

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1404**      June 2022

電気浸透を用いた浚渫土砂減容化手法に関する研究  
—粘性土に対する電気浸透の適用性に関する検討—

杉山 友理, 高野 大樹, 森川 嘉之

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 電気浸透に関する研究 .....	4
2.1 既往の研究 .....	4
2.2 電気化学的処理工法 .....	5
2.3 電気浸透工法と真空圧密工法 .....	5
3. 既往の浚渫土の減容化手法 .....	6
3.1 真空圧密による減容化 .....	6
3.2 粘土の練り返しによる乱れの影響を利用した減容化対策手法 .....	8
3.3 凝集沈降技術を用いた減容化 .....	10
3.3.1 溶液のpH及び塩分濃度を変えた沈降実験 .....	10
3.3.2 海水成分の違いが沈降挙動に及ぼす影響 .....	11
3.4 まとめ .....	13
4. 電気浸透圧密試験 .....	13
4.1 電気浸透脱水効果の検証 .....	13
4.1.1 電気浸透脱水実験 .....	13
4.1.2 電気浸透圧密予備実験 .....	13
4.2 電気浸透圧密試験装置の製作 .....	15
4.3 電気浸透圧密試験 .....	16
4.3.1 電気浸透圧密試験結果 .....	16
4.3.2 電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析 .....	18
4.4 まとめ .....	20
5. あとがき .....	20
参考文献 .....	20

# **Study on volume reduction method for dredged soil by electro-osmosis**

## **— An investigation into applicability of electro-osmosis in clays —**

**Yuri SUGIYAMA\***

**Daiki TAKANO\*\***

**Yoshiyuki MORIKAWA\*\*\***

### **Synopsis**

A large amount of soil is dredged every year due to dredging for the purposes of maintaining sea routes and harbors and deepening the front of seawall due to the increase in size of ships. Almost of dredged soil is disposed by ocean dumping or landfill so far. However, it has become an urgent issue which is maintaining disposal site because the capacity is getting tight. One of the volume reduction methods to solve this problem is consolidation dehydration. Currently, it thought that the vacuum consolidation is the most effective volume reduction method of dredged material which have high water content and low bearing capacity. However, the counter-measure by vacuum consolidation is not enough to reduce the volume of dredged soil because of the constant dredging. For that reason, the other volume reduction methods, volume compression by stirring the clay ground and sedimentation promotion technology by aggregation of clay particles, were proposed. In this study, applicability of these volume reduction methods was examined. Moreover, applicability of new volume reduction method by electro-osmotic dehydration was also examined. The electro-osmotic dehydration is the application of electric current to the soil through electrodes that are inserted into the saturated soil where water can be drawn from the anode to the cathode via electro-osmosis.

At first, we organized issues of which was already proposed volume reduction methods by using analysis simulation and performing model experiment. Next, the electro-osmotic consolidation test was conducted to consider the effectiveness of electro-osmotic dehydration. As a results, it was revealed that the electro-osmotic dehydration method was very effective of volume reduction of dredged soil.

**Key Words:** Dredged soil, Volume reduction, Electro-osmosis, Vacuum consolidation, stirring the clay, aggregation of clay particles

---

\* Researcher, Geotechnical Engineering Department Soil mechanics and geo-environment group

\*\* Head of Soil mechanics and geo-environment group

\*\*\* Director of Geotechnical Engineering Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 E-mail : sugiyama-yu@p.mpat.go.jp

# 電気浸透を用いた浚渫土砂減容化手法に関する研究

－粘性土に対する電気浸透の適用性に関する検討－

杉山 友理\*・高野 大樹\*\*・森川 嘉之\*\*\*

## 要 旨

船舶の大型化に伴う航路や泊地の維持整備及び護岸全面の増深等を目的とした浚渫により、毎年多量の浚渫土が発生している。従来、浚渫土の多くは、海洋投入、埋立により処分されているが、既存の処分場の容量が逼迫していることから、浚渫土の処分場確保が喫緊の課題となっている。浚渫土をより多く処分する方策の一つが、圧密脱水による減容化である。高含水比で支持力が小さい浚渫土に対しては、真空圧密工法を用いた減容化が最も有効であると考えられている。しかし、現在の対策だけでは永続的に発生する浚渫土砂に対応するには不十分である。新たな減容化手法として、粘土地盤の攪拌による体積圧縮や、粘土粒子の凝集による沈降促進を利用した手法などが検討されている。本稿では、これらの手法についてその課題を整理するとともに、土に電流を流すことで陽極から陰極に間隙水を強制脱水させる電気浸透現象を用いた新たな減容化手法を提案し、その適用可能性について検討した。

まず初めに数値シミュレーション及び既往の研究の模擬実験を通して、現在検討されている新たな減容化手法の課題について整理した。次に、電気浸透圧密脱水手法の有効性について検討するため、電気浸透圧密試験装置を製作し、様々な含水比の粘土スラリーを用いた実験を行った。その結果、電気浸透による圧密脱水効果は大きく、浚渫土砂の減容化手法として非常に有効であることが分かった。

**キーワード：**浚渫土、減容化、電気浸透、真空圧密、粘土の攪拌、粘土粒子の凝集

\* 地盤研究領域土質研究グループ 研究官

\*\* 地盤研究領域土質研究グループ グループ長

\*\*\* 地盤研究領域長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 E-mail：sugiyama-yu@p.mpat.go.jp

# 1. まえがき

近年、船舶の大型化に伴う航路や泊地及び岸壁前面の増深や水深の維持等を目的とした浚渫により、毎年多量の浚渫土が発生している。従来、浚渫土の多くは、海洋投入、埋立により処分されているが、既存の処分場の容量が逼迫していることに加え、海洋環境への影響の観点から新たな海面処分場の確保が難しいことから、浚渫土の処分場確保が喫緊の課題となっている。

このような状況を踏まえ、浚渫土をより多く処分する方策の一つとして、浚渫土を圧密脱水し、その容積を減少させることで減容化を図る方法が考えられている。浚渫土は高含水比でせん断強度が小さいため、真空圧密による圧密脱水が減容化に有効であるといえる<sup>1)2)</sup>。研究段階ではあるが、他にも土骨格の構造破壊を応用した減容化技術の開発<sup>3)</sup>や、分散剤添加による圧密特性の改質を利用した減容化技術が提案されている<sup>4)</sup>。他にも、浚渫土の減容化に適用可能であると考えられる手法として、電気浸透を用いた圧密脱水が挙げられる。これは、土中に直流電流を加えて土中水を電気浸透により強制脱水させる電気浸透脱水を用いた圧密方法である。電気浸透脱水の原理について、図-1.1に模式図を示す。多くの場合、粘土粒子は水中で負に帯電している。そのため、土粒子表面付近の正に帯電した間隙水は通電により陰極側へ移動する。これにより陰極側から間隙水の脱水が生じるため、電気浸透脱水と呼ばれている。電気浸透脱水を用いた地盤の安定処理工法については古くから盛んに研究されているが、歴史的に多くの研究が行われているにもかかわらず、土木の現場に適用した例はほとんどない。

そこで本論文では、電気浸透脱水が浚渫土の減容化手法として適用可能かどうか検討することを研究目的とし、電気浸透脱水による圧密効果について調べるため、通電

可能な圧密試験装置を製作し、電気浸透圧密脱水試験を実施した。また、他の減容化手法と比較するため、真空圧密工法、粘土の攪乱による減容化手法及び凝集沈降技術を利用した浚渫土受入容量拡大技術について、それぞれ既往の研究を模擬した数値シミュレーションや実験を行うことで、各手法の課題について整理した。

# 2. 電気浸透に関する研究

## 2.1 既往の研究

1940年から1960年頃にかけて、電気浸透に関する基礎研究が盛んに行われていた。Prece<sup>5)</sup>は圧密試験と通電を同時に行う実験により電気浸透の有効性を述べ、Winterkorn<sup>6)</sup>は電気浸透と熱浸透の類似性について述べている。Bernatzik<sup>7)</sup>は電気浸透圧について検討し、Geuze, et al.<sup>8)</sup>は三軸圧縮試験機を応用して電気浸透の土の強度に及ぼす影響について検討した。電気浸透の実際の応用についてCasagrande<sup>9)</sup>は、掘削時の浸透について、電気浸透によるボイリング防止の有効性等について言及している。電気浸透による土の脱水機構について三瀬<sup>10)</sup>は、電気浸透脱水装置を用いて、様々な一定電圧の直流を加えたときの試料の収缩量について検討し、土の電気浸透による脱水現象が圧密による脱水現象と同じ過程をとることを明らかにすると共に、電気浸透による脱水過程は、Terzaghiの圧密理論式を応用して理論的に解析できることを示した。また、電気浸透による脱水効果は、試料の初期含水比、間隙比、粒径、粘土含有量、粒子配列及び間隙水中の溶存物質などにより影響を受けることについて明らかにしている。さらに三瀬<sup>11)</sup>は、実際に軟弱粘土地盤を用いた電気浸透脱水実験を行い、脱水過程を理論的かつ実験的に考察することで脱水機構を明らかにした。本研究目的である電気浸透脱水を用いた浚渫土の減容化

電気浸透の原理 = 水・イオンの移動 (海成粘土のためNaClが存在)

