

洋上風力発電事業における海底地盤調査の最新技術

平 出 垂・岡 村 健・村 上文 敏

洋上風力発電事業の着床式風車を対象とした海底地盤調査の新技术（シングルパス・サーベイ，三次元音波探査，海底微動アレイ探査，海底逆PS検層，大孔径対応型サスペンションPS検層器）を開発した。海底微動アレイ探査は複数の特許を取得したほか，大水深にも対応できる機器を開発中であり，実証実験段階に入っている。大孔径対応型サスペンションPS検層器は，大孔径のCPT調査においても精度良くS波速度が測定できるよう開発した。これらは，コスト縮減および作業日数の短縮をはかるための新技术であり，いずれも今後の洋上風力発電事業に役立つものである。

キーワード：洋上風力発電事業，海底地盤調査，海底微動アレイ探査，サスペンションPS検層

1. はじめに

洋上風力発電事業では，洋上に設置する風車の基礎設計や発電施設のレイアウトデザインを検討するため，事業予定区域における海底地盤調査を行う必要がある。着床式風車の対象となる海域は，水深10～50m程度の一般海域で，この海域の特徴として，年間を通して厳しい海象条件にあり，海上作業が可能な期間に限られる。一方で風車は大型化し，風車に作用する外力として，波・風に加えて地震時の荷重を考慮する必要があり，風車設計には支持層のみならず，工学的基盤面の確認が必要である。海底地盤調査は，海底地形及び地層分布，工学的基盤面の深度などを調査する。調査は公募に応募するための基本設計に必要な概略調査と，発電事業者として選定されたのち，詳細設計を行うための詳細調査の2つに区分できる。

現在，経済産業省では洋上風力発電事業の入札制度見直しについて検討を行っており，事業実現性評価において迅速性が評価の対象として追加される可能性が高い。発電事業開始までの期間を短縮するには，基本設計段階から事業予定区域の地質データをより多く取得し，ウィンドファーム認証（NK審査）を受けておくことが望ましい。

主な海底地盤調査の内容を以下に示す。

(1) 面的調査

- ・海底地形調査（測深）
- ・海底面状況調査（サイドスキャンソナー（SSS））

- ・音波探査

(2) 地点での調査

- ・磁気探査
- ・ボーリング調査
- ・コーン貫入（CPT）調査
- ・物理検層（PS検層等）
- ・繰り返し载荷試験
- ・室内試験（物理試験，力学試験）
- ・海底微動アレイ探査

本稿では，このうち比較的新しい調査手法等について示す。



写真—1 自社製ボーリング用鋼製櫓（15基保有）

2. シングルパス・サーベイによる測定

着床式の事業エリアは北海道から東北の日本海側にかけてが多く、気象・海象条件からこれらの海域で海底地盤調査ができる期間は概ね5月上旬から9月下旬までである。調査期間が約5ヶ月と限られており各海域で海底地盤調査が一齐に開始されるため、各種調査を短期間で実施することが求められる。このため、筆者らは、一度の航走で面的調査に必要な物理情報（マルチビーム音響測深（MBES）、表層音波探査（SBP）、海底面状況調査（SSS）、磁気探査（MAG）など）を全て同時に取得する高効率な測定方法（シングルパス・

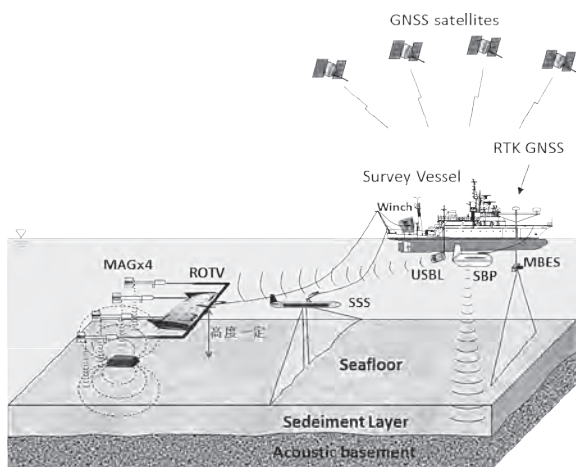


図-1 シングルパス・サーベイの概念¹⁾



EdgeTech4205 (図-1 中の SSS)
300,600,900kHz のうち 2 周波同時測定
EdgeTech 社 HP より引用



Geometrics G882 全磁力計(図-1 中の MAG)
Geometrics 社 HP より引用



EIVA ROTV
1.7m 間隔で 4 つの全磁力計を同時曳航可能な ROTV
EIVA 社 HP より引用

写真-2 シングルパス・サーベイの使用機器

サーベイと呼ぶ) の実用を試みている (図-1)。本測定では、ROTV (Remotely Operated Towed Vehicle) によって 4 本の磁気探査器を海底から一定高度に保って曳航する測定システムを含んでおり、データ品質も向上する。また、水深 300 m 程度まで適用できるため、大水深における浮体式の調査においても活用が期待される (写真-2)。

