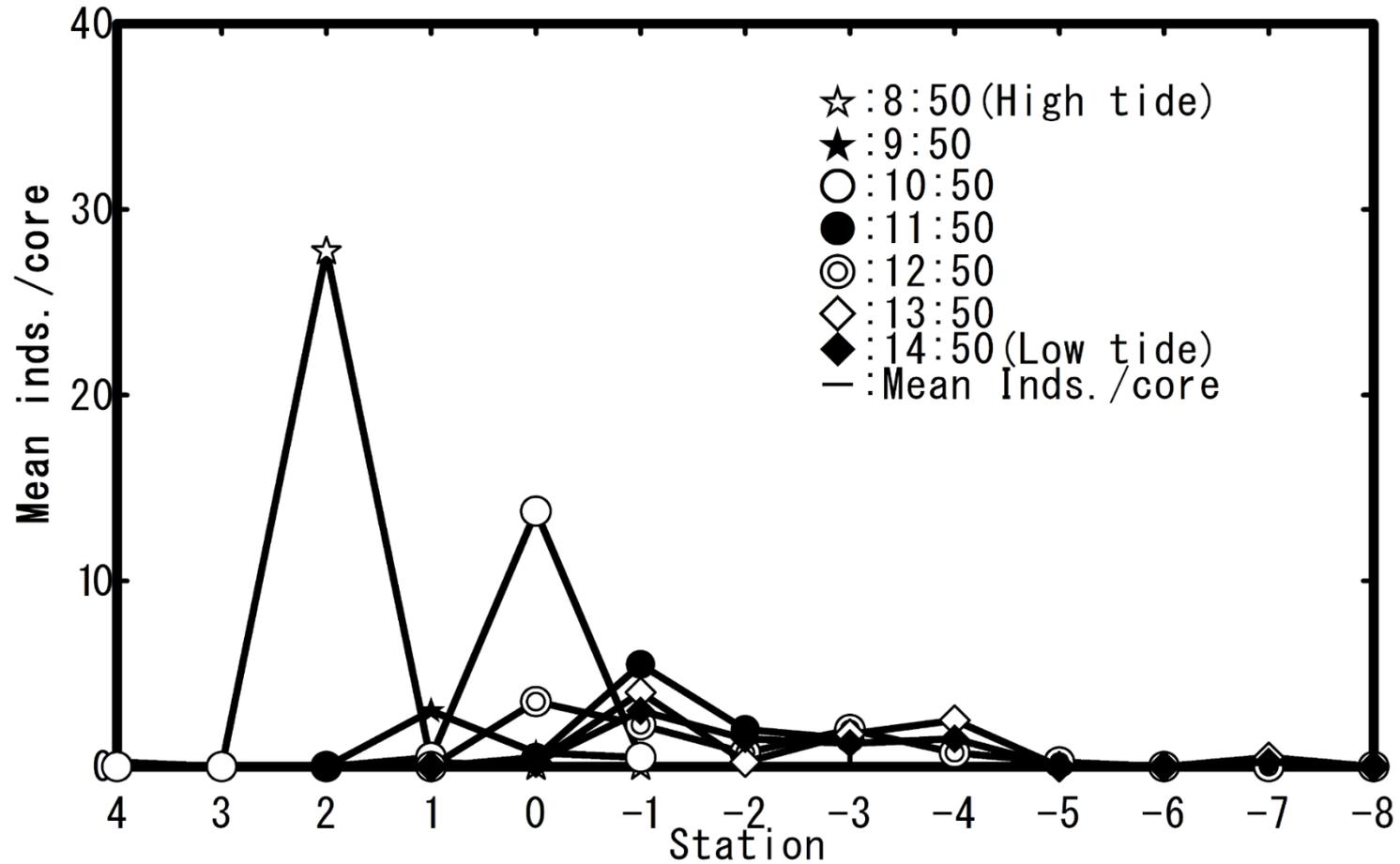


Fig. 17. Mean number of *Eohaustorioides japonicus* at each station, for each time.

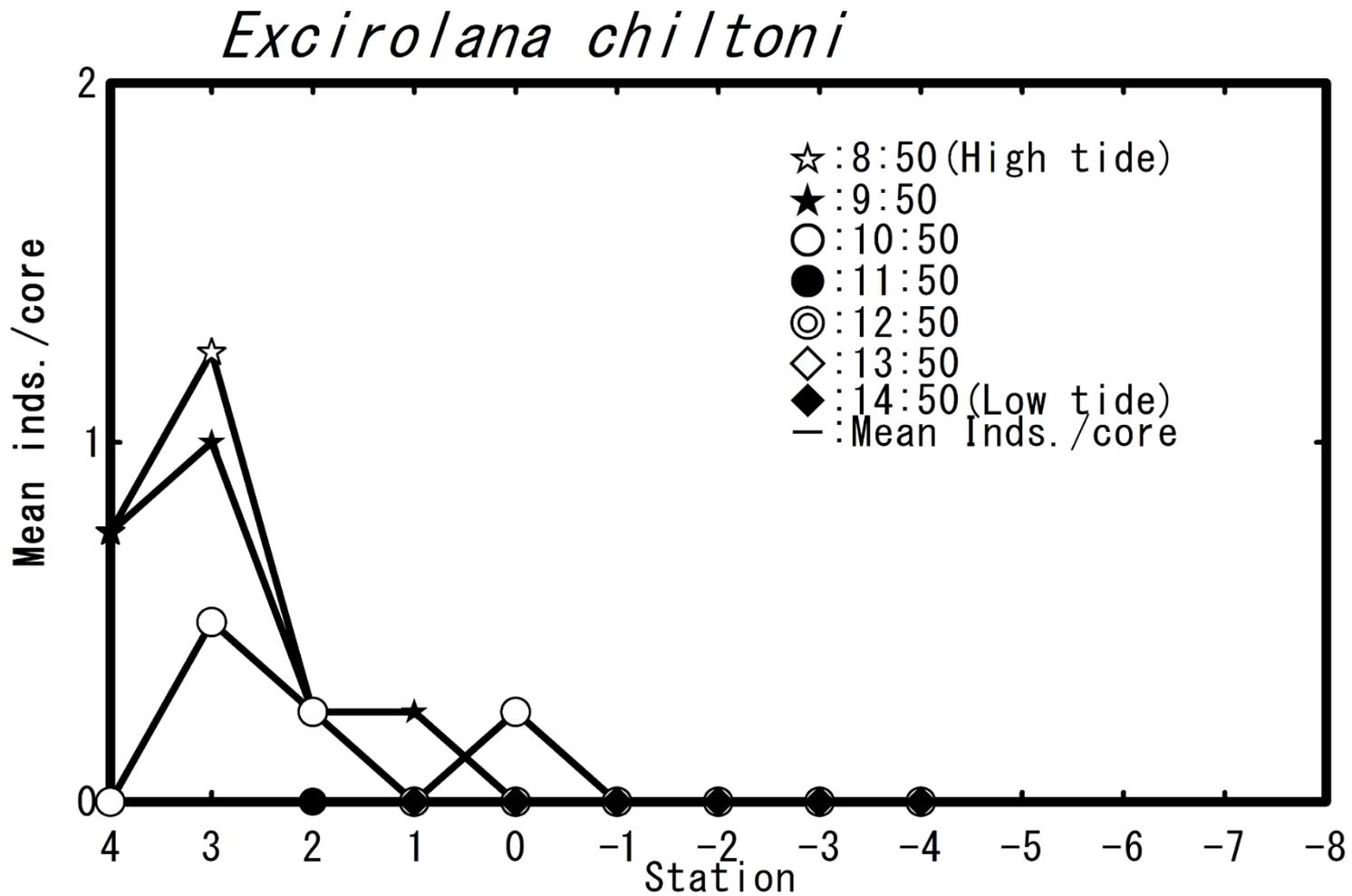


Fig. 18. Mean number of *Excirolana chiltoni* at each station, for each time.

