

2025 年の万博会場予定地における設計用地震動の策定に当たっては、告示スペクトルに基づく地表面波や最新の技術を用いて求めるサイト波としてできるだけ精度よい地震動を策定するため、当該敷地におけるアレイ微動による地下構造探査を、万博協会殿の協力を得て日総試として独自に実施した。この報告書概要はその結果の結論だけを取りまとめたものである。

1. アレイ微動探査の意義と探査の概要

我が国の地盤構造は場所によって千差万別であり、遠くても類似していることもあれば近くても異なっていることもある。その地盤の影響を大きく受ける設計用入力地震動の波形を精度良く策定するためには、当該サイトにおいてできるだけ深い地点までの速度構造調査を行うことが望ましい。調査においては地震動に特に大きな影響を与えるS波速度分布を知る必要がある。通常のボーリング調査では、孔を掘ってその孔内での情報を得ているが、地震動評価の観点からは地盤剛性と密度をより広域にわたって知る必要がある。

今回用いた方法は微動アレイ探査という方法で、地表面の常時微動（地表面上に常時生じている微小な振動）を一定の範囲に分布させた7～10点のセンサーで同時に観測し、それを解析してS波速度を推定する方法である。その結果、広い範囲の平均的な速度構造を比較的安価に知ることができる。これは非破壊的な調査方法で地盤掘削を伴わないのも利点である。調査は現地の微動環境を把握するための事前調査と、その結果を踏まえて行う本調査に分かれる。アレイ微動探査ではアレイの中心地点付近の平均的な速度構造が求められるので、予備調査の中心と本調査の中心をずらすことにより敷地内の地層が平坦に堆積しているかどうか判定できる。

探査手法の概要は以下の通りである。まず上下成分を計測できる微動観測装置を3重の同心円上に配置した三角形の指定地点に設置する（これをアレイ観測という）。対象周波数に応じて円の半径を変える（低振動数ほど大きく、高振動数ほど小さく）。計測は対象振動数に応じて継続時間を変えて観測する（低振動数ほど長く、高振動数ほど短く）。このアレイ微動探査で得たアレイ微動からSPAC法という解析手法により表面波の見かけ伝播速度（位相速度）を得る。その周波数依存性（分散性という）を最も良く説明する構造として表層から概ねアレイの辺長の最大サイズに相当する深度までのS波速度構造を求める。最後に得られた結果を近隣での推定値と比較してその妥当性を検証する。

2. 計測作業手順の概要

予備計測では本計測と同様に、3重同心円上に正三角形に配置した同時アレイ観測を行

う。1アレイの配置例を図1に示す。最大半径を r とすると、中間円の半径は $r/2$ に、最小円では $r/4$ になる。なお中心地点にも1点配置する。探査可能深度はアレイ半径 r に比例するので、今回は最大半径 r を変えて3回の計測を実施する。アレイ半径としては最大半径で8m, 32m, 128m（それぞれSS、S、Lアレイと名付ける）の3アレイとした。50m以下のS・SSアレイでは昼間計測とし、Lアレイでは静穏な時間帯の計測が必要なので、夕方に機器を配置し計測状態のまま次の日の朝に回収することとした。この観測には応用計測製の上下動成分用AMOM1を6台と3成分計測用ATOM3を4台用いた。

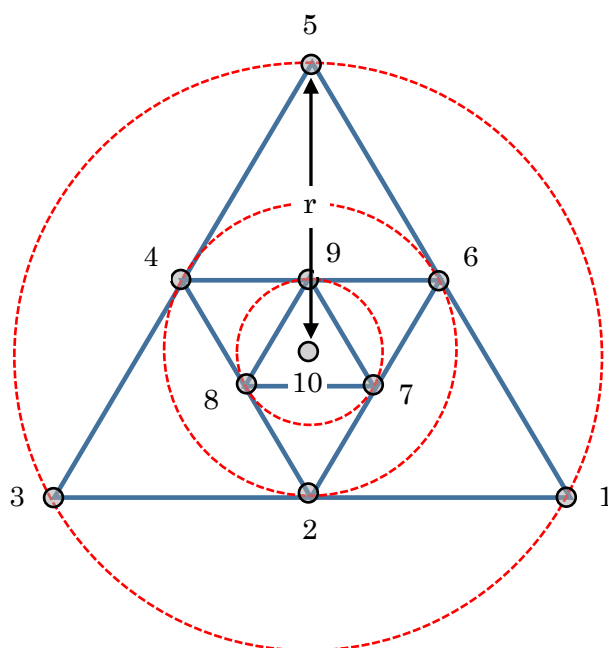


図1 最大半径 r の3重アレイ配置（番号は観測点の順番）

本計測では予備計測と同様に、3重同心円上に正三角形状に配置した同時アレイ観測を行った。アレイ半径としてはSS、S、Lの3アレイについては同じ最大半径8m, 32m, 128mの3アレイとした。最大アレイであるLLアレイについては敷地全体をカバーできるように半径400m、200m、100mの同心円上とした。L・LLアレイについては夕方に機器を配置し計測状態のままにして次の日の朝に回収することとした。

3. 計測地点の概要

今回の予備計測は以下のような手順で実施した。

- ①観測地点の中心を万博会場メイン敷地北部のアクセス道路北側において1点決定する。
- ②観測地点のSSアレイおよびSアレイの位置決め（所要時間：45分）
- ③SSアレイの観測機器の配置（所要時間：10分）
- ④SSアレイの計測開始（所要時間：30分）7月15日14:55～15:25
- ⑤SSアレイの計測終了・Sアレイに盛替（所要時間：20分）

- ⑥S アレイの計測開始（所要時間：30分）7月15日15:45～16:15
- ⑦S アレイの計測終了・L アレイの場所決め（所要時間：30分）
- ⑧L アレイに盛替（所要時間：15分）
- ⑨L アレイの計測開始・継続（所要時間：16時間）7月15日17:00～7月16日09:00
- ⑩翌7月16日、L アレイの観測機器の回収（所要時間：20分）