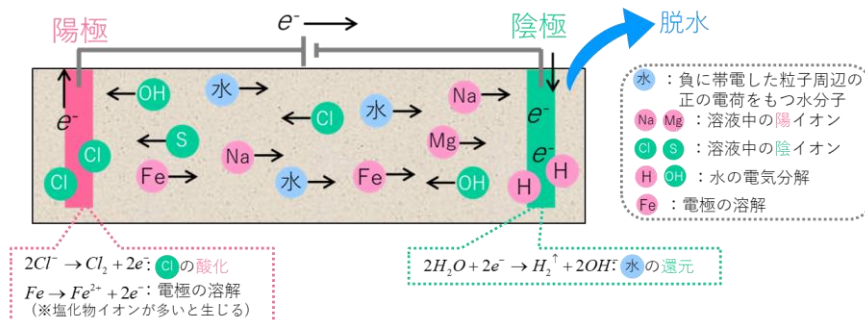


図-1.1 電気浸透原理の模式図

に関する論文として、Ready *et al.*<sup>12)</sup>は浚渫土の脱水における電気浸透の有効性について検討している。また、Fourie and Jones<sup>13)</sup>は Mine tailings の脱水に電気浸透を適用した検討を行っている。他にも、Coal tailings や tunnel slurry などの軟弱粘性土の脱水手法に電気浸透が用いられる事例が多く報告されている<sup>14),15)</sup>。軟弱地盤の圧密を目的とした研究で電気浸透が用いられる事例も報告されている<sup>16),17)</sup>。これらの研究成果より、軟弱地盤の圧密脱水に電気浸透が効果的であることが実験的に明らかになっているといえる。さらに、通電により粘土の強度が増加することが分かっている<sup>18)</sup>。Bjerrum *et al.*<sup>18)</sup>は、粒子にイオン交換が生じることで間隙水中のカルシウムイオンが粘土粒子に吸着することで強度が増加すると考察している。電気浸透による強度増加は斜面安定や盛土の安定に適用できることから、地盤の安定化に電気浸透を用いる研究が行われている<sup>19),20)</sup>。電気浸透に関する研究が再び盛んになった1980年以降は、電気浸透そのものが研究目的になるのではなく、圧密脱水や強度増加等の研究目的に対する一検討手法として電気浸透が用いられた研究報告が多くみられる。電気浸透脱水現象の解明を目的とした実験<sup>21)</sup>や数理モデルの提案<sup>22)</sup>も行われており、電気浸透現象を実験的・解析的に追及することが可能になっているといえる。また、動伝学的ジオシンセティクス (Electrokinetic geosynthetics)、略してEKGと呼ばれる電極の腐食が生じない電極材料も開発されている<sup>23)</sup>。EKGは取り扱いが容易で、EKGを円筒状に丸めて中央にポンプを設置すれば、通電と集水を同時に行うことができるため、浚渫土の減容化等に適用されることが期待されている。近年ではEKGを電極に採用した研究事例や、EKGの開発に関する研究報告も多く見られる<sup>24)</sup>。

土木技術分野の現場への電気浸透の適用としては、Casagrande<sup>25)</sup>が、ドイツの鉄道路盤及びアウトバーンで初めて電気浸透脱水を安定工法として採用した。シンガポールではcofferdam (囲い堰)の脱水時に堤防が大きく動いた際、迅速な安定化手法として電気浸透が採用された<sup>26)</sup>。しかし、電気浸透を採用した実際の工事のほとんどは経験と勘に終始し、歴史的に数多くの研究論文が発表されているにも関わらず、技術的にも学術的にも見るべき進展がなされなかった。最近では、Wang, *et al.*<sup>27)</sup>が、真空圧密と電気浸透脱水を併用することによる浚渫土砂の地盤改良技術を提案しているが、両工法の相互作用や電気浸透の有効性評価については多くの課題が残されている。

## 2.2 電気化学的処理工法

電気浸透を用いた軟弱地盤の安定化手法は、電気化学的処理と呼ばれる工法の一つである。電気化学的処理工法には、電気浸透工法、電気注入固結法及び電気固結工法がある。電気浸透工法とは、電気浸透脱水を利用する方法である。具体的には、土中水が電気浸透により陰極の方向へ強制流動を起こすことを利用し、機械的に排水の困難な細粒土地盤の間隙水の移動脱水をはかり、圧密促進や強度改良を行う工法である。電気浸透工法は土中水の脱水だけではなく、間隙水の流れに乗せて固結性物質を地中に送り込み、圧力注入では浸透不可能な地盤の固結化にも用いることができる。

地中通電によって起こる電気浸透現象は、いわば位置の固定された土粒子の間隙を液体が移動する現象である。これとは反対に、静止した液体に通電することによって、液体中に含まれる粒体の方が電極方向に移動する現象として電気泳動現象がある。電気泳動現象を利用することで、固結性物質を人工的に地盤内に誘導し固化させることができる。これが電気注入固結法と呼ばれるものである。電気注入固結法では、各種の硬化性液体を人為的に電極付近に補給し、これを電気浸透的もしくは電気泳動的に土中に導くことで地盤の固結化をはかる。一方、固結性物質を用いるのではなく、電極の溶出を利用することで土を電気化学的に処理して固結化をはかる方法が電気固結工法である。代表的なものとして、アルミニウム電極法や電気注入法が挙げられる。アルミニウム電極法は、その名の通り地中に挿入する電極材料がアルミニウムであり、脱水作用に加え、電解固結作用として極材料から電解したアルミニウムを土粒子間隙に沈殿固化させることで強度増加や土質変化を促す方法である。電気固結工法及び電気注入固結法の利点は、機械的注入では実施不可能な細粒地盤にも適用できることや、注入材を任意の方向に誘導できることである。

## 2.3 電気浸透工法と真空圧密工法

電気浸透工法と同様に、土中水を強制排水させる工法の一つとして、現在浚渫土の減容化で最も多く採用されているのが真空圧密工法である。真空圧密工法は1960年代前半に日本で技術導入されて以降、着実に使用実績を伸ばしている。真空圧密工法にはパーチカルドレーン工法の併用が必要不可欠であり、真空圧密工法の信頼性向上にはプラスチックボードドレーン工法の進化が大きく寄与していると考えられている<sup>28)</sup>。パーチカルドレーン工法の歴史的変遷についての報告<sup>29)</sup>を参考にしながら、表-2.1に、パーチカルドレーン工法、真空圧密工法

及び電気浸透工法の歴史についてまとめたものを示す。時系列でみると、電気浸透圧密理論が構築され、施工に対する設計及び管理上の指導原理が確立される頃に、大気圧载荷工法（現在でいう真空圧密工法）が導入されたことが分かる。土木分野では電気浸透よりも真空圧密の方が馴染み深く、圧密沈下の促進を目的にバーチカルドレーンが打設されていたため現場への適用がはるかに容易であったことなどが、電気浸透工法の衰退に繋がったと推察する。実際、真空圧密工法が飛躍的に発展した1960年から1980年の20年間、電気浸透に関する研究報告はまばらであった。しかし、1980年代後半以降、再び電気浸透に関する研究が盛んに行われ始めた。1930年から1960年は、電気浸透圧密理論構築や、電気浸透の原理の解明が主であったのに対し、1980年から現在に至るまでは、減容化を目的とした圧密脱水、地盤の安定化問題、強度増加、汚染物質除去や塩分除去等の課題に対して電気浸透を用いる研究が数多く報告されている。それにも関わらず電気浸透が現場に適用される例はほとんど報告されていない。現場実証実験による電気浸透工法の検証や、電気浸透適用時の周辺地盤への影響等に関する研究が十分でないことが原因であると考えられる。浚渫土砂処分場の減容化が喫緊の課題となる今、短時間での脱水

効果が大きい電気化学的処理工法を現場に適用できる工法に発展させることが急務であると考えている。

### 3. 既往の浚渫土の減容化手法

本章では、浚渫土砂処分場の減容化手法のうち、真空圧密工法、攪乱による減容化手法及び凝集沈降技術を利用した浚渫土受入容量拡大技術について整理する。各減容化手法について模擬シミュレーション及び模擬実験を行うことで、現在検討されている手法の課題について述べる。

#### 3.1 真空圧密による減容化

浚渫土の含水比は100～150%と非常に大きく、せん断強度が小さいため、ドレーンによる浚渫土の改良<sup>30),31)</sup>や、真空圧密工法による減容化施工が実施されている事例<sup>32),33),34),35)</sup>が多く報告されている。真空圧密工法は、改良したい地盤内に多数の鉛直ドレーンを打設した後、地表面に排水層として水平ドレーン及び有孔集水管を敷設する。その上を気密シートで覆い、排水層につないだ真空ポンプを運転させることで、排水層、鉛直ドレーン内を減圧する。このとき、鉛直ドレーンと地盤との間で水

表-2.1 各種工法の歴史

	バーチカルドレーン工法	真空圧密工法	電気化学的処理工法
1930	アメリカサンフランシスコで現場実験 (サンドドレーン工法(SD))		Casagrandeが粘土質軟弱地盤の電気化学的固結法の特許取得
1937	スウェーデンにてペーバードレーン工(PD)法が考案・実用化		
1941			ドイツの鉄道路盤及びアウトバーンで電気浸透脱水を安定工法として採用
1951	SD工法が日本に導入		↓ 電気浸透の理論構築 eg. Winterkorn(1947), 三瀬(1958)
1960		大気圧载荷工法という名で日本に導入	日本において施工に対する設計及び管理上の指導原理を確立
1963	ペーバードレーン工法が日本に導入		
1965 ～ 1970	プラスチックボードドレーン工法(PBD)の研究・開発 SD：大深度への適用拡大 PBD：多種多様なドレーン材の供給	運輸省が錦海湾の海底で真空圧密工法の実験を実施 大阪港浚渫粘土層の地盤改良に真空ポンプを用いた圧密促進工法を実施	地盤材料,電極材料,電流の作用方法等が電気浸透現象に及ぼす影響についての研究 review : Malekzadeh et al.(2016)
1975			シンガポールでcofferdamの迅速な安定化手法として電気浸透が採用
1980	SD：臨海部の大規模埋立造成工事に適用 PBD：PBDの性能評価に関する研究		
1987	PBD工法研究会の発足	キャップ式PBDの原型となる真空排水工法の考案 シート式真空圧密工法の使用	交流を用いた電気浸透圧密試験に関する論文報告(港空研土田)
2000	PBD工法が海上工事へ進出 生分解性ドレーンの開発	名古屋ポートアイランド内における真空圧密工法の減容化能力検証試験の実施	↓ 電気浸透を用いた研究 (圧密・強度増加・汚染物質除去等) eg. Reddy et al.(2006), Kaniraj et al.(2011)
2009	PBD工法研究会が「PBD工法その理論と実際」を出版	↓ 工法原理に関する研究	
2013 ～		水平ドレーンを利用した真空圧密工法による浚渫土の減容化施工の実施	真空圧密と電気浸透併用による圧密脱水に関する研究報告