日本ではこれまで潜水による磁気探査が主流であったが、洋上風力発電が先行する欧州では人による潜水作業による事故を防ぐため、曳航式の磁気探査が主流になっている。洋上風力発電事業の共同事業体に欧州の企業が参画することが増えており、労働安全衛生・環境 (HSE) も欧州と同等のものが求められ始めている。本測定で用いるセシウム磁力計などの各測定機器は、欧州仕様に適合しており、海域調査の安全性向上にも資するものである。

3. 三次元音波探査

村上らが開発した小型高分解能三次元音波探査システムによる地盤構造三次元化可視化の技術を紹介する。本システムは、船上の観測装置と船尾から曳航される装置に分けられる (図-2)。曳航装置は、音源と 4 本の受信ケーブルからなる。

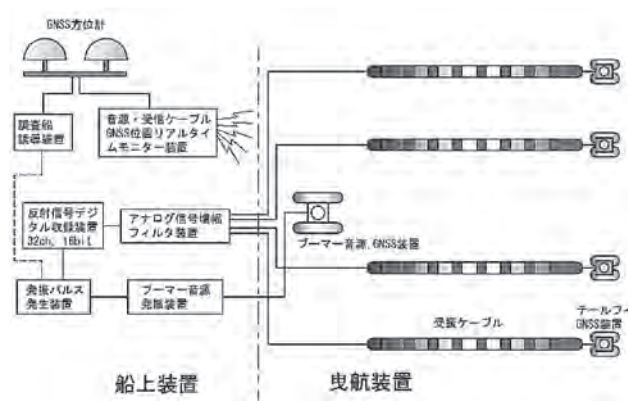


図-2 観測装置の概要

各受振ケーブルの端部には、GNSS 受信機が設置されたブイが取り付けられ、音源が取り付けられたブイ上にも GNSS 受信機が設置されている。音源ブイと受信ケーブルテールブイの GNSS 受信データは、オフライン収録と同時に簡易無線送信機によって船上受信機に送られ、データを取録とともに音源と受信ケーブル位置をリアルタイムでモニターできる。音源の種類としては、ブーマー、スパーカー、エアガン・GIガン、ウォーターガン等があり、目的とする探査深度、

地層分解能等に応じて音源を選択する。船上観測装置は、GNSS 方位計、曳航装置位置リアルタイムモニター・データロギング装置、受振ケーブルで得られた反射記録のアナログ処理・デジタルデータ収録装置、音源の発振装置等からなる。

図-3 は、受振ケーブルと音源等の標準的な配置を示す。チャンネル間隔 2.5 m の 4 本の受信ケーブルは片舷 10 m 長のブームに 8 m 間隔で取り付けられ、ブーマー音源と各チャンネルの midpoint が音波の反射点となる。反射点位置は、船上と受信ケーブルテールブイ上の GNSS 測位位置を基に計算される各チャンネル位置と音源ブイ GNSS の測位位置から計算される。

反射データの処理フローを図-4 に示す。調査海域はビンと呼ばれる矩形（本システムでは通常 2.5 m × 2.5 m）に細分され、反射点位置座標を使用したビンニング処理の後、速度解析と NMO 処理により一つのビンにおいて 1 本の反射トレースが得られ、すべてのビンの反射トレースから 3D ボリュームデータが作成される。反射データ解釈ソフトによって、海底下地盤構造の三次元可視画像を表示できる（図-5）。