同様に、今回の本計測では以下の手順でこれを実施した。

- ①観測地点の中心を万博会場メイン敷地内の第2区画側において1点決定する。
- ②観測地点のSS アレイおよびS アレイの位置決め（所要時間：45分）
- ③SS アレイの観測機器の配置（所要時間：10分）
- ④SS アレイの計測開始（所要時間：30分）7月21日14:20～14:50
- ⑤SS アレイの計測終了・S アレイに盛替（所要時間：35分）
- ⑥S アレイの計測開始（所要時間：30分）7月21日15:25～15:55
- ⑦S アレイの計測終了・L アレイの場所決め（所要時間：30分）
- ⑧L アレイに盛替（所要時間：10分）
- ⑨L アレイの計測開始・継続（所要時間：15時間）7月21日17:00～7月22日08:30
- ⑩翌7月22日、L アレイの観測機器の回収（所要時間：20分）
- ⑪LL アレイの場所決め（所要時間：40分）
- ⑫LL アレイの計測開始・継続（所要時間：18時間）7月22日16:50～7月23日10:00
- ⑬翌7月23日、LL アレイの観測機器の回収（所要時間：20分）
- ⑭撤収

4. 計測地点の概要

以下に計測地点の配置結果の概要を示す。予備計測は以下のような配置計画とした。

- ①SS アレイ
r=8 m (2m、4m、8m の3円上配置)、計測時間は30分
- ②S アレイ
r=32 m (8m、16m、32m の3円上配置)、計測時間は30分
- ③L アレイ
r=128 m (32m、64m、128m の3円上配置) 計測時間は16時間（当日設置後、自動計測状態にして観測を継続し、翌朝16日朝に回収）
本計測は以下のような配置計画とした。
- ①SS アレイ
r=8 m (2m、4m、8m の3円上配置)、計測時間は30分
- ②S アレイ
r=32 m (8m、16m、32m の3円上配置)、計測時間は30分

③Lアレイ

r=128 m (32m、64m、128m の 3 円上配置) 計測時間は 15 時間 (当日設置後、自動計測状態にして観測を継続し、翌朝 22 日朝に回収)

④LLアレイ

r=400 m (100m、200m、400m の 3 円上配置)。計測時間は 18 時間 (当日設置後、自動計測状態にして観測を継続し、翌朝 23 日朝に回収)

個別観測地点の配置図を図 2 に示す。基本的に機材は防水であるが、雨滴がセンサーにかかるとノイズの原因となるので、Lアレイ・LLアレイでは雨養生にポリボックスをかぶせ、その上に風で飛ばないように煉瓦を載せた。なお 3 成分観測装置についてはコンパスによりその Y 成分を磁北に合わせた。

また観測点配置の例として LLアレイの配置を図 3 に示す。外周部の 1 系列は 1 成分のセンサー、内周部とセンターの 3 系列は 3 成分のセンサーを用いた観測点である。

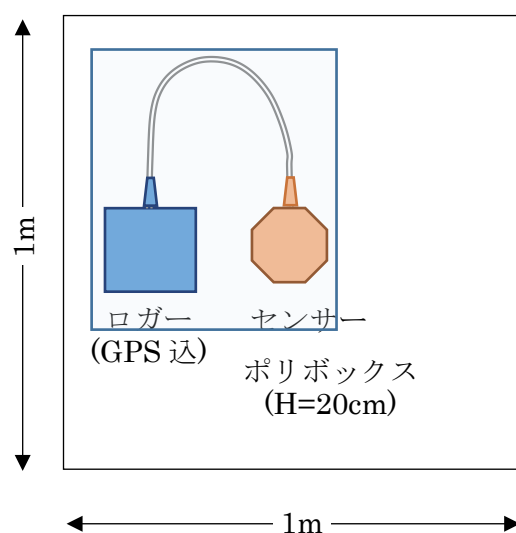


図 2 個別計測地点のセンサーとロガーの配置図

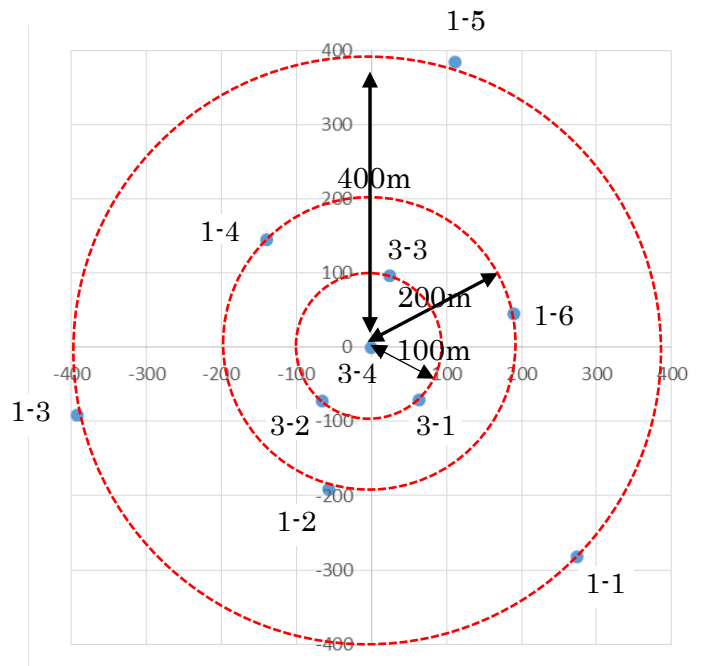


図3 LLアレイ（本計測）の観測装置の機番配置図（GPSによる実測値）

その計測アレイの地図上の配置位置は現地の微動環境や地表面の状況（特に水たまり）、振動環境を実際に見た上で現場にて決定した。今回の計画で計測した予備計測のLアレイと本計測のLLアレイの最大半径の位置を図4に示す。なおこのLLアレイの三角形の底辺から頂点までの高さは600m、一辺の長さは約692mである。