頭差が生じることで、粘性土層の間隙水が排水され、圧密が促進される工法である。真空載荷時の地盤変形挙動や圧密及び強度増加等、工法原理についての研究が盛んに行われ<sup>36),37)</sup>、施工実績が着実に増加している。真空圧密工法の技術的な課題に、対象地盤の気密性の確保や、負圧を安定的に作用させることなどが挙げられる。荒井ら<sup>38)</sup>は、地盤の圧密に真空圧密工法を採用した際、気密シート下の地盤内間隙水圧の測定値が真空圧に到達していなかったと報告している。例えば、地盤の間隙水中に気体が溶解している場合、真空圧密では負圧を作用させるため、溶存気体の気化が生じることで地盤が不飽和化する可能性があるといえる。地盤が不飽和状態になると、地盤内には真空載荷圧よりも小さい載荷圧しか作用せず、排水能の低下により圧密が妨げられると考えられる。そこで、溶存気体の気化が真空圧密に及ぼす影響について、溶存気体を考慮できる数値モデル<sup>39)</sup>を用いて数値シミュレーションを行った。なお、負圧の作用により液体自体が気化するキャビテーション現象について、真空状態（0気圧）における水の沸点温度は約45℃であることから、本検討の範囲内においてキャビテーション現象は生じないと考えられることから考慮していない。解析に用いたメッシュ図、水分特性曲線及び材料パラメータをそれぞれ図-3.1、図-3.2、表-3.1に示す。材料パラメータには、真空圧密が実施された地盤の再現解析が行われた既往の研究成果を参考に設定した<sup>40)</sup>。溶存気体は全て空気であると仮定した。上端面に真空圧である-101.3kPaの負圧を瞬時に載荷し、一定時間放置した。溶存気体の状態変化を考慮しないケースをCASE1、溶存気体の状態変化を考慮したケースをCASE2とする。

図-3.3に真空圧を与えてから180日後の地盤内飽和度分布を示す。図-3.3より、溶存気体の気化を考慮しないと真空圧を作用させても飽和度は変化しないが、考慮すると不飽和化が生じていることが分かる。これは、地盤内に負圧が生じることでサクションが増加することに起因する。図-3.4に深さ0.5mにおける真空圧（間隙水圧）及び上面沈下量の時間変化を示す。これらの結果から、溶存気体の気化を考慮しないと、上端面に与えた真空圧がすぐに地盤内に伝わる事が分かる。一方、溶存気体の気化を考慮すると、地盤が不飽和化することで間隙水圧応答が鈍くなり、地盤内に真空圧に等しい圧力が加わるまでに時間を要することがわかる。このことから、間隙水中の溶存気体が真空圧載荷により気化すると、真空載荷圧の伝達に時間を要するため、所定の圧密度を確保するために真空ポンプの運転期間を延長することが必要になると考えられる。上面沈下量を比較すると、最終的

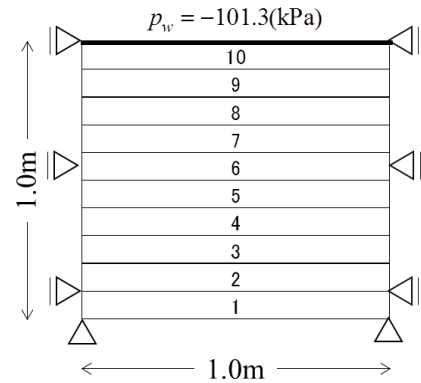


図-3.1 解析メッシュ図

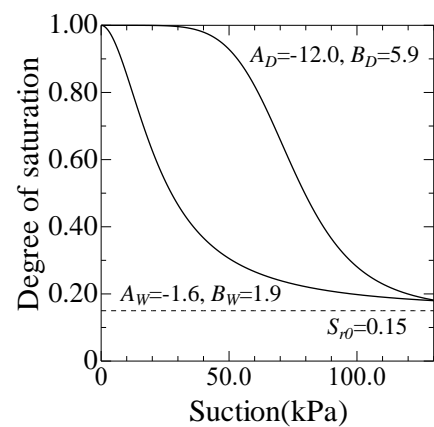


図-3.2 水分特性曲線

表-3.1 材料パラメータ

$\lambda$	$\kappa$	$G_s$	$a$	$n_s$	$S_r$	$n_E$
0.614	0.17	2.7	90	1.0	1.0	1.5
$k_w$ (cm/sec)	$k_a$ (cm/sec)	$M_d$ (g/mol)	$R$ (J/K/mol)	$T$ (K)	$k_h$ (g/kPa)	$e$
4.0E-07	4.0E-05	28.8	8.31	288.15	0.173	1.0

※ $R, T, k_h$  : 気体状数

に地盤内の間隙水圧が真空圧に等しくなるにも関わらず、CASE2で得た沈下量がCASE1よりも小さくなる事が分かる。これは、溶存気体の気化により、真空載荷圧の一部を間隙気体圧が受け持つことで、地盤内に作用する有効応力が小さくなるためである。

浚渫土砂の減容化手法として真空圧密工法が現在最も有効であると考えられているが、真空圧密工法の最大作用負圧は理論上101.3kPaであり、前述の理由等から現場での作用負圧は60~70kN/m<sup>2</sup>となる。真空圧密工法の短所は、これ以上の負圧を作用させることができないことである。そのため、溶存気体の気化やポンプの目詰まり等による作用負圧の低減を防ぎ、最大負圧に近い負圧を作用させることが課題であるといえる。



### 3.2 粘土の練り返しによる乱れの影響を利用した減容化対策手法

御手洗ら<sup>41)</sup>は、不攪乱試料に対して練り返しによって乱れの影響を受けた試料の方が大きく体積圧縮が生じることから、攪乱による減容化が有効であると考えている。御手洗らの実験では、サンプリングチューブ中央部から切り出した試料を不攪乱試料と考え、この不攪乱試料と全攪乱（練り返し）試料を用いた圧密試験が行われている。従来から、サンプリングによる土試料の力学性状変化の原因として、サンプリング時や力学試験実施時の機械的な乱れと応力解放による乱れの影響が指摘されている。特に海底地盤の採取試料の場合、海成粘土試料内の残留有効応力の測定値が予想よりもはるかに小さいことや<sup>42)</sup>、測定した飽和度が深度とともに減少していること<sup>43)</sup>が分かっている。通常の地盤においても、堆積物中のガスが水圧変動に大きく影響するという実験報告がある<sup>44)</sup>。そこで、溶存ガスの状態変化を考慮できる数理モデル<sup>39)</sup>を用いて、より精微にサンプリング過程をシミュレートすることで、サンプリング時の応力解放による乱れ

が採取試料の力学挙動及び室内試験結果に及ぼす影響について検討した。

解析メッシュ図を図-3.5に示す。サンプリングシミュレーションでは、サンプリング過程を、Process1: サンプラーの引き上げに伴う水圧低下過程、Process2: サンプラーから試料を切り出す際の応力解放過程、の2段階に分けて計算した。サンプラーを海上まで引き上げる際、チューブの上端及び下端は海水に接しており、先端の土は飽和状態のまま引き上げ時の水圧変化の影響をダイレクトに受けると考えられる。そのため、Process1では、図-3.5(a)に示すシンウォールチューブ内の試料を想定したメッシュ図を用いて、側方の変形を固定し、上下端面のサクションが常に0となるような水理境界条件を与えた。Process2では、図-3.5(a)に示すサンプラーの全要素について、Process1後の各要素にかかる残留拘束圧が

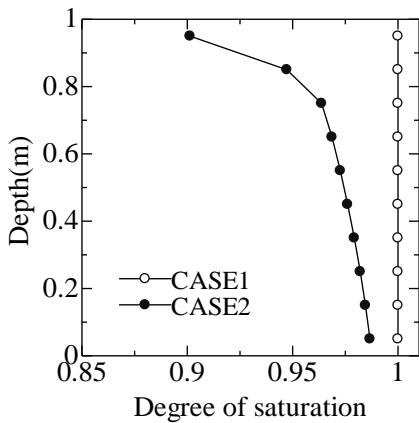


図-3.3 飽和度分布

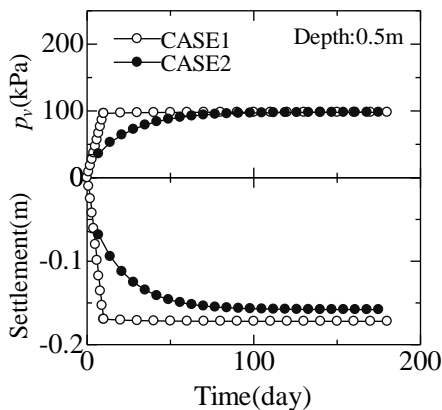


図-3.4 真空圧/上面沈下量の時間変化

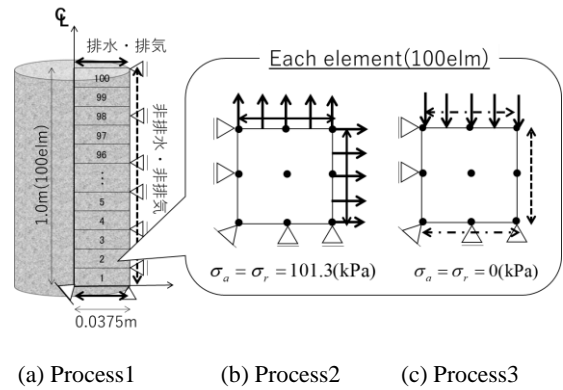


図-3.5 解析メッシュ図

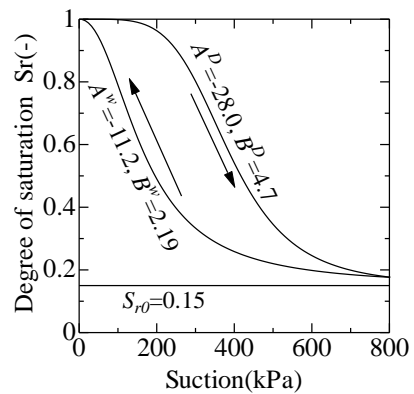


図-3.6 水分特性曲線

表-3.2 解析パラメータ

$\lambda$	$\kappa$	$G_s$	$e_i$	$k_v$ (cm/sec)	$k_o$ (cm/sec)
0.997	0.066	2.71	2.24	6.94E-4	6.94E-2
$k_h$ (g/kPa)	$M_a$ (g/mol)	$R$ (J/K·mol)	$T$ (K)	$a$	$n_s$
0.366	33.86	8.31	288.15	90	1.0

