

圧電セラミックス素子を用いた弾性波速度と一軸圧縮強さ関係

Relationship Between Unconfined Compression Strength and Seismic Wave Velocities Using Piezoelectric Element

中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学工学部)

日本海の表層型メタンハイドレートの特徴は、粘土層中にメタンハイドレートが塊状や層状をなして存在していることである。海底面からメタンハイドレート層間の粘土の変形・強度特性に、湧昇するメタンと海水の硫酸イオンにより形成される炭酸塩鉱物が影響することが指摘されている。変形・強度特性とともに弾性波速度を測定できれば、原位置測定結果との比較や、品質評価の点において有用であるといえる。そこで本研究では、なるべく供試体を乱さない弾性波測定方法として、発信・受信装置を供試体に挿入せずに弾性波を測定する装置を用いて、 q_u と弾性波速度の関係について検討を行った。

キーワード：弾性波速度，一軸圧縮試験

(IGC : D-06)

1. はじめに

現在、太平洋側の砂層型メタンハイドレートとともに、日本海の表層型メタンハイドレートに関する検討がすすめられている¹⁾。日本海の表層型メタンハイドレート層の特徴は、粘土層中にメタンハイドレートが塊状や層状をなして存在していることである²⁾。本研究で対象とするのはメタンハイドレート層ではなく、採掘するにあたって掘削が必要となる海底面からメタンハイドレート層までの浅層部である。この層は太平洋側の砂層型メタンハイドレートとは異なり、湧昇するメタンと海水の硫酸イオンにより炭酸塩鉱物が形成される。この成長した炭酸塩鉱物は、土粒子に対する膠着作用（セメンテーション）、あるいは直径1~10mm程度の粗粒の方解石が形成され、海底地盤の変形・強度特性に影響を与えることがこれまでの予備的検討で明らかになっている³⁾。予備的検討で用いた日本海海底土の粒径加積曲線を図-1に示す。なお細粒分はレーザー回折式粒度分布測定装置により測定している。このように土粒子の最大粒径は0.1mm程度であるが、1~10mm程度の粗粒の方解石が存在していることが特徴である。また、現地調査から間隙比が大きい（2~4程度）ことがわかっており、構造が高位な状態であることが考えられる。メタンハイドレートの調査では、海上からのP波測定⁴⁾、不攪乱試料であるボーリングコアに対し船上でP波速度⁵⁾など、 V_s 測定が主である土木分野とは異なり V_p も用いられる。今後、不攪乱試料や、上記の特徴を模擬した試料に対しせん断試験とともに弾性波速度を計測する予定であり、なるべく供試体を乱さずに計測する方法が望ましい。

ここでベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法が基準化されている。この基準では、電圧により駆動する圧電セラミックの薄板を2枚貼りあわせたベンダーエレメントを用いており、このベンダーエレメン

トを供試体に挿入して使用する。このため、ベンダーエレメント挿入前に溝を設けるか、溝を設けずに挿入するなどの作業が必要となり、供試体を乱すおそれがある。また、図-1に示すように粗粒分も含むため、整形には注意を要する。土の一軸圧縮試験において最も q_u に与える影響が大きいのは供試体整形作業であることが指摘⁶⁾されており、供試体の整形作業は少ないほど望ましいと言える。そこで本研究では、メタンハイドレート回収技術に関する検討として、海底地盤の変形・強度特性とともに弾性波速度測定を目的として開発^{7,8)}されたものを用い、キャップとペDESTALに組込むこととした。仕組みなどの詳細は後述するが、本装置の特徴は供試体と接触する多孔板（ポーラスメタルなど）を軸方向または円周方向に電圧により駆動し起振することができること、P波S波とも発信可能である点である。供試体に測定器具を挿入することなく弾性波速度を測定する方法として、基準化されているパルス透過法による岩石の超音波速度測定方法、荷重ロッドを打撃して起振し供試体側面の設置した加速度計により計測した結果から弾性波速度を測定する⁹⁾などの方法がある。本研究で用いた装置の利点は、P波S波ともに発信できる、セル圧を荷重した状態で使用できる、ベンダーエレメント法と同様に発信周波

