

土の可能性を感じられる技術者の育成

Cultivating engineers who can see the potential of soil

小峯 秀雄

正会員 早稲田大学理工学術院創造理工学部社会環境工学科教授

「土って、面白い」という感性の育成

幼児の頃を、思い出してほしい。著者は毎日、泥だらけになって帰宅し、母に叱られた。しかし、泥んこ遊びは甘美な思い出である。今は「最高級で、とってもし剣な泥んこ遊び」と考えて、高度な土質実験を日夜進めている。実際は、早稲田大学地盤工学研究室（以降、早大地盤研）のメンバーが鋭意推進しており、取得される実験データを基盤に学術的議論が随時展開されている。そして実は、このような研究成果が、これからの日本、いや世界・地球を救うと確信している。本稿では、そのほんの一例を紹介するとともに、未来水劫、永続するかもしれない「土」の可能性を感じられる技術者を育成する上での考えを述べてみたい。

土は、何相の物質？

土とは、固相、液相、気相の集合体であり、その質量割合もしくは体積割合に応じて、固体、液体、気体のいずれの振る舞いも呈することができる。このように、多くの土木系大学では土質力学の初歩として教授されていると思う。著者も同様の講義をするが、付け加えて「実際には、もっと数多くの相で構成されている」と話している。したがって、実際には土が、どのような振る舞いをするかの予測は極めて難しく、固いと思っていた地盤が地震時に液化したり、降雨時に地滑りを起こしたりする。

その一方で、予想外の新しい素材としての視点もある。いくつもの特性を具備した物質の集合体と考えると、素晴らしい可能性が見えてくる。早大地盤研では、固相として、モンモリロナイトと呼ばれる粘土鉱物や種々の特性を持つ微小鉱物、バライト、



KOMINE Hideo

1962年東京都生まれ。1987年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程建設工学（土木）専攻修了。（財）電力中央研究所、茨城大学を経て、2014年4月より早稲田大学教授。専門は土木工学・地盤工学。博士（工学）。

随伴鉱物、配合砂・礫、炭酸塩、金属コロイド、感染性蛋白質^{たんぱく}粒子や鳥インフルエンザウイルス等に分解して考えている。産業廃棄物処分場に使用される土質系遮水材中には、ウイルス等も存在する可能性があるからである。液相も、自由水、吸着水、層間水、固定相水、電解質、結晶水、水和陽イオンなど、非常に細かく分ける。気相も空気や二酸化炭素、メタンガス等を考える。

図1の左図を見てほしい。これは、物質密度が2.5 g/cm³の液体である。そして、これも土質材料である。大学の土木系学科で開講されている土質力学では、一般的な土粒子の密度は、2.65 g/cm³程度と学習したことと思う。では先の液体は、いったい何でできているのか。実は、水に、物質密度が4.2 g/m³のバライト粉末とベントナイトを混合したものである。この新しい土質材料は「超重泥水」と名付けられ、福島第一原子力発電所の廃止措置において、高い放射線遮蔽性能と遮水性の両方を持つ材料と



図1 超重泥水(左:写真は、NB研/ホージュン/早大地盤研の氏家伸介氏提供)と技術研究組合国際廃炉研究開発機構(IRID)プロジェクトへの貢献(右)(<https://www.nb-institute.com/nb%e6%8a%80%e8%11%93%e7%b4%b9%e4%bb%8b/nbc/>)

して、活用が考えられている(図1右)。密度の大きい物質はガンマ線遮蔽に、そして、水素原子の多い物質は中性子の減速に有効である。すなわち、重く水を大量に保有する「超重泥水」の優れた点であり、いくつもの相で構成される土質材料だからこそ、創造できる新材料と言える。