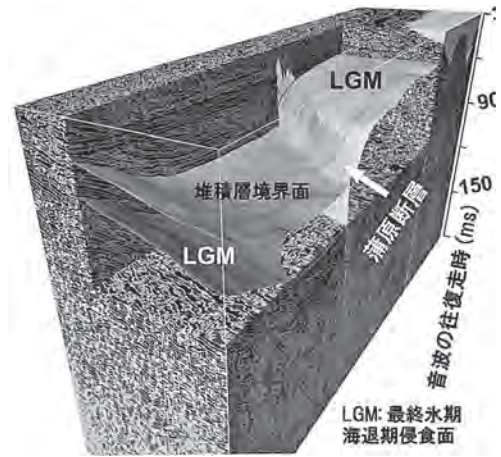


図-5 3D ボリュームデータの可視画像²⁾

4. 海底微動アレイ探査

ボーリング調査では、サスペンション PS 検層によって地盤の S 波速度と工学的基盤を把握するが、費用や調査期間の問題から概略調査段階において多数のボーリング調査を実施することは困難である。また、工学的基盤の深度が 100 m を超えるとボーリングによる調査も難しくなる。

そこで、陸上で使用されている微動アレイ探査を海底に適用し海底地盤の S 波速度を求めめるのが、海底微動アレイ探査である（図-6）。

海底微動アレイ探査は、正三角形の頂点及びその重心に配置した微動計を海底に設置し、様々な方位からの微動を計測して、1 次元の S 波速度構造を推定する

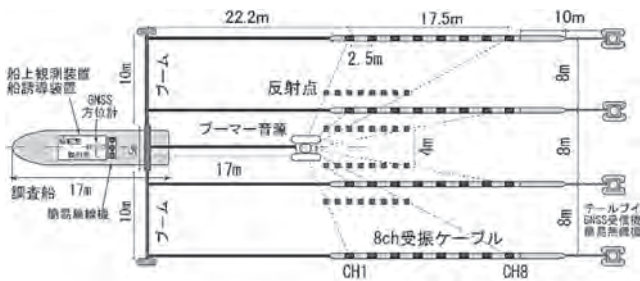


図-3 受振ケーブルと音源の標準的配置²⁾

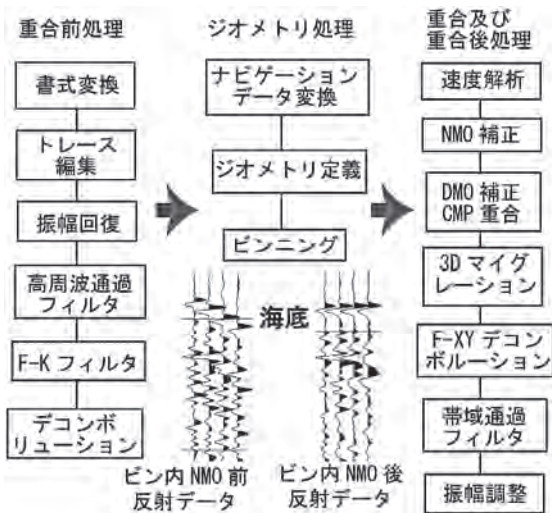


図-4 反射データの処理フロー

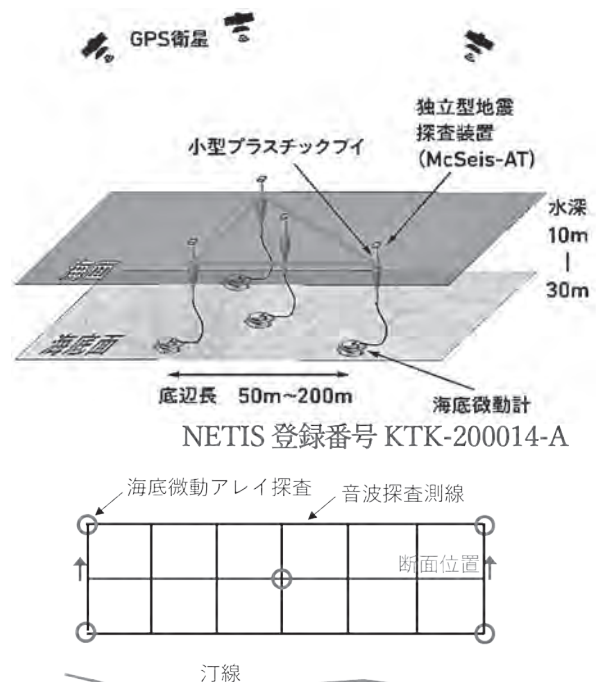
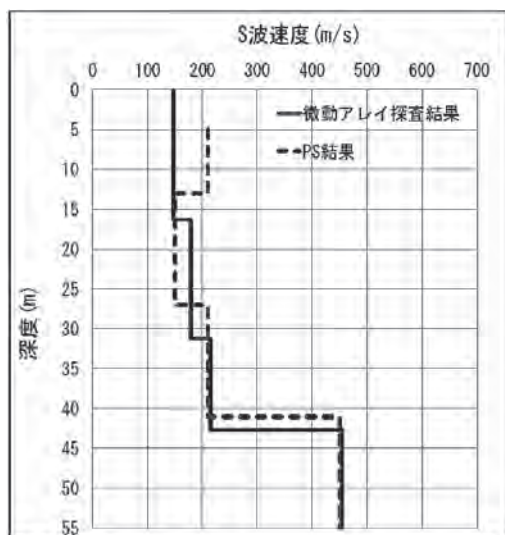