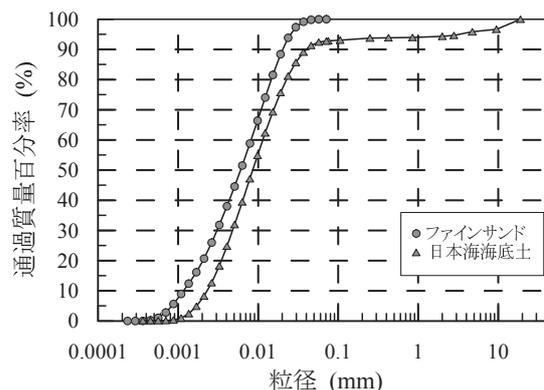


図-1 粒径加積曲線

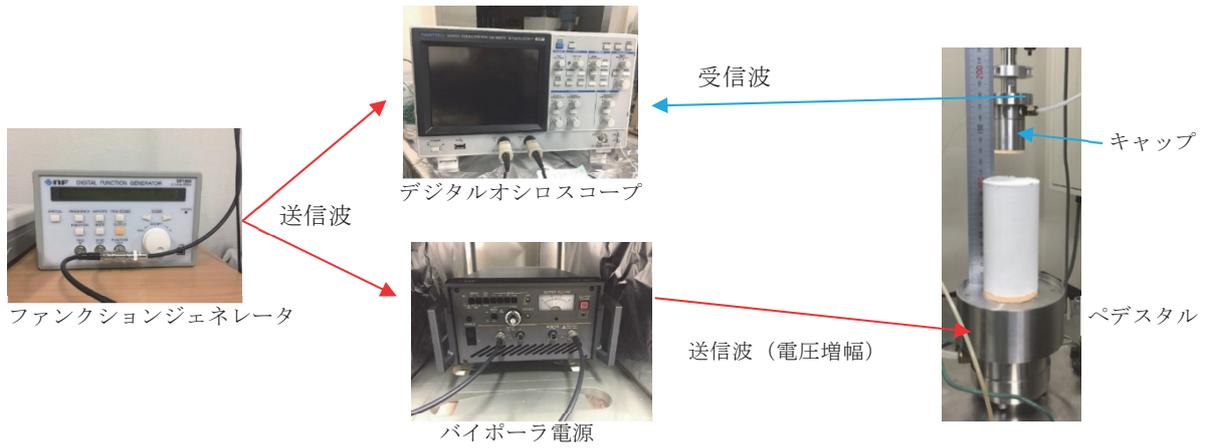


図-2 機器の構成

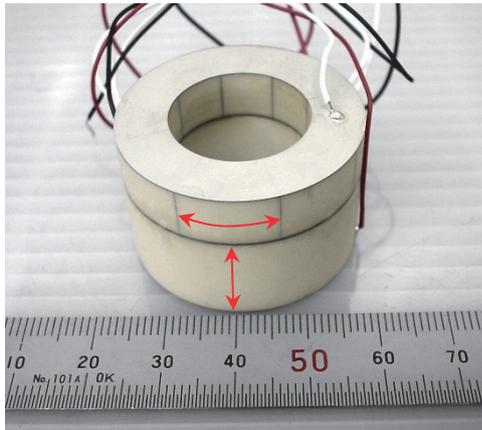


図-3 圧電素子

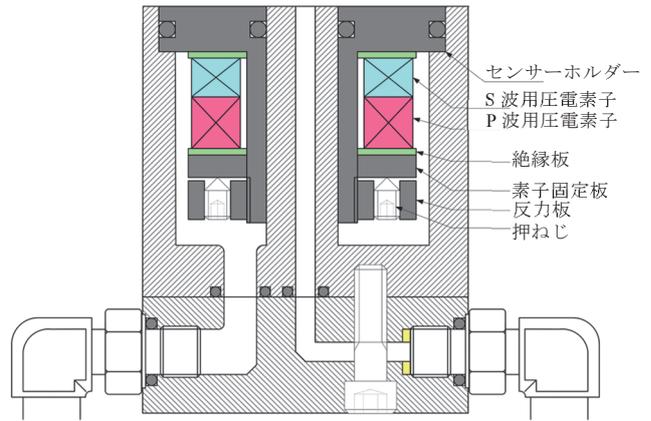


図-4 キャップまたはペDESTALの構造

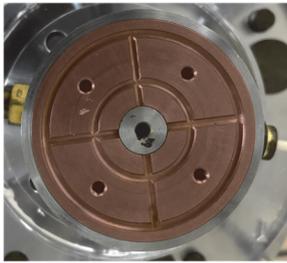


図-5 ペDESTAL



図-6 スペーサ

2. 実験装置

2.1 弾性波計測システム

システムの構成を図-2に示す。圧電素子は高電圧で駆動させるため、バイポーラ電源が必要となる。図-2に示すように、ファンクションジェネレータから正弦波または矩形波の電圧を発信し、バイポーラ電源で発信信号を増幅してペDESTALに内蔵された圧電素子を駆動する。デジタルオシロスコープは、ファンクションジェネレータの発信電圧と、キャップに内蔵された圧電素子で受信した電圧を測定する。圧電素子は、振動が加わると電気容量変化が起こるため、容量変化を電圧変化に変換することで弾性波振動を計測できる。用いた圧電素子はプラス電圧の印加で伸長する。本研究では、正弦波では $\pm 1.0V$ 、矩形波では $+2.0V$ をファンクションジェネレータで発信し、この信号をバイポーラ電源で100倍して圧電素子に電圧を印加した。用いた圧電素子は500Vまで電圧印加が可能であるが、以降に説明する実験でファンクションジェネレータの出力電圧をさらに増加させてもキャップで計測される電圧はほぼ変化がなかったため、全て上記の条件で弾性波速度を計測した。オシロスコープの設定は、電圧の分解能 $0.001mV$ 、タイムステップは V_p 計測時 $4nsec$ 、 V_s 測定時 $10nsec$ とした。

図-3は用いた圧電素子、図-4はキャップまたはペDESTAL

数を変更することができる点である。

本論文では、2つの項目について検討を行なった。1つは、本装置による弾性波測定結果を、P波は水の理論値と、S波はベンダーエレメント試験による測定結果と比較することである。もう1つは、今後、日本海海底土の不攪乱試料や、模擬試料に対する実験を考慮した基礎的な検討である。本研究の対象は日本海海底の浅層部であり、低拘束圧状態である。本論文では、低拘束圧の極端な条件として一軸圧縮強度と弾性波速度の関係を検討することとした。一軸圧縮試験では三軸圧縮試験と異なり、供試体の間隙比を調整しやすく、圧密が必要ないため時間短縮が可能であり、多数の実験を実施できるメリットがある。これより、 q_u と弾性波速度の関係について検討を行った。

