

## 飽和砂質地盤における空気侵入値の定量的評価手法に関する研究

## A Study on Quantitative Evaluation Method for Air Entry Value of Saturated Sand Layer

小松 満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境学研究科)  
榊 利博 Toshihiro SAKAKI (スイス放射性廃棄物管理共同組合)

地中貯留技術 (CCS) は二酸化炭素の排出削減問題の解決策として期待されているが、筆者らは、浅層の帯水層に気体として注入する手法を提案し、これまでに溶解度を用いて貯留可能量を推定する方法や気体の貯留及び注入条件に必要なパラメータである空気侵入値 (AEV) の測定方法について検討した。また、注入後の気体の挙動を気泡運動と関係付けて整理した。今回は、17種類の砂質系試料に対し、飽和供試体に背圧を加えてその伝播挙動から求める圧力法と水分特性曲線から求める水分法により求めた AEV を比較した上で、得られた AEV に対して試料の間隙率及び平均間隙径から定量的に推定する手法について議論した。その結果、一定の相関性が見られることを確認した。

キーワード：帯水層，気体注入，AEV，間隙率，平均間隙径 (IGC : E04)

## 1. はじめに

二酸化炭素の排出削減問題の解決策の一つとして期待されているのが、二酸化炭素の地中貯留技術 (Carbon dioxide capture and storage : CCS技術) である<sup>1)</sup>。現在、主に技術開発が進んでいるのは、超臨界状態にした液化二酸化炭素を地下 800m 以深の地下帯水層へ圧入して、安定的に貯留する方法である<sup>2)</sup>。海外では、ノルウェーやカナダなどで既にプロジェクトが実施されており、国内においても新潟県長岡市の岩野原サイトで約 1 万トンの二酸化炭素を貯留する実験が行なわれ、貯留状況の詳細な調査が実施されている<sup>3)</sup>。

現在研究が進められている地中貯留において、回収した二酸化炭素は注入時に超臨界状態にする必要があるとともに、貯留地点までの運搬が必要となるため、新たなエネルギーと多大なコストが費やされることとなる。そこで筆者らは、二酸化炭素排出事業者のごく近傍において貯留することを念頭に置き、上部粘土層が存在する数十m程度の浅層海面下帯水層に気体として注入する手法に着目し、その基礎的な研究として、飽和状態の砂層に注入可能な二酸化炭素の量とその溶解挙動を計測するとともに、溶解度を用いた理論的な方法との整合性について検討した<sup>4)</sup>。

一方、地盤に空気を注入することにより地盤を不飽和化する液状化対策工法が、低コストで既設構造物直下の対策にも適用可能な工法として提案されている<sup>5)</sup>。

浅層における二酸化炭素の地中貯留技術と空気注入による液状化対策工法はいずれも地盤内に気体を直接注入する工法であり、共通点が多い。その中でも、注入圧の設

定と貯留条件に密接に関係するパラメータである空気侵入値 (Air Entry Value : AEV) を評価することが重要である。そこで、筆者らは沿岸地域で採取された試料に対する室内での要素試験を実施した<sup>6)</sup>。具体的には、岡山県水島沿岸地盤より採取されたボーリングコアから採取した砂質層とその上部のシルト層をそれぞれ注入帯水層とシルト層と想定してAEVを求めた上で、不飽和領域の挙動を評価する一次元鉛直カラム試験を行い、注入した気体の上昇現象のメカニズムを解明するとともに、気体貯留の可能性について考察した。その結果、AEVの測定については、乾燥試料に対して上部からの注水に伴う間隙空気圧を測定する方法と飽和試料に対して上下の圧力差を測定する方法について、水分特性曲線から求まる値と比較した結果、一定の整合性を確認した。これらの結果を基に、試料採取現場を貯留サイトと想定した場合、砂質層に気体注入が可能であること、静水圧と砂質層のAEVがシルト層のAEVを越えない注入圧であれば、注入気体の上昇を止め気体を貯留させることができることを示した。また、飽和帯水層への気体注入によって生じる不飽和領域の挙動は、動水勾配と関係があり、その広がり方は気泡運動で説明できることを確認した。さらに間隙空気圧、間隙水圧、水分量の3つのパラメータを同時に計測する一次元カラム試験を実施し、不飽和領域の挙動は気体注入過程と、気体注入後の貯留過程において異なることが判明したことから、それら2つの過程に生じている現象を解明することで、不飽和領域の挙動や安定条件などを推定することが可能であることを示した。

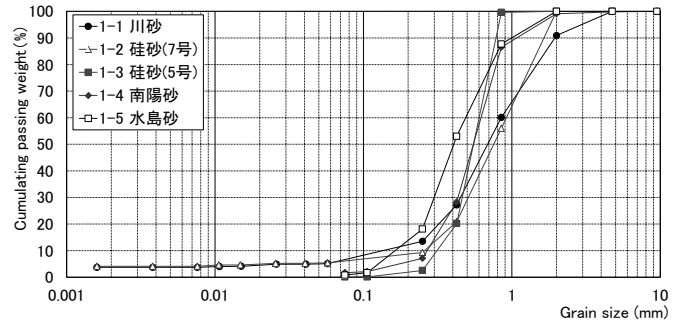
今回は、貯留可能な沿岸地域を検討する際に必要となる

注入帯水層のAEVについて、様々な試料に対する測定法の適用性とその結果を基に概略値の推定方法について検討する。具体的には、17種類の砂質試料を対象に、飽和供試体に背圧を加えてその伝播挙動から求める圧力法と水分特性曲線から求める水分法により求めたAEVを比較することで測定法の適用性について検討するとともに、得られたAEVに対して試料の間隙率及び粒度特性から定量的に推定する手法の提案を目的とした。