Suction

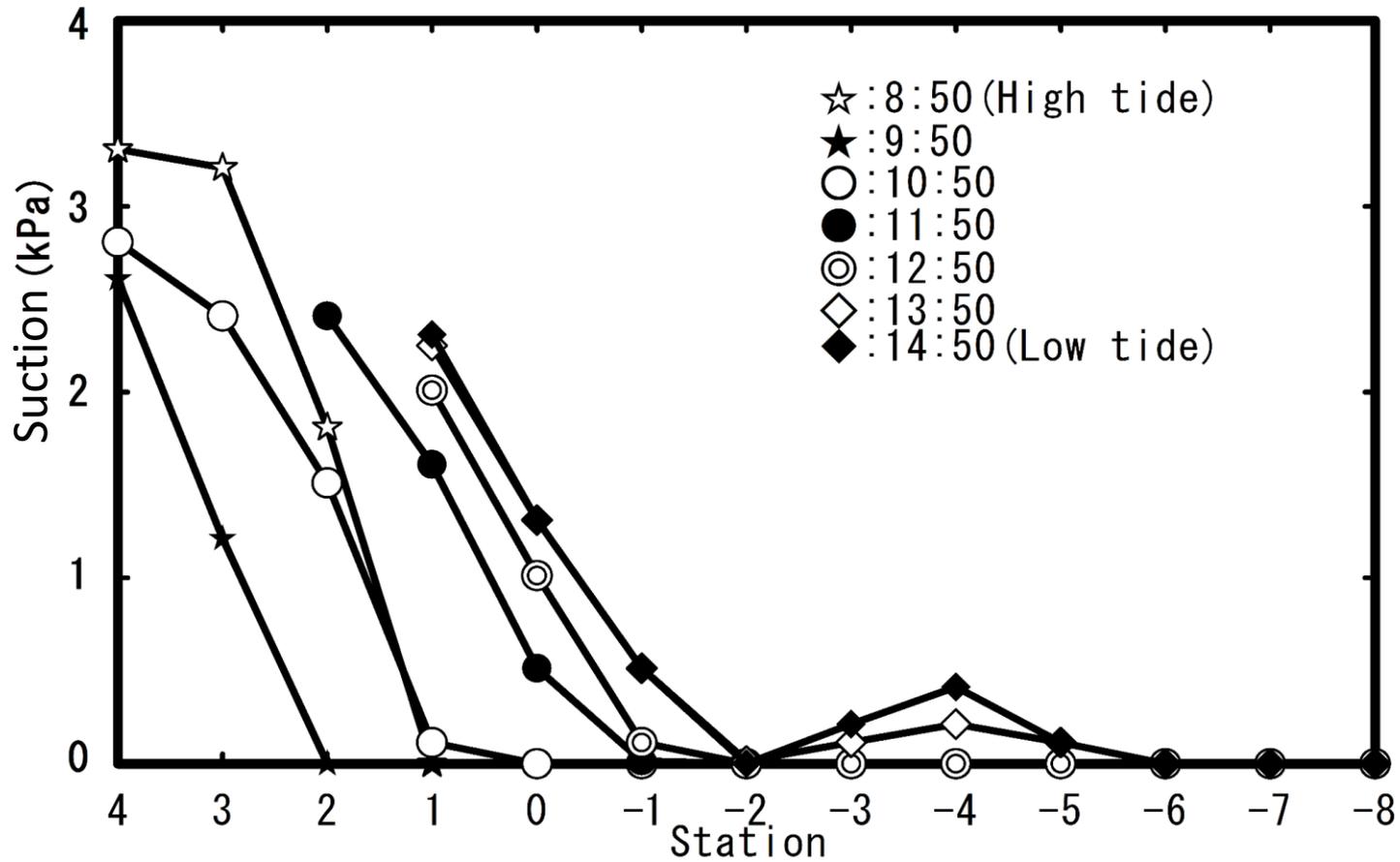


Fig. 19. Suction at each station, for each time.

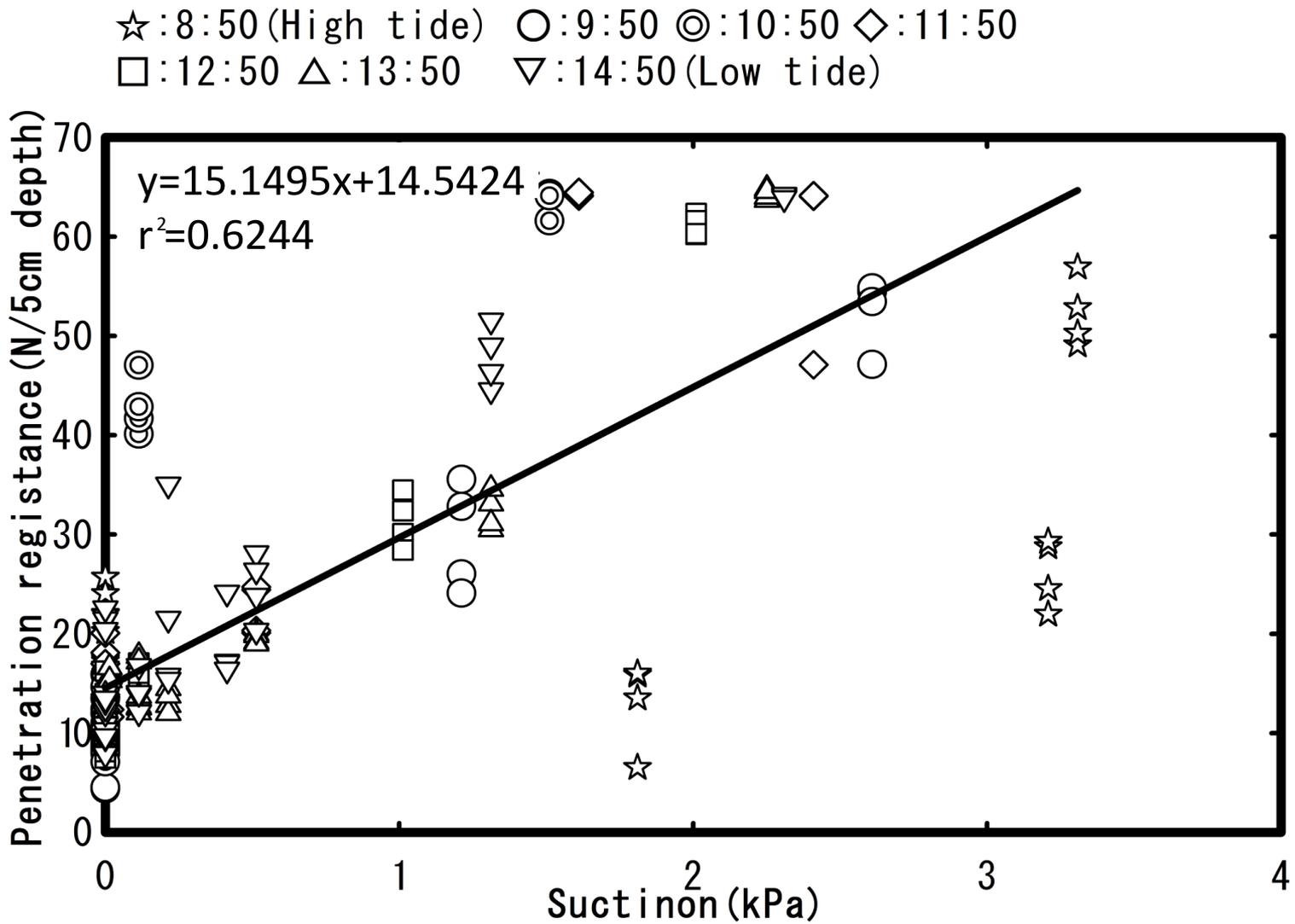


Fig. 21. Relationship between digital force gauge (DFG) measurements and suction at the survey location.

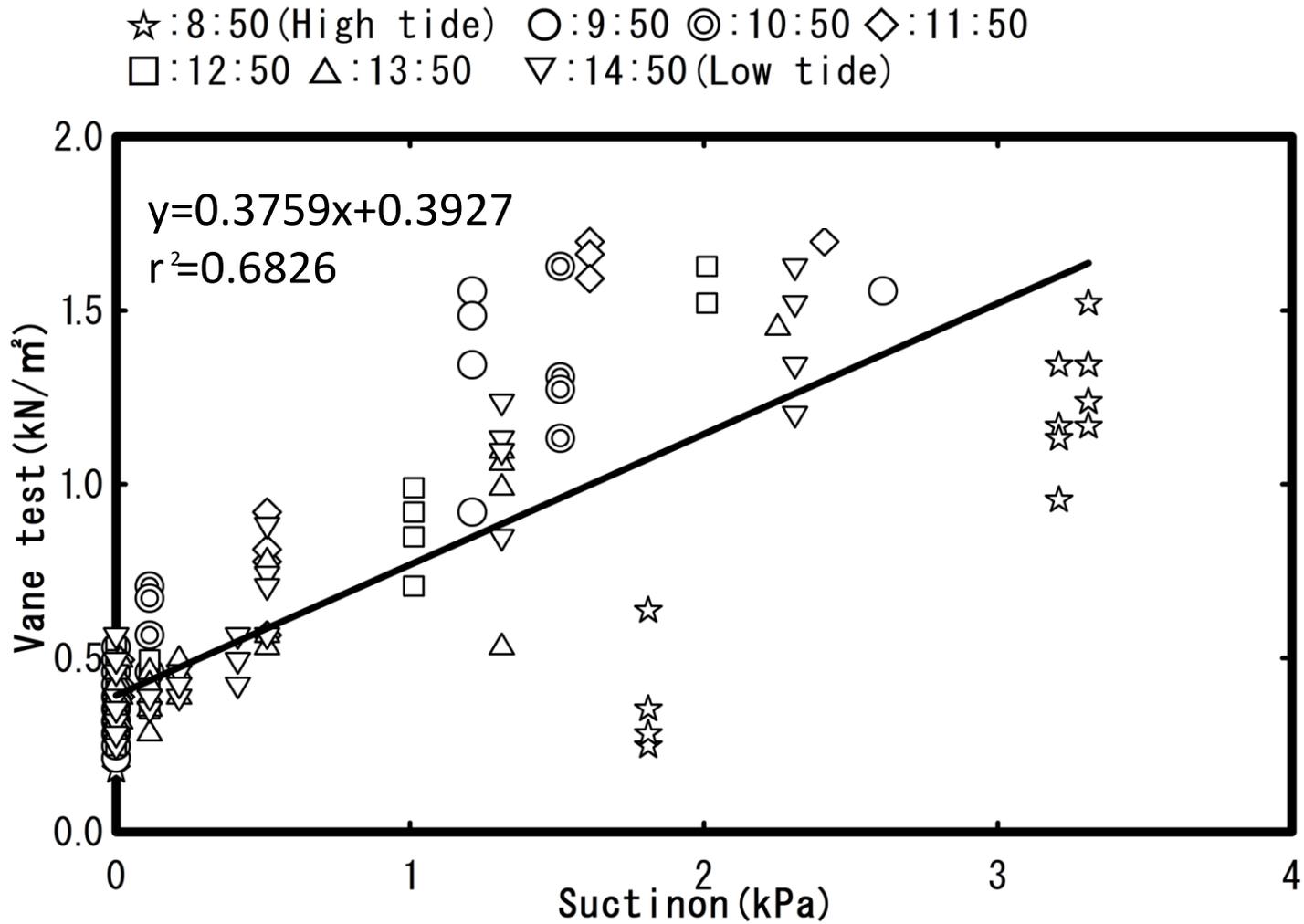


Fig. 22. Relationships between hand vane (HV) measurements and suction at the survey location.