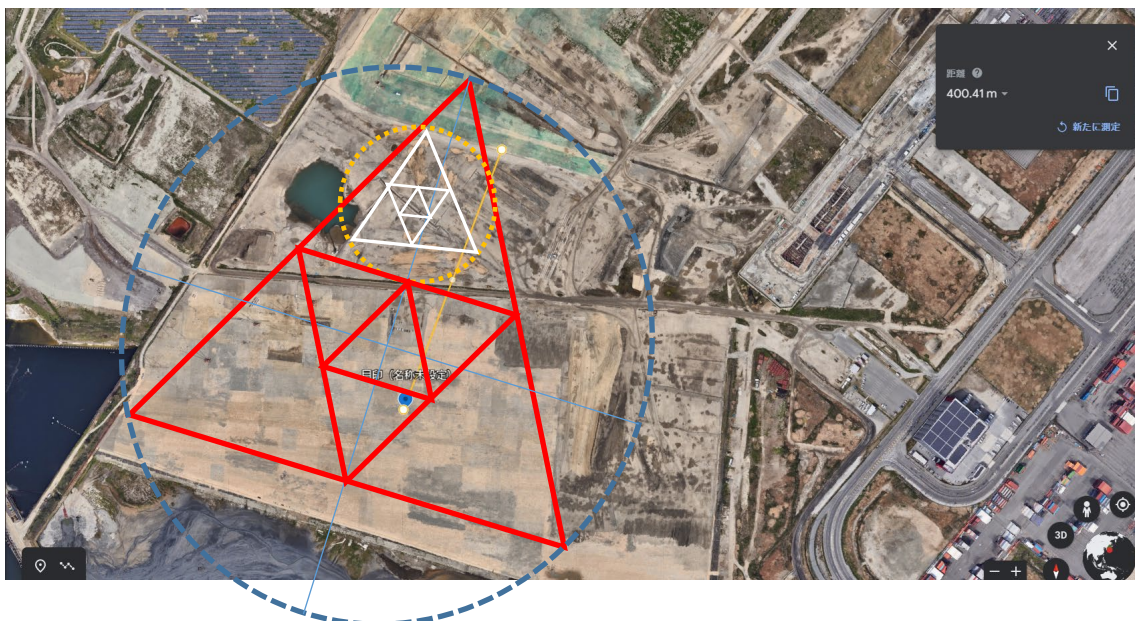


図4 予備観測のLアレイ（白）および本観測のLLアレイ（赤）の配置図

5. 計測微動データと解析結果

はじめに予備計測の SS アレイの観測データ（上下動）を図 5 に示す。これはアレイ解析に用いた上下動を 10 地点分まとめて示したものである。順序は全て図 3 に示したように、右下の外周部から中心に向かって時計回りに付けた順序となっている。すなわち最上部が 1-1 で最下部が 3-4 である。この観測波形の順番は以下の全てのデータで共通である。解析対象時間が 1200 秒弱となっているのは、全計測時間のうち、開始直後と終了直前のノイズの多い部分を取り除いているからである。時間軸上のサンプリング周波数は 250 Hz（時間軸上では 0.004 秒刻み）であり、トレンド除去と高振動数ノイズ除去のため 0.05Hz から 50Hz のバンドパスフィルターを使用している。全地点でよく似た波形が得られており、振幅の大きなパルス状の波群はほとんどアレイの外周部から到来していることがわかる。

この波形に対して SPAC 法によるアレイ解析を施した。SPAC 法では同じ距離にある二点間のコヒーレンスの低下度合いを周波数の関数として求め、それに対して位相速度（見かけの伝播速度）を仮定して理論解を当てはめることによって位相速度を同定する。こうして得られた位相速度を図 6 に示す。横軸が振動数(Hz)、縦軸が位相速度(m/s)で 1.4Hz から 9.6Hz の範囲で有効と思われる位相速度が得られている。2.5Hz 以上で振動数が高くなるほど位相速度が漸増する逆分散現象が観測されている。これは表層ほど速度が増大する傾向にあることを示唆している。

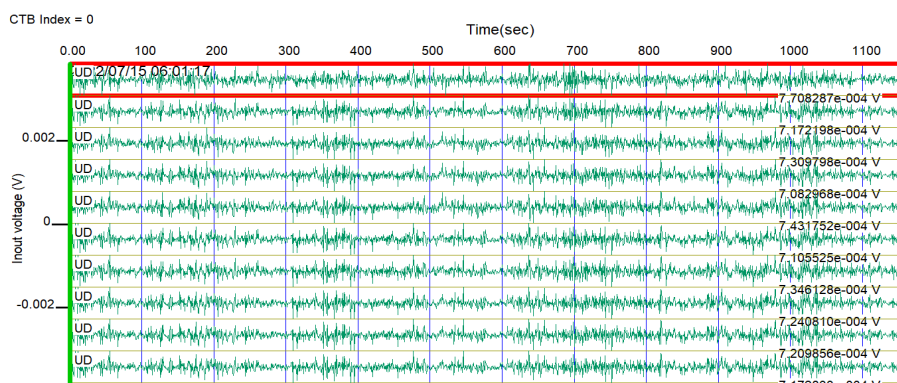


図 5 SS アレイで観測した上下動の微動速度波形

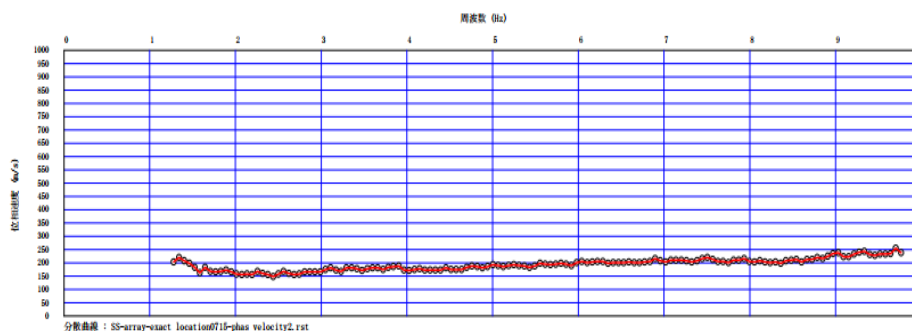


図 6 SS アレイの SPAC 係数から求めた周波数毎の Rayleigh 波の位相速度 (m/s)