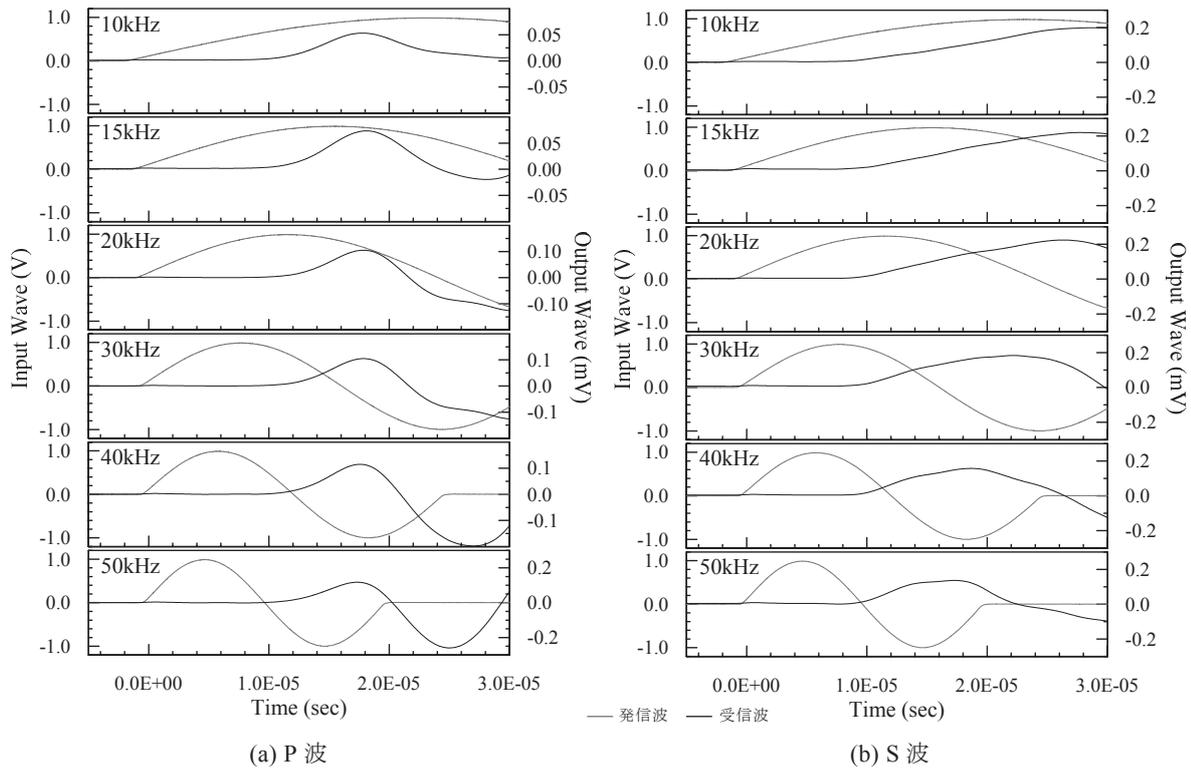


図-7 遅延時間計測結果

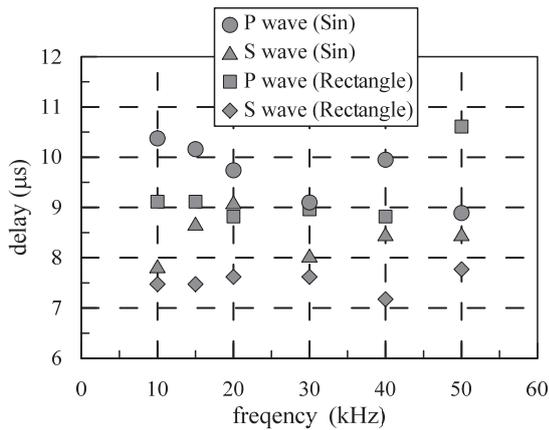


図-8 遅延時間のまとめ

スタルの構造である。圧電素子は電圧印加により一方向に伸長または収縮するという機能をもつ。図-3と図-4に示すように、圧電素子を上下に重ねた構造とすることで、P波とS波を発信することができる。図-4の右下の継手は供試体の排水口、左下の継手はセンサー用コード取出口である。下部の素子は、図-3に示す矢印の方向に伸長または収縮することでP波を発信する。上部の素子は、8個組み合わせたリング状となっており、それぞれの素子が図中矢印の方向に伸長または収縮する。これより供試体接触面がねじり運動となり、S波を発信することができる。可動部は図-4のセンサーホルダーであり、図-5の赤い部分に対応する。ここにネジ4本で多孔板（直径50mm）を固定する。この固定された多孔板を介して供試体に弾性波を発信する仕組みとなっている。なお、図-6に示すドーナツ状のスペーサを取付けて、直径10cm、高

さ20cmの供試体にも対応することができる。これより、ボーリングコアなどで採取した不攪乱試料から最小限の整形作業により、実験を実施することができる。

受信信号のノイズ除去方法は、加算平均とローパスフィルタを用いた。加算平均はデジタルオシロスコープの機能を用いており、16回加算平均を行っている。ローパスフィルタは、加算平均した計測結果に対し、遮断周波数を500kHzとして処理を行なった。

2.2 遅延時間と初動の方向

送信波と受信波の計測経路が異なるため、遅延時間が発生する。キャップとペDESTALを接触させた状態で、正弦波と矩形波を、周波数を変えて測定した。図-7にP波S波それぞれの正弦波の結果を示した。これより、初動方向は発信と同じく正の電圧が発生し、それはP波とS波ともに同じである。P波はS波と異なり、発信周波数の変化と対応せず、受信波の変化が小さいようである。遅延時間をまとめた結果を図-8に示す。最大で約4μsの差があり、遅延時間の平均は8.725μsとなった。

2.3 圧縮試験装置

三軸圧縮試験装置に2.1で説明したキャップとペDESTALを取り付け、水の V_p 測定、三軸圧縮試験、一軸圧縮試験を実施した。なお、一軸圧縮試験ではセルを取り付けず、水の V_p 測定と三軸圧縮試験ではセルを取り付けて実験を実施した。

3. 弾性波速度計測結果の妥当性に関する検討

3.1 水の V_p

V_p は、水の速度を測定することで装置の妥当性を検討した。測定方法は、ペDESTALとキャップ間の距離を10cmとし、キャップ部が水没するまで三軸室内を水で満たした状態で、伝播時間の測定を行なった。図-9に、立ち上がりが明確な矩形波の計測例を示した。これより、周波数が増え、受信側の電圧にはさほど影響がみられないことがわかる。計測結果は、周波数、正弦波・矩形波の影響はなく、 $V_p=1500\text{m/s}$ 程度となった。水の速度は水温によって変化し、水温20度から30度で1410~1540m/sとされている¹⁰⁾。これより、 V_p は問題なく計測できていると考えられる。

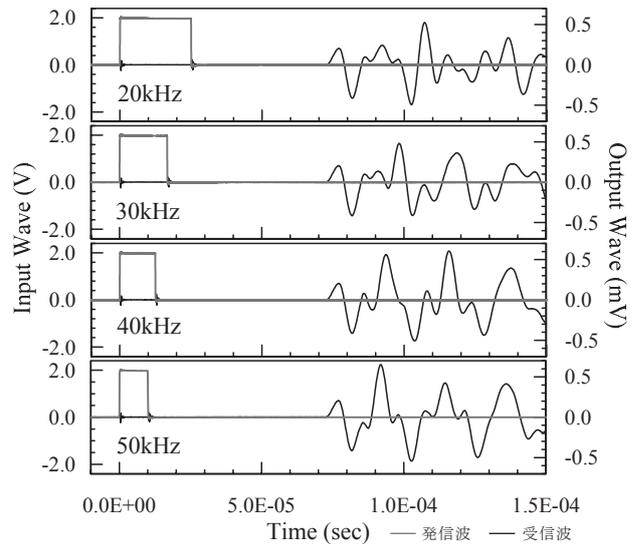
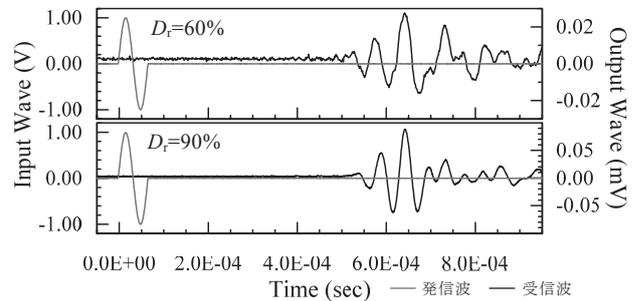