大気圧下での拘束圧(101.3kPa)になるまで除荷されることを想定し、Process1後の各要素(100要素)について要素シミュレーションを行った。圧密試験シミュレーション(Process3)では、Process2後の各要素について、上下面排水・非排気条件の下、定ひずみ速度0.18%/minで圧密した。Process1からProcess3に至るまで一連の流れとしてシミュレーションを行うため、Process2,3の初期条件は、間隙比や飽和度を含めて全て、それぞれProcess1,2終了時の値となっている。解析に用いた材料パラメータを表-3-2に示す。原位置地盤は極めて一様性が高く、深度方向に均一であると仮定した。圧縮指数及び膨潤指数に関しては、御手洗ら<sup>4)</sup>の羽田の粘性土(水深15~20m)を用いた室内試験結果から得られた値を用いる。透水係数及び図-3.6に示す水分特性曲線は粘性土を想定している。溶存ガスは空気であると仮定した。溶存ガス量にはヘンリーの法則を用い、次式のように間隙気体圧に比例するように定義している。

$$m_{dg} = k_h p_g V_w$$

$m_{dg}$ : 溶存ガス量,  $k_h$ : ヘンリー定数,  $p_g$ : 間隙気体圧,  $V_w$ : 液相の体積

原位置飽和地盤において、間隙水中に、水深に比例した飽和量の溶存ガスの存在を表現するため、初期間隙空気圧を初期間隙水圧と同値と仮定した。初期応力状態は正規圧密状態とした。また、初期は等方応力状態を仮定し、初期の応力誘導異方性は考慮していない。

図-3.7及び図-3.8に、水深20m、海底深度40mからのサンプリング後のサンプリングチューブ内残留飽和度分布及び残留有効応力比分布をそれぞれ示す。残留有効応力比は、残留有効応力を原位置有効応力で除した値と定義する。これらの結果から、比較的サンプリング深度が浅い場合でも、チューブ内で不飽和化が顕著に生じ、チューブ中央部であっても応力解放に伴う除荷により有効応力が減少することが分かった。次に、Process2後のチューブ中央部の応力状態を初期とした圧密試験シミュレーションから得られた $e-\ln p$ 関係を図-3.9に示す。比較のため、完全不攪乱試料、すなわち原位置応力状態(完全飽和)を初期条件として圧密した解析結果を黒プロットで示している。また、御手洗らの実験結果を青プロットで示す。図中の点線は原位置拘束圧に相当する圧密圧力を示す。これらの結果から、原位置拘束圧状態における間隙比が、完全不攪乱試料の結果とサンプリング試料の結果で大きく異なることが分かる。これは、サンプリング試料の場合、圧密初期の間隙比がサンプリング時に膨張した影響を含むために生じたといえる。御手洗らの実験結果と本研究で得た解析結果の $e-\ln p$ 関係を比較す

ると、御手洗らの不攪乱試料の実験結果は、サンプリング後の応力状態を初期値とした結果(図-3.9中の中抜きプロット)に類似し、御手洗らの全攪乱試料の実験結果

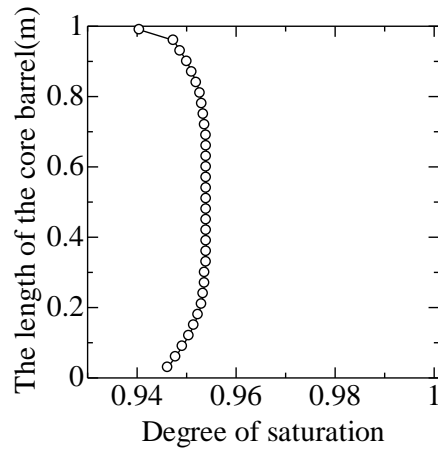


図-3.7 チューブ内残留飽和度分布

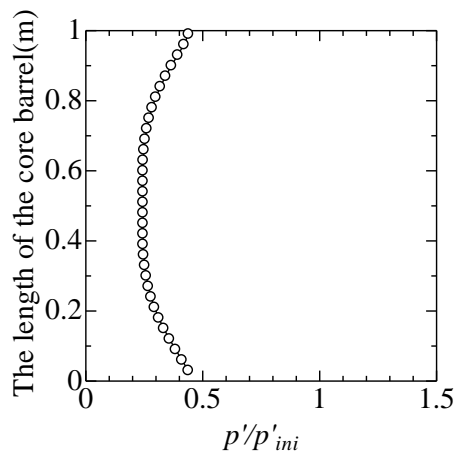


図-3.8 チューブ内残留有効応力比分布

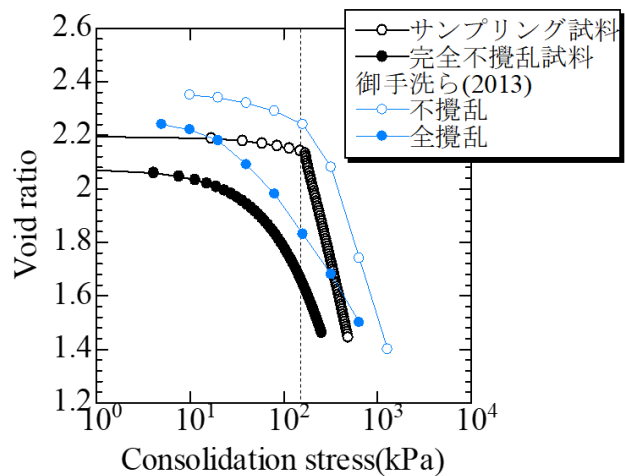


図-3.9  $e-\ln p$  関係

は、原位置応力状態を初期値とした結果(図-3.9 中の中塗りプロット)に類似することが分かった。

これらの結果から、御手洗らが提案する粘土の練り返しによる乱れの影響を利用した減容化対策手法は、圧密が進行して構造<sup>45)</sup>を有している地盤に対しては有効であるといえるが、体積圧縮量の評価には、サンプリングによる乱れの影響を利用した減容化手法は、圧密が進行して構造を有している地盤に対しては有効であるといえるが、体積圧縮量の評価には、サンプリング時の試料の不飽和化等による乱れにより生じた膨潤の影響を除外した検討が必要であるといえる。また、浚渫土砂処分場に堆積している土砂は圧密が進行中で構造が未発達のため、練り返しによる体積圧縮効果は小さくなると考えられる。

### 3.3 凝集沈降技術を用いた減容化

#### 3.3.1 溶液の pH 及び塩分濃度を変えた沈降実験

凝集剤を添加することで浚渫土の圧密特性が改善することから、浚渫土の凝集を利用した浚渫土砂処分場の受入容量拡大技術の開発が検討されている<sup>46),47),48)</sup>。凝集剤は主に、無機系、高分子系及びハイブリッド系の3種類に分類される。早野<sup>47)</sup>は、凝集効果が期待できる凝集剤として、無機系はポリ塩化アルミニウム系、高分子系はアニオン系、ハイブリッド系は無機・高分子・PS 灰の混合品を使用している。初期含水比を1000%に調整した浚渫粘土に凝集剤を添加して実施した沈降実験では、高分子系とハイブリッド系の凝集剤を添加したケースで顕著に圧密が早く進行する結果が得られている。しかし、フロック(凝集体)を形成した浚渫粘土の比体積は無添加の浚渫粘土よりも大きくなっている。フロックは高压密状態になったとき破壊し、破壊後は無添加のケースの比体積に近づくとされている。また、沈降体積について、pH の変化による粘土粒子の表面電荷の変化により、土粒子の沈降速度及び最終的な沈降体積が変化することが分かっている。図-3.10 に粘土粒子間の結合様式の模式図を示す。一般的に粘土粒子の表面(face)は負に帯電しており、反対の面には結合水が存在している。一方、粒子端面(edge)の電荷はpH に依存し、pH が低ければ負

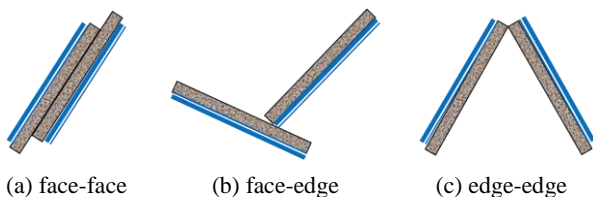


図-3.10 粘土粒子間の結合様式

に、pH が高ければ正に帯電する。そのため、溶媒のpH を低くする、すなわち酸性にすることで粘土粒子端面電荷を負にすれば、粒子表面と粒子端面に反発力が働き、粒子表面同士で結合する(face-face 結合)ため、密な状態で堆積することになる。実際に松下ら<sup>49)</sup>の沈降試験を参考に、カオリン、東京湾粘土及びNa型ベントナイトを用いて、pH の異なる溶液中で沈降実験を行った。試験方法は、乾燥質量20gのカオリン、Na型ベントナイト試料及び液性限界104.6%の湿潤重量20gの東京湾粘土を、それぞれ所定のpH、塩分濃度に調整した水溶液の中に入れて粘土懸濁液を調整した。その後、攪拌させたのちに静置して、所定の時間ごとの沈降面及び沈降体積を目視で観察した。静置後の所定時間における沈降体積の計測は、メスシリンダー内の濁りが概ね見られなくなった高さとしている。本実験では、pH12 に調整した水酸化ナトリウム水溶液と、pH4 に調整したフタル酸塩標準液を用いた。塩分濃度の違いも粘土粒子の分散・凝集に影響を及ぼすことから<sup>50),51)</sup>、1.0%と3.0%の塩分濃度に調整した人工海水を用いた沈降実験も行った。沈降の様子を写真-3.1 に示す。用いた試料の初期pHは、カオリンが4.5、Na型ベントナイトが10.3、東京湾粘土が8.3であり、1.0%と3.0%に調整した人工海水のpH はそれぞれ8.64及び8.47であった。

カオリンはもともと表面が帯電していないため、蒸留水でも早く沈降するが、pH12 溶液に関しては沈降速度が非常に遅くなる結果となった。コロイド粒子の荷電特性には、永久荷電と変異荷電(pH 依存荷電)の2種類の荷電が存在し、全ての粘土がこれらの種の荷電特性を持つ。変異荷電は、アルカリ側ではマイナスの荷電が発現する。このことから、pH12 溶液中ではプラスの荷電が消滅し、マイナスの荷電が現れることで粒子同士が反発して分散状態になり、沈降速度が遅くなったと考えられる。1440 分後の最終沈降体積を比較すると、沈降体積に差は生じないことが分かった。

東京湾粘土を用いた沈降実験結果を見ると、塩分濃度の高い溶液で素早く沈降することが分かる。塩分濃度が高くなると、溶液中の塩化マグネシウムや塩化カルシウムが増加し、溶液中に多くイオンが存在することになる。溶液中にイオンが多く存在すると、イオン濃度とイオンの電荷数から求まるイオン強度が大きくなり、電気二重層が薄くなることが分かっている。電気二重層とは、個体と溶液の間に形成される陽イオンと陰イオンが釣り合う界面のことである。土粒子は解離して陽イオンを放出するため、水中で土粒子は負電荷をもつ。溶液の塩分濃度が増加して溶液中の $H^+$ が増加すると、土粒子の周辺