以下、Sアレイ・Lアレイの観測データも同様に解析して位相速度を得た。それらを繋いで3アレイの解析によって得た位相速度曲線を図7に示す。最後に図7を説明するようなS波速度構造を逆算した。図8には同定したS波速度構造を示す。この図に示されている赤丸は図7の位相速度を1/3波長則で深さに変換したもので、近似的にその深さのS波速度が得られるとされている。同定されたS波速度構造と概ね対応していることがわかる。

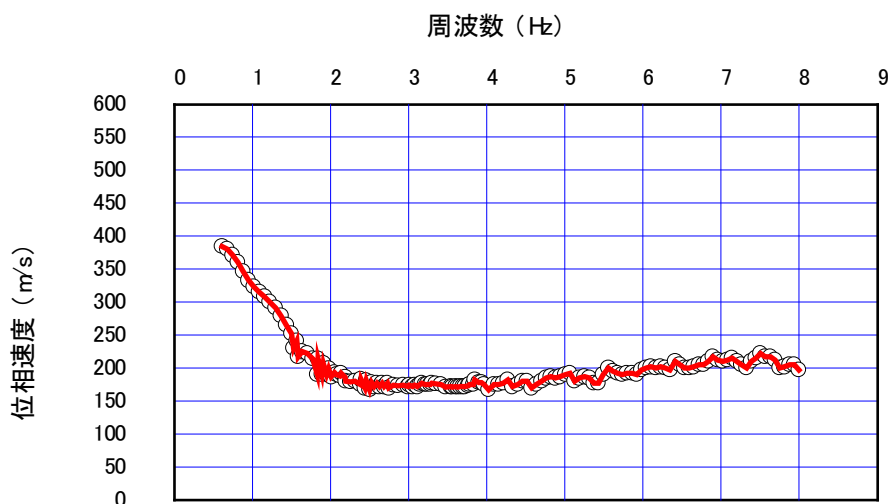


図7 各アレイの有効周波数範囲のデータを平均して得た Rayleigh 波の位相速度 (m/s)と周波数の関係

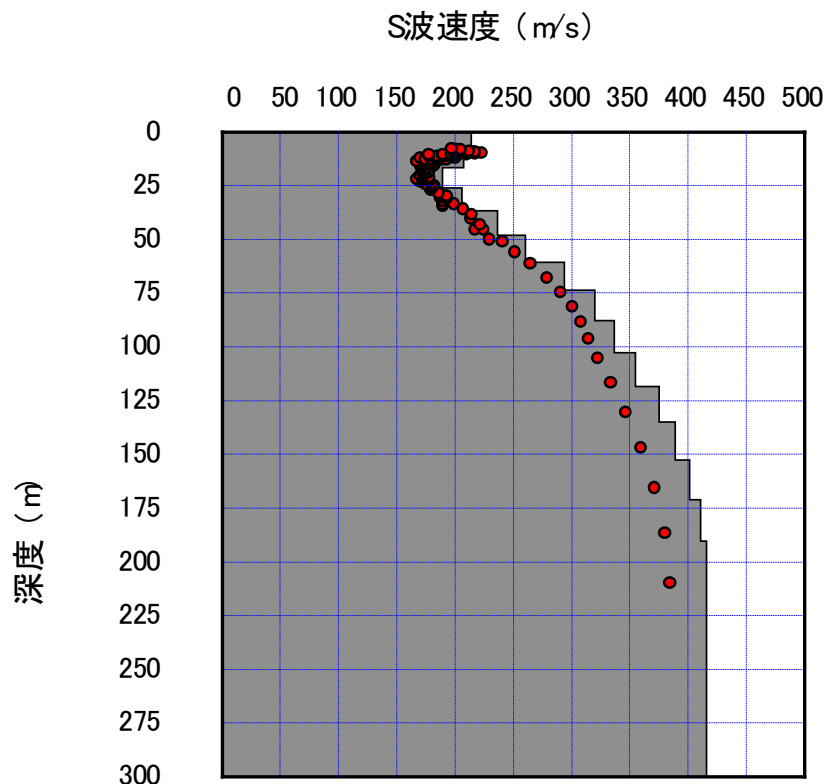


図8 Rayleigh 波の位相速度の分散性から求めた予備観測地点直下の S 波速度構造 (赤丸は 1/3 波長則で図 2 0 の位相速度から近似的に推定した S 波速度)

図8から、表層 20m ほどは速度がその下の層よりも早く、逆転層となっていることがわかる。20m から 40m まで一旦速度が 200 m/s 程度まで低下したあと、約 50m で 270 m/s まで増大していることがわかる。ここかあるいはその下の 60m がいわゆる洪積層の始まりの面だと考えられる。その後深度が深くなるに従って S 波速度は漸増する特性を示し、190m で 400 m/s に達する。

本計測についても予備計測の場合と同じ手順で解析した。SS アレイの観測データを図 9 に示す。解析対象時間は 2100 秒弱である。全地点でよく似た波形が得られており、振幅の大きなパルス状の波群はほとんどアレイの外部から到来していることがわかる。