図-9 水のP波測定結果

3.2 豊浦砂の V_p , V_s に関する検討

3.2.1 供試体作製方法と実験条件

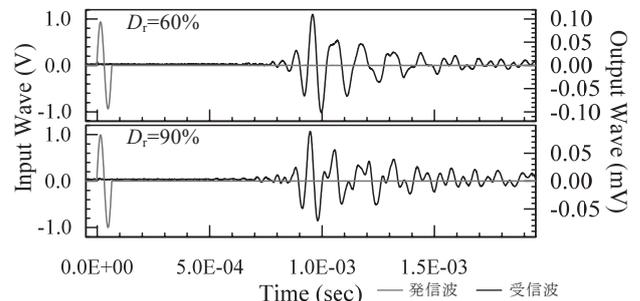
相対密度は60%と90%の2種類、乾燥状態、拘束圧50kPaで計測を行なった。供試体の大きさは、直径10cm、高さ20cmである。供試体作製方法は、モールドへ乾燥砂をいれて細い棒を突き刺して相対密度を調整した。調整にあたっては、所定の相対密度となるよう高さ2cmごと、10層にわけて作製した。乾燥状態で弾性波を測定した。



(a) V_p 測定結果 (正弦波 15kHz)

3.2.2 弾性波速度測定結果

V_p と V_s の測定結果を、それぞれ図-10に示す。図-9と図-10のP波を比較すると、伝播距離が長くなったことも影響し、受信電圧が1/10程度まで減衰している。このため、同程度のノイズが強調されている。



(b) V_s 測定結果 (正弦波 15kHz)

図-10 豊浦砂の弾性波測定結果

豊浦砂の V_p は、B値や飽和度と関係することが知られている¹¹⁾。今回の結果では、 V_p は $D_r=60\%$ と $D_r=90\%$ ともに約400m/sとなった。 V_s は $D_r=60\%$ は約250m/s、 $D_r=90\%$ は約280m/sとなった。既往の研究¹¹⁾によると $D_r=80\%$ で V_p は約400m/s、 V_s は約250m/sとされている。これより、ベンダーエレメント試験とほぼ同等の結果を得られることを確認できた。

4. 弾性波速度と一軸圧縮強度の関係

4.1 実験方法と実験条件

4.1.1 用いた試料と供試体作製方法

試料は、市販されている白色石英砂(ファインサンド)を用い、粒径加積曲線を図-1に示す。土粒子密度は 2.700g/cm^3 である。ファインサンドを用いた理由は、メタンハイドレートに関する検討で用いられた事例があること¹²⁾、また図-1に示すように0.1mm以下の粒度分布がほぼ同じためである。

供試体作製は、セメント添加の有無によりそれぞれ以下のように行った。セメント無しの場合、含水比を15%に調整した試料を所定の密度となるよう、1層2cmずつ、

5層にわけてランマーにより突固めて作製した。その後、40℃の乾燥炉で48時間乾燥させた。セメントを添加する場合は、乾燥状態の試料にセメントを添加して混合させ、その後含水比を15%に調整し、セメント無しと同様に突固めて作製した。締固め後、1週間恒温室内(室温20度)で養生した後に実験を行った。乾燥状態としたのは、不飽和によるサクションが強度に与える影響を避けるためである。

4.1.2 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。表-1に示した間隙比は、圧縮載荷前に測定した供試体高さと質量より求めている。セメントを添加した供試体は、間隙比1.2を目標として作製している。間隙比1.2とした理由は、構造が高位な状態を模擬するため、本試料でセメントを添加せず供試体を作製できる、最も間隙比が大きい状態としたためである。なお、セメントと試料は質量比で混合した。

表-1 実験ケースと実験結果

e	セメント 質量比 %	q_u kN/m ²	E_{50} MN/m ²	e	セメント 質量比 %	q_u kN/m ²	E_{50} MN/m ²
0.815	0	171	31.0	1.228	10	419	106.4
0.876	0	107	22.3	1.164	10	741	156.3
0.901	0	248	51.0	1.157	10	849	174.7
0.906	0	305	69.8	1.150	10	887	221.0
0.920	0	145	29.8	1.135	10	916	197.3
0.973	0	83	19.7	1.214	7.5	325	82.6
1.005	0	181	48.6	1.188	7.5	431	112.3
1.016	0	208	60.5	1.180	7.5	502	125.6
1.021	0	168	45.8	1.175	7.5	661	157.9
1.030	0	229	60.5	1.178	5	400	104.4
1.091	0	47	11.9	1.167	5	550	120.6
1.093	0	158	43.2	1.189	5	315	87.2
1.107	0	51	11.7	1.212	5	237	66.3
1.111	0	147	41.0	1.220	2.5	122	38.9
1.190	0	100	20.7	1.255	1	46	16.1
1.233	0	39	8.3				
1.245	0	106	29.6				
1.270	0	25	8.2				

4.1.3 一軸圧縮試験方法と弾性波速度測定条件

一軸圧縮試験は、JISA 1216 に従った。供試体の直径は 5cm、高さは 10cm である。なお、弾性波速度の計測後に圧縮荷重を実施している。

弾性波速度測定時は、キャップの質量が供試体に荷重されないよう、荷重軸にキャップを剛結した。弾性波測定には供試体とキャップ・ペDESTALを密着させる必要があるため、軸差応力 1~2kPa を荷重した。この状態で弾性波速度を計測し、 V_p と V_s ともに正弦波と矩形波を、5kHz、10kHz、15kHz、20kHz、30kHz、40kHz、50kHz の周波数で計測した。

4.2 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験の応力ひずみ曲線の代表例を図-11、 q_u と E_{50} は表-1、間隙比との関係を図-12 に示した。セメント添加無しの場合では、ばらつきはあるものの間隙比の低下とともに q_u が増加する傾向であることがわかる。目標間隙比を 1.2 としてセメント添加量を変えた条件では、セメント添加量が増加するほど q_u と E_{50} は増加し、セメントを添加しない条件よりも強度が大きくなった。

4.3 正弦波・矩形波の違いと周波数の影響

q_u が異なる 3 ケースについて、計測した受信波を発信周波数ごとに図-13~図-15 に示す。

q_u が小さくなると、P 波 S 波ともに立ち上がり点の電圧変化が小さくなり、読みとるのが難しくなる傾向となった。周波数が 30kHz 以上ではその傾向が顕著である。第 1 波目のピーク電圧と以降のピーク電圧を比較すると、P 波はほぼ同じであるが、S 波は第 2 波目の方が大きい。この傾向は、バンダーエレメントによる既往の結果でも