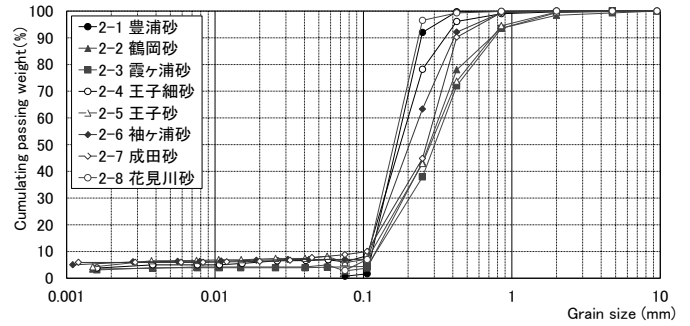
## 2. 空気侵入値(AEV)測定試験

### 2.1 試料の物理特性

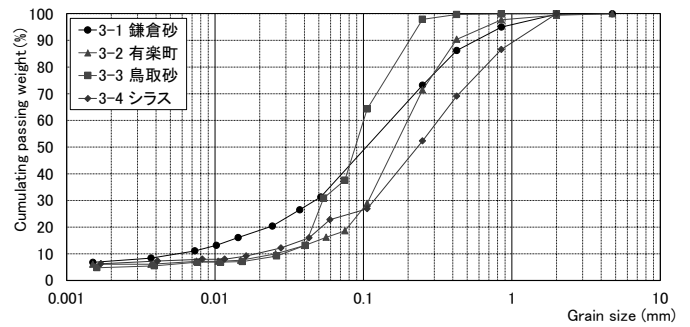
国内各地から集めた17種類の砂質系試料を使用した。これらについて粒径分布の特性が類似しているものを3つのグループに分けて整理した。分類方法としては、各試料を相対評価し、グループ1(粒径幅が狭く、粒径がやや大きい。細粒分を含まない)、グループ2(粒径幅が狭く、粒径がやや小さい。細粒分を含まない)、グループ3(粒径幅が広く、細粒分を含む)とした。JIS A 1202及びJIS A 1204に準じて測定した各試料の土粒子密度と均等係数及び曲率係数等を表-1、粒度試験結果を基に整理した粒径加積曲線を図-1にそれぞれ示す。なお、一部の試料は透過粒径2mm以下のものを使用した。また、表-1には、JIS A 1224に準じて測定した砂の最小密度・最大密度試験の結果と50%粒径の値を併記した。



(a) グループ1



(b) グループ2



(c) グループ3

図-1 各試料の粒径加積曲線

表-1 各試料の土粒子密度と粒度特性

グループ	No.	試料名	土粒子密度 ( $g/cm^3$ )	均等係数	曲率係数	最小密度 ( $g/cm^3$ )	最大密度 ( $g/cm^3$ )	50%粒径 $D_{50}$ (mm)
1	1-1	川砂(岡山県産)	2.682	4.230	1.234	1.407	1.692	0.718
	1-2	珪砂(7号)	2.682	3.561	0.854	1.336	1.614	0.776
	1-3	珪砂(5号)	2.608	1.667	1.076	1.473	1.711	0.583
	1-4	南陽砂(愛知県産)	2.618	2.139	1.131	1.317	1.641	0.545
	1-5	水島砂(岡山県産)	2.620	2.556	1.006	1.339	1.659	0.401
2	2-1	豊浦砂(山口県産)	2.636	1.588	0.961	1.315	1.626	0.182
	2-2	鶴岡砂(千葉県産)	2.696	2.434	0.978	1.366	1.699	0.283
	2-3	霞ヶ浦砂(千葉県産)	2.702	2.618	1.029	1.430	1.792	0.311
	2-4	王子細砂(東京都産)	2.672	1.845	0.968	1.081	1.389	0.191
	2-5	王子砂(東京都産)	2.694	2.739	0.980	1.212	1.486	0.289
	2-6	袖ヶ浦砂(千葉県産)	2.637	2.088	0.955	1.289	1.626	0.215
	2-7	成田砂(千葉県産)	2.764	2.802	1.159	1.398	1.717	0.269
	2-8	花見川砂(千葉県産)	2.671	1.631	0.962	1.058	1.420	0.166
3	3-1	鎌倉砂(神奈川県産)	2.762	30.167	2.034	1.225	1.564	0.141
	3-2	有楽町(東京都産)	2.715	8.120	2.384	1.199	1.595	0.172
	3-3	鳥取砂(鳥取県産)	2.598	3.161	0.925	0.786	1.132	0.082
	3-4	シラス(鹿児島県産)	2.403	16.421	2.552	0.958	1.276	0.232

2.2 圧力法による AEV の測定

供試体を毛管の集合体と考えると、载荷空気圧、間隙水圧、毛管圧の関係は式(1)のように表すことができる<sup>6)</sup>。

$$P_2 = P_1 + \frac{mg}{A} - P_c \quad (1)$$

ここで、 $P_1$ : 载荷空気圧(kPa)、 $P_2$ : 間隙水圧(kPa)、 $P_c$ : 毛管圧(kPa)、 $mg$ : 水に働く重力(kN)、 $A$ : 供試体の断面積(m<sup>2</sup>)である。毛管圧 $P_c$ はAEVと等しいので、AEVを求めるには、式(1)を $P_c$ について解くことで求められる。そこで、 $P_1$ と $P_2$ は供試体上部及び下部の圧力センサーで計測し、 $mg$ は飽和供試体の高さ下部圧力センサーの計測点の差から求めた。なお、AEVの値は水頭換算(cm)として表示した。

この方法を基に作成した試験装置の概略を図-2に示す。φ10cmの亚克力製のカラム内に試料を水中落下により投入した後、十分に締め固めて飽和供試体を作成した。供試体の下部は、ろ紙を介して水で満たされた土台に接続されている。カラムは密閉されており、上部からコンプレッ

サーによって空気圧を载荷できる。非排水条件で段階的に空気圧を载荷させていき、カラム下部の水槽の水圧と上部の载荷空気圧を圧力センサーで測定し、その結果からAEVを算出した<sup>6)</sup>。