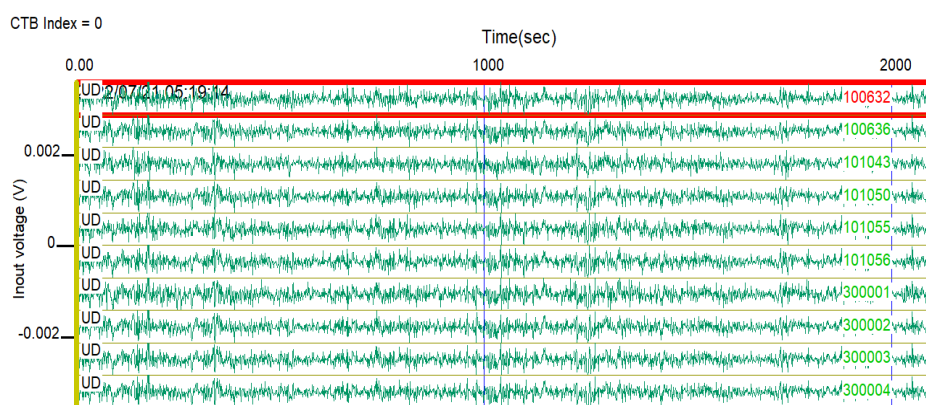


図 9 SS アレイで観測した上下動の微動速度波形（本計測）

この波形に対して予備計測の場合と同様に、SPAC 法によるアレイ解析を施した。図 10 にはその SPAC 係数に当てはめて求めた位相速度を示す。横軸が振動数(Hz)、縦軸が位相速度(m/s)で 1.1Hz から 7Hz の範囲で有効と思われる位相速度が得られている。

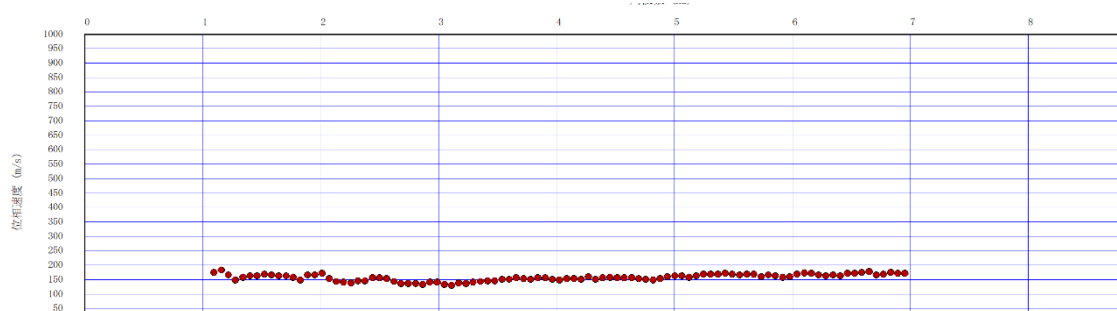


図 10 SS アレイの SPAC 係数から求めた周波数毎の Rayleigh 波の位相速度 (m/s)

最後に各アレイの有効周波数範囲のデータを平均し、得られた広周波数帯域の分散特性を求め、それを説明するような S 波速度構造を求めた。図 11 には速度構造同定に用いた平均操作を施したターゲットの位相速度分布を示す。なお SS アレイの解析結果は 2Hz 以上の有効周波数範囲では S アレイのそれとほぼ同じだったので、平均操作には含めていな

い。図12にはこの位相速度をターゲットに同定したS波速度構造を示す。図12に示されている赤丸は、予備解析と同様に位相速度を1/3波長則で深さに変換したものである。この構造を予備計測の構造と比較すると、浅部で逆転層があるという点では似ているが、予備計測地点の表層のS波速度の方が万博予定サイトの本計測地点のそれよりも大きいこと、その下の軟弱層のS波速度も予備計測地点の方が万博予定サイトの本計測地点のそれよりも大きいことがわかる。このことから埋め立て工事がより最近であった万博予定サイトのS波速度はその北側地点のそれよりも柔らかいと考えられる。

それ以深の構造では40~50mで250m/sレベルの層に遭遇し、漸次速度が増大して200m前後で400m/sに達するという意味ではほぼ同じ構造となっていることがわかる。距離の近さを考えれば深い構造が良く似ているのは当然期待される通りであり、速度構造同定が適切に実行できていることを示唆している。表1には予備計測地点の、表2には本計測地点の同定したS波速度構造を示す。図13には予備計測サイトと本計測サイトで得られたS波速度構造を比較した。なお予備計測サイトの最大同定深度は200m弱なので点線を引いている。

