

土の活性度と物理化学的性質に関する一考察

日野 剛徳¹ 根上 武仁² 柴 錦春²
 姫野 季之³ 陣内 隆文⁴

1. はじめに

土の活性度は、その物理化学的性質を間接的に示すことから、地盤環境の判定や化学的地盤改良工法適用時の参考値として期待される。しかし、同値が最近の学術・技術の場で検討される機会は少なくなっている。

有明海沿岸低平地域では、有明海沿岸道路建設プロジェクトの進行に伴い、多くの地盤調査結果が蓄積されつつある¹⁾。

本報では、土の活性度について改めて理解するとともに、佐賀県政下の有明海沿岸道路建設プロジェクトで掘削された8箇所の基準ボーリング結果を用い、当地における活性度の地域的・深さ的性質を検討した結果について述べる。

2. 土の活性度

2.1 活性度の定義

Skempton²⁾によって示された活性度(=A("A"ctivity))は次式で示され、多くの学術・技術書で説明されてきている。なお、Skemptonによる次式(1)の分母については「 $2\mu\text{m}$ 未満($<2\mu\text{m}$)の粘土分含有量(%)」と示されているが、近年の和文版学術・技術書では「 $2\mu\text{m}$ 以下($\leq 2\mu\text{m}$)の粘土分含有量(%)」と示されるようになってきている。

$$A = \frac{\text{塑性指数} I_p}{2\mu\text{m} \text{未満} (<2\mu\text{m}) \text{の粘土分含有量} (\%)} \quad (1)^{2)}$$

さらに、活性度の説明として、近年の和文版学術・技術書では次のような原文によって記述されてきている。

1) 界面作用の大きな粘土粒子を多量に含む土の I_p は大きい。また、 $I_p / (\text{粘土分} \%)$ は粒子一個の界面作用の尺度とみてよく、これを活性度と呼ぶ。活性度が粘土鉱物の種類に応じた固有の値をとることは、上の説明からあきらかであろう。³⁾

2) 一般に、粘土分の含有量が多い土ほど液性限界は高く、塑性を示す含水比の範囲、すなわち塑性指数 I_p が大きい。ただし、粘土分の含有量が同じでも、電気的な性質の活発なスメクタイトなどの粘土鉱物の含有量が多い土ほど I_p が大きくなる。(中略)活性度は細粒土の堆積時の環境や含有粘土鉱物の推定などにも用いられる。⁴⁾

3) 活性度Aは、粘性土の活性の程度を表したもので、次式(前述の(1)式)で求められる。⁵⁾(ただし、前述の(1)式において分母が「 $2\mu\text{m}$ 以下($\leq 2\mu\text{m}$)の粘土分含有量(%)」のように示されている。)

2.2 活性度と物理化学的性質の関係

活性度の説明について、地盤工学会では次の説明を続けているが、補足にとどめている。

4) 活性とは、他の物質を吸着したり、化学的に結合する傾向の強さをいう。⁵⁾

Mitchellは、活性度の説明に至るまでに、結晶構造、鉱物学的性質、土構造、土の構成の定義、土と水、粘土-水電解質系、土の集合系および測定、有効応力と全応力、土の構成と工学的性質、のように、事前に多くの物理化学的知識を踏まえさせている⁶⁾。その上で、活性度の事例として表-1の結果を示している。他方、嘉門・浅川は、代表的粘土鉱物の特徴として表-2の内容を示している。

表-1および表-2より、モンモリロナイト(正しくは、スメクタイト族に属するモンモリロナイ

1 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター

2 佐賀大学大学院工学系研究科都市工学専攻

3 佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程

4 佐賀県立唐津工業高等学校

ト種⁹⁾) およびカオリナイトを選び、両者の特性について再整理したのが図-1である。同図から、土の活性度が1.25を超え、高活性と判断される場合、スメクタイト(モンモリロナイト)のような粘土鉱物が含有されていること、同粘土鉱物は高い比表面積および陽イオン交換容量のために化学的な反応に敏感なこと、粒度組成によらず高液性限界を示す根拠になること、などのように推定される。