図-6 海底微動アレイ探査の調査計画イメージ³⁾

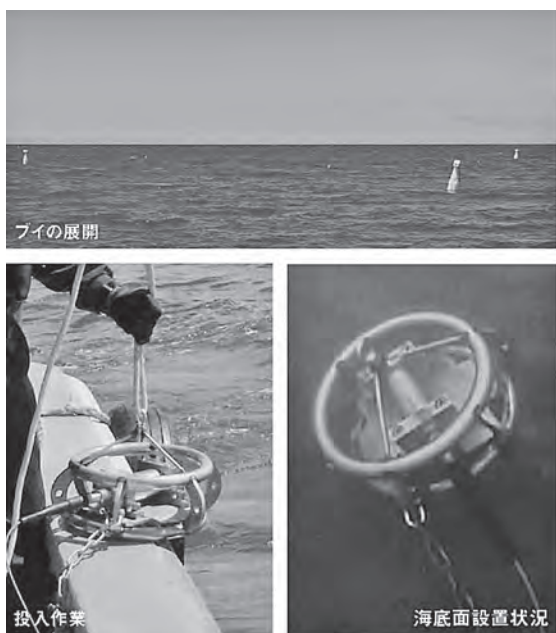


図一七 PS 検層と海底微動アレイ探査結果の対比例³⁾

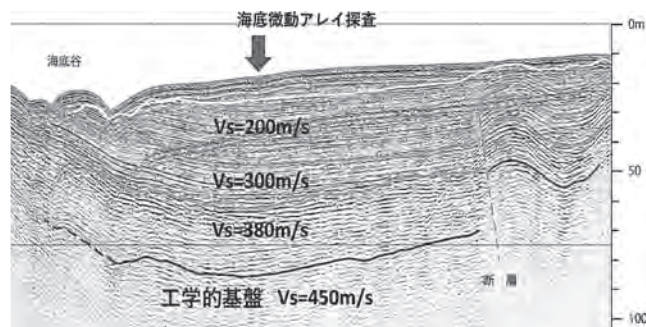
ものである。一般的には複数の底辺長のアレイ観測(たとえば 50 m, 100 m, 200 m)を行い、海底下 200 m 程度までの S 波速度構造を求める。また、地層境界深度の誤差は地盤深さの ±1 割程度で、解析結果による V_s の速度値の誤差も ±1 割程度である。

海底微動アレイ探査の測定は、小型船から海底微動計を投入し自由落下させて行うが、海底微動計の位置を正しく把握することが重要であるため、弊社では海面で発振した音波でその位置を把握する手法を開発した(特許番号 6766122)。

海底微動アレイ探査の利用例を図一八に示す。同図に示す通り、音波探査の結果と合わせて検討することにより、概略調査段階で開発エリアの地層構成及び、工学的基盤面の分布を把握することが可能となる。



写真一三 海底微動アレイ探査の作業状況³⁾

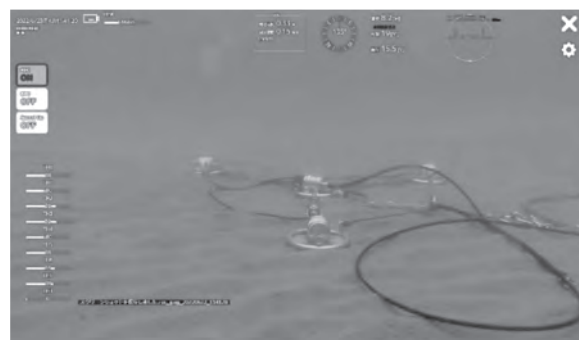


図一八 海底微動アレイ探査と音波探査の複合解析イメージ³⁾

現在の海底微動アレイ探査は、洋上における正三角形配置の取り回し上の問題から S 波速度を測定できる調査深度が G.L.-20~200 m 程度である。また、計測機器の耐水圧性能は、浮体式洋上風力の大水深(水深 50 m 以上)には対応できていない。