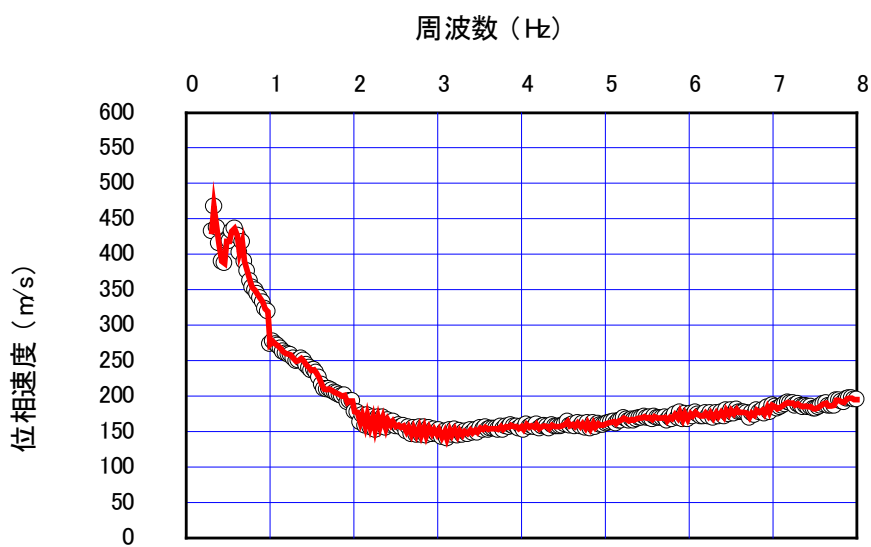


図11 Sアレイ・Lアレイ・LLアレイの有効周波数範囲のデータを平均して得たRayleigh波の位相速度 (m/s)と周波数の関係

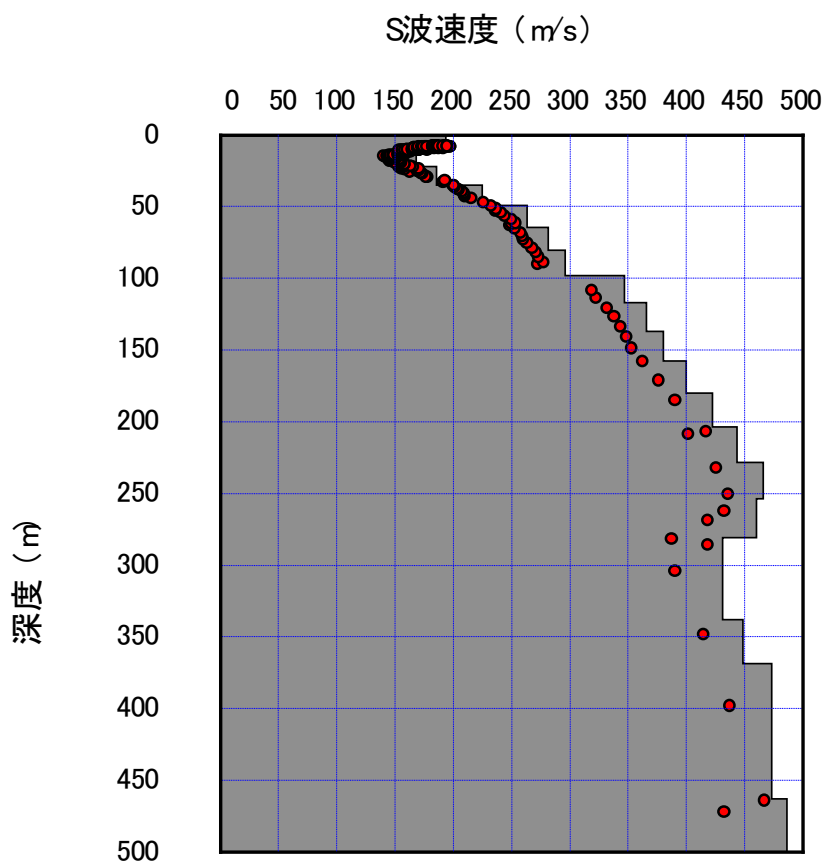


図 1 2 Rayleigh 波の位相速度の分散性から求めた本計測地点直下の S 波速度構造
(赤丸は 1/3 波長則で位相速度から近似的に推定した S 波速度)

表 1 アレイ微動観測で得られた予備計測地点の S 波速度構造

Layer No.	Depth(m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)
1	0.0	214	1527	1.80
2	7.9	207	1520	1.79
3	16.7	189	1500	1.79
4	26.3	206	1518	1.79
5	36.8	236	1552	1.80
6	48.2	260	1579	1.81
7	60.5	294	1616	1.82
8	73.7	320	1645	1.83
9	87.7	337	1664	1.84
10	102.6	355	1684	1.85
11	118.4	375	1706	1.85
12	135.1	389	1722	1.86
13	152.6	402	1736	1.86
14	171.1	411	1746	1.87
15	190.4	416	1751	1.87
16	347.4	416	1751	1.87

表2 アレイ微動観測で得られた本計測地点の S 波速度構造

Layer No.	Depth(m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)
1	0.0	199	1511	1.79
2	9.2	173	1482	1.78
3	19.4	177	1486	1.78
4	30.7	219	1533	1.80
5	43.0	250	1568	1.81
6	56.3	271	1591	1.82
7	70.6	287	1609	1.82
8	86.0	297	1620	1.83
9	102.3	347	1675	1.84
10	119.7	365	1696	1.85
11	138.2	380	1712	1.85
12	157.6	399	1733	1.86
13	178.1	422	1758	1.87
14	199.6	443	1782	1.88
15	222.1	460	1801	1.88
16	245.6	464	1805	1.88
17	270.2	436	1774	1.87
18	295.8	422	1758	1.87
19	322.4	461	1801	1.88
20	405.3	468	1809	1.88