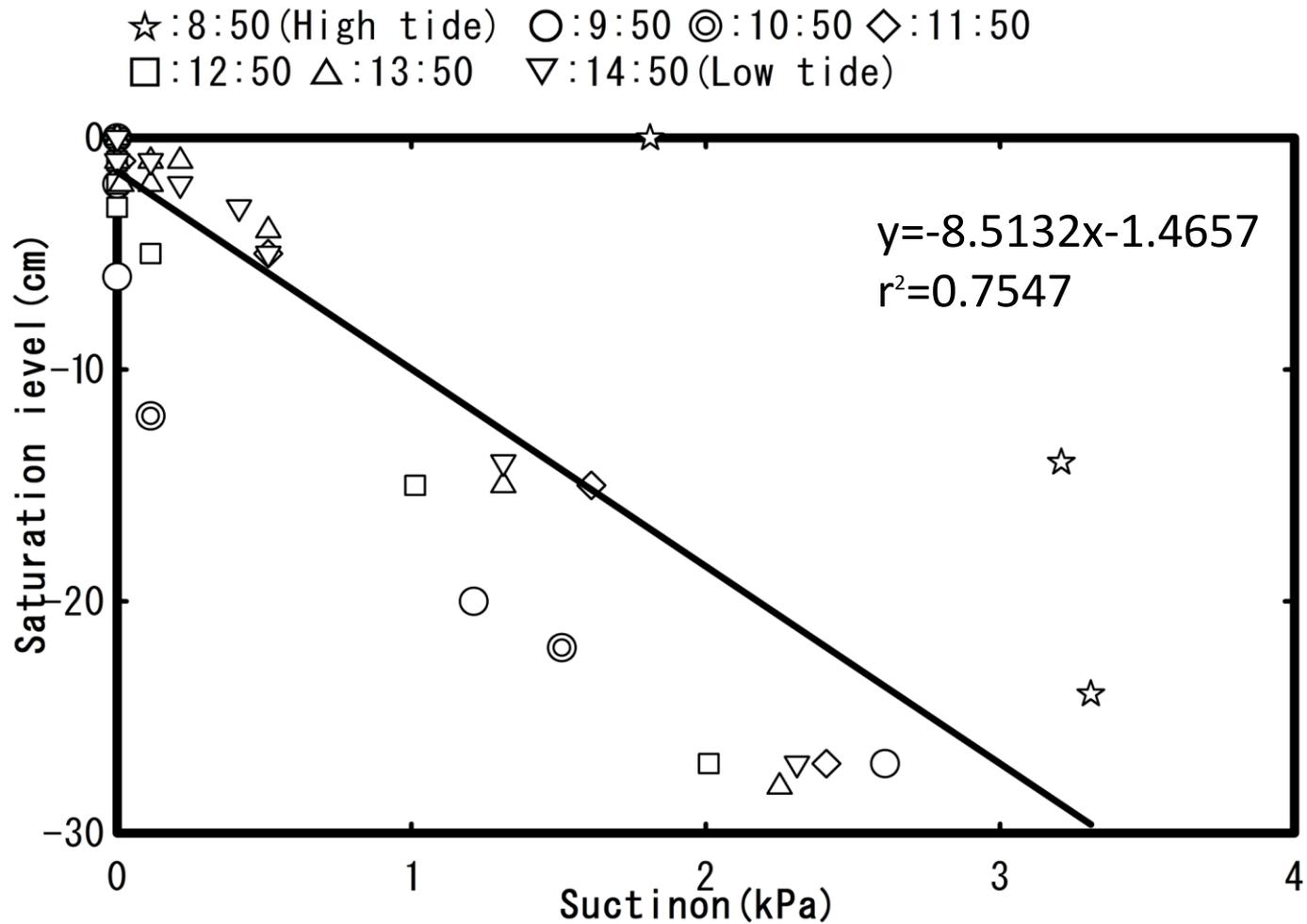


Fig. 23. Relationship between saturation levels and suction at the survey location.

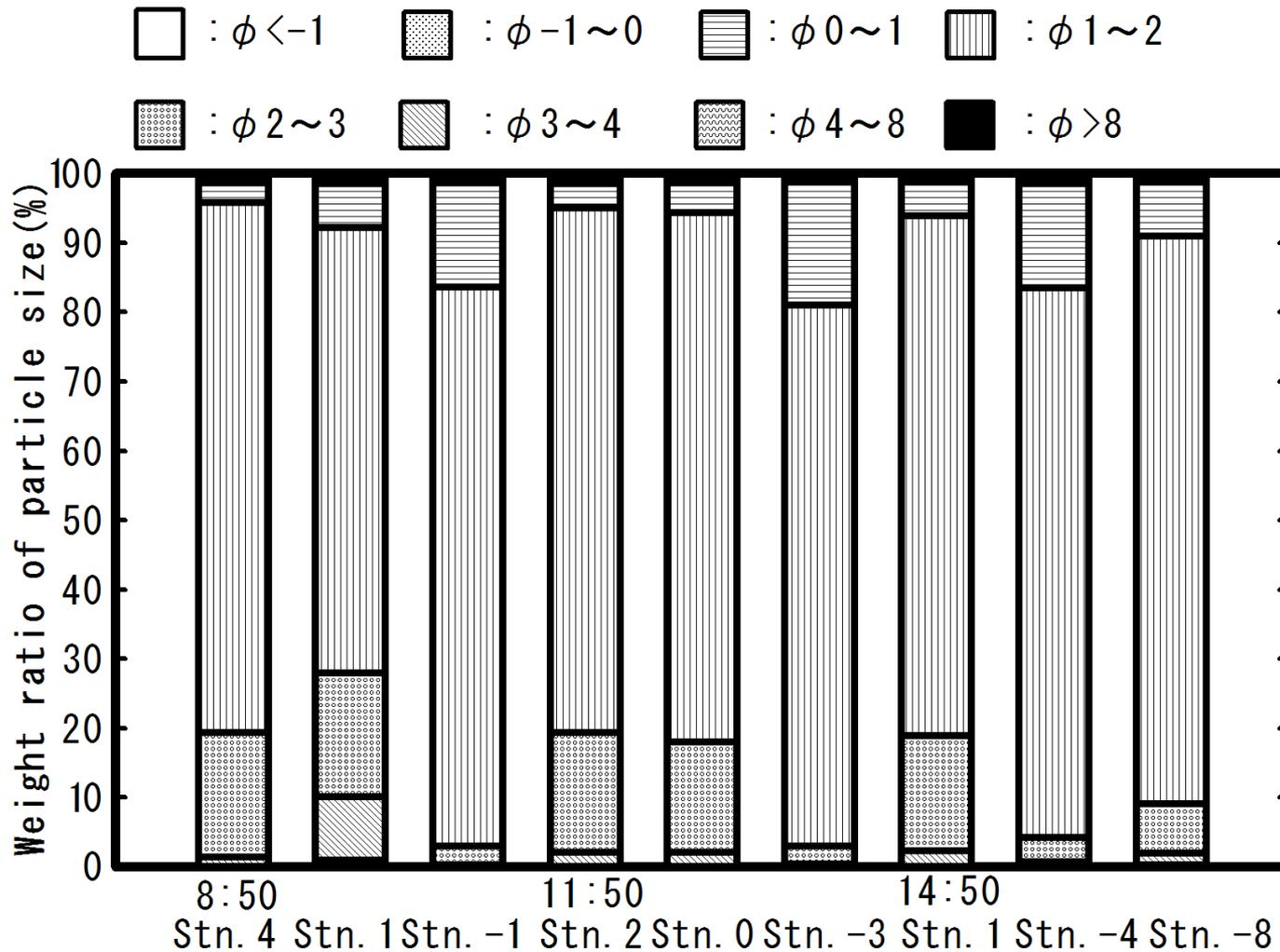


Fig. 24. Sand particle size distributions at each station, for each time.