表-1 様々な粘土鉱物の活性度⁷⁾

鉱物	活性度
スメクタイト	1~7
イライト	0.5~1
カオリナイト	0.5
ハロイサイト (2H ₂ O)	0.5
ハロイサイト (4H ₂ O)	0.1
アタパルジャイト	0.5~1.2
アロフェン	0.5~1.2

他方、活性度が0.5を下回る低活性な土の場合、カオリナイトのような粘土鉱物が含有されていること、同粘土鉱物は低い比表面積および陽イオン交換容量のために化学的な反応に鈍感なこと、粒度組成によらず低液性限界を示す根拠になること、などのように推定される。

図-2に、土粒子・水界面のイオン・水分子吸着水の模式図を示す。粘土鉱物の比表面積および陽イオン交換容量が液性限界の高低に関連するのは、前者の値が高ければ同図中の吸着水(強吸着水・弱吸着水)の量が増し、低ければ吸着水の量が減ることによる。

2.3 活性度の理解に認められる課題

前節までに示してきた活性度に関する理解は、近年の和文版学術・技術書においては嘉門・浅川によるものが詳しい¹¹⁾。また、山口による同書では、活性度に関する理解の以前に粘土粒子の物理

表-2 代表的な粘土鉱物の特徴⁸⁾

粘土鉱物	粒子の大きさ	比表面積 (m ² /g)	陽イオン交換容量 (meq/100g)	形態	備考
カオリナイト	d=0.3~3 μm t=d/3~d/10	10~20	3~15	不整形六角板状、または鱗片状	結晶度の低いものは、周辺がギザギザしており、粒径も小さい。
ハロイサイト	外径: 0.07 μm 内径: 0.04 μm 長さ: 0.5 μm	40~100	10~40	細長い中空管状、球状 短冊状	
パーミキュライト	d ≤ 2 μm t = d/10 (t _{min} = 数 10 Å)	5~400	150~200	不定形板状または薄片状	粒径範囲が広い。水に分散させたとき、微細粒子が観察される。
イライト	d=0.1~2 μm t=d/10	60~100	10~40	不定形板状または薄片状 不整形六角板状	
モンモリロナイト	d=0.1~1 μm t=d/100	800	100~150	無定形板状または薄片状 水で分散したとき薄膜状	{d=0.02~0.2 μm t=20 Å という報告もある。

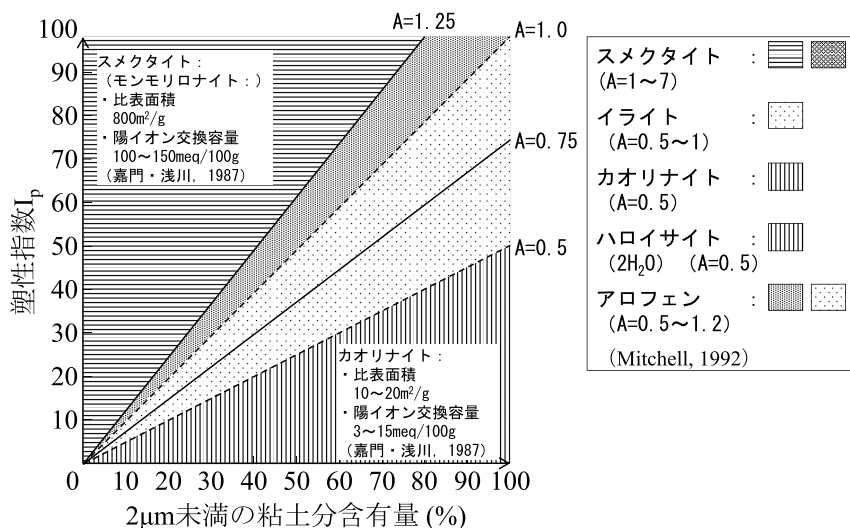


図-1 活性度と物理化学的性質の関係

化学に関する章が設けられていた¹²⁾。今日の活性度に関する理解は、土のコンシステンシーに関する説明において、世界各地の土の値が示される程度の簡易な記述のみであり、真意が伝えられているとはいえない。