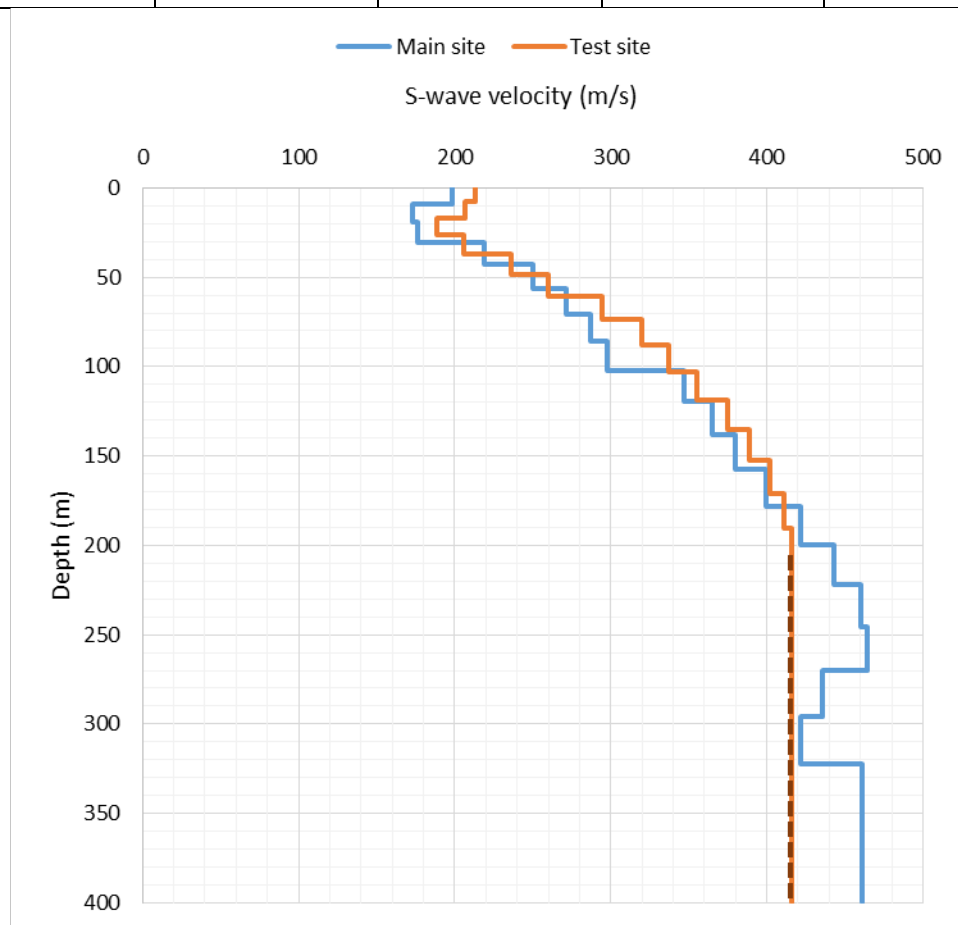


図13 予備計測サイトと本計測サイトで得られた S 波速度構造の比較

6. 得られた速度構造の検証

ここで得られた速度構造を既往の調査結果と比較する。ここでは少し離れているが敷地に隣接する別の埋め立て地に位置する咲洲庁舎地点でのボーリングによる PS 検層結果と、夢洲内の近隣敷地のボーリング調査で得て公開されている標準貫入試験の N 値から土質と拘束圧（上載圧）を考慮した経験的 S 波速度推定式を用いて S 波速度に換算した S 波の深さ方向分布を 2 地点に対して、図 14 に結果を示す。これらの比較で PS 検層による S 波速度では、表層 20m は逆転層になっていること、その後は深さ 50m まで沖積層が堆積しており、その後洪積粘土層が出現するがその層の S 波速度は 200m/s 以下で、工学的基盤層といえる洪積砂礫層が出現するのは 70~75m 以深であることがわかる。それ以降 300m/s を超える層が出現するが深度 90m まで行って漸く 400m/s に達している。一方、N 値換算による S 波速度は沖積層では、最表層の逆転層が無く 150m/s 程度の軟弱な S 波速度となっている点を除き、ボーリングの速度分布とよく似た速度分布を呈している。ただし 50m で出現する砂礫層の換算 S 波速度は 450m/s 以上と推定されており、大きな違いを見せている。これらの層ではいずれも N 値 50 以上の換算 N 値（50 回までに 30cm まで貫入できなかったので貫入できた量 ÷ 30 で 50 回から換算したもの）となっており、礫に当たって大きな N 値となっている可能性が推察できる。またボーリング調査結果では最表層逆転層の S 波速度が 300m/s となっており、我々の同定結果の 200~215m/s とは隔たりがあるが、逆転層の存在自体は疑いようのないものと考えられる。また 20m から 70m までは我々の同定値の方が上回る傾向にあるのに対して 70m から 110m までは砂層を中心に 300m/s を上回る速度となっており、我々の同定値を上回る傾向となっている。これはアレイ微動で求めた位相速度は滑らかな周波数依存性を持っており、個々の層の速度を精度よく同定することは困難であって、ある深さまでの平均的な速度を同定しているからである。従ってボーリングによる S 波速度分布を平均すれば両者の傾向はよく一致している。一方、N 値換算の S 波速度については、上述のように N 値が 100 以上となっている洪積砂礫層を除けば全体的な値やその分布は今回の同定値とよく対応していると言える。

以上のことから、今回の同定値の基本的特徴である、表層に逆転層が存在すること、50m~60m で洪積層が出現すること、200m 以浅では S 波速度は 400m/s 以下に過ぎないことなどは妥当な値であるものと考えられる。