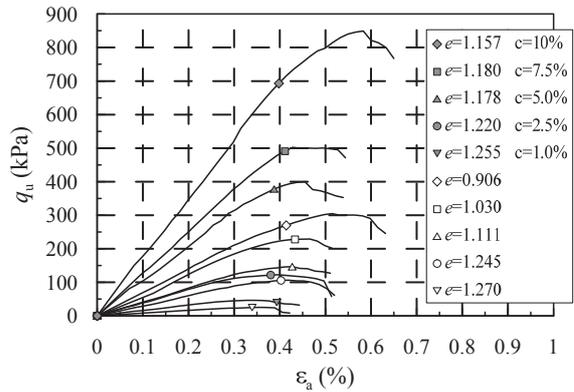


図-11 一軸圧縮試験結果（応力-ひずみ関係）

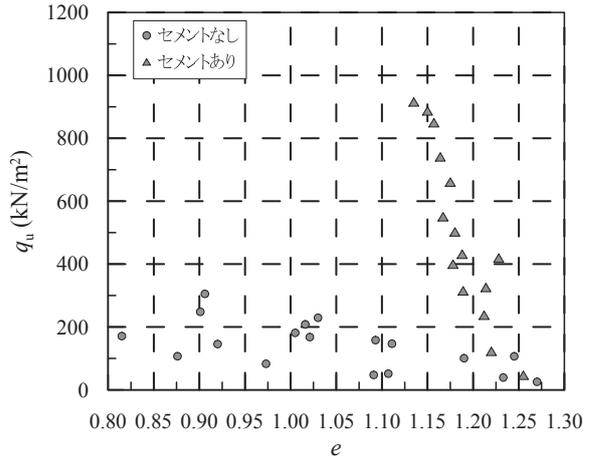


図-12 e - q_u 関係

同様な傾向であった。

4.4 伝播時間同定法

バンダーエレメント試験方法では、伝播時間同定法について推奨される条件が示されている。ここでは S 波を対象に、バンダーエレメントと起振方法が異なる本装置に適用できるか検討を行なった。なお、3 章も以下と同じ方法で伝播時間を同定している。

基準化されているバンダーエレメント試験では、T.D.法を用いること、推奨される条件として式(1)により求めること、 Δt_s と Δt_p の差が 3%以内であること(式(2)参照)、伝播距離が送信波の 2 波長以上とされている(式(3)参照)。

$$\Delta t = \frac{\Delta t_s + \Delta t_p}{2} - \Delta t_d \quad (1)$$

$$\left| \frac{(\Delta t_p - \Delta t_s)}{\Delta t} \right| \times 100 \leq 3 \quad (2)$$

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{L}{v_s/f} = \frac{L \cdot f}{L/\Delta t} = f \cdot \Delta t \geq 2 \quad (3)$$

ここで、 Δt はせん断波の伝播時間、 Δt_s は送受信波の立ち上がり点から求めた伝播時間、 Δt_p は送受信波のピーク点から求めた伝播時間、 Δt_d は計測システム全体の遅延時間である。また、 L は伝播距離、 λ は送信波の波長、 f は送信波の周波数である。

図-13~図-15 の S 波正弦波の結果より、送受信波の立ち上がり点とピーク点それぞれで伝播時間を求めると、ピーク点から求めた伝播時間が立ち上がり点から求めた

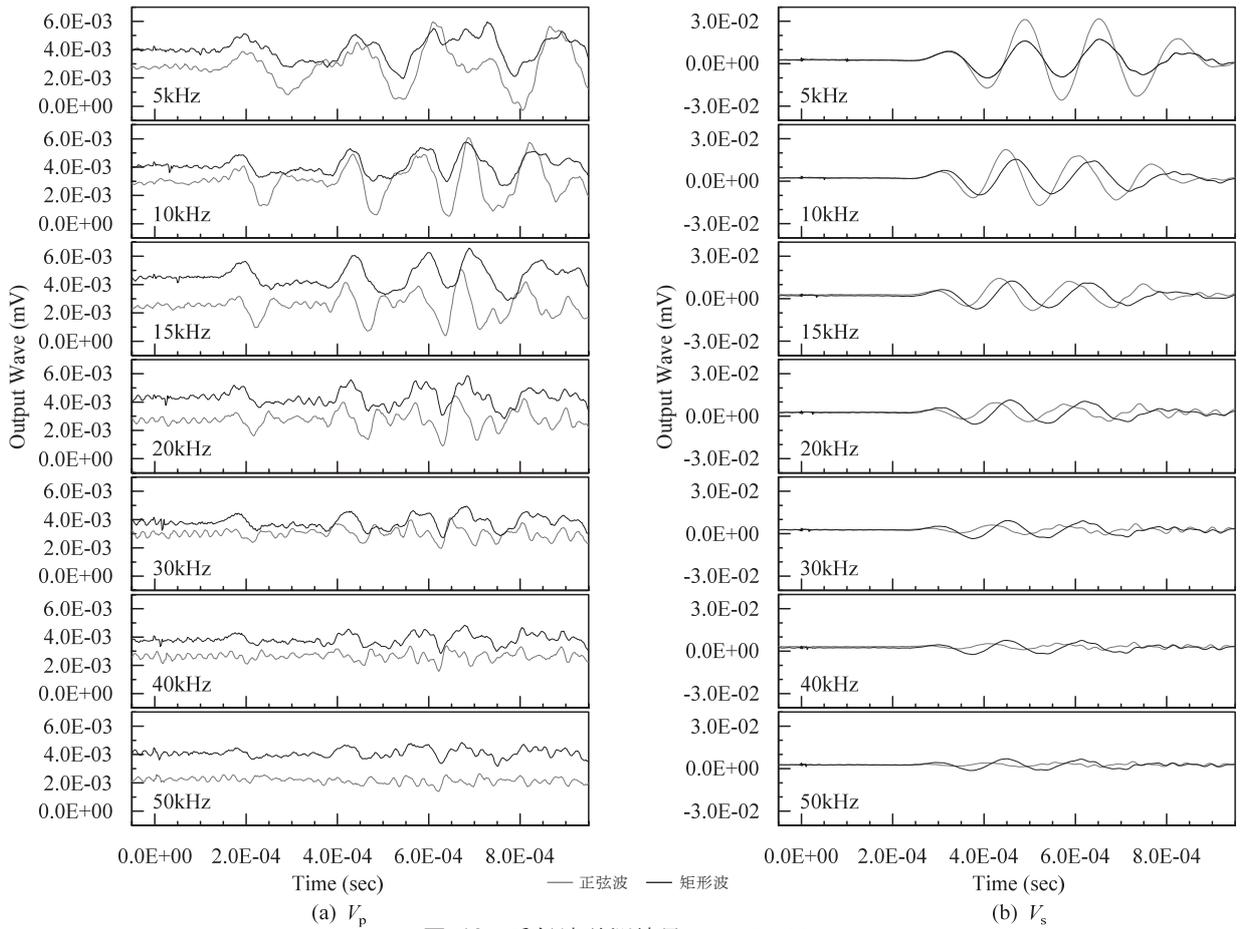


図-13 受信波計測結果 ($q_u=741\text{kPa}$)