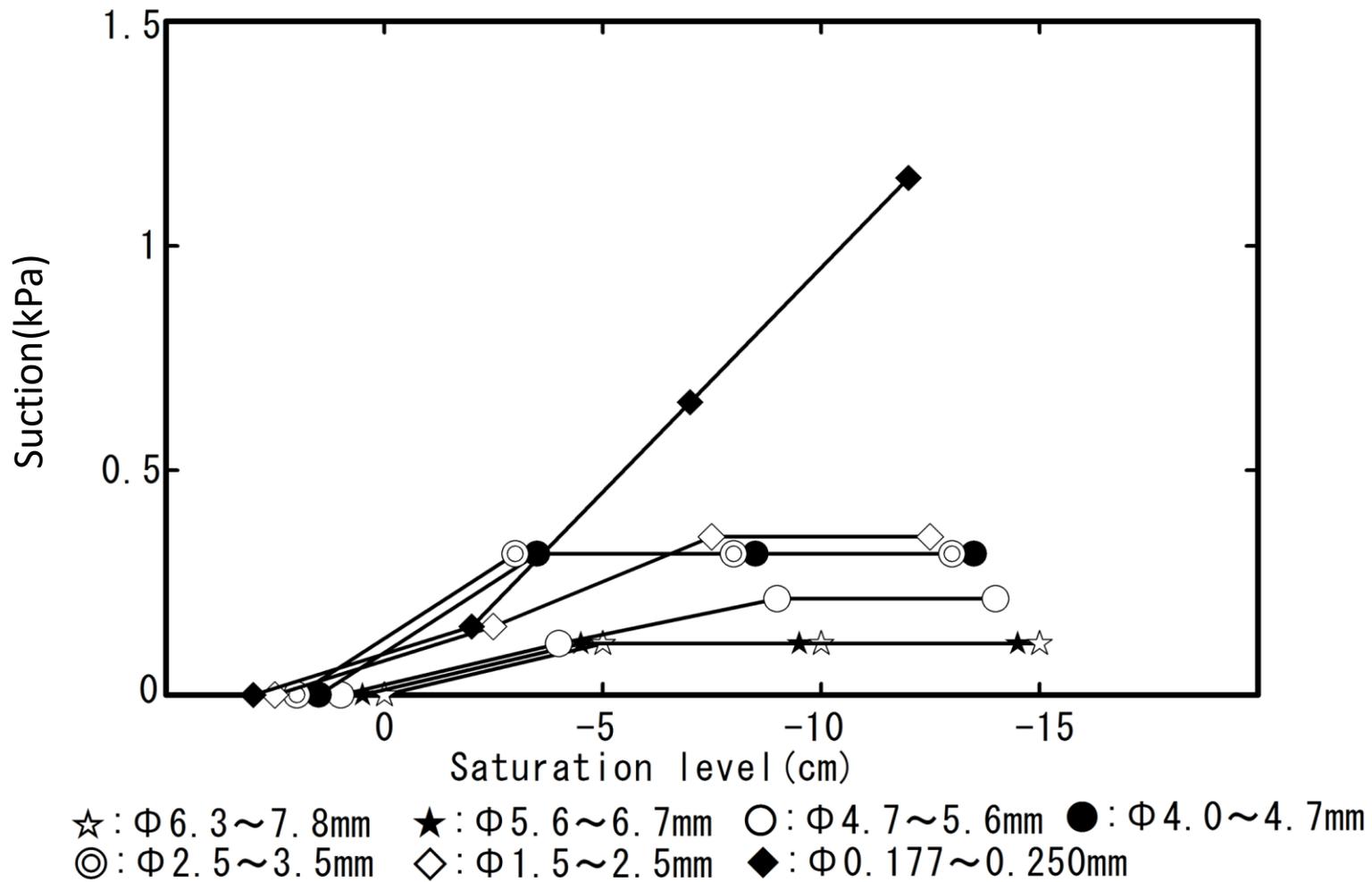


Fig. 25. Suction measurement of gravel in each saturation level.

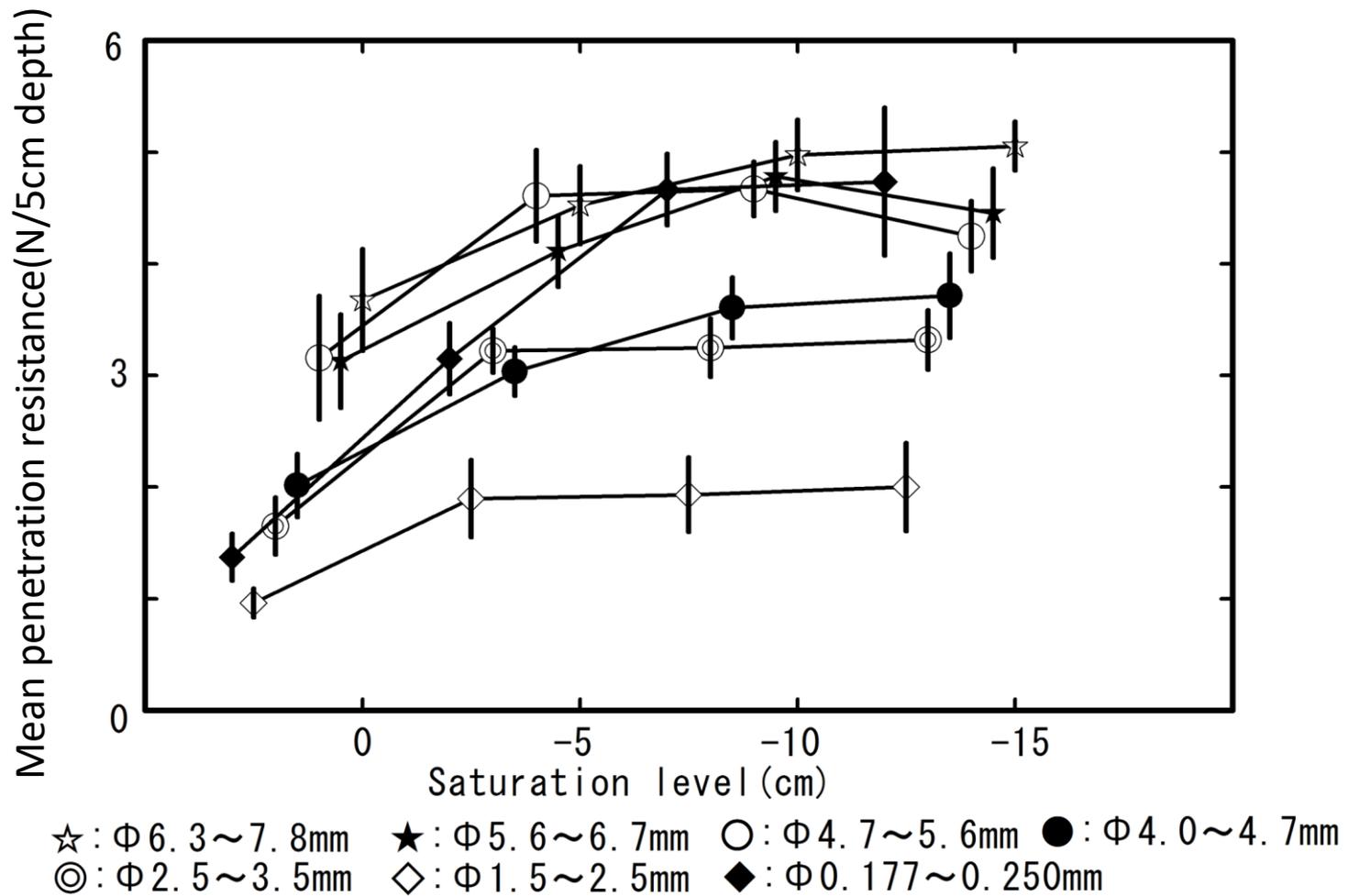


Fig. 26 The digital force gauge (DFG) measurement of gravel in each saturation level. Bar shows the standard deviation.

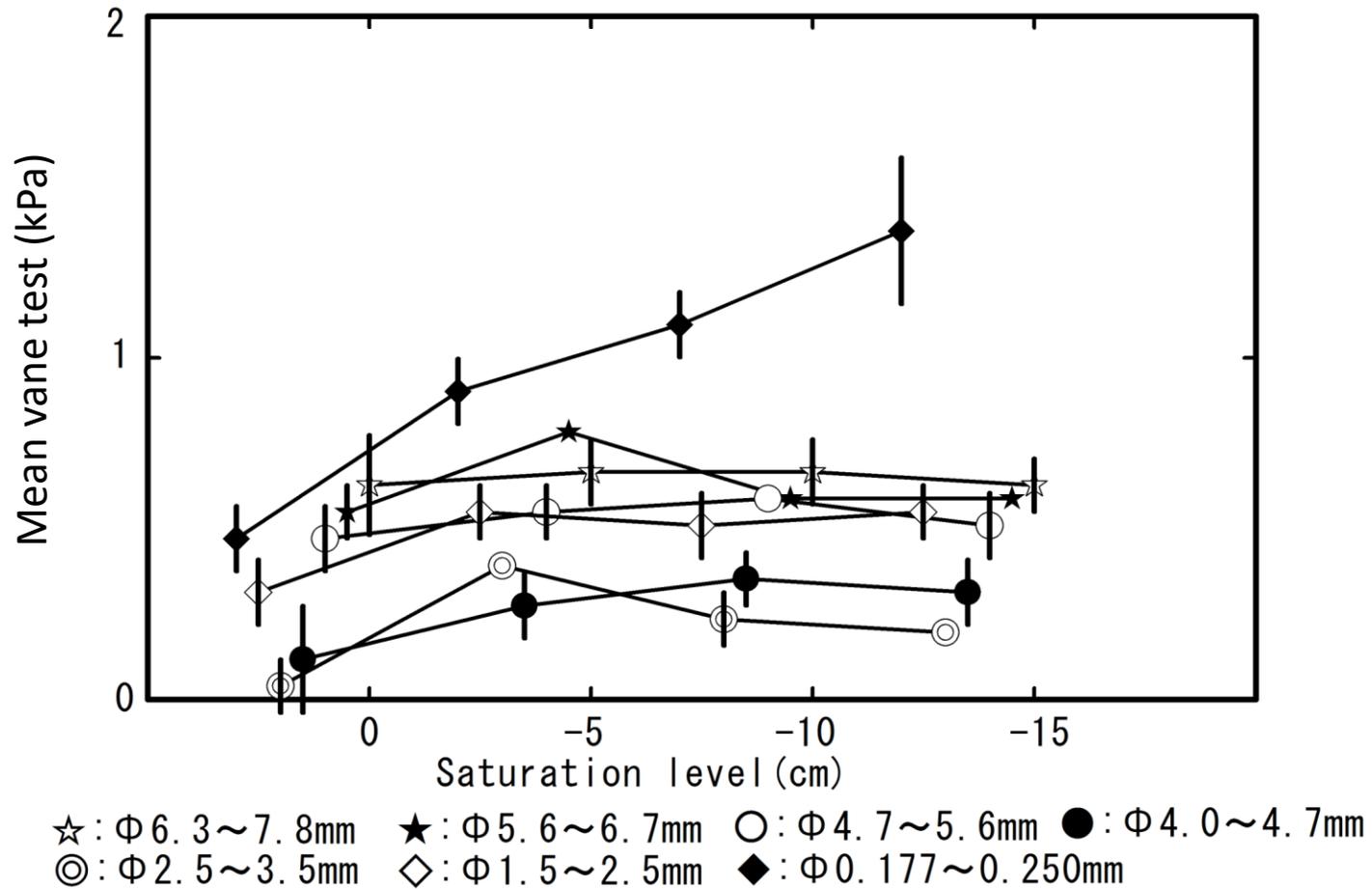


Fig. 27. The pocket vane tester (VT) measurement of gravel in each saturation level. Bar shows the standard deviation.