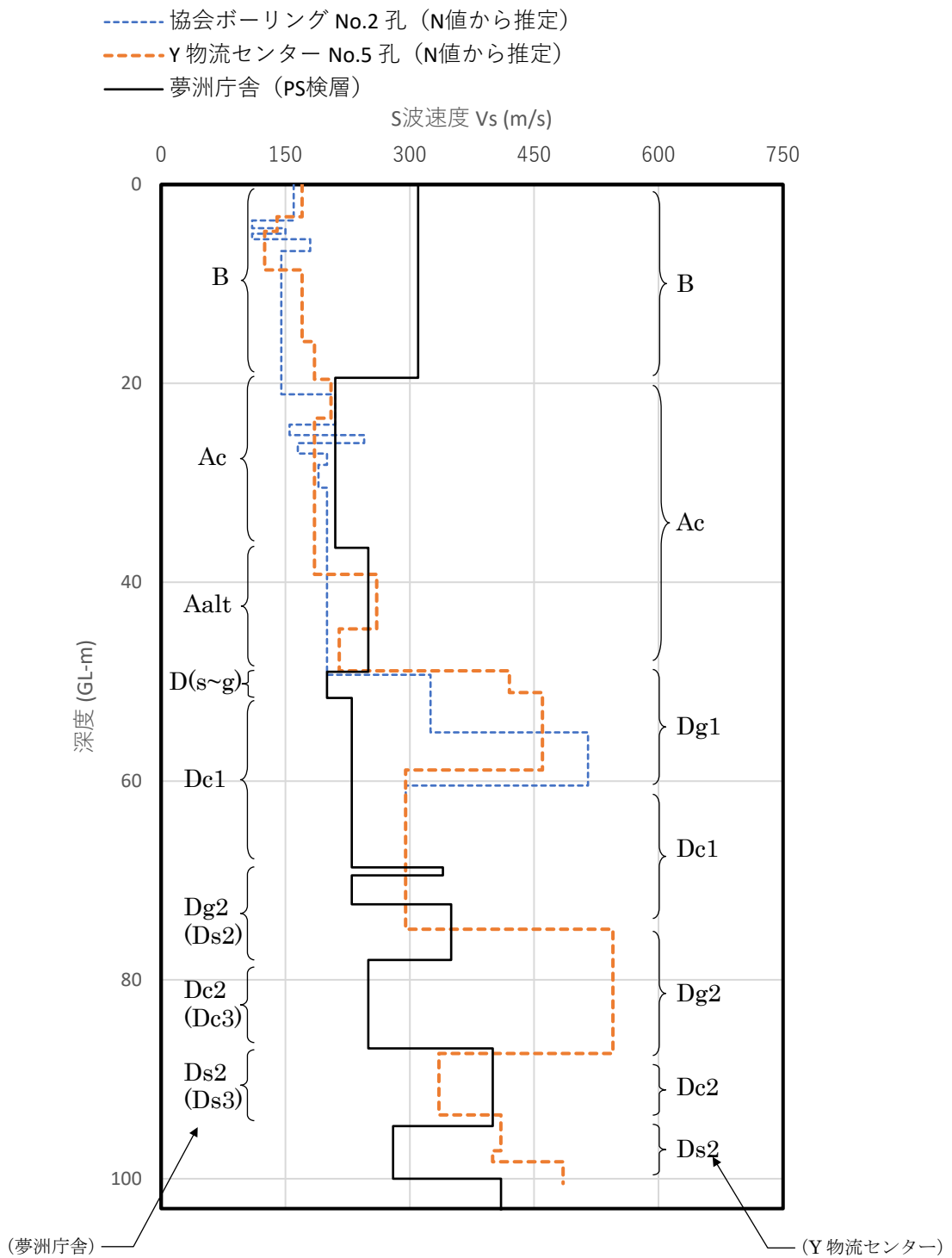


図 1 4 近傍地点における推定 S 波速度の比較

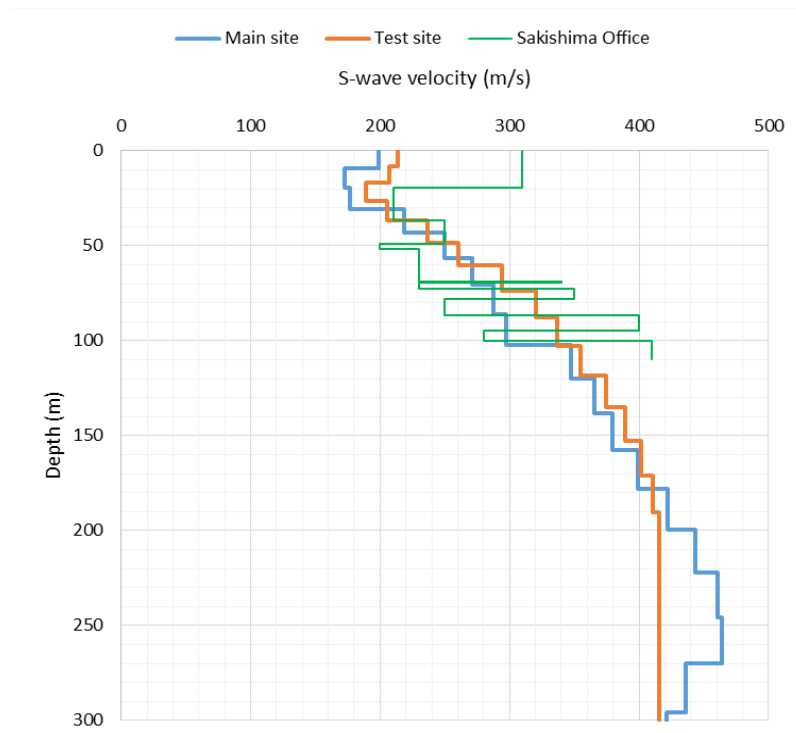


図 1 5 咲洲庁舎でのボーリング検層による S 波速度分布と今回の調査で得た予備計測サイトおよび本計測サイトでの S 波速度分布の比較

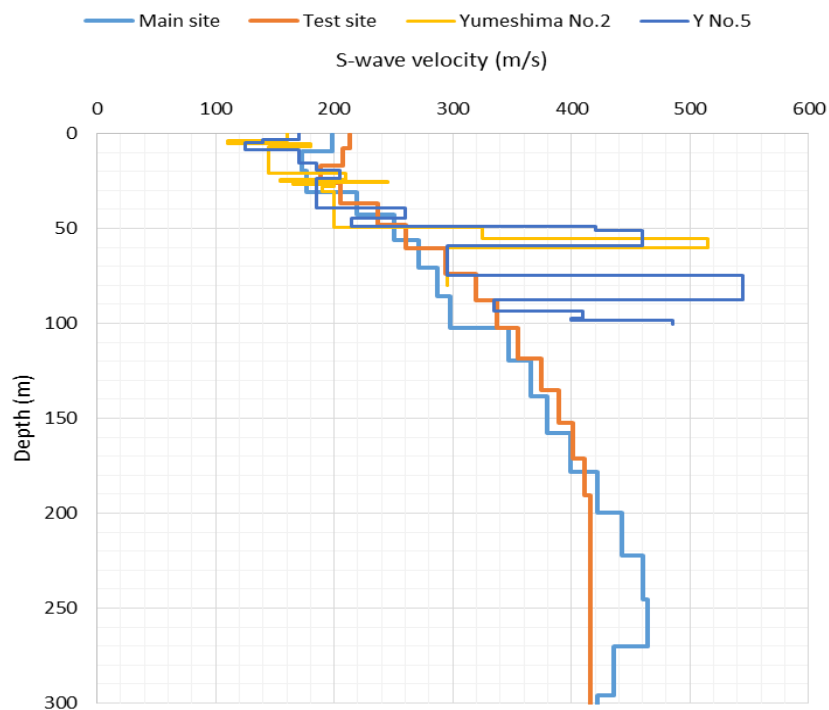


図 1 6 夢洲の近隣サイトでのボーリング調査で得た N 値から換算した S 波速度分布と今回の調査で得た予備計測サイトおよび本計測サイトでの S 波速度分布の比較