このため、浅層 (G.L.0~20 m) の V_s を精度良く把握することに特化した極小海底微動アレイ探査を開発し、特許(特許番号 7082643)を取得した。この技術は、浅層地盤が対象となるジャッキアップ船 (JUV) のレグ貫入支持力調査、ケーブルルート調査などに有効であると考え(写真一四)。

また、耐水圧性能を大幅に向上した大水深対応型の海底微動アレイ探査機器を開発中であり、現在、実証実験段階に入っている。



写真一四 極小海底微動アレイ実施例³⁾

5. 海底逆 PS 検層

洋上風力発電施設に係る地盤調査で実施されるボーリングや CPT の目的の一つは、掘削孔を用いて直接地盤の S 波速度を求めることにある。S 波速度はモノパイル基礎の耐震設計や地震動予測に必要不可欠であり、洋上ではボーリング孔を利用したサスペンション PS 検層(以下、SUS)が実施される。しかしながら良好なデータを取得するため SUS の条件として、掘削孔径が 150 mm 以下で、孔壁面の乱れが少なく、測定時に孔壁が安定していることがあげられる。さら

に、ボーリング孔の保護鋼管のない裸孔区間で計測することが必要となる。

このような状況の中、アップホールタイプのPS検層（海底逆PS検層と呼ぶ）を考案し実用化した。海底逆PS検層は上記のSUSで障害となる条件を考える必要はなく、保護鋼管挿入前の測定が可能であり、さらに調査孔の孔底においてSUS測定器の長さ相当分の余掘りの掘削も不要である。

測定は、S波発生の振動源として、ボーリング調査時の標準貫入試験（SPT）による孔底の打撃振動、あるいはトッププッシュ式CPTで併用されるパーカッションボーリング時の孔底の打撃振動を用いる。孔底を垂直打撃した際に生じるS波は図-9に示すように、水平方向に強い放射パターンを持っており、垂直上方にはほとんど伝わらない。したがって、S波測定用の海底地震計はボーリング孔よりある程度オフセットを取った海底面に設置して、S波が捉えられるようにしている。