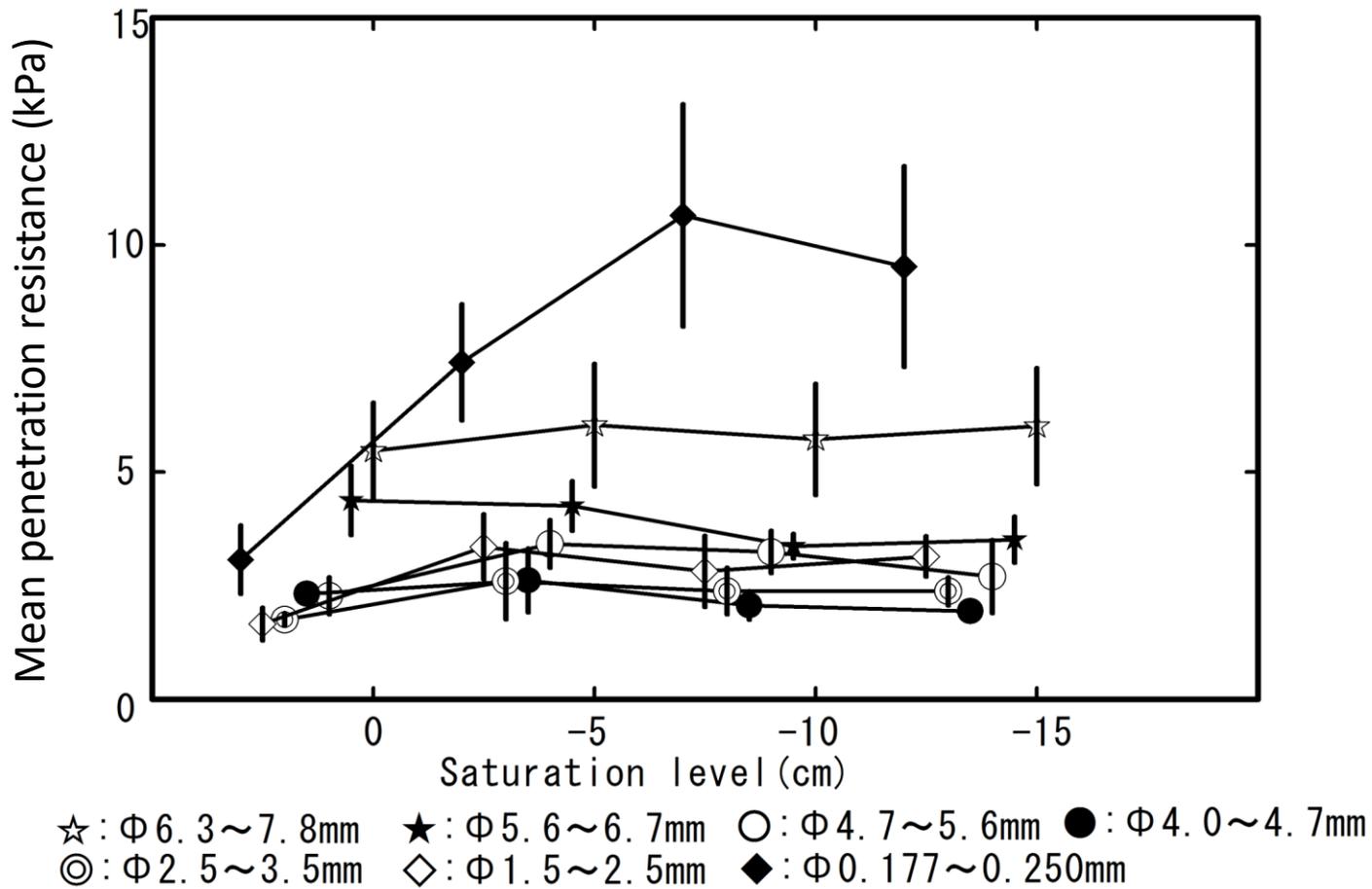


Fig. 28. The penetration resistance (PE) measurement of gravel in each saturation level. Bar shows the standard deviation.

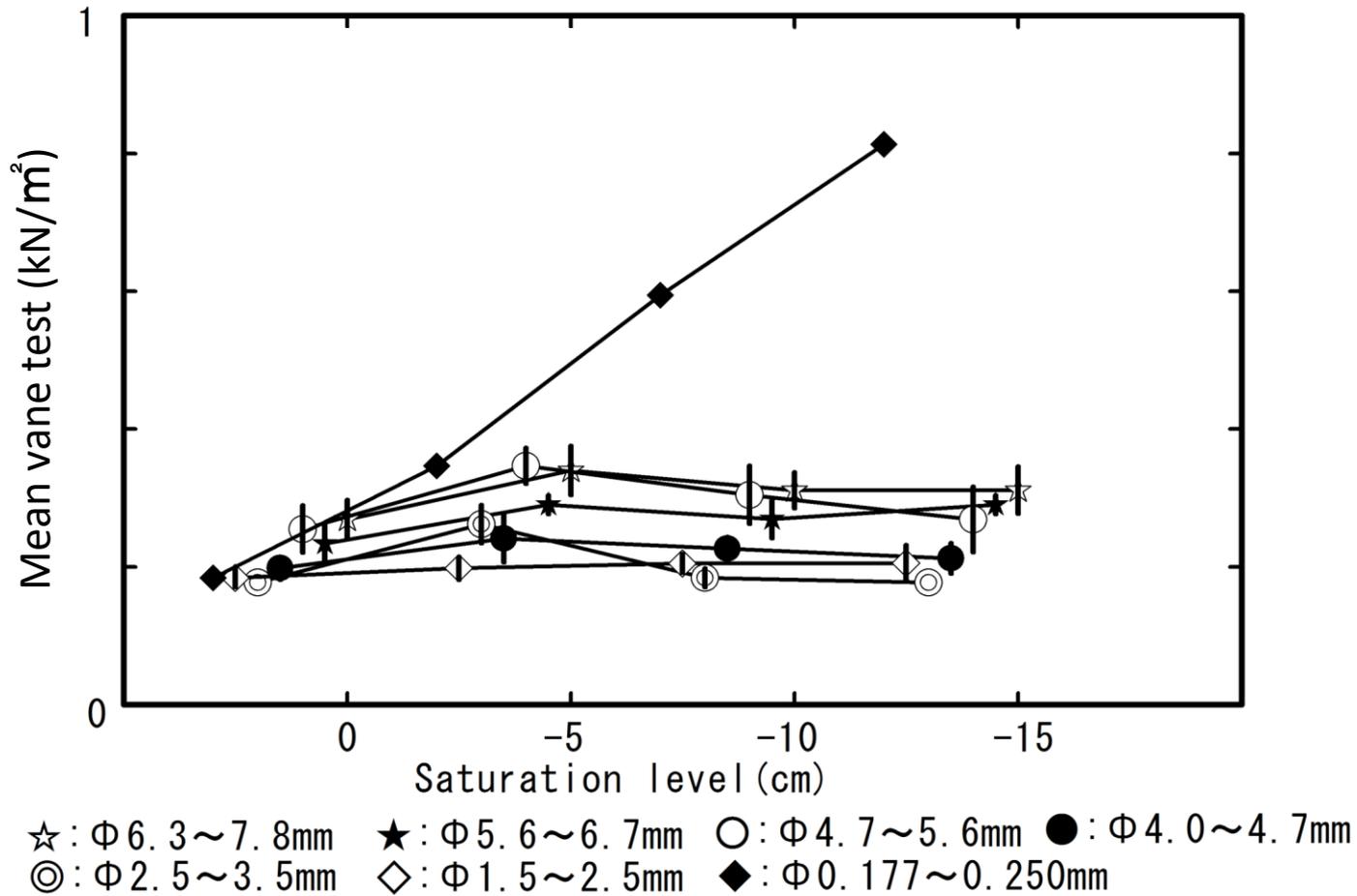


Fig. 29. The hand vane (HV) measurement of gravel in each saturation level. Bar shows the standard deviation.