試験結果の一例として、グループ 1~3 のそれぞれから川砂、豊浦砂、鎌倉砂を取り上げ、図-3 及び図-4 に示す。

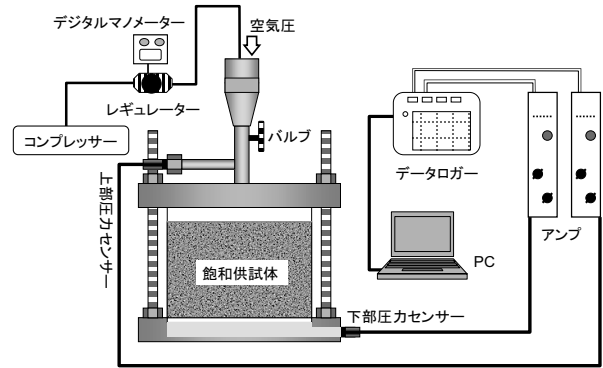
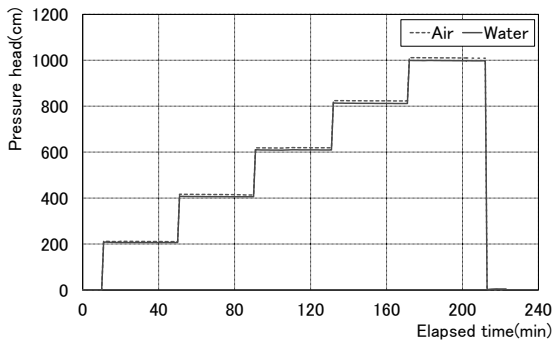
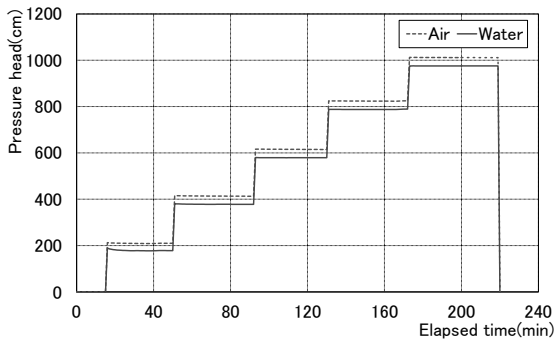


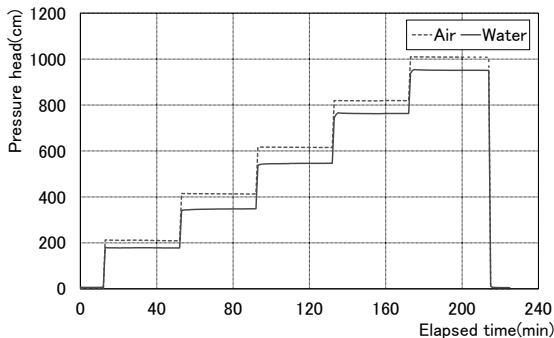
図-2 飽和試料に対するAEV測定試験装置<sup>6)</sup>



(a) 1-1 川砂

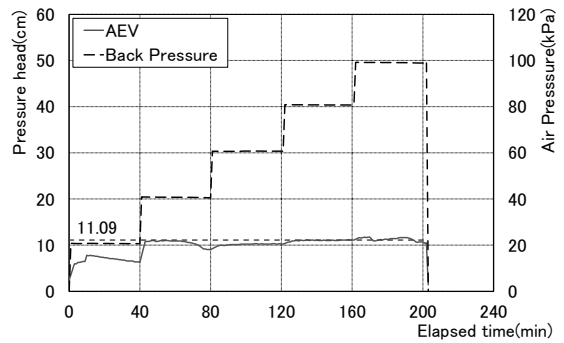


(b) 2-1 豊浦砂

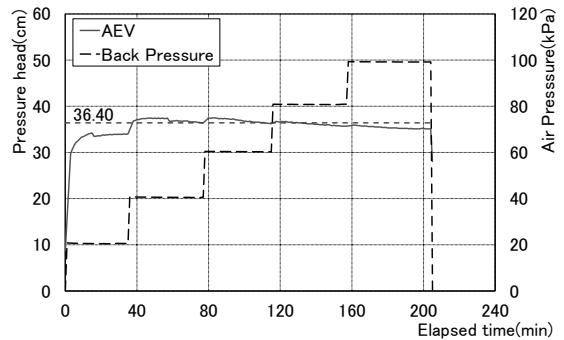


(c) 3-1 鎌倉砂

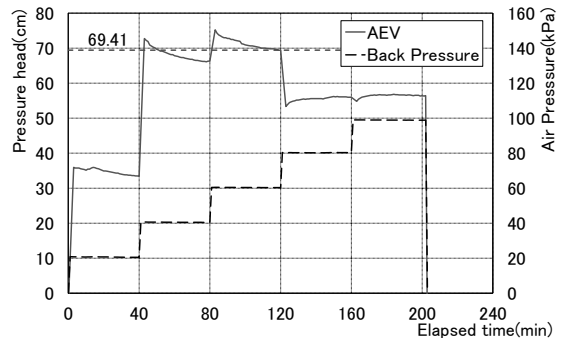
図-3 圧力法による計測値の経時変化



(a) 1-1 川砂



(b) 2-1 豊浦砂



(c) 3-1 鎌倉砂

図-4 圧力法による AEV 測定試験結果

図-3は20kPaずつ上昇させた際の载荷空気圧( $P_1$ )と供試体下端の間隙水圧( $P_2$ )の経時変化であり、図-4はその結果を基に求められた毛管圧( $P_c$ )、すなわちAEVの経時変化である。なお、同図の右軸には载荷空気圧 (Back Pressure) の値 (kPa) を併記している。段階的に空気圧を载荷しても、载荷空気圧と水圧の差はある一定の値を示していることがわかる。また、得られたAEVは若干の時間的な変化がみられたことから、最も高い値を示した段階における平均値で評価することとした。なお、鎌倉砂に代表されるグループ3に分類される試料については、载荷圧力上昇時に一時的に大きな圧力差を生じたことでAEVが急激に上昇する結果を示したが、圧力伝播の時間的な遅れを表しているものと判断できる。また、高い圧力段階でAEVが低下する傾向を示したことは、供試体の変形に伴って間隙水が供試体の表面に浸出したことが原因で毛管圧が低下した可能性が推察される。