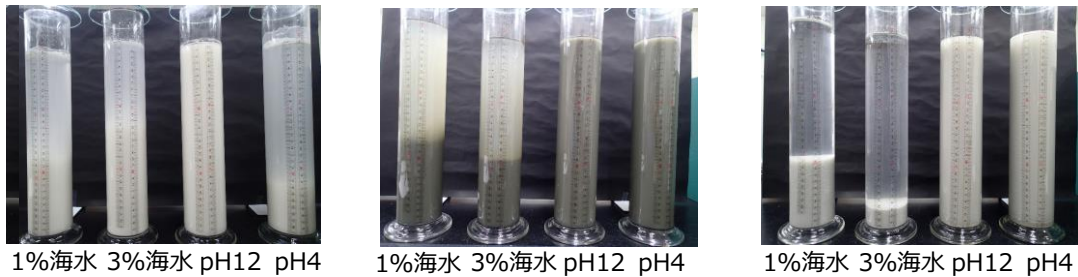
に放出された陽イオンとつり合う界面（電気二重層）が土粒子側に移動して縮小する。電気二重層の縮小に伴い粒子間に作用する反発力が及ぶ距離が小さくなり、ファンデルワールス引力によって粘土粒子が凝集することになる。このため、塩分濃度の高い溶液中では、粘土粒子間反発力が減少し、素早く沈降したといえる。pH4の溶液について、一部の粒子が沈降し、堆積状況が比較的明瞭に観察できるが、沈降せずに浮遊したままの状態の粒子も同時に存在していることが分かる。実験後に pH 測定を行ったところ、pH は 7.18 であった。沈降実験前の東京湾粘土の pH が 8.3 であったことから、東京湾粘土の沈降中に溶液の pH が中性化し、一部の粒子は粒子端面の電荷が変化せず、粒子間の反発力により沈降速度が鈍くなったと考えられる。1440 分後の pH4 の沈降状況を見ると（写真-3.1(b)1440 分後）、2 層になって体積していることが分かる。このことから、下層は、端面電荷が負になったことで粒子が凝集しながら沈降し（凝集沈降）、

face-face 結合様式で堆積したが、上層では端面電荷が変化せず、粒子は分散状態のまま沈降し（自由沈降）、face-edge 結合様式で堆積したと考えられる。pH12 溶液での沈降実験では、1440 分後も沈降しなかった。実験後の pH を測定すると 9.75 となり、終始アルカリ性であったため、粒子同士が反発しやすい状態であったと考えられる。

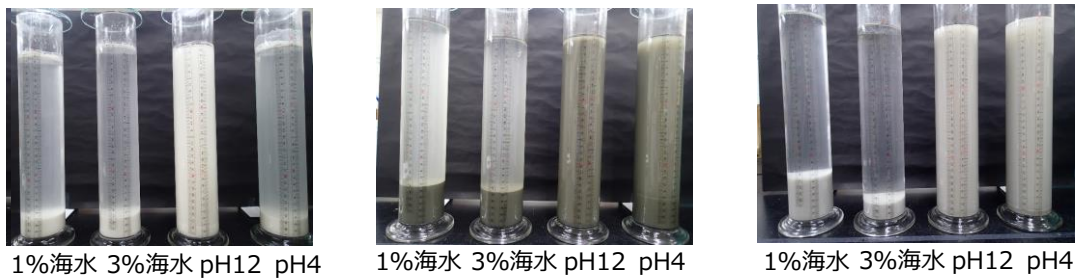
### 3.3.2 海水成分の違いが沈降挙動に及ぼす影響

Na 型ベントナイトを用いた沈降実験では、人工海水で顕著に沈降するのに対し、pH 調整溶液ではどちらのケースもほとんど沈降しない結果となった。Na 型ベントナイトは層間に存在するナトリウムイオンが水分子を吸着することで膨潤する特性を持つ。人工海水にはカルシウムイオン、マグネシウムイオン、カリウムイオンが存在し、いずれのイオンもナトリウムイオンよりも陽イオンの交換侵入力が高いため、層間イオンの交換が生じると考え

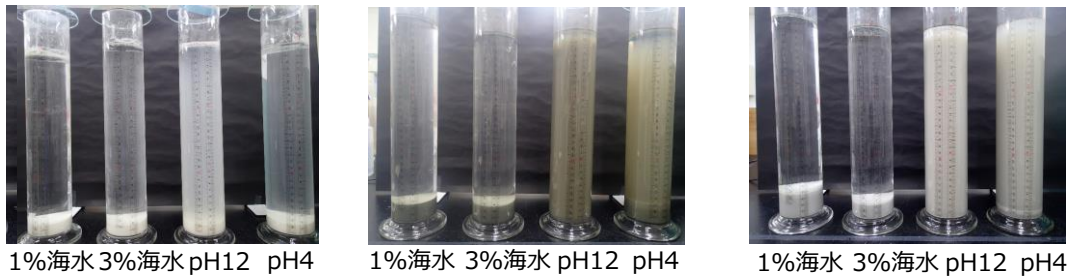
10 分後



60 分後



1440 分後



(a) カオリン

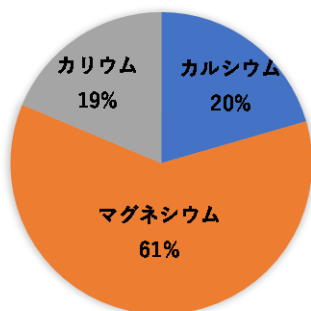
(b) 東京湾粘土

(c) Na 型ベントナイト

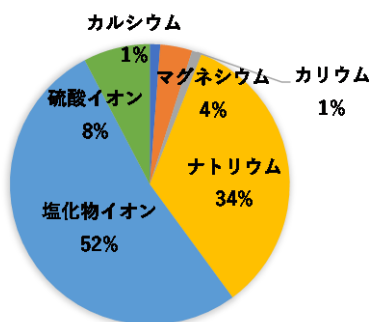
写真-3.1 沈降分析結果



られる。本実験では、陽イオンの交換侵入力が最も高いカルシウムイオンが人工海水に多く含まれるため、層間



(a) 人口海水



(b) 久里浜湾海水

図-3.11 海水中に含まれるイオン

の陽イオンがナトリウムからカルシウムに置換されることで膨潤特性を失い、速やかに沈降したと考えられる。人工海水と久里浜湾の海水の成分を比較すると（図-3.11）、久里浜湾の海水はほとんどナトリウムイオン及び塩化物イオンが占めており、カルシウムイオン含有量が1%と非常に少ない。しかし、久里浜湾で採水した海水（塩分濃度 3.47%、pH7.32）を用いて Na 型ベントナイトの沈降実験を行った結果、人工海水を用いた場合と同様、素早く沈降する結果を得た（写真-3.2）。しかし、人工海水を用いたケースよりも溶液の濁りが完全になくなるまでに時間を要した。このことから、溶液中のカルシウムイオン濃度は沈降速度に影響を及ぼし、1%の塩分濃度でも、本実験の量に対してはカルシウムイオンが十分であったため、Na 型ベントナイトは陽イオン交換により膨潤特性を失ったと考えられる。次に、人工海水及び pH 調整液を用いた Na 型ベントナイトの沈降実験後の堆積状況を写真-3.3 に示す。pH12 溶液では、沈降しながらベントナイトが膨潤し、ゲル化が生じた。pH4 溶液では沈降中には膨潤せず、沈降堆積したのち、堆積粘土と溶液との境界から徐々に膨潤することが分かった。また、両ケース共に粒子が緩い構造で堆積し、人工海水濃度 1% よりも人工海水濃度 3% のケースで沈降後の体積が小さくなった。

海面処分場に浚渫土砂を投入する場合、土砂は海水中で沈降することになる。本実験結果から、塩分濃度が高い溶液中では比較的早く粘土の沈降が生じた。すなわち、

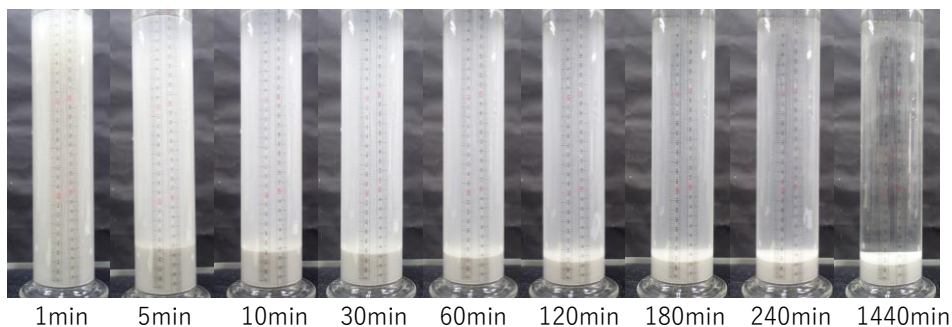


写真-3.2 Na 型ベントナイトの久里浜湾海水を用いた沈降実験結果

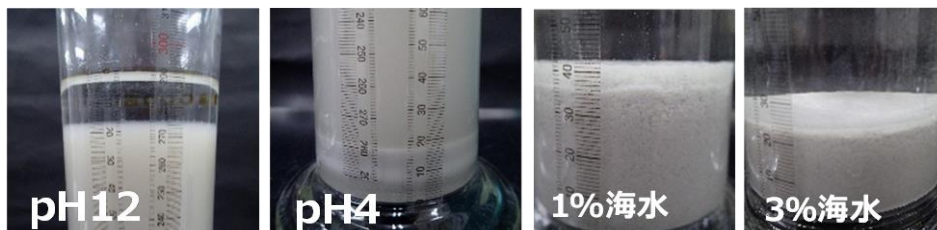


写真-3.3 人口海水及び pH 調整液を用いたベントナイトの沈降実験後の堆積状況

海面処分場では自然条件で沈降が生じやすい環境であるため、粒子の凝集を利用した減容化は海面処分場においてはすでに実現しており、新たに実施する手法ではないことが分かった。

### 3.4 まとめ

浚渫土砂処分場の減容化手法のうち、真空圧密工法、攪乱による減容化手法及び凝集沈降技術を利用した浚渫土受入容量拡大技術について、模擬シミュレーション及び模擬実験による検討を行った。以下に得られた結果をまとめる。