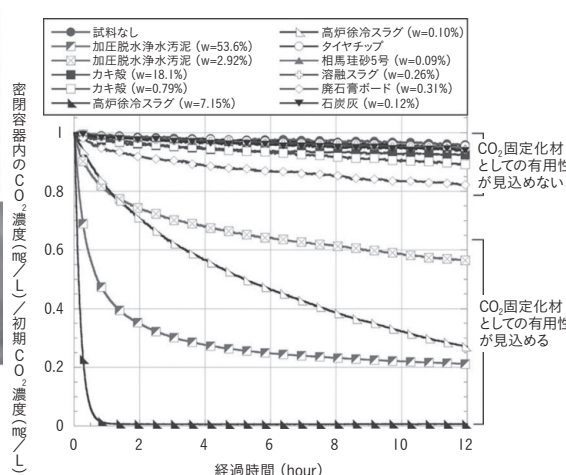
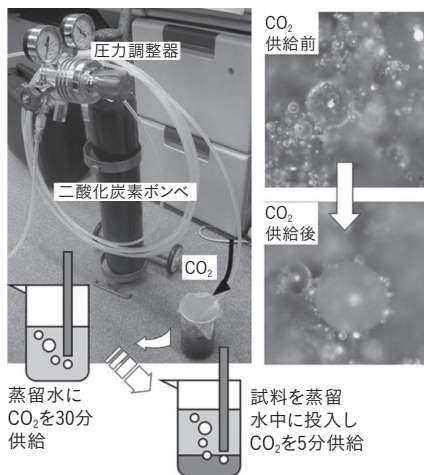


図2 遊離カルシウムを含有する石炭灰のCO₂固定化の様子(左)と都市副産物のCO₂固定化性能(右)

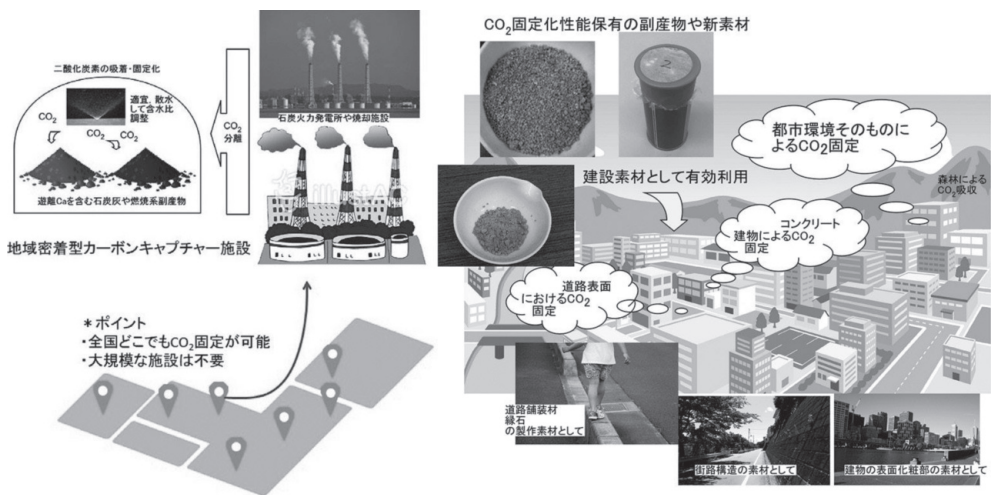


図3 CO₂固定化性能土質材料を活用したカーボンキャッチャー未来社会の創生

日本各地の廃棄物処分場を活用した地域密着型カーボンキャッチャー構想

*ポイント
・全国どこでもCO₂固定が可能
・大規模な施設は不要

CO₂固定化性能素材を活用したカーボンキャッチャー未来社会の創生

呼吸する土質材料

もう一つ、面白い土の話をしよう。土木工学分野で扱う土には、自然が生成した「土」もあるが、人間活動に伴い排出される物質も、「土」として土地造成や建材などに使われている。早大地盤研では、都市

活動に伴い発生する副産物も、研究対象としている。その中には、遊離カルシウムを多量に含むものもあり、CO₂を固定できるものがある。このような材料は、いわば呼吸する土質材料とも言え、脱炭素社会の創生に、大いに役立つ可能性がある。本当に、そんな無機物がCO₂を固定するのか?と思われる方も多いと思うので、図2に、学術論文として発表さ