### 2.3 水分法による AEV の測定

AEVは水分特性曲線から求めることもできる。そこで、各試料に対して、保水性試験のうち土柱法あるいは吸引法を用いて水分特性曲線を求めることでAEVを測定した。

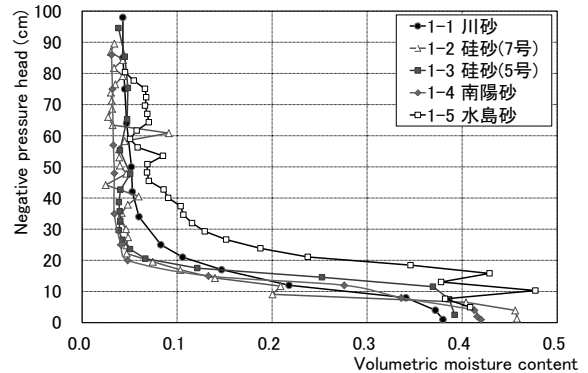
#### (1) 土柱法による測定

土柱法による保水性試験は、内径  $\phi 50\text{mm}$ 、高さ 25mm のカラムを 33 個積み重ねた土柱に水中落下で試料を投入した後でカラムを叩く方法で、飽和供試体を作製した。試験は供試体下部から排水を行い、排水が完全に停止したのを確認後、カラムを解体し、炉乾燥により体積含水率を測定した。結果を図-5に示す。なお、負の圧力水頭の値は、各カラムの中心高さを水頭換算した。飽和領域が大きな体積含水率を示す試料において測定値がばらつく傾向を示した。これは、試料作成時の水中落下により部分的に細粒分と粗粒分が分離したことが影響していると推察される。

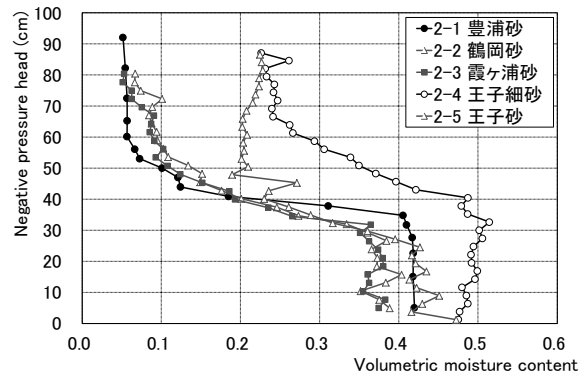
#### (2) 吸引法による測定

一部の試料 (2-6 袖ヶ浦砂, 2-7 成田砂) に対して、吸引法を用いて水分特性曲線を測定した。使用した試験装置を図-6に示す。直径  $\phi 10\text{cm}$ 、高さ 10cm のアクリル製カラムの底に飽和させたセラミックディスクを取り付けるとともに、カラムの中心にセラミックカップ内に脱気水を入れて負圧計測を可能とした圧力計と FDR 水分計を設置した。そして、試料を水中に投入した後で締め固めにより飽和供試体を作製した。計測方法は、排水タンクとの高さを段階的に増加させて供試体内に負圧を発生させる方式で行い、各計測器の出力値の経時変化を測定した。なお、各段階で圧力計と水分計の計測値が一定になるのを確認し、その定常値をプロットする形で結果を整理した。

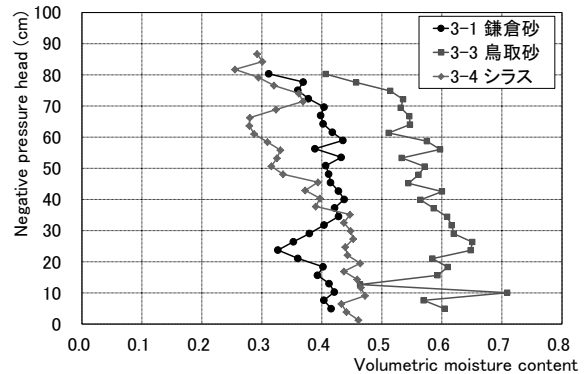
この試験により測定した水分特性曲線を図-7に示す。土柱法の測定結果と比較して、供試体の間隙状態が一定であることから、測定値のばらつきが小さく飽和領域から不飽和領域に遷移する部分が明瞭である特徴が確認できた。



(a) グループ1



(b) グループ2



(c) グループ3

図-5 保水性試験 (土柱法) 試験結果

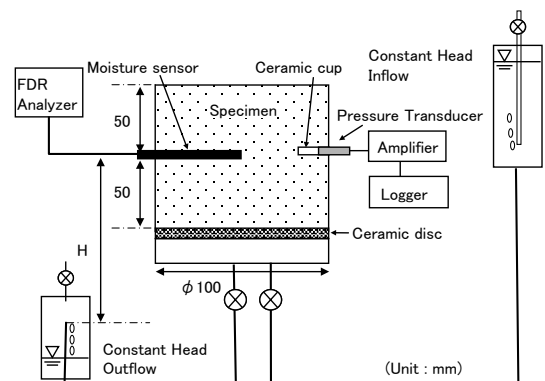


図-6 保水性試験 (吸引法) 装置概略図

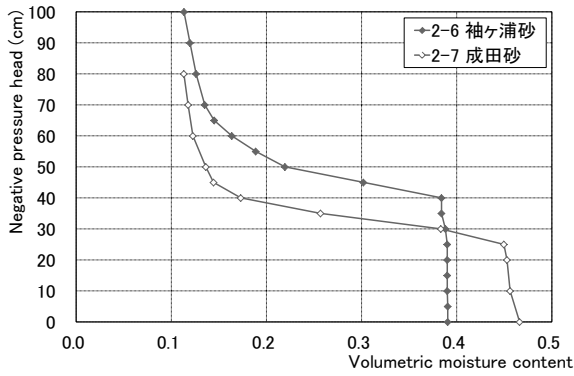


図-7 保水性試験（吸引法）試験結果

(3) 水分特性曲線からの AEV 推定

Brooksらは水分特性曲線を表すモデルを推定する中で、空気侵入値 (AEV) を次式(2)により定義している<sup>7)</sup>。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cdot 10^2 = \left(\frac{h_b}{h_p}\right)^\lambda \cdot 10^2, \quad h_b \geq h_p \quad (2)$$