#### 1. 真空圧密による減容化について

浚渫土砂の減容化手法として真空圧密工法が現在最も有効であると考えられているが、地盤が不飽和化することで間隙水圧応答が鈍くなり、地盤内に真空圧に等しい圧力が加わるまでに時間を有する結果を得た。そのため、真空載荷圧の伝達に時間を要するため、所定の圧密度を確保するために真空ポンプの運転期間を延長することが必要になると考えられる。さらに、溶存気体の気化により真空載荷圧の一部を間隙気体圧が受け持つことで、地盤内に作用する有効応力が小さくなるため、地盤沈下量が小さくなる可能性があることが分かった。

#### 2. 粘土の攪乱による減容化について

不攪乱試料及び攪乱試料を用いた既往の実験について数値シミュレーションを実施した結果、既往の実験結果はサンプリング時の試料の不飽和化等による乱れの影響を含む可能性があることが分かった。攪乱による体積圧縮量については、圧密が進行して構造を有する地盤に対しては有効であるといえるが、体積圧縮量の評価には、サンプリング時の試料の不飽和化等による乱れにより生じた膨潤の影響を除外した検討が必要であるといえる。また、浚渫土砂処分場に堆積している土砂は圧密が進行中で構造が未発達のため、繰り返しによる体積圧縮効果は小さくなると考えられる。

#### 3. 凝集沈降技術を用いた減容化について

東京湾粘土及びNa型ベントナイトを用いて、pHの異なる溶液中及び塩分濃度を変えた溶液中で沈降実験を行った。その結果、溶液のpHは粒子同士の反発に影響を及ぼし、pHを小さくして酸性にすることで反発力を小さくし、沈降を促進できたが、沈降中に中和してpHが大きくなることで沈降促進効果が小さくなることが分かった。また、溶液が海水である場合、塩分濃度によらず沈降促進効果があることが分かった。海面処分場では自然条件で沈降が生じやすい環境であるため、粒子の凝集を利用した減容化は海面処分場においてはすでに実現して

おり、新たに実施する手法ではないことが分かった。

## 4. 電気浸透圧密試験

本章では、粘性土に対する電気浸透脱水効果の検証するため、簡易的な電気浸透実験及び電気浸透圧密脱水実験を行う。次に、実験により得られた結果について整理し、電気浸透圧密試験が実施可能な試験装置を製作する。最後に、製作した電気浸透圧密試験装置を用いて、東京湾粘土及びカオリン粘土を対象とした電気浸透圧密試験を行う。さらに、供試体中の成分元素について、電気浸透により陽極側と陰極側で分布に偏りが生じるかどうかを検討するため、電子線マイクロアナライザーを用いた面分析を実施する。

### 4.1 電気浸透脱水効果の検証

#### 4.1.1 電気浸透脱水実験

電気浸透による粘土材料の脱水について簡易的な電気浸透実験を行い、粘性土に対する電気浸透脱水効果について検討した(写真-4.1)。実験では、初期含水比158.2%の川崎粘土をアクリル容器に投入し、0.1Aの直流電流を定電流で5時間通電した。電極にはステンレス板を用いた。通電後、陽極付近から採取した試料の含水比を測定すると100.3%となり、数時間で60%程度の含水比低下がみられた(写真-4.2)。また、実験前の試料、実験後の陽極側及び陰極側付近の試料それぞれについて、走査型電子顕微鏡を用いた成分分析を行った。図-4.1に元素種類ごとの含有比率を、図-4.2に各試料の成分分析結果を示す。得られた結果は、試料から収集した全イオンの質量を100とした場合の含有比率であるため、イオンの移動量の定量的な評価には至らないが、陽極側でNaやMgの陽イオンが減少し、陰極側でClやSの陰イオンが減少していることが確認できた。また、観察した画像から、電気浸透により陰極及び陽極共に実験前よりも間隙が小さくなっていることが確認できた。

#### 4.1.2 電気浸透圧密予備試験

電気浸透脱水を利用した圧密試験装置を製作するため、その機構について検討するための予備試験を実施した。予備試験は、φ60mm、高さ20mmのアクリル円筒を用いて電気浸透脱水試験を行った(写真-4.3)。脱水した水は、容器側方に設置した脱脂綿が詰まった配管より集水した。試験に用いた電極はステンレス板で、供試体上面を陽極、下面を陰極とした。実験には東京湾粘土を用い、スラリー状の粘土供試体に対して0.1Aの定電流を与えた。図

-4.3 に予備試験で得られた結果を示す。図中の黒プロットは東京湾粘土に砂を混合させた結果である。図-4.3から、全てのケースで脱水効果が得られることが確認できた。混合土についても、初期含水比が小さいため、含水

比変化量は小さかったが、砂分があっても電気浸透脱水が生じることが分かった。写真-4.4に試験前後の供試体の様子を示す。写真-4.4(a)及び(c)に示すように、初期スラリー状態の供試体が数時間の通電により自立して半

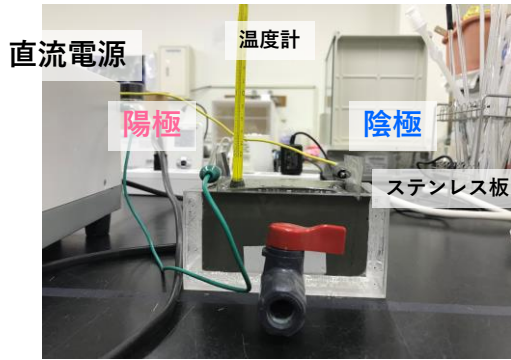
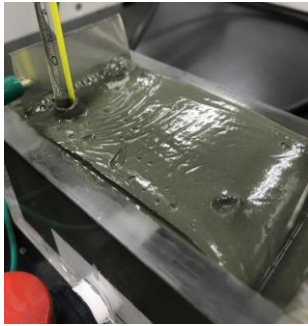
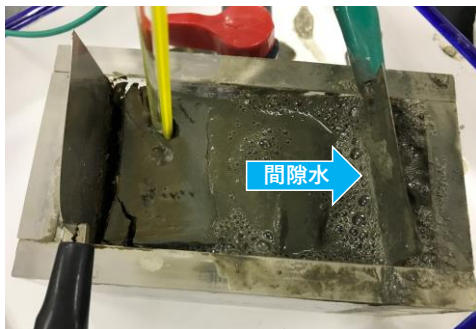


写真-4.1 電気浸透実験装置



(a) 通電直後



(b) 通電後

写真-4.2 通電前後における実験試料の様子

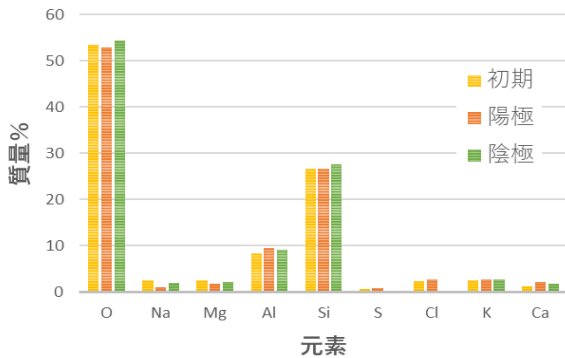


図-4.1 元素種類ごとの含有比率

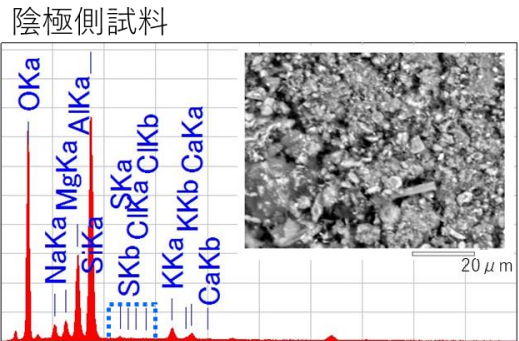
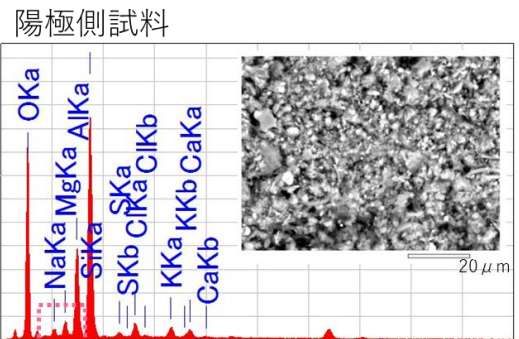
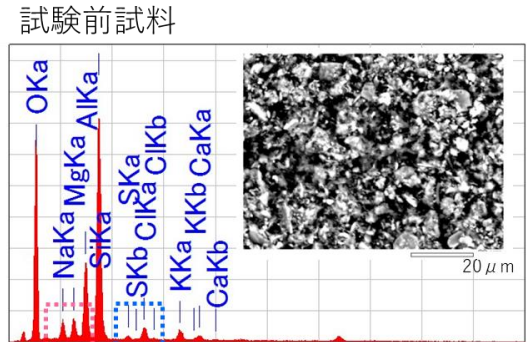


図-4.2 各試料の成分分析結果

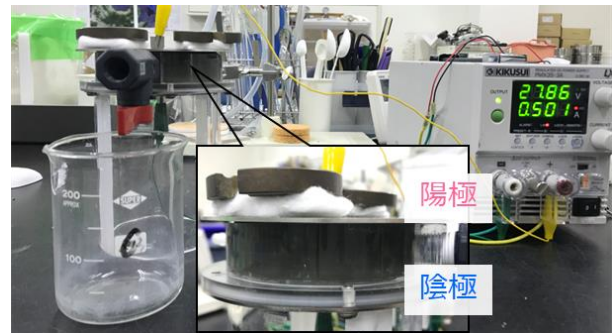


写真-4.3 電気浸透圧密予備試験



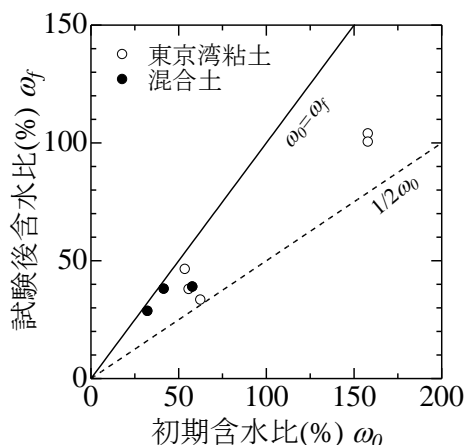


図-4.3 予備実験の含水比変化まとめ



(a) 実験前



(b) 実験後

陽極側



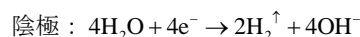
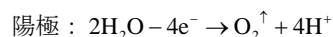
陰極側