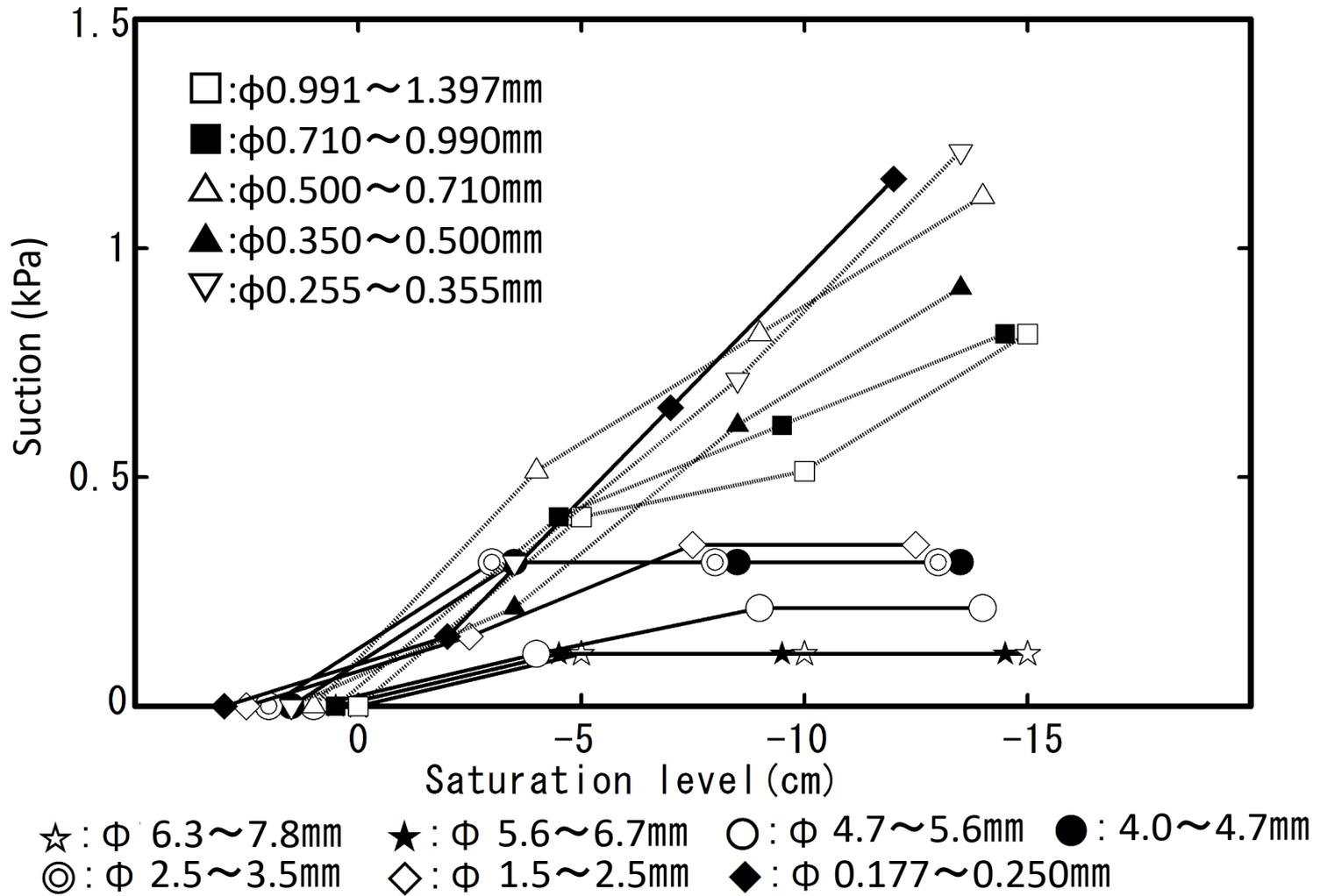


Fig. 30 . Suction measurement of sand and gravel in each saturation level.

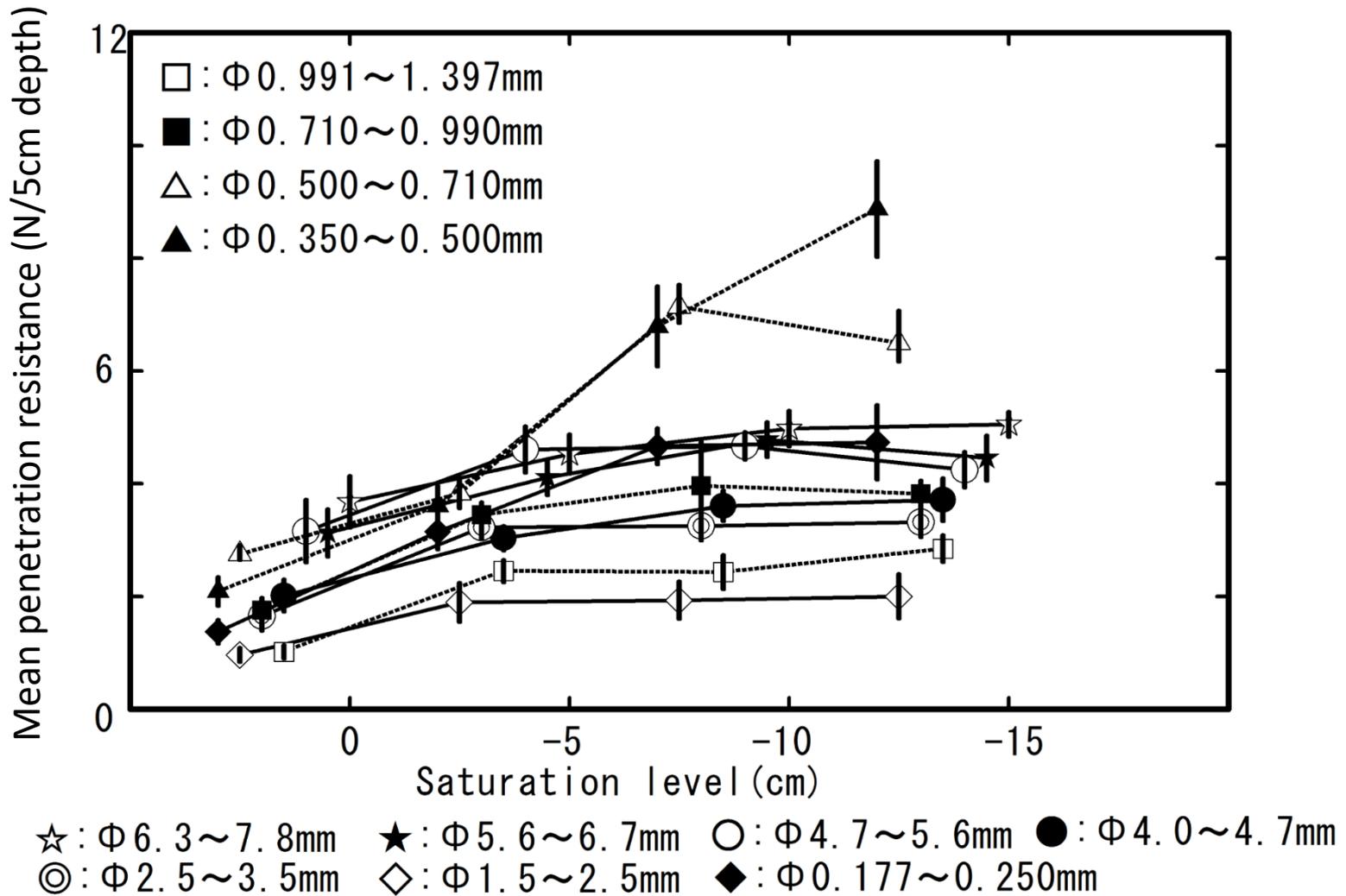


Fig. 31. The digital force gauge (DFG) measurement of sand and gravel in each saturation level. Bar shows the standard deviation.

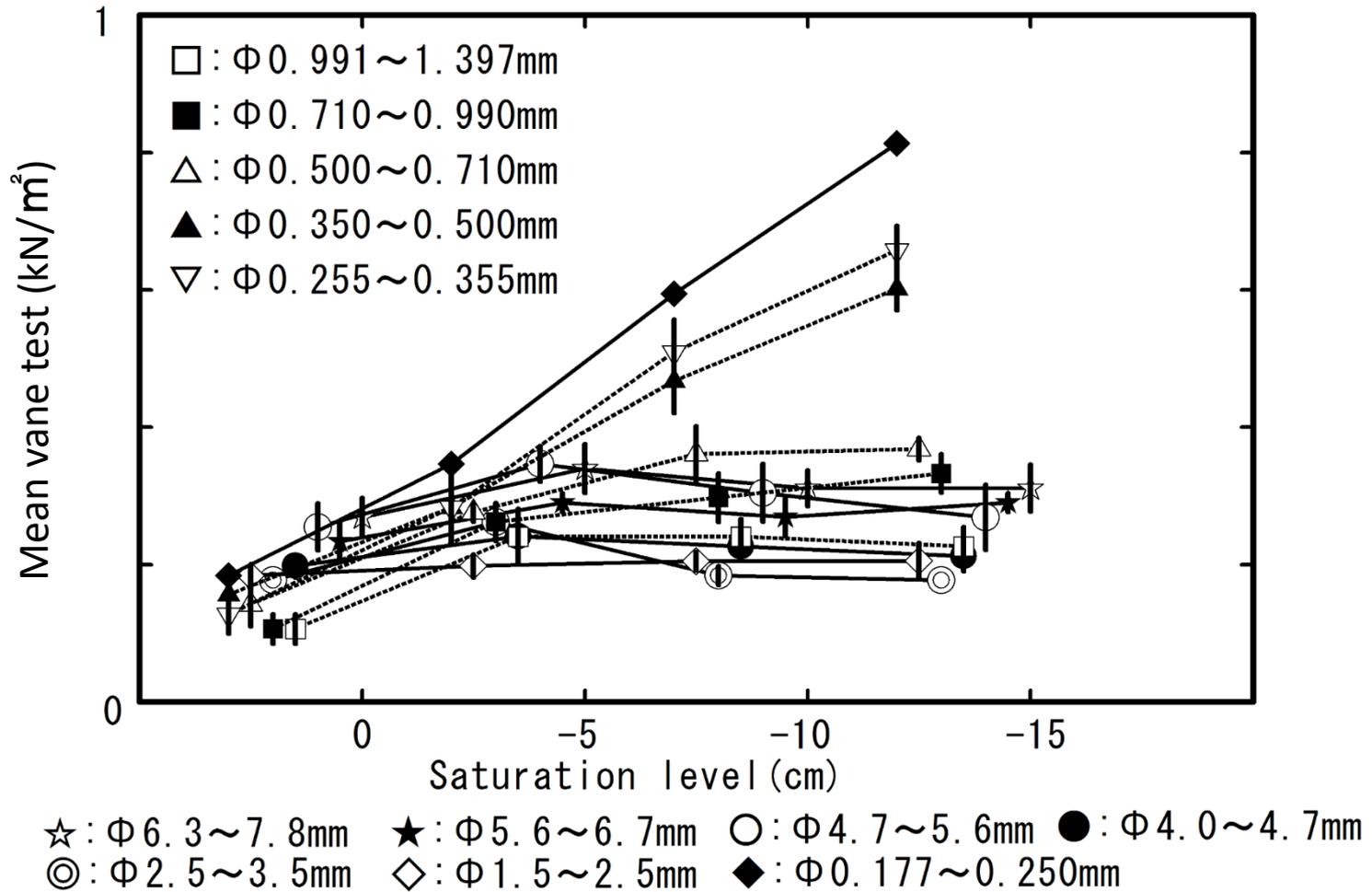


Fig. 32. The hand vane (HV) measurement of sand and gravel in each saturation level. Bar shows the standard deviation.