前述のように、活性度の理解には土の堆積時の環境や含有粘土鉱物の推定などが期待されているが、(1)式の分子に塑性指数が用いられていることも課題になる。これまでの研究事例に基づけば、2次的な地盤環境の変化¹⁴⁾が塑性限界に及ぼす影響は小さい反面、液性限界に及ぼす影響は大きいことがわかってきている¹⁵⁾。堆積当時の液性限界が塩分溶脱現象などによる2次的な地盤環境の変化に伴い低下すると、塑性指数も低下する。粒度組成が不変の場合、図-1上で活性度の値は鉛直下方に低下することになる。結果として、かつては高活性の土が現在では低活性の土になっている可能性が否定できなくなり、堆積時の環境の復元に誤った情報をもたらしてしまうことになる。

図-3に、粘土化へのプロセスを示す。典型的な高活性を示すモンモリロナイトと低活性を示すカオリン鉱物との間で可逆性の関係が認められる。2次的な地盤環境の変化には、かつてのアルカリ環境から酸性環境に転じるものがある¹⁴⁾。同図におけるモンモリロナイトのカオリン鉱物化は、酸性から中性の環境下で生じる。これらは土の粒度組成を変化させ、鉱物自ら比表面積や陽イオン交換容量をも変化させ、結果として活性度を変化させる可能性を示している。

土にアロフェンが含まれている場合、同鉱物の活性度は図-1の関係において0.5から1.25の範囲に分布するため、注意が必要である。同鉱物の表面電荷は、図-2の事例とは逆の正の電荷を有しており、固着層および拡散層に吸着されるイオンは陰イオンとなるため、他の鉱物を含む土との間で物理化学的性質を違えることになる。