図-10はパーカッションボーリングを使用してCPTを実施中に海底逆PS検層を同時に実施した事例である。

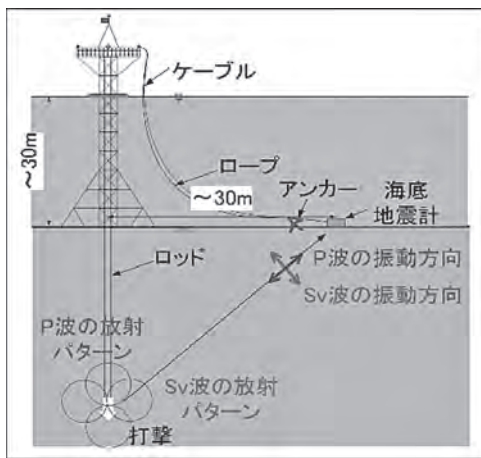


図-9 海底逆PS検層の模式図（ボーリング）³⁾

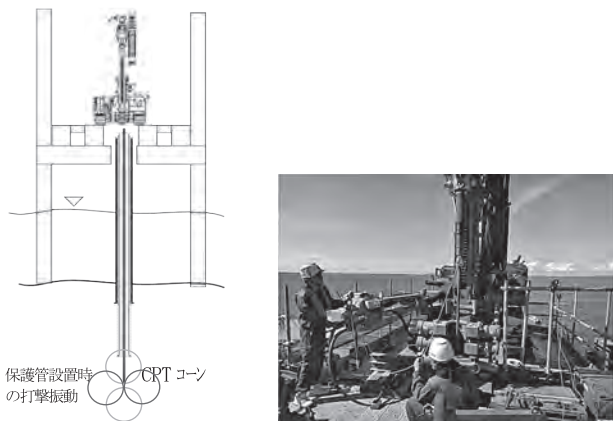


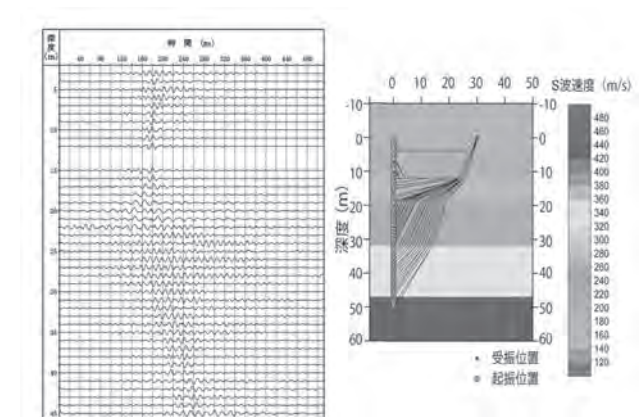
図-10 海底逆PS検層の実施状況例（CPT）³⁾

SPT実施時は、海底地震計での波形及びボーリングロッド上端に取り付けた加速度センサーの波形記録を取録し、その到達時間（走時）により地盤のS波速度を求める。またトッププッシュ式CPTで使用するパーカッション掘削時は、2つの波形記録のコリレーションを取ることで走時を求める。なお走時を導出する際は、ボーリングロッド中を伝わる弾性波速度を求め、その伝搬時間を差し引く必要がある。

解析は、海底地震計をボーリング孔近傍に設置できれば、得られた走時は起振点から鉛直上方に到達する際の走時であり、縦軸に起振深度、横軸に走時をプロットするとその傾斜がそのままS波速度値になる。しかし、海底逆PS検層では海底地震計はオフセットを取って設置するため、図-11に示すように観測されるS波は地盤の速度構造に応じて屈折して伝わる。このため走時の傾斜から直接S波速度を求めることができない。

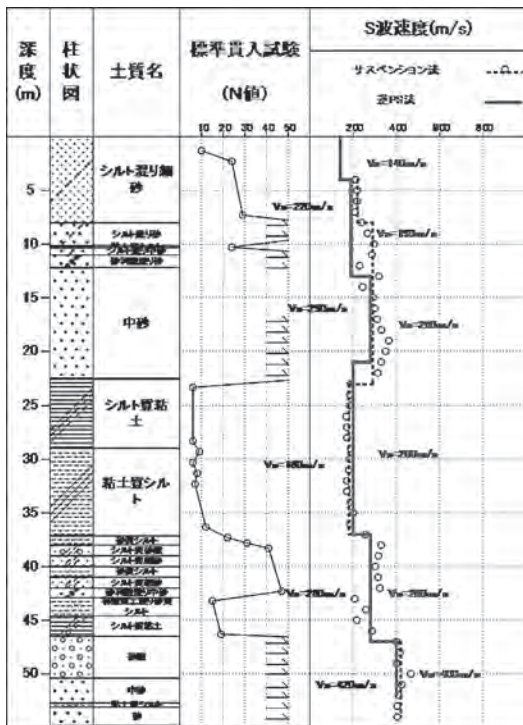
したがって、S波速度の導出に当たっては、例えば図-11 (b) に示すような水平成層構造を仮定し、レイトリングに基づく逆解析により観測走時を説明する速度構造を求めるといような工夫が必要となる。

洋上で測定を行った結果の例を図-12に示す。この地点では比較のため同一孔でSUSも実施している。屈折の影響が大きく現れる浅層部で両者の速度値がやや異なるが、深度20m以深では海底逆PS検層の速度値はほぼSUSと同じ値となっている。



(a) (b)

図-11 観測波形例（左）と波形例（右）⁴⁾



図一12 海底逆PS検層の測定結果例⁵⁾

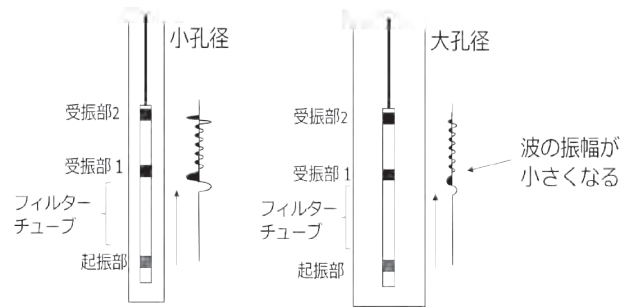
6. 大孔径対応型サスペンションPS検層

風車の耐震設計を行うためには、各地層のS波速度(V_s)と工学的基盤を把握する必要がある。海上ボーリング調査では、孔中に挿入した振源でP波、S波を発生させ、同じく孔中に挿入した受振器により地盤を伝搬した振動を受振することで、孔付近の地盤の弾性波速度(P波速度、S波速度)を把握することができるサスペンションPS検層が用いられる。