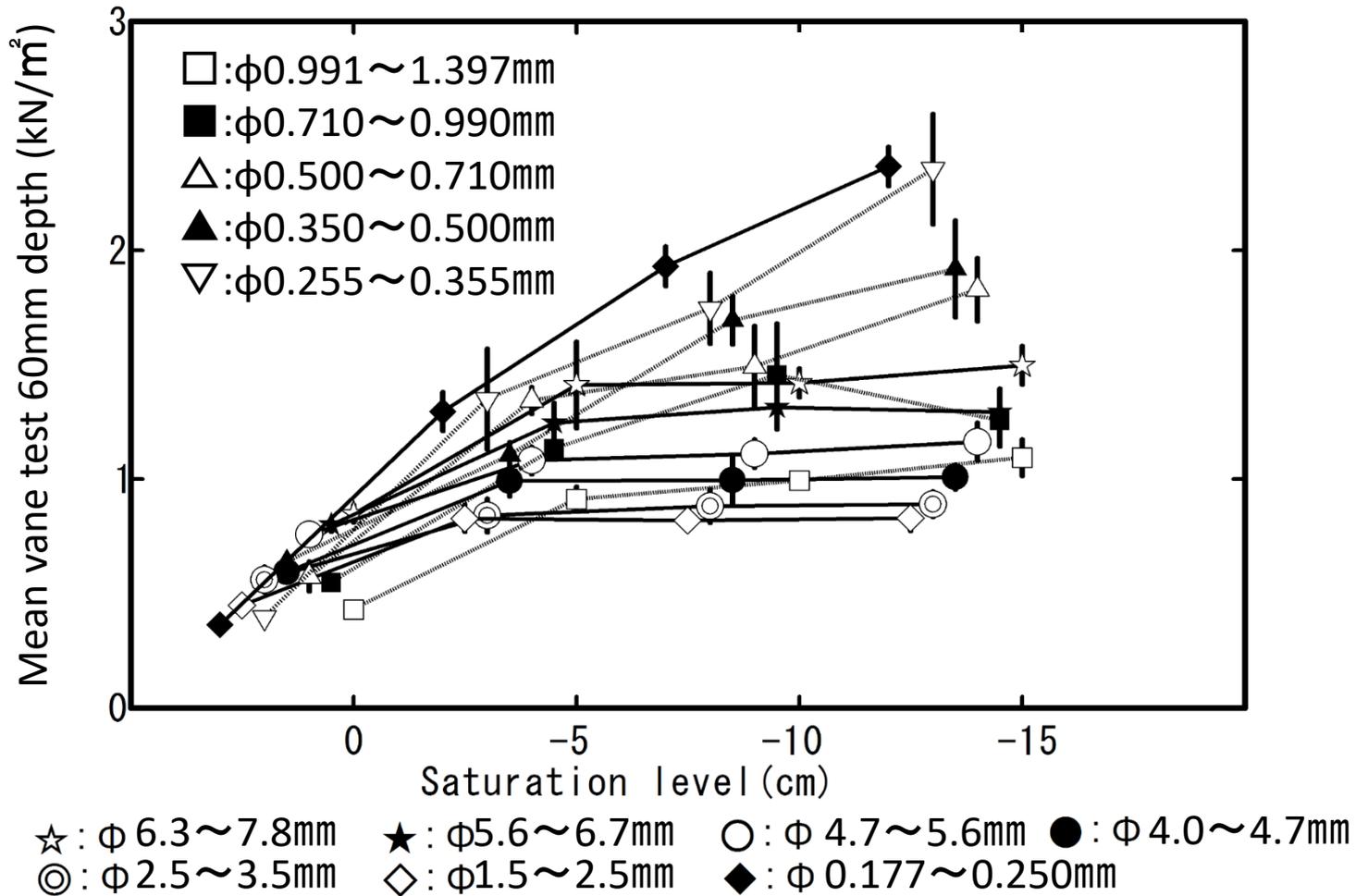


Fig. 33. The hand vane (HV60mm) measurement of sand and gravel in each saturation level. Bar shows standard deviation.

Table 1. Size composition (weight ratio %) of bottom sediment collected from four sites in Niigata Prefecture.

Site	Φ scale									D10(mm)
	~ -1	$-1 \sim 0$	$0 \sim 1$	$1 \sim 2$	$2 \sim 3$	$3 \sim 4$	$4 \sim 8$	$8 \sim$		
Sawata	0.1	5.5	72.6	11.1	9.9	0.5	0.2	0.1	0.2412	
Sawane	0.0	0.1	1.3	2.1	66.0	29.3	0.9	0.3	0.0813	
Nagaishi	0.0	0.0	0.1	9.8	89.0	0.8	0.2	0.1	0.1375	
Yotsugoya	0.0	0.1	6.6	42.3	48.5	1.4	0.9	0.2	0.1443	

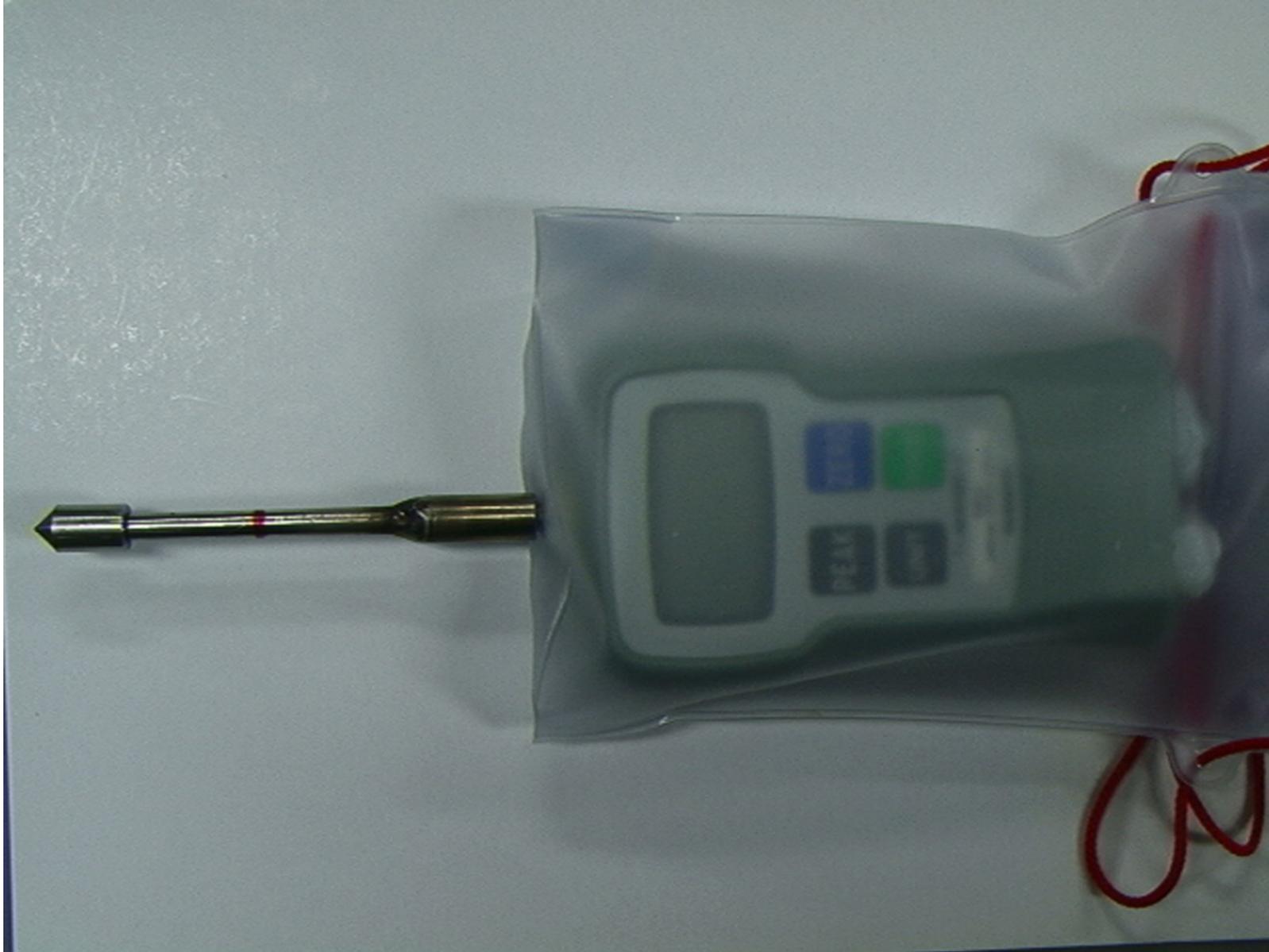
Table 2. Water content and ignition loss of the sand of each sampling times and stations.