(c) 実験後断面

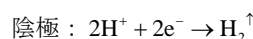
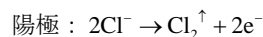
写真-4.4 実験前後の試料の様子

割できるほど脱水が生じることを確認した。また、写真-4.4(b)の供試体と容器の間の白く見える部分は空隙であり、このことから供試体が収縮したことが分かる。これは、電気浸透による圧密が水頭差での圧密ではないため、必ずしも排水面から収縮が生じないためであると考えられる。さらに、この空隙にガスが溜まっていた痕跡(写真-4.4(b)の白い部分)があり、収縮した際に極板反応で発生したガスが供試体側方の集水管から水と一緒に排気していたと考えられる。電気浸透では、以下に示す極板反応により電極からガスが発生する。

・間隙水が純水の場合(水の電気分解)



・間隙水が海水の場合



これらの結果から、電気浸透圧密試験装置製作時の課題を以下にまとめる。

1. 従来の荷重や変位を制御する圧密試験とは異なり、圧密脱水の際に供試体が側方にも収縮するため、圧密量を評価するには側方変形量の計測が必要
2. 極板反応によりガスが発生し、供試体が乱れる
3. 極板反応によるガスの発生は主に陰極側で生じるため、陰極を供試体下方にして脱水量を計測すると、発生ガスが排気されず試料容器内に留まってしまう

#### 4.2 電気浸透圧密試験装置の製作

前項でまとめた課題をクリアすることができる電気浸透圧密試験装置を製作した。電気浸透圧密試験装置の概略図を図-4.4に示す。標準圧密試験結果と比較検討でき

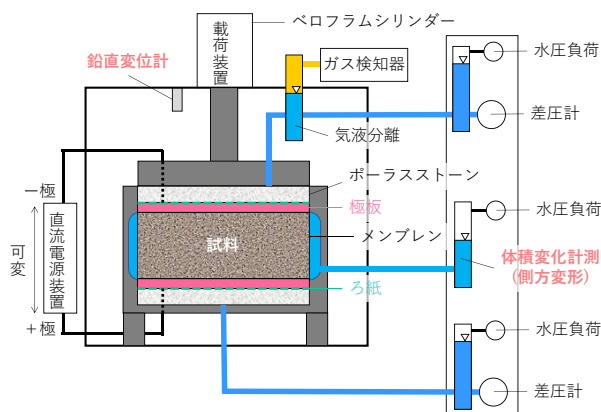


図-4.4 電気浸透圧密試験装置概略図



るよう、圧密容器はφ60mm、高さ20mmとした。試料容器から発生ガスを排気するため、電極には平板ではなく厚みのあるパンチングメタルを用いた。陽極で発生するガス量は非常に少なく、特に間隙水が海水の場合は、発生する塩素ガスが水に接するとすぐに水に溶ける性質を有するため、陽極側からはほとんどガスは発生しない。陰極側からの発生ガスをすぐに排気させるため、試験装置の上面を陰極とし、供試体上面を排気排水条件とした。また、陰極に集まった水とガスを分離回収するため、気液セパレータを載荷板に設置した。電気浸透中の電気動水勾配や透水係数等について検討するため、圧密容器上下に差圧計を設置した。電気浸透圧密試験では供試体が側方にも収縮するため、試料容器内側に小さな穴を2か所あけ、試料容器内側にメンブレンを被せ、メンブレンと試料容器の間を水で満たして、拘束圧による圧密が生じない程度の側圧を作用させることで側方変形による体積変化を計測できる機構とした。また、試料容器に粘土試料を投入する際、真空ポンプを接続して真空引きをすることで試料容器とメンブレンが密着するようにしている。また、試験中常に供試体上面と電極が接するよう側方拘束圧とつり合わせるように鉛直荷重を作用させる。

### 4.3 電気浸透圧密試験

製作した電気浸透圧密試験装置を用いて、初期含水比を様々に調整した粘土供試体に対して実験を実施した。実験に使用した東京湾粘土及びカオリンの土質特性を表-4.1に示す。実験に用いた直流電源装置は3A/35Vが最大出力であり、実験では0.1Aの定電流を流し、電位差が35Vになるまで通電した。電気浸透圧密試験は0.1Aの定電流で行い、極板材料について陽極にはステンレス板を、陰極には銅板を用いた。電気浸透圧密は電位変化により生じるため、定電流として与える電流を段階的に大きくすることで常に電位を変化させることができる。しかし、電流の与え方は今後の課題とし、本研究では定電流条件で35Vの電位差になるまで通電することとし、電位勾配の発生速度が圧密脱水量に及ぼす影響について検討した。

#### 4.3.1 電気浸透圧密試験結果

含水比変化及び通電時間についてまとめた表を表-4.2に示す。また、含水比変化についてグラフにまとめた結果を図-4.5に示す。図-4.5より、全てのケースで脱水効果が得られ、初期含水比が高いほど大きな脱水効果が得られる結果を得た。写真-4.5には表-4.2中のCase2-1及びCase C-1の電気浸透圧密試験前後の供試体の様子を示す。東京湾粘土の初期含水比は171%であり、実験後は含水比が94%まで低下した。カオリンについては、初期

表-4.1 物理試験結果

(a) 東京湾粘土				(b) カオリン			
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\omega_L$ (%)	$I_p$	$k_w$ (m/s)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\omega_L$ (%)	$I_p$	$k_w$ (m/s)
2.68	102.4	62.1	$6.1 \times 10^{-10}$	2.77	52.1	22.4	$6.5 \times 10^{-9}$
粒度分布 (%)				粒度分布 (%)			
砂礫	シルト	粘土		砂礫	シルト	粘土	
3.7	25.1	71.2		0.4	28.9	70.7	

表-4.2 電気浸透圧密試験結果一覧

ケース名	初期 $\omega$ (%)	最終 $\omega$ (%)	$\Delta\omega$	通電時間	試験材料
Case 0	125.12	81.26	43.93	4.5h	東京湾粘土
Case 1-1	128.41	77.28	51.13	4.0h	東京湾粘土
Case 1-2	126.49	80.34	46.14	4.0h	東京湾粘土
Case 2	181.41	82.36	99.01	1.5h	東京湾粘土
Case 2-1	171.78	94.86	76.92	3.0h	東京湾粘土
Case C-1	52.45 ( $\omega_L$ )	40.48	11.97	0.5 h	カオリン

含水比 52%から実験後は含水比 40%まで低下した。実験後に半割した供試体断面の様子から、全体的に脱水が生じていたことが確認できた。また、表-4.2より、東京湾粘土に比べカオリンの通電時間が非常に短いことが分かる。カオリンは水道水で攪拌してスラリーを作製しており、間隙水の塩分濃度が 1.7%の東京湾粘土に比べて供試体の抵抗が初めから大きく、同じ電流に対して電位差が

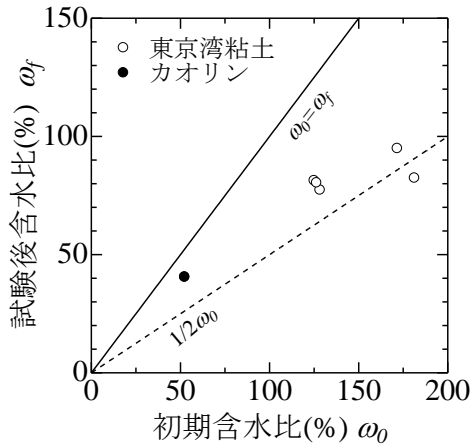


図-4.5 初期含水比と試験後の含水比の関係



(a) 通電前 (左：東京湾粘土，右：カオリン)



i) 東京湾粘土



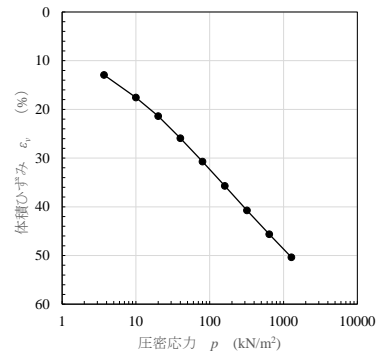
ii) カオリン

(b) 通電後

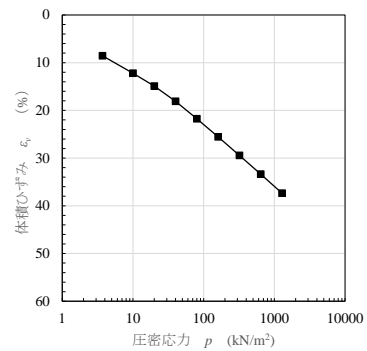
写真-4.5 電気浸透圧密脱水試験前後の供試体

大きくなったためと考えられる。したがってカオリンの場合、通電初期からすぐに脱水効果が得られたと考えられる。一方、東京湾粘土についても徐々に脱水が生じて供試体が固くなり始めると抵抗が大きくなり、それに伴い電位差が大きくなると脱水が急速に生じるため、通電時間は最大でも 5 時間程度であった。

次に、電気浸透圧密試験で生じる体積変化について検討するため、初期含水比130%の東京湾粘土及び初期含水比52%のカオリン粘土について、標準圧密試験を行った。標準圧密試験から得られた  $\varepsilon - \ln p'$  関係を図-4.6に示す。東京湾粘土について、表-4.2中の初期含水比130%程度の供試体について、実験後の含水比が80%程度になっていることが分かる。このときの含水比変化量より体積ひずみを求めると、電気浸透圧密試験における体積ひずみ  $\varepsilon_v$  は 30.86%となった。電気浸透圧密試験で得られた  $\varepsilon_v$  と図-4.6(a)に示す  $\varepsilon - \ln p'$  関係を比較すると、80kPa程度の荷重段階で得られる体積ひずみと同程度であることが分かる。今回の電気浸透圧密試験での通電時間は5時間であり、短時間で大きな体積変化が得られる結果を得た。カオリン粘土については、表-4.2中のCaseC-1から、電気浸透圧密試験における体積ひずみ  $\varepsilon_v$  は13.5%となり、図-4.6(b)



(a) 東京湾浚渫粘土



(b) カオリン粘土

図-4.6 標準圧密試験から得られた  $\varepsilon - \ln p'$  関係

から20kPa程度の荷重段階で得られる体積ひずみと同程度となった。東京湾粘土よりも圧密脱水効果が小さくなる結果を得たが、カオリンの通電時間は30分であり、短時間で圧密効果が得られることが確認できた。また、本実験で用いた直流電源装置は最大電位差が35Vであり、これ以上の電位差を与えることでさらに圧密脱水量が増えると考えられる。