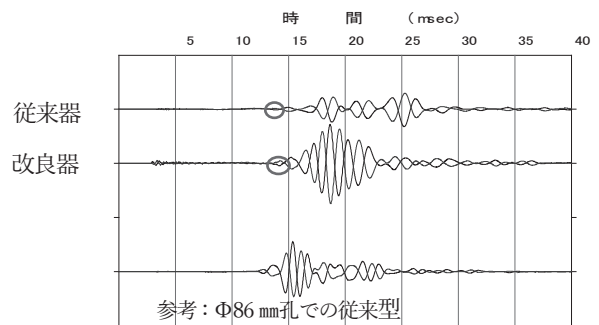
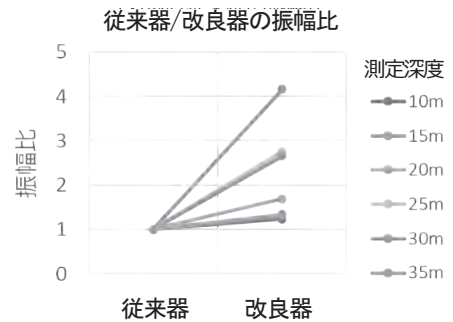
このときボーリング調査における掘削孔径は、通常 $\phi 100\sim 150$ mmである。一方、短期間で多数の風車基礎を調査することになる詳細調査や大水深の浮体式調査では、専用の調査船(ドリルシップ)によるCPT調査が多くなるが、専用調査船における保孔管の外径は通常 $\phi 180\sim 250$ mmである。

現在のサスペンションPS検層の適用限界は $\phi 150$ mm(理論的に $\phi 200$ mm程度以下)であり、これ以上の孔径では径が大きくなるほど正しいS波の波形が読み取りにくくなり測定精度が落ちる。特に工学的基盤となる更新世前期～鮮新世の地層は V_s が 400 m/s前後となるケースが多く、精度良く V_s を測定する必要がある。なお、言うまでもなく、孔内に保孔管として塩ビパイプを挿入しての測定では正しい結果は得られない。

そこで、弊社では従来のサスペンションPS検層器を改良し、新たにCPT調査向けに起振エネルギーを



図一13 大孔径におけるPS検層の模式図



※深度25m ○印の振幅値を比較

図一14 $\phi 270$ mm孔でのサスペンションPS検層器の性能比較³⁾

大幅に増加させた大孔径対応型サスペンションPS検層器を開発し、性能確認を行った。試験結果を図一14に示す。孔径が $\phi 270$ mm相当の試験孔で、従来型振源と改良型振源での比較測定を行い複数の深度で振幅の増加を確認した。

7. おわりに

ここ数年の間で、洋上風力発電設備のための海底地盤調査が本格的に実施されるようになったが、一般海域においては地盤調査の実績がほとんどなく、陸上とは異なる調査機材や調査手順が必要となることも多い。

洋上風車の実績は欧州で積み重ねられてきたことから、海底地盤調査においても欧州の実績を参照することが多い。しかしながら我が国の沿岸を構成する地盤は欧州北海の地盤と異なる点が多く、我が国は世界有数の地震国であることから、我が国に特有な設計施工

条件に適用する新たな調査方法や調査機材を開発していく必要があると考える。

JCMIA

《参考文献》

- 1) オーシャンエンジニアリング(株)社内資料
- 2) 総合地質調査(株)社内資料
- 3) 応用地質(株)社内資料
- 4) 久住呂貴之, 松原由和, 山本正人, 平出亜, : 洋上ボーリング調査における新しいPS検層の実施例, 第56回地盤工学研究発表会, 2021
- 5) 川崎悠介, 信岡大, 松原由和, 久住呂貴之, 平出亜, 永島三雄: 洋上地盤調査への物理探査の適用～海底逆PS検層～, 物理探査学会第140回学術講演会論文集, 2019

【筆者紹介】

平出 亜 (ひらいで あけし)
応用地質(株)
エネルギー事業部
技術長



岡村 健 (おかむら けん)
オーシャンエンジニアリング(株)
事業本部
本部長



村上 文敏 (むらかみ ふみとし)
総合地質調査(株)
顧問