ここで、 $S_e$  : 有効飽和度(%),  $h_p$  : サクション(水頭換算, cm),  $h_b$  : AEV(水頭換算, cm),  $\lambda$  : 土の種類で決まるパラメータである。この式の両辺を  $10^2$  で除して、さらに対数をとると次式となる<sup>8)</sup>。

$$\log\left(\frac{S_e}{10^2}\right) = \lambda(\log|h_b| - \log|h_p|) \quad (3)$$

豊浦砂の水分特性曲線に対して  $|h_p| \sim S_e/10^2$  の関係を両対数軸で整理した結果を図-8 に示す。この関係を基に、上式(3)の  $\lambda$  と  $h_b$  (AEV) を未知数として、最小二乗法を用いて解を求めた。その結果の一例として、図-9 に川砂、豊浦砂、鎌倉砂の  $|h_p| \sim S_e/10^2$  の関係を示し、上記の方法で求めた  $\lambda$  と  $h_b$  (AEV) の結果を図中に併記する。

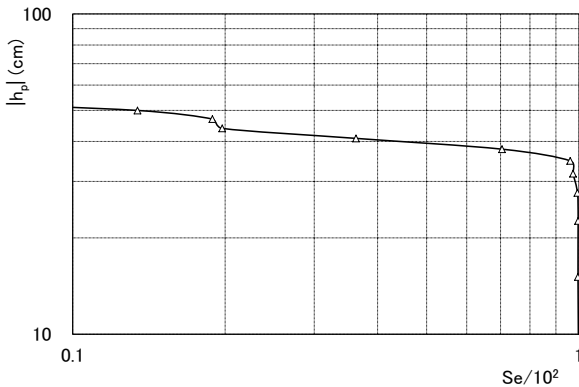
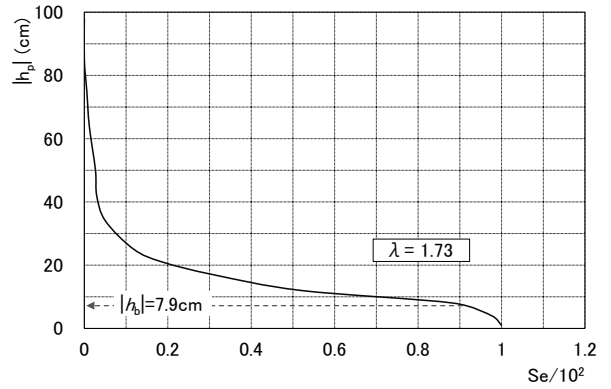


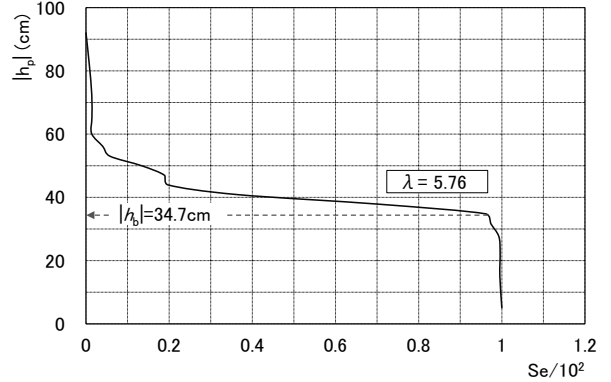
図-8  $|h_p| \sim Se/10^2$  の関係 (豊浦砂)

2.4 圧力法と水分法による AEV の測定値の比較

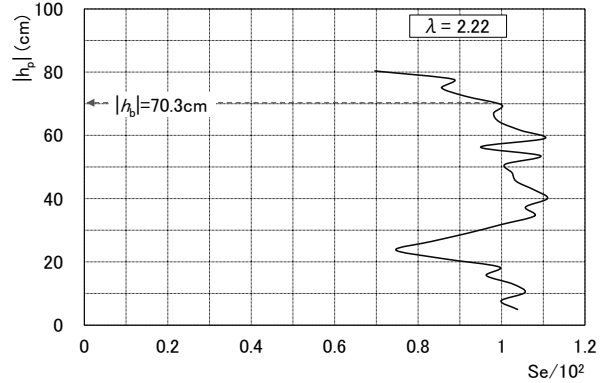
上述の飽和供試体に背圧を加えてその伝播挙動から求める圧力法と水分特性曲線から求める水分法により求めた AEV を比較することで測定法の適用性について評価した。表-2 に圧力法と水分法による測定結果をまとめる。また、図-10 にそれぞれの値をプロットした関係図を示す。



(a) 1-1 川砂



(b) 2-1 豊浦砂



(c) 3-1 鎌倉砂

図-9  $|h_p| \sim Se/10^2$  の関係と求めた  $\lambda$  と  $h_b$  の値

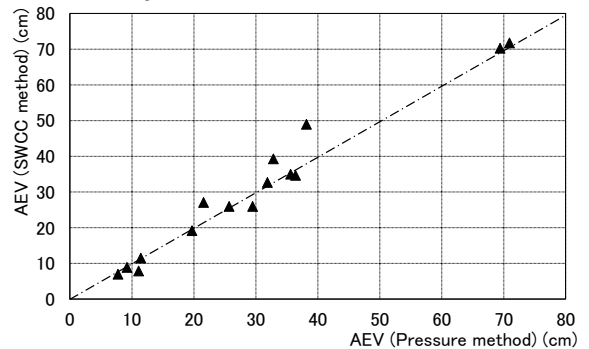


図-10 水分法と圧力法により得られた AEV の比較

同図より、一部の試料に対して水分法で得られた値 (図中の SWCC method) が若干高くなる傾向を示した。両者の差異は 1 つを除いて最大 10cm 未満であることから、全体的に見ると両者はほぼ整合するものであると判断できる。

