【040】

海底微動アレイ探査の調査事例

応用地質株式会社　○井上雄介，今井幹浩，江波戸昌徳

1. はじめに

2019年4月から施行された「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」により、一般海域での洋上風力発電の開発環境が整った [1)]。これにより、洋上風力発電施設に係る地盤調査市場は大幅に拡大している。地盤の支持層の分布あるいは工学的基盤深度の把握にはＳ波速度の測定が必須であるが、洋上においてはボーリング孔を利用したサスペンション PS 検層が一般的に行われている。しかしながら、洋上風力発電（着床式）は年平均風速7 m/s 以上、水深10～40 m 程度の海域を対象としており、厳しい環境下でのボーリング作業は容易ではない。著者らはこのような厳しい環境下でも短期間でＳ波速度構造を把握することができる海底微動アレイ探査システムを開発した。海底微動アレイ探査のニーズは高く，著者らは昨年までに計8サイト，56地点で探査を実施した。本稿ではこれまでに実施した調査のうち標準的な1サイトを選び、PS 検層結果と対比させた事例について報告する。

なお，当手法については 2021 年 3 月に NETIS 登録を行っている.

2. 調査方法

本調査は海底地盤のＳ波速度構造を把握することを目的として、水深約13m の地点で実施した。海底は砂主体の地盤であり、地盤構造は広範囲で水平成層構造であることが既往の調査で確認されている。また、本調査地点は事前に PS 検層により速度情報が得られている。

アレイ配置は4点正三角形配置とし、アレイ底辺長は 50m、100m、200m の3パターンとした。

測定システムは海底地震計（2Hz）、Geometrics 社製の独立型データ収録器（Atom）、Atom を海上に浮遊させるためのブイ、海底地震計と Atom をつなぐ信号ケーブル等で構成した。

海底地震計の設置は Trimble 社製の RTK-GNSS を用いて船舶を目標座標に誘導し、海底地震計および Atom を搭載したブイを海中に投入した。主な測定機器を図-1 に、海底微動アレイ探査の測定模式図を図-2 に示す。

図-1　主な測定機器（海底地震計(左)，独立型データ収録器 ATOM(中)，RTK-GNSS アンテナ(右)）

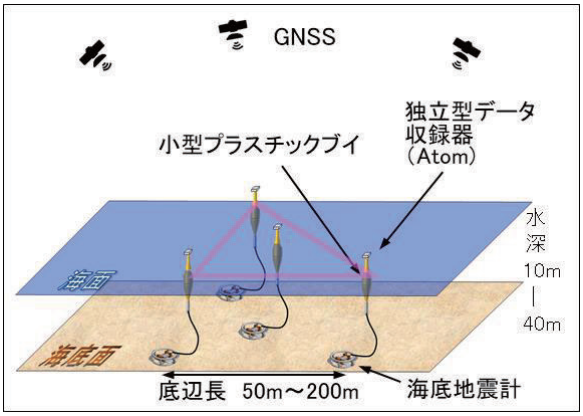

図-2　海底微動アレイ探査測定模式図

設置後の海底地震計の設置位置を特定するために，微動観測を 1～2 時間行った後、ブイの外周を船舶で航行しながら、船舶に取り付けた音波発振装置（OWS 振源 [2)]）を複数ヵ所で起振した（図-3）。

これらの一連の作業は人員 4～5 名、1 地点あたり 1～2 日で実施できるが、有義波高 1.0m を超える海象条件では作業が難しく、有義波高 0.5m 程度の穏やかな海象条件が測定実施の目安になる。

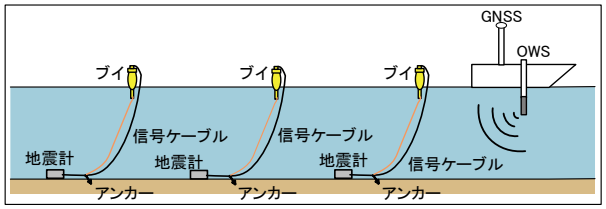

図-3　海底地震計の設置位置特定　概念図

3. 調査結果

海底微動アレイ探査により得られた観測波形のフーリエスペクトルを図-4に示す。各地震計のスペクトル分布は整合的であり、良好な波形記録が得られたと考えられた。各地点の観測波形から空間自己相関関数法（SPAC 法）[3)] を用いて作成した周波数領域の位相速度イメージを図-5に示す。この図より0.7～2.9Hz 付近で位相速度が滑らかに繋がる観測位相速度曲線が得られた。これにより、海底面においては波浪や海流による振動ノイズの影響が少ない良好な結果が得られたことを確認できた。

Ｓ波構造の算出方法は、遺伝的アルゴリズム [4)] による逆解析手法を用いた。観測で得られた位相速度曲線と得られた Ｓ 波速度構造から求めた理論位相速度曲線を図-6 に、またＳ波速度構造を図-7に示す。位相速度曲線は観測と理論で整合する結果となった。

得られたＳ波速度構造は最小アレイ底辺長の関係から深度30m以浅のＳ波速度構造は既往のPS検層結果とやや乖離するものの、深度30m以深のＳ波速度構造及び工学的基盤深度(Ｓ波速度≧400m/sに相当する深度)は既往のボーリング孔内での PS 検層結果と整合的する結果が得られた。

4. まとめ・今後の課題

海底微動アレイ探査を実施したサイトのうち、PS検層結果と対比させた事例を示した。海底微動アレイ探査で求めたＳ波速度構造は PS 検層結果と整合的であることから逆解析によって得られたＳ波速度構造の妥当性を示すことができた。

一方で長いケーブルを扱う作業の安全上、最小アレイ底辺長は50m が限界であるために極浅部の位相速度を捉えきれていないという課題が残った。今後は地盤条件、水深、波浪などさまざまな条件が異なる海域における適用事例を蓄積していくとともに、極浅部層のＳ波速度構造を把握するためのシステムを新たに開発していく予定である。

《引用・参考文献》

1) 牛山泉 (2020) ： 急進展する洋上風力発電、基礎工、48, 12, 1.