	High tide			Midium tide			Low tide		
	High level	Midium level	Low level	High level	Midium level	Low level	High level	Midium level	Low level
Water content (%)	32.5	35.0	35.0	30.3	33.3	32.5	19.1	31.9	35.2
Ignition loss (%)	1.9	2.3	1.6	2.2	2.1	1.6	1.9	1.6	1.9

Table 3. Width of zone and density of *Eohaustorioides japonicus* (Measured / Our estimated).

		Time						
		8:50(High tide)	9:50	10:50	11:50	12:50	13:50	14:50(Low tide)
Width of zone(m)	Measured value	2	3	3	4	6	8	8
	Estimate value	2	2	2	*2.84	7.39	7.39	7.39
Density/m(Inds.)	Measured value	15	1.5	4.92	2.38	1.58	1.16	0.93
	Estimate value	15	15	15	*9.53	4.06	4.06	4.06

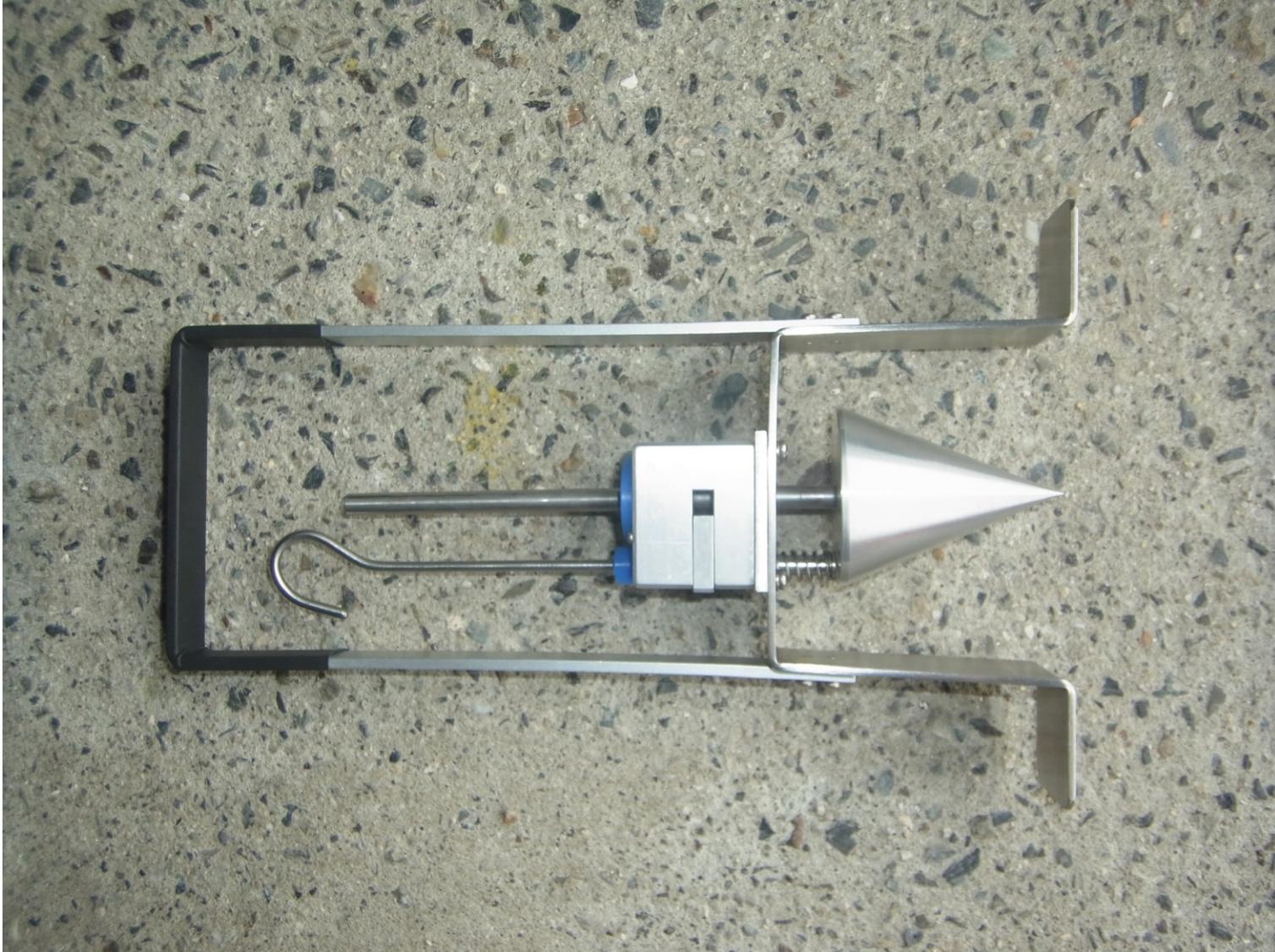
*It was estimated at 6.3° and 1.7° ratio of 1:1



Appendix 1. Digital Force Gauge with waterproofing.



Appendix 2. Pocket Vane Tester.



Appendix 3. Penetrometer for Soft Soil.



Appendix 4. Device for measuring penetration resistance with corn and spring.



Appendix 5. Torque measurement tool for bolting with vane.



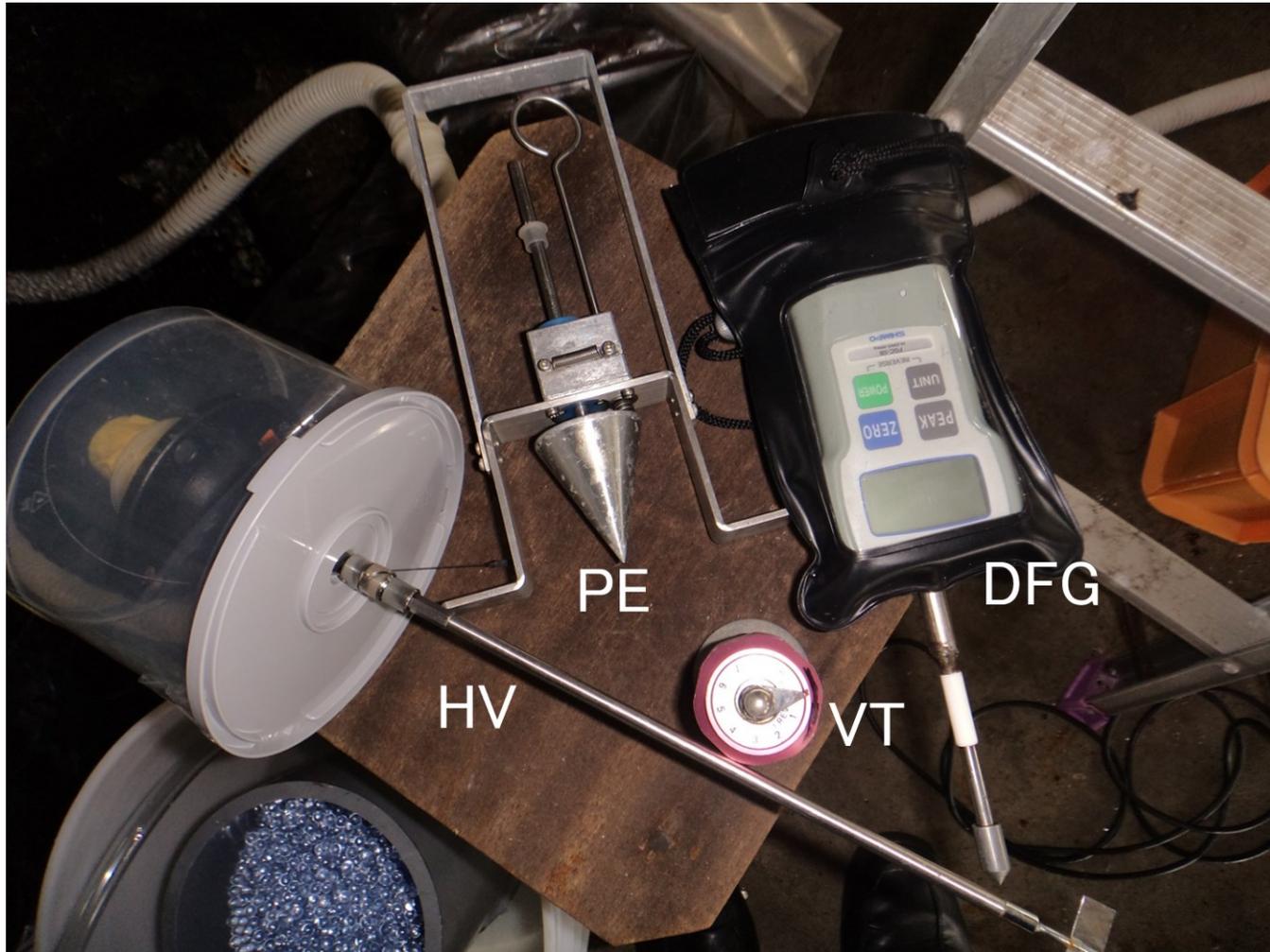
Appendix 6. The ceramic sensor for suction measurement.



Appendix 7. FLOWATCH, device for measurement of current speed (upper).
Sand trap for drift with 63 μ m mesh (lower).



Appendix 8. Experimental column with glass beads and suction meter.



Appendix 9. DFG, VT, PE and HV, Device for measurement of hardness.



Appendix 10. Devices for measurement of deep vane shearing.