表-2 各試料に対して圧力法と水分法により求めた AEV の値

グループ	No.	試料名	50%粒径 D <sub>50</sub> (mm)	間隙率	間隙比	相対密度 (%)	AEV (cm) 圧力法	AEV (cm) 水分法
1	1-1	川砂(岡山県産)	0.718	0.396	0.656	77.9	11.09	7.9
	1-2	珪砂(7号)	0.776	0.432	0.760	71.5	7.75	7.0
	1-3	珪砂(5号)	0.583	0.382	0.617	62.3	11.43	11.5
	1-4	南陽砂(愛知県産)	0.545	0.444	0.797	48.5	9.20	8.9
	1-5	水島砂(岡山県産)	0.401	0.412	0.702	67.5	19.69	19.2
2	2-1	豊浦砂(山口県産)	0.182	0.409	0.691	81.6	36.40	34.7
	2-2	鶴岡砂(千葉県産)	0.283	0.416	0.713	67.4	21.56	27.1
	2-3	霞ヶ浦砂(千葉県産)	0.311	0.396	0.655	61.4	31.86	32.7
	2-4	王子細砂(東京都産)	0.191	0.546	1.201	49.4	38.16	49.0
	2-5	王子砂(東京都産)	0.289	0.496	0.983	58.4	29.48	26.0
	2-6	袖ヶ浦砂(千葉県産)	0.215	0.432	0.760	67.4	32.82	39.3
	2-7	成田砂(千葉県産)	0.269	0.419	0.720	69.9	25.68	26.0
	2-8	花見川砂(千葉県産)	0.166	0.498	0.991	82.8	40.71	—
3	3-1	鎌倉砂(神奈川県産)	0.141	0.482	0.932	66.1	69.41	70.3
	3-2	有楽町(東京都産)	0.172	0.470	0.886	67.3	41.25	—
	3-3	鳥取砂(鳥取県産)	0.082	0.609	1.557	74.0	70.92	71.8
	3-4	シラス(鹿児島県産)	0.232	0.491	0.965	86.9	35.61	35.0

### 3. 空気侵入値 (AEV) の定量的評価手法

既往の研究として、「空気圧入法」に代表される土の透気特性から間隙径分布を計測する手法<sup>8)~10)</sup>が提案されているが、AEVを推定する手法は確立されていない。そこで、注入帯水層の概略値としてのAEVを試料の粒度特性及び間隙率等から定量的に推定する手法について議論する。

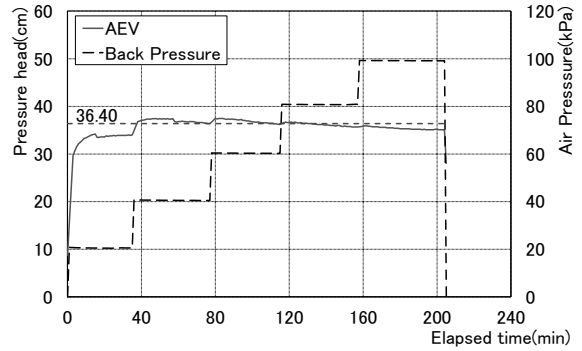
#### 3.1 間隙率に対する検証

豊浦砂を用いて種々の間隙率で供試体を作成し、図-2 に示した圧力法によってAEVを測定した結果を図-11に示す。なお、同図の右軸には載荷空気圧 (Back Pressure) の値 (kPa) を併記している。これらの図を比較すると、間隙率が低下 (相対密度が増加) するほど毛管力の影響が大きくなることでAEVが増加する傾向が見受けられる。また、図-12にAEVと間隙率及び相対密度との関係を示す。いずれも相関関係が認められたことから、地盤の間隙状態にあわせて適切なAEVが評価できる可能性が示唆された。

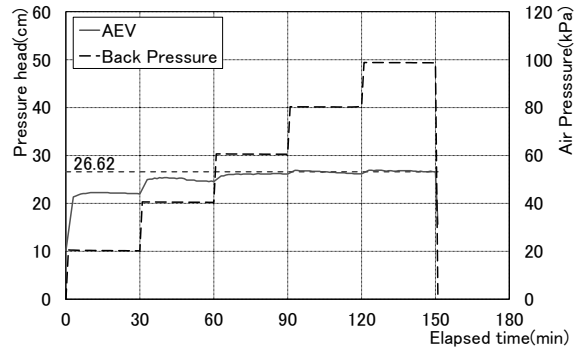
#### 3.2 粒度特性に対する検証

同一試料に対するAEVは、上述のように間隙率や相対密度で一定の評価を行うことができる。そこで、次に、試料の粒度特性から評価する方法について検証する。

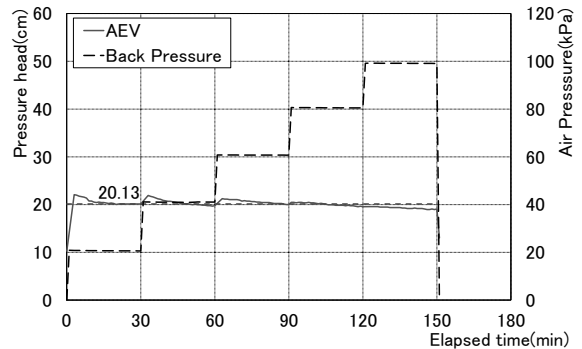
図-13に表-2を基に整理した各試料に対して十分に締め固めて作成した飽和供試体に対して圧力法で測定したAEVと間隙率及び相対密度との関係を示すが、相関は低い結果となった。このことは、試料の粒度特性が大きく影響していることを示している。そこで、図-14に各粒度特性との関係を示す。50%粒径であるD<sub>50</sub>との相関が認められたが、均等係数及び曲率係数との相関は低い結果となった。



(a) 高密度試料 (間隙率 0.409, 相対密度 81.6%)