2) 小倉公雄・荘司泰敬・大橋武一郎(1999)： 多層円盤を用いた孔中振源の開発, 物理探査, 52, 2, 141-152.

3) Aki., K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors: Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35, 415-456.

4) 山中浩明・石田寛(1995):遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 468. 9-17.

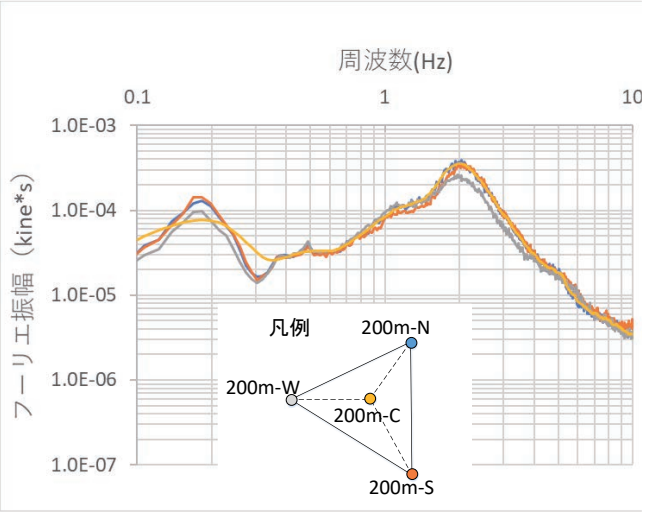

図-4 200m アレイにおけるフーリエスペクトル

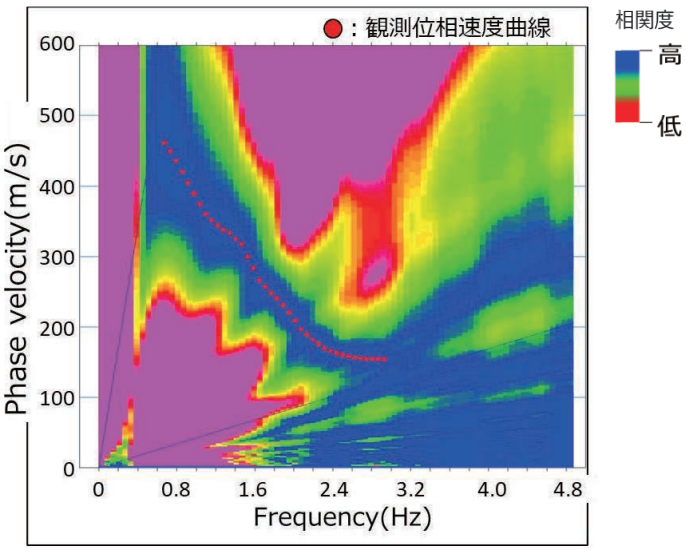

図-5 周波数領域の位相速度イメージ
(赤丸:観測位相速度曲線)

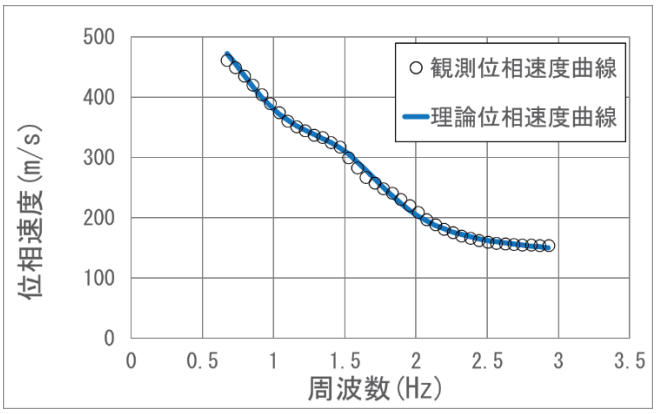

図-6 観測位相速度曲線および理論位相速度曲線

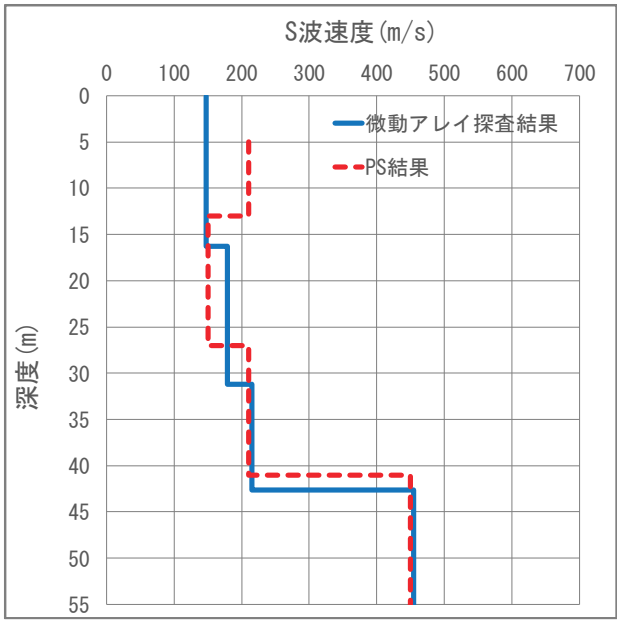

図-7 Ｓ波速度構造