以上のことから、活性度の理解として、あくま

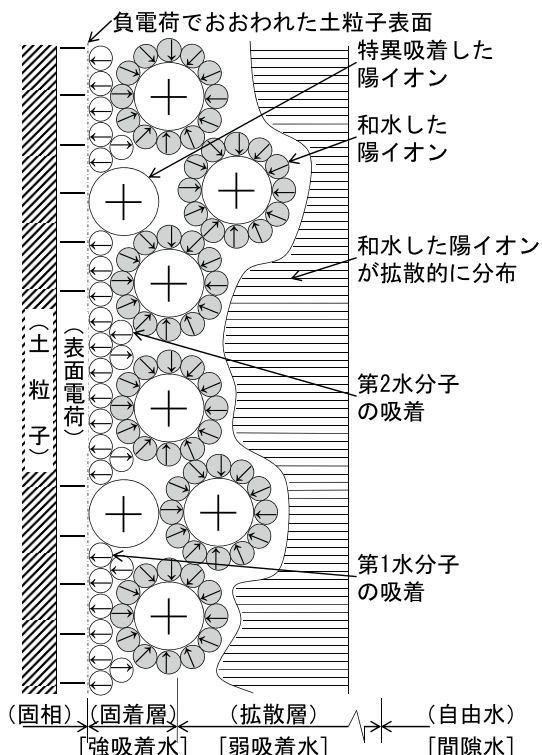


図-2 土粒子・水界面のイオン・水分子吸着水の模式図¹⁰⁾

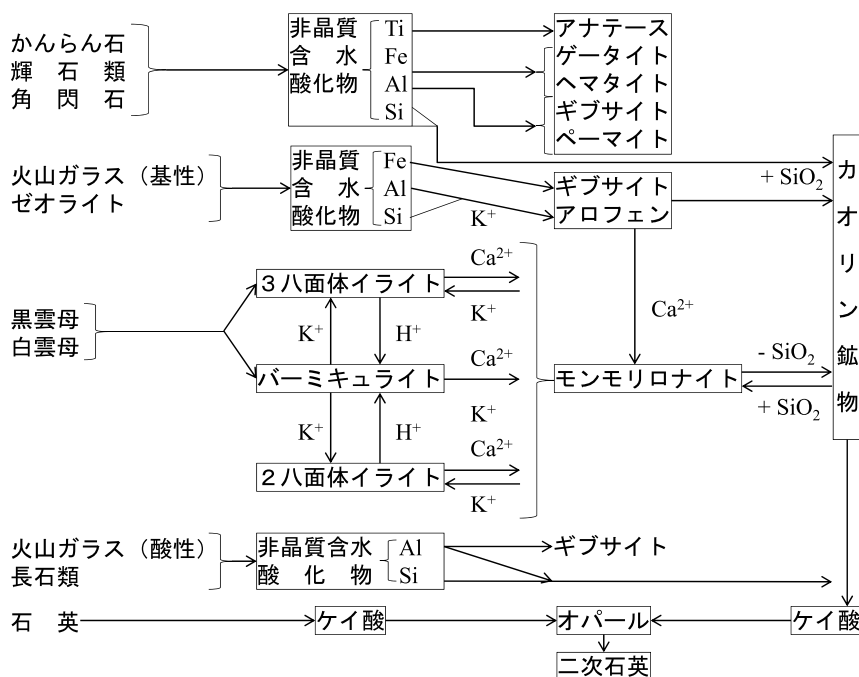


図-3 粘土化へのプロセス¹³⁾

で調査時点における土の鉱物学的性質、比表面積、陽イオン交換容量、化学的反応性、液性限界の数値の根拠、などの推定に活かされるほうが無難といえる。アロフェンとそれ以外の鉱物の含有に関する単純な見分け方として、土に対する塩化カルシウムの添加が挙げられる¹⁵⁾。塩化カルシウムの添加によって液性限界や練返し強さの値の増加が認められれば、アロフェンの含有は否定されることになる。

3. 有明海沿岸低平地における活性度の地域的・深さ的性質に関する検討

3.1 基準ボーリング「嘉瀬コア」における活性度

図-4に、本報の検討に供した基準ボーリング群の調査位置を示す。図-5に、これらの調査結

果の事例として、嘉瀬コアと呼ぶ基準ボーリングの調査結果を示す。基準ボーリング群の掘削は、佐賀県政下の有明海沿岸道路（佐賀福富道路）における技術検討の段階において、2003（平成15）年度から2005（平成17）年度の季節的な地下水位の回復の時期（稲作期後）¹⁶⁾に行われている¹⁷⁾。

嘉瀬コアについて、下位から非海成の蓮池層下部aH₁（同図中では記号未表記）、海成の有明粘土層aAcおよび非海成の蓮池層上部aHu（記号未表記）のように区分される完新統が、非海成の更新統に区分される三田川層dMの上に重なる堆積環境を有する。活性度Aについて、完新統の下位から上位にかけて1から2の範囲でC字的な垂直分布を示している。また、更新統に区分される中原層上部dNuの上位では2.5程度の高い値が認められる。



図-4 基準ボーリング群の調査位置

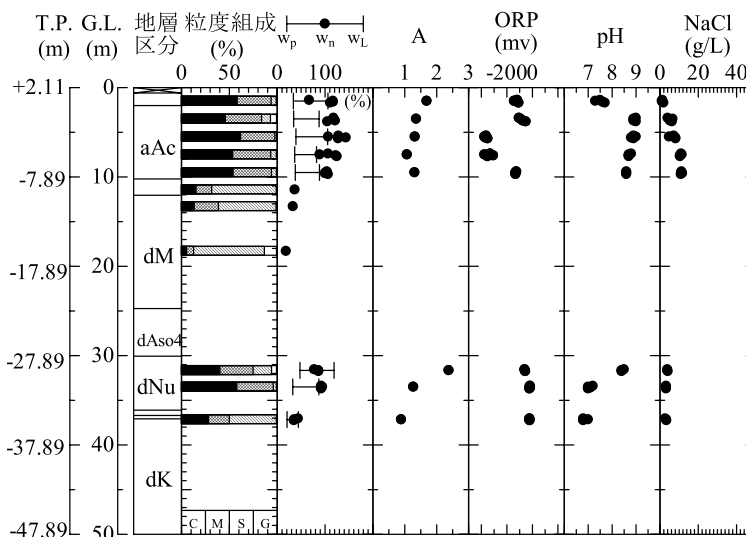


図-5 嘉瀬コアの調査結果

3.2 活性度の地域的・深さ的性質に関する検討

図-6に、基準ボーリング群から得られた活性度Aの深さ分布を示す。同図における深さ25m付近から以浅にかけてのデータは、基準ボーリング群における完新統の結果である。25m付近から深いデータは更新統のものである。