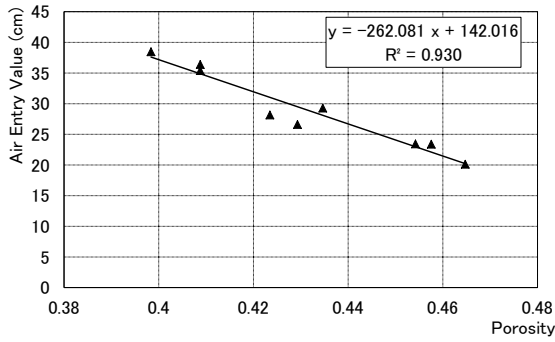


(b) 中密度試料 (間隙率 0.429, 相対密度 65.7%)

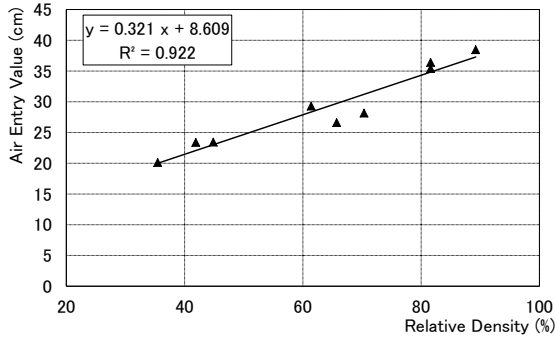


(c) 低密度試料 (間隙率 0.465, 相対密度 35.5%)

図-11 AEV 測定試験結果 (圧力法：豊浦砂)

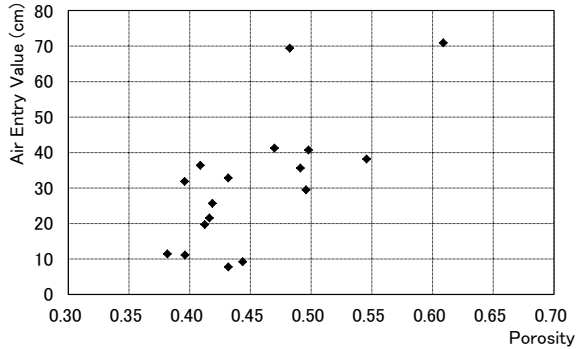


(a) 間隙率

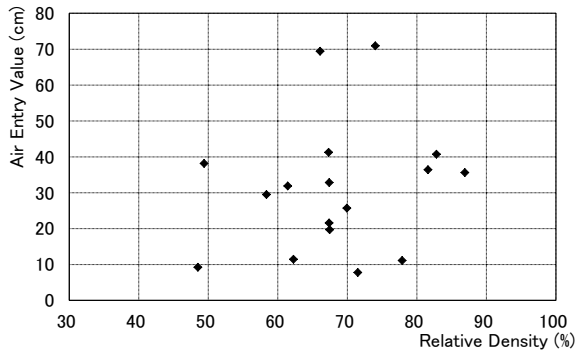


(b) 相対密度

図-12 AEVと間隙率及び相対密度との関係（豊浦砂）



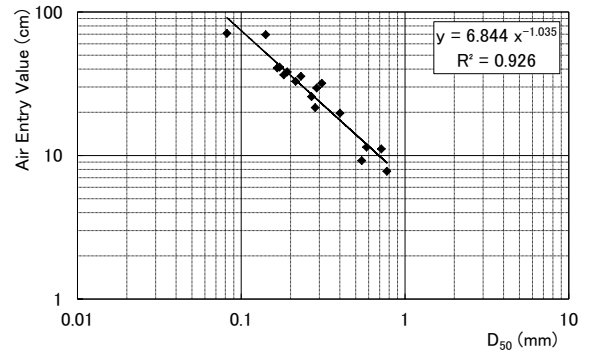
(a) 間隙率



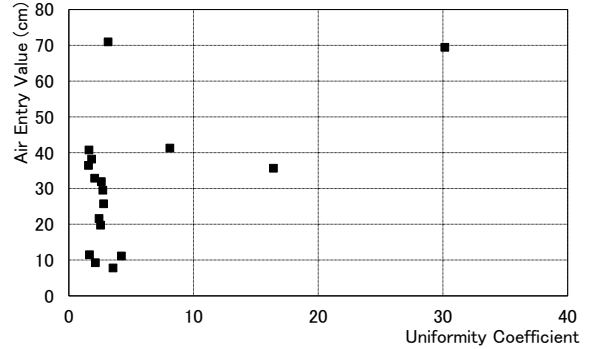
(b) 相対密度

図-13 AEVと間隙率及び相対密度との関係（全試料）

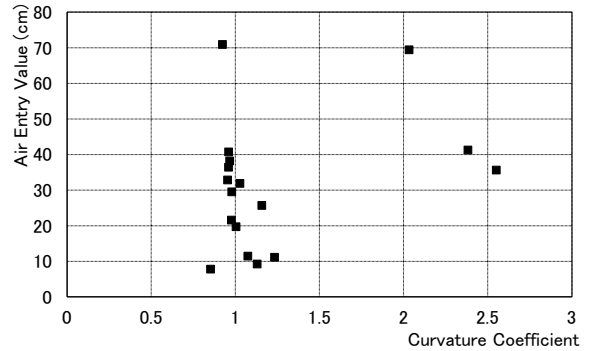
次に、これらの結果を平均粒径及び平均間隙径に対して整理する<sup>8)</sup>。まず、本論で用いる平均粒径 ( $D_w$ ) は50%粒径 ( $D_{50}$ ) と異なるパラメータとして次式(4)で定義されているものである。つまり、粒径の重みつき調和平均値として与えられ、透水係数を推定するZunker式やKozeny-Donat式に用いられている。



(a) 50%粒径 ( $D_{50}$ )