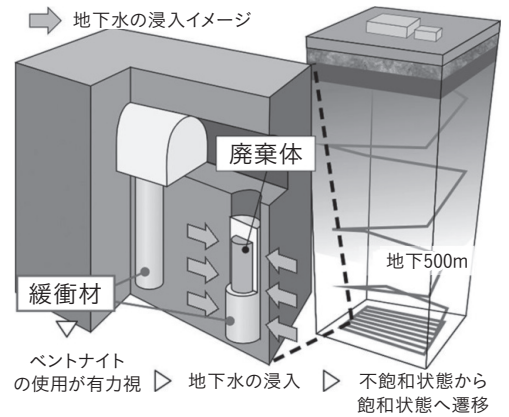


図4 ベントナイトの膨潤挙動と高レベル放射性廃棄物地層処分施設の概要

まだまだある土の魔訶不思議と そんな土が地球を救う

図4左は、ベントナイトと呼ばれる粘土の挙動を示す。右は水を吸う前の様子で、それに水を吸わせると、左のように液体になることなく（もちろん、軟らかくなるが）、体積が4〜5倍に膨らむ。

このような現象は「膨潤現象」と呼ばれており、地滑りの一因と考えられるとともに、この性質を活用して、廃棄物最終処分場の遮水工の材料に使われ、また化粧品やペイント材料などにも用いられている。この粘土は、極めて低い透水係数を呈し、有害な物質を吸着・収着することにより、その移行を抑制することが可能である。このような特性の観点から、高レベル放射性廃棄物地層処分のキーデバイスとも言える「緩衝材」を構築する主材料として有望視されている(図4右)⁽³⁾。また、超長期的なプロジェクトであり、地震や地殻変動等により、緩衝材内部に亀裂などが発生しても、この「膨潤現象」により、自らの亀裂をシールする性能を有している点も、優位性が高いと考えられている。

土の特性は、人の一生よりも長い

前節で、ベントナイトと呼ばれる土を紹介した。この土は、ものすごく水を通しにくい性質を持つ。これも高レベル放射性廃棄物地層処分で使用される理由の一つである。危険な物質を地下水と接触させ

にくくし、できる限り長く、人間の生活圏や一般環境と隔離するためである。このベントナイトの透水係数は、締め固めることにより 10^{-11} ～ 10^{-12} cm/s にもできる。読者には相場観を持ってもらうために、土質力学の初歩で学修するダルシーの法則に基づき、この透水係数の値の意味を考えていただきたい。ぜひ机の引き出しから電卓を出して、これからの話を計算して考えてほしい。先の透水係数の場合、動水勾配が1という条件において、ダルシーの法則で規定される水分子の速度は、 10^{-11} ～ 10^{-12} cm/s となる。このように記しても、まだ、なかなか分かりにくい。それでは、この水分子の速度の逆数をとってみよう。単位は、s/cm となる。すなわち、ベントナイトの中で水分子が1cm先に進むことに要する時間になる。すなわち、 10^{11} ～ 10^{12} s の時間をかけて、水分子はベントナイト中を1cm先に進むということである。さて、 10^{11} ～ 10^{12} s すなわち 10^{11} ～ 10^{12} 秒を、相場観を感じられるよう、読者の皆さんには単位換算していただきたい。まず、秒を60で除すと分になる。それを60で除すと時間になり、そして、24で除して日に引き続き、365で除すと年になる。どうであったであろうか。このベントナイトの中を水分子が1cm前に進むのに要する時間は、ダルシーの法則で規定される速度で考えると、人の一生をはるかに超える年月になることが、読者にもお分かりであろう。土の特性は、人の一生よりも長く、世代を超えて、その性能を発揮し続けるのである。なんてロマンチックなのであろう。

れたデータを一例として示す⁽²⁾。

これらのCO₂固定化性能を保有する各種都市副産物は、もしかしたら、現在、世界的に推進されている脱炭素社会の創生の切り札的存在になるかもしれない。図3は、そんな未来社会を描いたものである。新しい未来社会を、「土」が変えるかもしれない。夢は広がるばかりである。



さて本稿では、紙面スペースの関係で、ほんの少しの紹介にとどめた。土にはさまざまな特性がもつともつとある。それらの活用には、限りない可能性を感じる。その様子を示す動画教材を、巻末に紹介している。