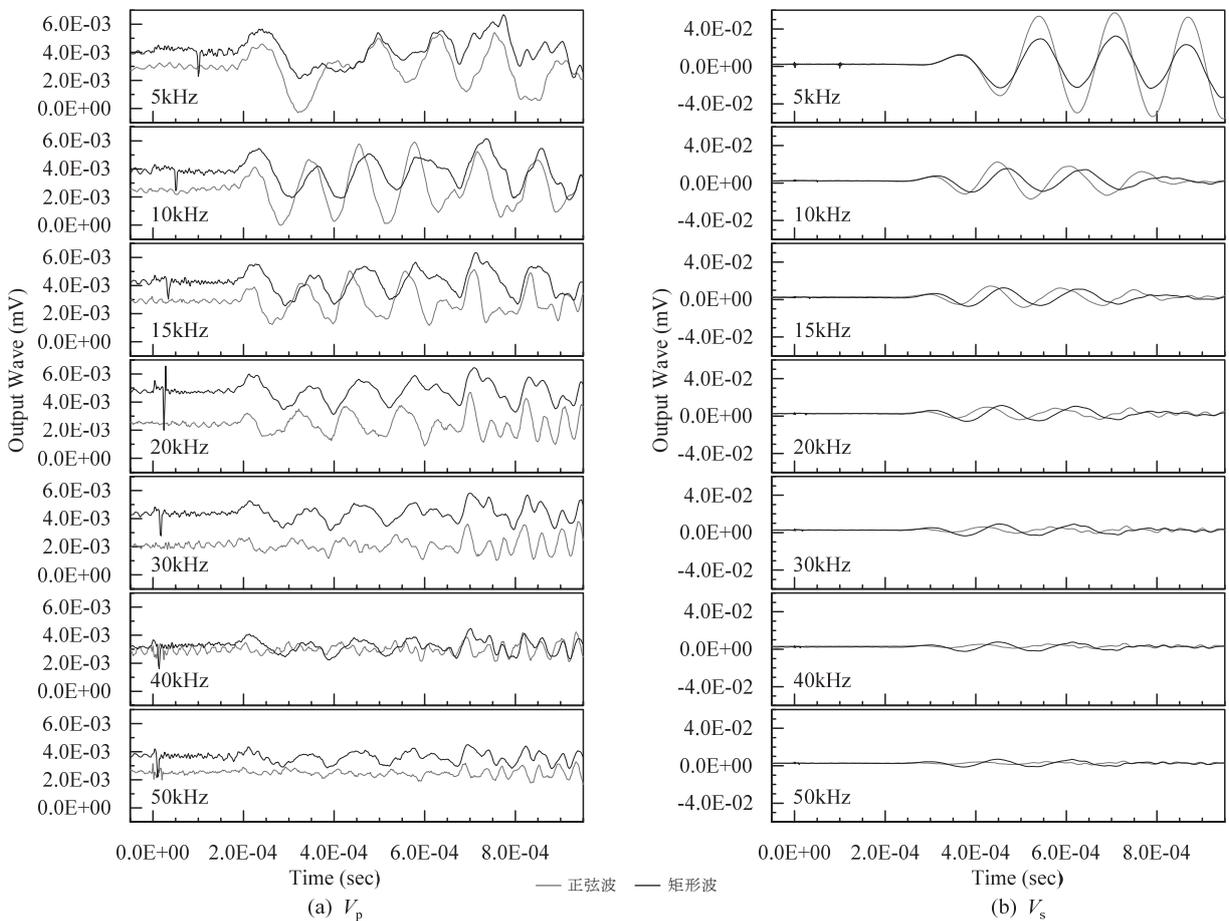


図-14 受信波計測結果 ($q_u=315\text{kPa}$)

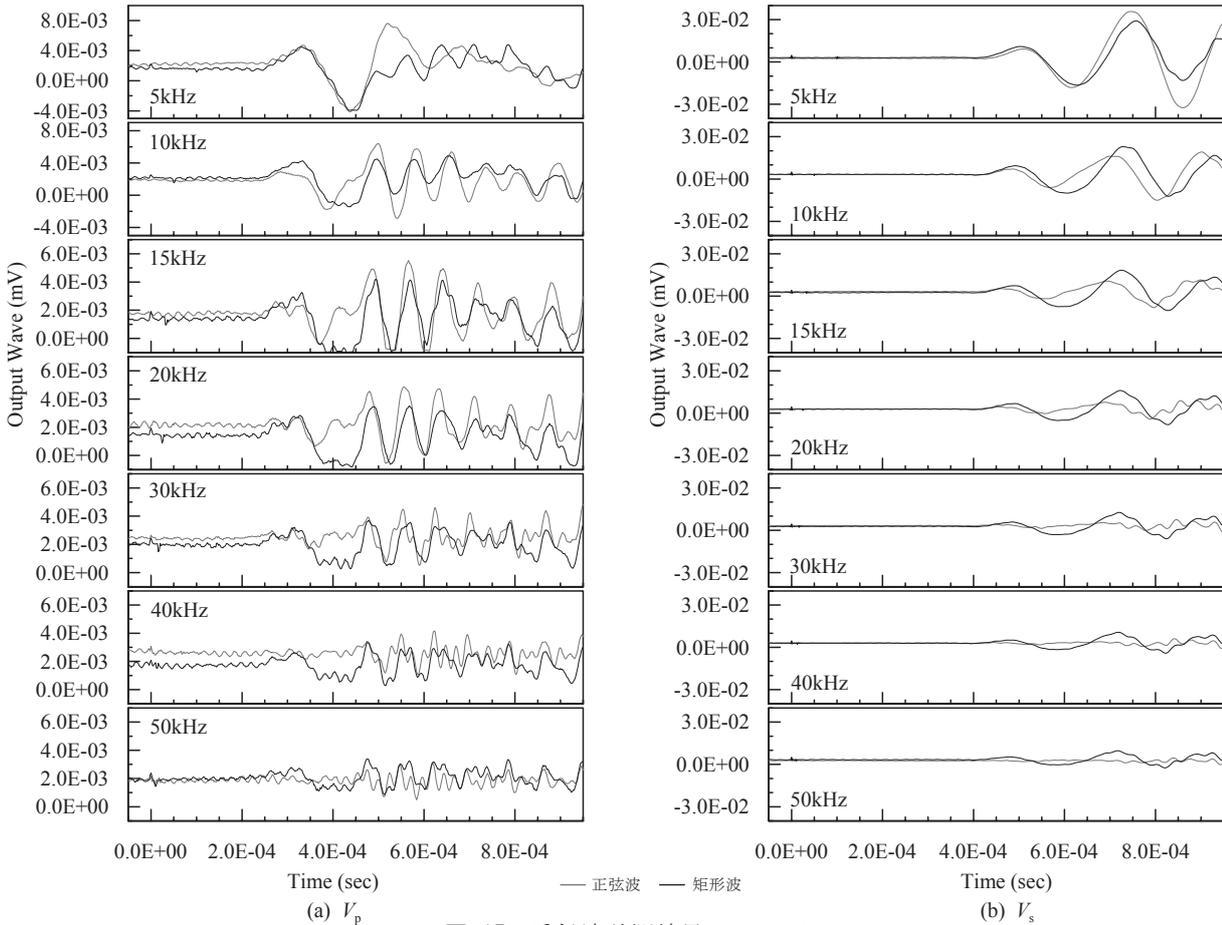


図-15 受信波計測結果 ($q_u=100\text{kPa}$)