完新統の結果について、竜王コアでは非活性粘土 ($A=0.75$ 未満)としての性質が認められるが、これ以外のコアでは普通の粘土 ($A=0.75 \sim 1.25$)以上の性質としてプロットされる。さらに、六角川を境として嘉瀬、久保田、道免、芦刈の各コアと福富東、福富、築切堀の各コアとの間でグルーピングの可能性がうかがえ、後者の各コアでは活性の高い粘土 ($A=1.25$ 以上)の性質として理解される。

次に、更新統の結果について、完新統に比べて相対的に活性度Aの値が高まり、かつ完新統と同様な地域区分の傾向がうかがえる。

3.3 物理化学的性質と活性度の関係

図-7～9に、有明海沿岸低平地域における物理化学的性質の評価に際し、簡便な指標として用いている酸化還元電位 (ORP)、pHおよび塩化ナトリウム (NaCl) 濃度を横軸に取り、活性度Aとの関係を求めた結果を示す。これらの3つの数値は市販の器機を用いて計測されてきている¹⁸⁾、竜王コアの完新統では酸化状態が卓越し、塩化ナトリウム濃度の値が2g/L以下の塩分溶脱現象を示していることから、二次的な地盤環境の変化が著しく進んでいると考えられる¹⁴⁾。前述の(1)式の分子における塑性指数 I_p は、 $I_p = \text{液性限界}w_L - \text{塑性限界}w_p$ の関係であり、上記の塩分溶脱現象は液性限界 w_L を低下させることから¹⁵⁾、結果として活性度Aの値を低下させる。このようなメカニズムが竜王コアにおける完新統の活性度Aに生じ、堆積当時から今日にかけて同値が低下していることが考えられる。

図-8に示したpHの関係では、図-6の検討で述べた地域区分がほぼ同様に当てはまることうかがえる。pHは、セメント系・石灰系固化材による化学的地盤改良工法適用時の貴重な数値であるが、計測の機会が少なくなっている。同工法の施工においてpHの値を伴わなくとも、技術者にとってはむしろ土質試験の範ちゅうとして取り扱い可能な活性度Aを検討することにより、pHが未計測の場合の代理値として役割を果たす可能性がある。