「地球のお医者さん」という意識

「土」の英訳の一つに、earthがある、レアアースなども、土である。著者は、土質力学・地盤工学を専門とする土木技術者であるが、最近、「地球のお医者さん」という意識も芽生えている⁽¹⁾。人間が、数多くの細胞で構成されていると考えられると、「土」はいわば、地球の細胞に相当するのかもしれない。そういえば、恩師の一人、早稲田大学名誉教授の後藤正司先生（元地盤工学会会長）の最終講義で、「神は地面の土を使って人間を作った」と旧約聖書の「創世記」で記されていることを、学部4年生の時に教えていただいた。最初の人間「アダム」は、ヘブライ語で「土、地面」を意味するとのことである。そう考えると、人間と土の相似性は間違っていないかもしれない。地球を構成している単位としての「土」を専門にするということは、地球そのものの行く末を考え続ける宿命にあるように思う。人間を対象とする医学が永遠に発展し続けるように、地球を対象とする土木工学も、永遠に発展し続けなければならない。とりわけ、地球の細胞に相当する「土」を専門とする地盤工学は、地球の根源にも迫るように、探求し続

けなければならないのかもしれない。

土の可能性を感じられる人材の育成へ

読者にも分かっていたただけであらうか。土は、摩訶不思議で魅力的な物質である。土木系大学で土質力学を学ぶとき、どうしても単位取得や期末試験が頭に浮かんでしまい、覚えることがたくさんあつて、数式もたくさん出てきてという印象になりがちである。高校の教科で例えるなら、歴史のような印象であらう。テストになると嫌われがちな教科である。しかし、歴史小説や大河ドラマでの歴史はともロマンチックである。土質力学も同様で、実際の社会では、とてもロマンチックな学問分野である。そして、土のロマンチックな特性を知れば知るほど、その応用の広さに、多くの人が驚愕する。それは、今回紹介したように、従来の土木工学にとどまらず、これからの未来社会の創生に大いに活用できる。これからの未来を支える方々には、そんな土の可能性に目を向けて、新しい分野を切り開いていただきたい。一例として、早稲田大学で展開している新しい学問体系「廃炉地盤工学」の人材育成を、少しだけ紹介しよう。「廃炉地盤工学」は、原子力工学の技術者と協働し、福島第一原子力発電所の廃止措置をはじめ、今後予定されている数多くの廃炉事業に、土木工学の観点から貢献できる技術者の育成を目指した新しい学問体系である⁽⁵⁾。詳しくは、巻末のwebサイトにおいて、多くの人材育成の取り組みとヒン

トを紹介している。ぜひ、アクセスしていただきたい。

なお今回は、土木学会誌の特集の趣旨を踏まえて、土のさまざまな特性を、未来社会の創生に活用するという夢のある視点で紹介した。その一方、この土のさまざまな特性が、地盤災害を誘発していることも忘れてはならない。土の持つ摩訶不思議な特性を、学術的に探究し、その知見を未来社会の創生と今ある自然の危機からの回避の両面に応用できる技術者の育成が求められている。

土の魅力を伝授する情報提供・教材webサイト

【土の摩訶不思議な特性を知る実験のいろいろ】<http://www.fwaseda.jp/hkonline/SoilDemo.html>
 【廃炉地盤工学webサイト】<https://www.hairo-jiban.org/>
 【廃炉地盤工学・研究・人材育成プロジェクトの概要動画15分】<https://waseda.box.com/s/9g4tr6jzyobzina25tvefngazwzr8pn>
 【廃炉地盤工学・人材育成プログラム動画集】<http://www.fwaseda.jp/hkonline/Decommissioning.html>

参考文献

- (1) 吉川絵麻、小峯秀雄、後藤茂、吉村貞、鈴木聡彦、成島誠一、新井靖典、氏家伸介、佐古田又規、長江泰史・土質系材料の放射線遮蔽性能の定量評価、土木学会論文集C（地盤工学）、第73巻、第4号、342～354頁、2017年
- (2) 小峯秀雄・土質系材料のCO₂固定化性能を活用した地域密着型カーボンキャプチャー構想と気候変動緩和策、地盤工学会誌、第67巻、第4号、16～19頁、2019年
- (3) 小峯秀雄・放射性廃棄物処分に対する地盤工学の役割、地盤工学会誌、第63巻、第6号、1～3頁、2015年
- (4) 小峯秀雄・医学との比較に基づく土木の未来、電力土木、第413号、3～6頁、2021年
- (5) 小峯秀雄、後藤茂、鈴木誠、菱岡宗介、渡邊保貴、東畑郁生・廃炉地盤工学の提唱とカリキュラムの試作、土木学会論文集H（教育）、第75巻、第1号、10～19頁、2019年