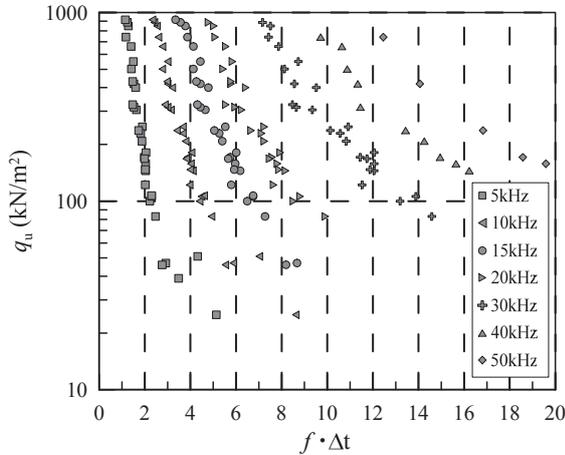


図-16 波数と q_u の関係

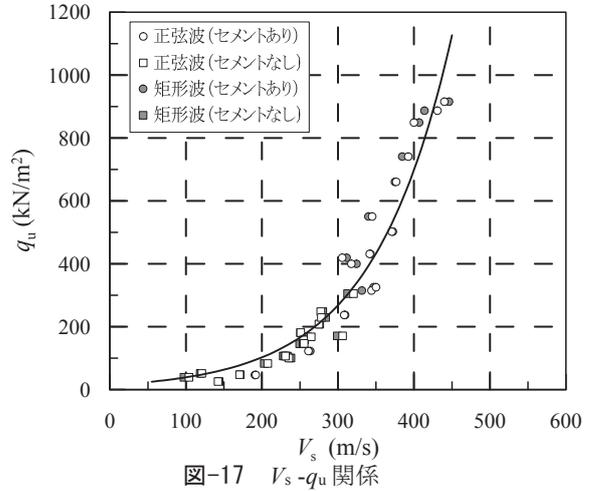


図-17 V_s - q_u 関係

時間が約 15%長い. このため, Δt_p と Δt_s の 3%以内にはほとんどのケースで満足しない. 以上から Δt は, 送受信波の立ち上がり点から求めることとした.

図-16 に, 式から求めた波数と q_u の関係を示した. プロット点は送受信波の立ち上がり点を読み取ることができ, 伝播時間を決定できたものである. これより, 周波数が大きく q_u が小さくなると, 伝播時間を決定できないケースが増加し, 送信波の周波数が 30kHz 以上ではそれが顕著になり $q_u=100\text{kN/m}^2$ 以下が読み取れないことがわかる. 図-16 より, 送信波の周波数 5kHz の約 $q_u=100\text{kN/m}^2$ 以上では 2 波長以下となっていることがわかる. 2 波長以上が推奨される理由は, near-field-effect と呼ばれる理

論上のせん断波到達時間よりも前に振幅が確認され, 受信波の立ち上がり点の決定に影響を及ぼすことがあるためである. 今回の計測結果では 2 波長以下であっても, near-field-effect の現象は確認されなかった.

以上 2 つの検討結果から各周波数の伝播時間は, P 波・S 波, 正弦波・矩形波全ての条件で, 送受信波の立ち上がり点と遅延時間を用いて求めた. そして, q_u ごとの伝播時間は, near-field-effect の現象は確認できなかったことから, 求めることができた周波数の伝播時間を平均して, 正弦波・矩形波それぞれで求めた.

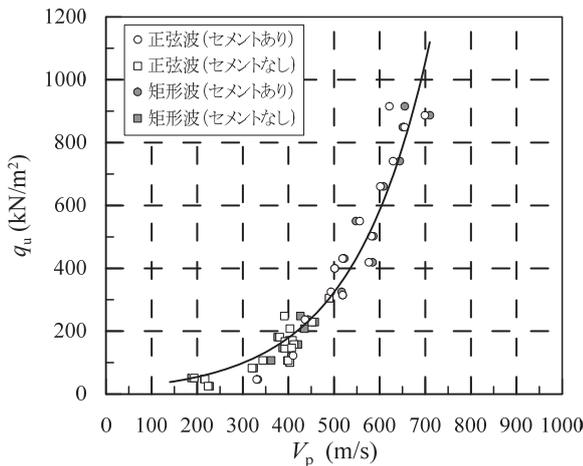


図-18 $V_p - q_u$ 関係

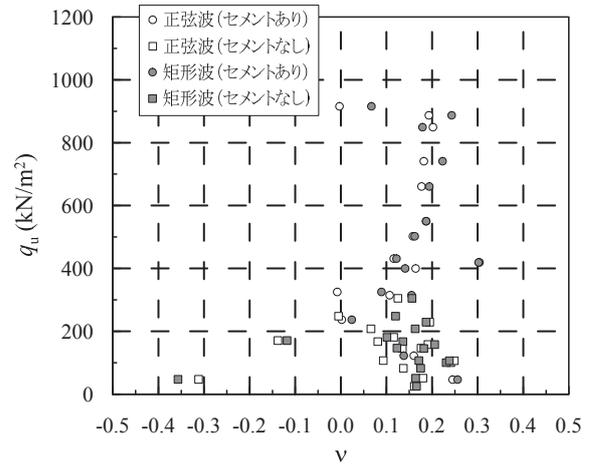


図-19 $v - q_u$ 関係

4.5 $V_s - q_u$ 関係

図-17に $V_s - q_u$ 関係を示した。 V_s に与える正弦波・矩形波の違いの影響は、図のように小さいことがわかる。一軸圧縮強度とせん断波速度の関係は既往の研究¹³⁾により検討され、次式が提案されている。

$$q_u = a \times \{\exp(b \times V_s) - 1\} \quad (4)$$

ここで a と b は土により異なる定数である。ベンダーエレメントと異なる起振方法である本装置でも同様に近似できるか検討する。なお、図-17には式(4)でより描いた近似曲線は、正弦波の結果を用いている。式(4)のパラメータは、Rの非線形回帰分析により、 $a=15.274$ 、 $b=0.00956$ となった。また、 p 値はどちらも 0.001 以下であり、推定値は有意であると判断できる。