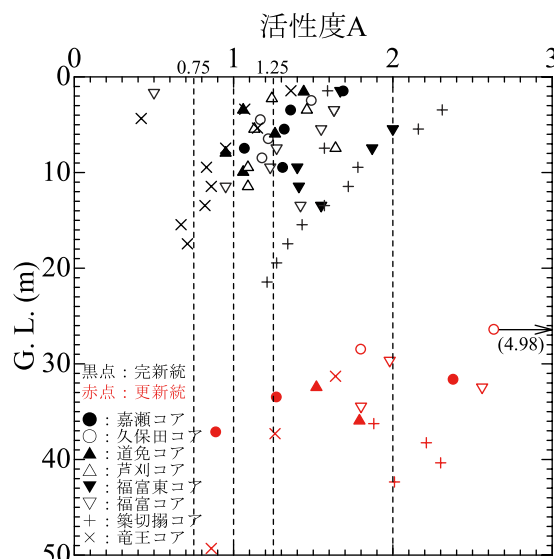


図-6 活性度の深さ分布

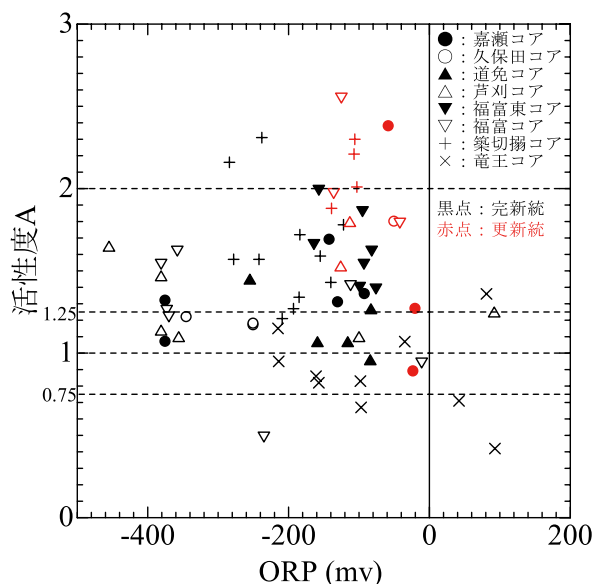


図-7 活性度と酸化還元電位 (ORP) の関係

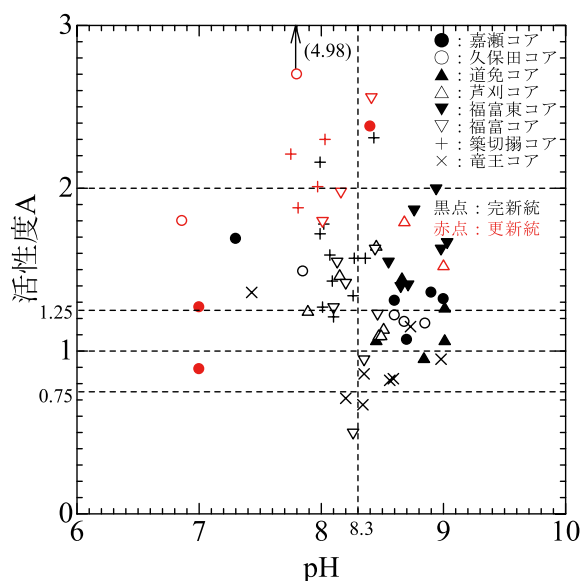


図-8 活性度と pH の関係

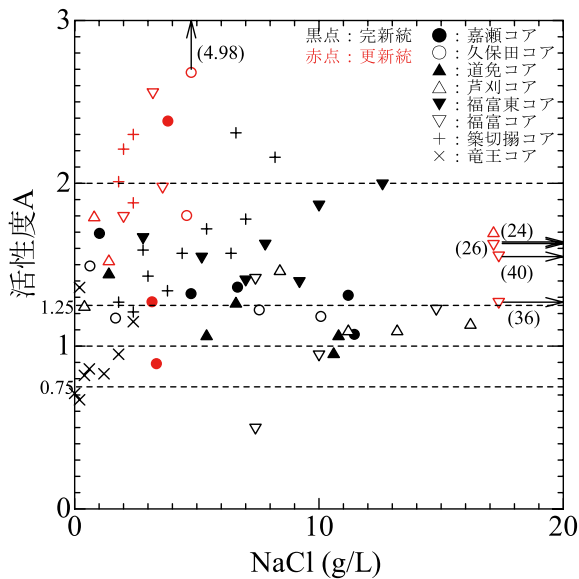


図-9 活性度と塩化ナトリウム (NaCl) 濃度の関係

4. おわりに

本報では、活性度の定義、物理化学的性質との間の関係、活性度の理解に認められる課題について検討した。これらの検討から得られた知見に基づいて、佐賀県政下の有明海沿岸道路建設プロジェクトにおける基準ボーリング結果を用い、当地における活性度と物理化学的性質の地域的・深さ的性質に関する検討を行った。本報で得られた知見を要約すると、次のとおりである。

1) 土の堆積時の環境や含有粘土鉱物の推定に活性度を用いるのは難しいことを指摘した。調査時点における土の活性の程度を知るための利用は有用と考えられる。

2) 土にアロフェンが含まれている場合、同鉱物の活性度は0.5から1.25の範囲に分布する。ただし、同鉱物の表面電荷は正の電荷を有し、固着層および拡散層に吸着されるイオンは陰イオンとなるため、他の鉱物を含む土との間で物理化学的性質を違えることに注意が必要である。