(b) 均等係数



(c) 曲率係数

図-14 AEVと粒度特性との関係

$$D_w = \frac{1}{\sum (P_i/D_i)} \quad (4)$$

ここで、 $D_w$ ：平均粒径(mm)、 $P_i$ ：試料全体に占める任意の粒径分布範囲における質量比、 $D_i$ ： $P_i$ が占める中心粒径(mm)である。なお、 $D_i$ は粒度試験におけるふるい分析の各ふるいの開き目の寸法及び沈降分析における土粒子径の中間径をとり、 $P_i$ はその粒径範囲の値を算出した。

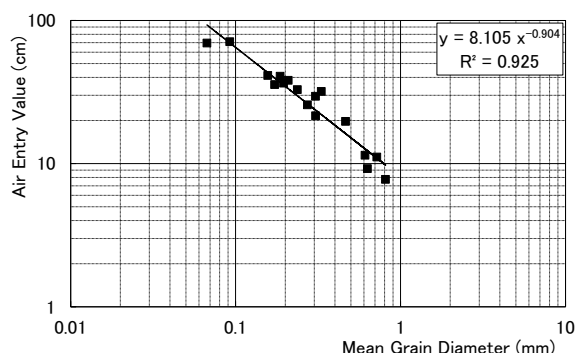
平均間隙径はHagen-Poiseuille式を土の毛細管モデルに適用した際の毛細管の直径として表され、径深と土の比表面積及び間隙比の関係により、次式(4)で示される<sup>10)</sup>。

$$\frac{R}{D_w} = \frac{2}{3}e \quad (5)$$

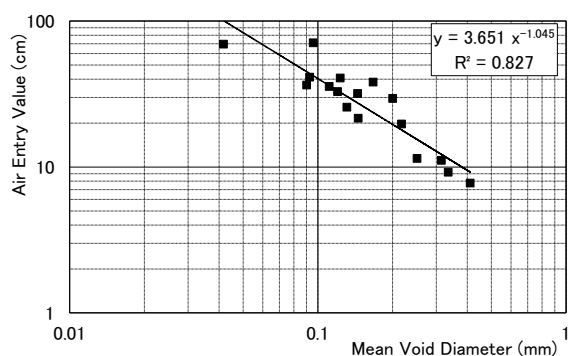
ここで、 $R$ ：平均間隙径(mm)、 $e$ ：間隙率である。

上式により算出した平均粒径及び平均間隙径と圧力法により測定したAEVとの関係を50%粒径の場合と同様に両対数グラフで図-15に示す。いずれも若干のばらつきがあるものの比較的良好な関係を示した。特に平均粒径は

50%粒径と同様に高い相関を示していることから、AEVの概略値を推定するプロセスとして、50%粒径や平均粒径を基にすることが妥当であると判断できる。なお、先に述べた通り、これらの評価の基にした値は、各試料を水中で十分に締め固めて作成した飽和供試体に対して圧力法で測定したAEVの結果である。つまり、各試料の状態量（間隙率や相対密度等）が異なれば、これらの相関関係が変化する可能性があることに注意が必要である。



(a) 平均粒径



(b) 平均間隙径

図-15 AEVと粒度特性との関係

#### 4. まとめ

本研究では、大規模排出源近郊の沿岸地域において浅層の帯水層に気体の二酸化炭素を地中貯留することを想定し、貯留及び圧入条件に必要なパラメータである空気侵入値（AEV）の定量的評価手法の提案を目的とした。具体的には17種類の砂質系試料に対し、飽和供試体に背圧を加えてその伝播挙動から求める圧力法と水分特性曲線から求める水分法により求めたAEVを比較することで測定法の適用性について評価するとともに、得られたAEVに対して試料の粒度特性及び間隙率から定量的に推定する手法について議論した。得られた知見を下記に列挙する。

(1) 圧力法と水分法により求めたAEVを比較した結果、

一定の整合性を見出すことができた。

- (2) 同一試料に対するAEVと間隙率及び相対密度の関係について、豊浦砂に線形の相関性が見られることを確認した。つまり、粒度特性の他にこれらの状態量を把握しておく必要があることを示唆する結果となった。
- (3) 50%粒径や既往の研究で示された平均粒径及び平均間隙径と圧力法により測定したAEVとの関係を整理した結果、比較的良好な関係を示したことから、AEVの概略値を推定するプロセスとして、50%粒径や平均粒径を基にすることが妥当であると判断できる。

今後の課題としては、実際に間隙分布を観察した結果から平均間隙径を求めることで、AEVを評価するプロセスを検証することが挙げられる。

#### 謝辞

本研究における室内試験の実施にあたり、眞鍋康雄氏（平成24年3月岡山大学卒業、現四国中央市）に多大なご尽力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 萩原義孝:CO<sub>2</sub>地中貯留の動向:土木学会誌, Vol.95, No.6, pp.22-23, 2010.
- 2) 林栄治, 松本弘:二酸化炭素の地中貯留, 地盤工学会誌, Vol.57, No.2, pp.18-21, 2009.
- 3) 財団法人地球環境技術研究機構:二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告, p.27, 2007.
- 4) 小松満・藤田知大:二酸化炭素の浅層帯水層への注入に関する基礎的研究, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.137-143, 2010.
- 5) 西垣誠・小松満・藤井直・大内正敏:液状化防止を目的とした地盤の不飽和化に関する実験的研究, 土木学会論文集C, Vol.64, No.2, pp.340-352, 2008.
- 6) 小松満・藤田知大・榎利博:浅層帯水層への気体注入及びその移動現象に関する研究, 地盤と建設, Vol.29, No.1, pp.27-37, 2011.
- 7) Brooks, R.H. and A.T.Corey: Properties of porous media affecting fluid flow, ASCE, Vol.92, IR.2, pp.61-88, 1996.
- 8) 宇野尚雄・神谷浩二・田中宏路:「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, No.603, III-44, pp.35-44, 1998.
- 9) 神谷浩二・宇野尚雄・松島健之:「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測, 土木学会論文集, No.541, III-35, pp.189-198, 1996.
- 10) 宇野尚雄・杉井俊夫・神谷浩二:比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No.469, III-23, pp.25-34, 1993.

(2012年6月27日 受付)