4.6 $V_p - q_u$ 関係

図-18に $V_p - q_u$ 関係を示した。 V_p に与える正弦波・矩形波の違いの影響は、 V_p と同様に小さいことがわかる。なお、図-18には式(1)でより描いた近似曲線は、正弦波の結果を用いている。Rの非線形回帰分析により、式(1)のパラメータを求めると、 $a=17.038$ 、 $b=0.00590$ となった。 $V_s - q_u$ 関係と同様に、近似できることがわかる。

4.7 ポアソン比の変化

V_p と V_s の関係は、等方均質弾性体の物性定数の関係より式(5)のように示され、既往の研究¹⁴⁾でも V_p と V_s よりポアソン比について検討されている。

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (5)$$

図-19に弾性波測定結果と式(5)より求めた ν と q_u の関係を示した。図よりポアソン比は、0.1 から 0.25 の間にほとんどがおさまっている。 q_u との対応をみると、 $q_u=100 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ で 0.1 程度となる傾向がみられる。 $V_p - q_u$ 関係、 $V_s - q_u$ 関係は既往の研究で提案された近似式とよい一致をみたが、ポアソン比は図のように一定値を決定できるほどの結果とならなかった。考えられる理由として、図-18より $q_u=100 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ は、 $V_p=400 \text{ m/s}$ であるものが多いことが、計算されるポアソン比の結果に影響

を与えたことが考えられる。P波の受信波はS波に比べ出力電圧が小さく、S波よりも伝播時間決定が難しい。

2.1に記載したように、圧電素子への入力電圧を増加させても出力電圧がそれに応じて増加しない条件で計測を実施している。このため、出力電圧をアンプなどで増幅するなどの検討が必要であると考えている。弾性波速度と q_u の関係は、今回の伝播時間決定方法でも問題ないと考えられるが、弾性波速度からポアソン比を検討する場合には、計測方法や伝播時間決定方法に留意する必要があるといえる。

5. まとめ

日本海海底土の弾性波速度を計測するため、ベンダーエレメントとは起振方法が異なる弾性波発生装置について、ベンダーエレメントを用いた既往の計測結果と比較を行った。そして、一軸圧縮強度と弾性波速度の関係について検討を行った。以下に結果をまとめる。

- (1) ベンダーエレメントとは異なる弾性波発生装置を用いて、 V_p は水の速度、 V_s は豊浦砂の既往の研究結果と比較し、問題なく測定できることを示した。
- (2) ベンダーエレメントとは異なる弾性波発生装置を用いて計測した V_s と一軸圧縮強度の関係は、ベンダーエレメントを用いた既往の研究結果を適用することができた。
- (3) V_p と一軸圧縮強度の関係は、 V_s と一軸圧縮強度関係の式を適用できることを示した。

謝辞

応用地質 中山栄樹様には装置の作製や計測方法について助言頂きました。鳥取大学工学部 海老沼孝郎先生には模擬試料の選定などについて助言頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 産業技術総合研究所：表層型メタンハイドレートの研究開発 2019 年度 一般成果報告会，<https://unit.aist.go.jp/epri/mhpu/stmh2019.html>（参照 2020.6.15）。
- 2) 松本良，奥田義久，蛭田明宏，戸丸仁，竹内瑛一，山王梨紗，鈴木麻希，土永和博，石田泰士，石崎理，武内里香，小松原純子，Antonio Fernando FREIRE，町山栄章，青山千春，上嶋正人，弘松峰男，Glen SNYDER，沼波秀樹，佐藤幹夫，的場保望，中川洋，角和善隆，荻原成騎，柳川勝則，砂村倫成，後藤忠則，廬海龍，小林武志：日本海東縁，上越海盆の高メタンフラックス域におけるメタンハイドレートの成長と崩壊，地学雑誌，Vol.118，No.1，pp.43-71，2009。
- 3) 北山大典，森啓介，木南僚太，石田直人，海老沼孝郎，増澤隆也，中村公一，松本良：表層型メタンハイドレート分布海域の海底地盤特性，表層型メタンハイドレート・フォーラム(2017 年度研究成果報告)講演要旨集，pp.42-43，2018。
- 4) 佐伯龍男，稲盛隆穂，長久保定雄，Peter WARD，浅川栄一：佐渡南西沖のマウンド・ポックマーク群下の三次元地震波速度構造，地学雑誌，Vol.118，No.1，pp.93-110，2009。
- 5) 日本地質学会：海洋底科学の基礎，pp.207-209，2016。
- 6) 鈴木直文，真島淑夫，柴田東：室内土質試験結果の不確かさ，地盤工学ジャーナル，Vol.2，No.4，pp.339-352，2007。
- 7) 中山栄樹，横山幸也，斎藤秀樹：メタンハイドレートを胚胎するコア試料の弾性波と比抵抗特性，石油技術協会誌，Vol.74，No.4，pp.283-289，2009。
- 8) 中山栄樹，横山幸也，斎藤秀樹：メタンハイドレート胚胎試料の弾性波と比抵抗特性，第 1 回メタンハイドレート総合シンポジウム，pp.110-113，2010。
- 9) 内田明彦，畑中宗憲，田屋裕司：礫質土の K0 値測定について，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.433-436，1997。
- 10) Martin Greenspan, Carroll E. Tschiegg : Tables of the Speed of Sound in Water, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.31, pp.75-76, 1959.
- 11) 畑中宗憲，増田剛美：砂質土の P 波速度と液化化強度に及ぼす飽和度の影響，Vol.74，No.645，pp.2029-2037，2009。
- 12) 皆川秀紀，西川泰則，坂本靖英，駒井武，宮崎晋行，高原直也，山口勉，成田英夫，水谷和敬，大賀光太郎：メタンハイドレート堆積物の浸透率特性，石油技術協会誌，Vol.74，No.5，pp.472-485，2009。
- 13) 浅香美治，安部透，桂豊，杉本裕志，辰己佳裕：ベンダーエレメントを用いたせん断波速度測定によるセメント系改良地盤の非破壊検査方法，日本建築学会構造系論文集，Vol.612，pp.103-110，2007。
- 14) 堀智仁，山下聡，鈴木輝之：ベンダーエレメント試験による S 波および P 波の測定，土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.927-928，2005。

(2020 年 6 月 15 日 受付)