3) 本報で検討した地域における活性度は、六角川以東の佐賀地区、同河川以西の白石地区および白石地区最西部との3つの地域区分が行える可能性がある。

4) 更新統の活性度は完新統の同値に比べて相対的に高い値を有する。

5) 活性度とpHの間で優位な関係が求められることがうかがえた。

謝辞：本報の検討に用いた地盤調査結果は、佐賀県有明海沿岸道路整備事務所によって2002（平成14）年度来から得られてきているものを提供して

いただいた。また、本報の検討に際しては、日本学術振興会（JSPS）・科学研究費補助金・基盤研究（B）（一般）・課題番号23360204（研究代表者：日野剛徳）、同・挑戦的萌芽研究・課題番号23656300（研究代表者：日野剛徳）、同・挑戦的萌芽研究・課題番号24656288（研究代表者：柴錦春）および同・基盤研究（C）（一般）・課題番号25420499（研究代表者：梅崎健夫（信州大学））のそれぞれから補助をいただいていた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊賀屋豊, 日野剛徳, 柴錦春: 佐賀低平地における自然地盤及びフロート式深層混合処理地盤上の試験盛土の挙動, 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol. 60, No. 8, pp. 18-21, 2012.
- 2) Skempton, A. W.: The colloidal activity of clay, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 57-61, 1953.
- 3) 山口柏樹: 土質力学 (全改訂) ~講義と演習~, 技法堂出版, pp. 22-23, 1984.
- 4) 三田地利之: 土質力学入門, 森北出版, p. 30, 2013.
- 5) 地盤工学会: 土質試験~基本と手引き~第二回改訂版, p. 44, 2010.
- 6) Mitchell, J. K.: Fundamentals of soil behavior, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 4-189, 1992.
- 7) Mitchell, J. K.: Fundamentals of soil behavior, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., p. 186, 1992.
- 8) 嘉門雅史, 浅川美利: 土木学会編・新体系土木工学16土の力学(I)~土の分類・物理化学的性質~, 技法堂出版, p. 43, 1988.
- 9) 日本粘土学会編: 粘土ハンドブック, 第二版, 技報堂出版, 1987.
- 10) 嘉門雅史, 浅川美利: 土木学会編・新体系土木工学16土の力学(I)~土の分類・物理化学的性質~, 技法堂出版, p. 62, 1988.
- 11) 嘉門雅史, 浅川美利: 土木学会編・新体系土木工学16土の力学(I)~土の分類・物理化学的性質~, 技法堂出版, pp. 87-97, 1988.
- 12) 山口柏樹: 土質力学 (全改訂) ~講義と演習~, 技法堂出版, pp. 13-21, 1984.
- 13) 土質工学会編: 土質工学における化学の基礎と応用, 土質基礎ライブラリー 15, pp. 2-15, 1978.
- 14) 日野剛徳, 柴錦春: 5.海面変動が地盤環境に及ぼす影響と評価, 講座「地球温暖化がもたらす地盤の環境変化と災害」, 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol.62, No.1, Ser.No.672, pp.53-59, 2014.
- 15) Ohtsubo, M., Egashira, K., Koumoto, T. and Bergado, D. T.: Mineralogy and chemistry, and their correlation with the geotechnical index properties of Bangkok clay: Comparison with Ariake clay, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 1, pp.11-21, 2000.
- 16) 陶野郁雄: 大深度地下開発と地下環境, 鹿島出版会, pp.119-133, 1990.
- 17) 日野剛徳, 伊賀屋豊, 下山正一, 柴錦春: 九州・沖縄の特殊土の紹介①~有明粘土~, 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol.58, No.6, pp.6-9, 2010.
- 18) 日野剛徳, 井上貴昭, 辻大輔, 竹辺義信: 粘土中塩分濃度の簡易測定法について, 低平地研究, No.10, pp.15-24, 2001.