#### 4.3.2 電子線マイクロアナライザー (EPMA) による面分析

通電により粘土供試体中の元素のうち、陽イオンは陰極へ、陰イオンは陽極へ移動することを3.1節で述べた。そこで、電気浸透圧密試験後の供試体が電気的な不均一性を有するかどうかを確認した。初期含水比が100%になるように作製したカオリンを用いて、0.03Aで1時間かけて電気浸透圧密試験を実施し、試験後の供試体について電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析(以下EPMA分析とする)により、供試体断面の元素の濃度分布を調べた。分析に用いた電子線マイクロアナライザーを写真-4.6に示す。また、試料調整の様子を図

-4.7に示す。試料の中央近辺をカッターにより切断して縦1.5cm、横5.5cm、厚さ0.5cm程度の試験片を採取し、1週間真空乾燥した。これを樹脂により包埋した後、斜線の面を鏡面状に研磨し分析面とした。研磨は耐水研磨紙を用いた乾式研磨とした。研磨後、分析面に導電性を与える目的で炭素を蒸着し、EPMA分析を実施した。JSCE-G574<sup>5)</sup>に準拠し、分析を実施した。分析条件を表-4.3に示す。濃度換算には比例法を用いており、測定元



写真-4.6 電子線マイクロアナライザー

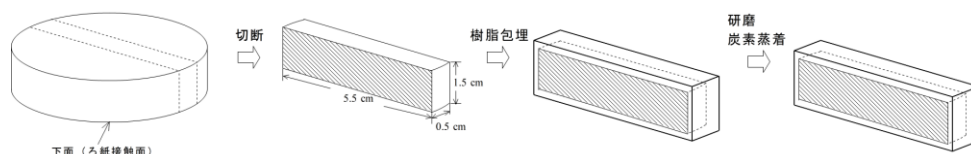


図-4.7 試料調整の様子

表-4.3 分析条件および面分析画像の作成条件

使用機器	日本電子社製 電子線マイクロアナライザー JXA-8200
加速電圧	15 kV
試料電流	50 nA
プローブ径	50 μm
ピクセルサイズ	100 μm
ピクセル数	180×564 (分析領域: 縦 18.0 mm×横 56.4 mm)
計数時間	40 msec/ピクセル
測定元素	ケイ素 (Si), アルミニウム (Al), ナトリウム (Na), 硫黄 (S)
標準試料	Si : Wollastonite(SiO <sub>2</sub> :50.94%), Al : Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =100%) Na : Albite(Na <sub>2</sub> O=11.48%), S : Anhydrite(SO <sub>3</sub> =58.81%)
分光結晶	TAP : Si, Al, Na PET : S
スキャン方式	ステージスキャン
濃度換算方法	比例法
測定結果の表示形式	【濃度単位】 % 【測定元素表示】 Si, Al, Na, S : 酸化物表示 (SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, SO <sub>3</sub> )
面分析画像の作成条件	空隙など実体のない部分を除くピクセルを表示

素の相対濃度は比較可能であるが、一般には絶対値は保証できないとされている。ただし、普通セメントに塩化物イオンを混入した試料の測定例によると、本手法で求めた質量濃度は化学分析によるデータと対応した値となっており、絶対値としても一定の精度を有していると考えられる。分析結果を図-4.8に示す。図-4.8(a)が分析面の真空乾燥前の写真、図-4.8(b)が真空乾燥後の分析面の写真、図-4.8(c)～(f)が分析した各元素の濃度分布である。また、いずれの画像とも上方が供試体の上面で、下方が下面である。各画像左側のスケールの目盛の間隔は1mmである。各元素の濃度は色分けにより表示し、それぞれの色に相当する濃度(%)の範囲を各画像の右側にカラーバーとして表示した。図-4.8(b)の分析面の写真より、全体的に真空乾燥による影響と思われる細かいひびが見られた。供試体は概ね灰色を呈しているが、まだらに白色を呈する部分が見られるのは樹脂の浸透の差によるものと考えられる。図-4.8(c)に示すSiO<sub>2</sub>濃度分布をみると、左右の端がやや高くなっているように見え

る。EPMAの測定原理から供試体の傾きや供試体高さがずれると、測定で得られるX線強度が変化するため濃度差に影響を及ぼすことがある。この濃度差について、電気浸透圧密試験とEPMA分析における測定条件のどちらの影響により生じたものかどうか検討するため、図-4.9にSiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比の元素マップを示す。SiとAlは水に溶けにくい性質をもつため、通常面全体でモル比の値は一定となる。図-4.9から、SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比は面全体で一定になっていることが分かる。このことから、図-4.8(c)で見られた供試体左右端と中央部の濃度差は電気浸透圧密試験において生じる密度差が影響していると考えられる。電気浸透圧密試験中に供試体が収縮するため、通電前から側方に拘束圧を作用させている。また、側方変形による体積収縮が大きく生じたことから、初期に作用させた側方拘束圧及び実験中の収縮により密度差が生じたと考えられるが、詳細に検討するためには側方変形量の計測精度を上げる必要があるため、脱水メカニズムと密度変化に関する検討については今後の課題とする。一方、

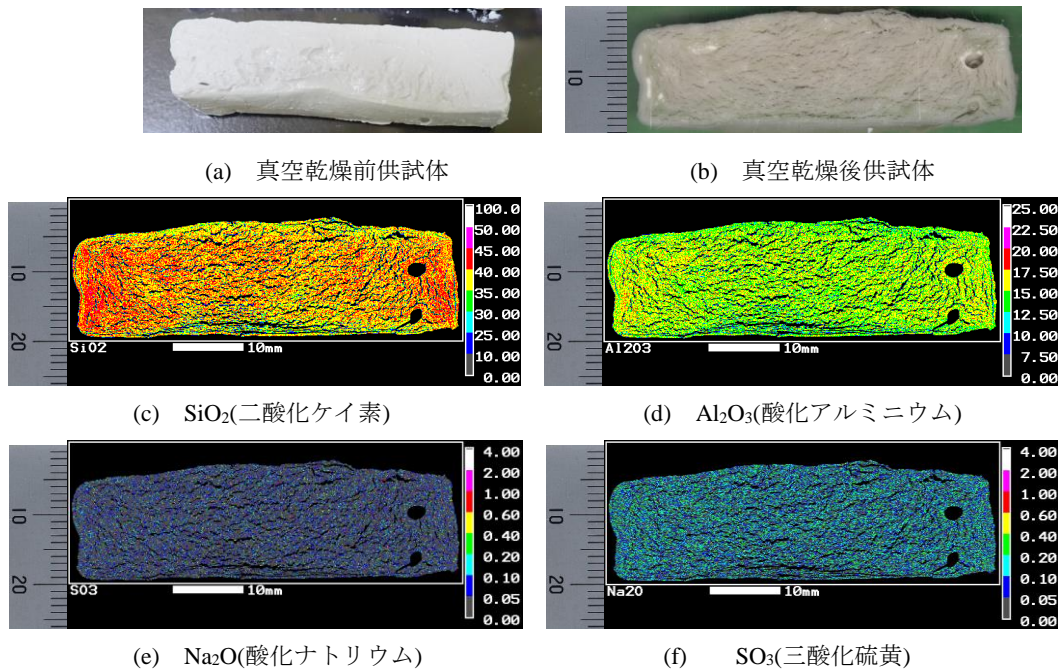


図-4.8 EPMAによる面分析結果

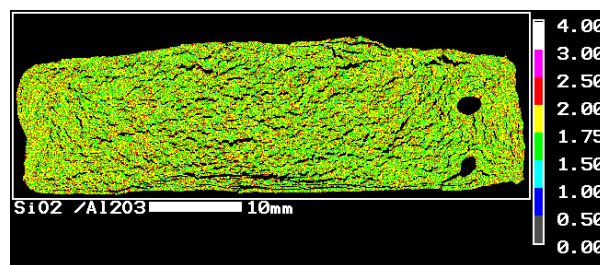


図-4.9 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比

図-4.8(d)～(f)に示す  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  及び  $\text{SO}_3$  濃度は概ね一定であった。これらの結果から、 $\text{SiO}_2$  濃度には若干の濃度差が見られたものの、その差は僅かであることから、電気浸透圧密試験後の供試体の構成元素の濃度はほぼ均一であるといえる。

#### 4.4 まとめ

電気浸透圧密試験が実施可能な試験装置の製作及び、東京湾粘土及びカオリン粘土を用いた電気浸透圧密試験を実施した。電気浸透圧密試験の結果、初期含水比によらず脱水効果が得られることが分かった。また、砂分があっても電気浸透脱水が生じることが分かった。さらに、同じ初期含水比の東京湾粘土を用いた電気浸透圧密試験及び標準圧密試験結果から、80kPa程度の荷重段階で得られる体積ひずみと同程度の体積ひずみが5時間の通電時間で得られることが分かった。電気浸透圧密試験後の供試体断面を観察したところ、全体的に脱水が生じていることが確認できた。電気圧密浸透後の供試体内部の電気的不均一性について検討するために実施したカオリン供試体のEPMA分析結果から、製作した試験機の規格であれば供試体内部の電気的不均一性が生じないことが分かった。今後は、電気浸透圧密による脱水効果について様々な粘土供試体を対象に実験を行い検討することで、電気浸透脱水効果と土質定数の関係について整理する。また、本実験で用いた電位差よりもさらに大きな電位差を与えた実験や、電流を段階的に大きくする等電流の与え方を様々に変えた実験を行うことで、最適な通電方法について検討する。

#### 5. あとがき

本稿では、電気浸透脱水を用いた浚渫土砂の減容化手法の適用性について検討した。その結果、電気浸透脱水を用いた減容化について、実験室レベルでの検討ではあるが、電気浸透は非常に減容化に有効な手法であると考えられる結果が得られた。東京湾粘土については、標準圧密試験で80kPaの荷重を載荷した際に得られる体積ひずみと同程度の体積ひずみを得ることができた。電気浸透脱水を現場に適用した際においても同程度の電気浸透脱水効果が得られると仮定すると、真空圧密工法で作用する地盤内の負圧が-70kPa程度であることから、真空圧密工法で得られる体積変化と相違ない程度の体積変化が電気浸透脱水でも得られる可能性があるといえる。本実験では最大電位差が75Vであったが、電位差を大きくすることでさらなる脱水効果が得られると考えられる。

さらに、電気浸透脱水は非常に短時間で脱水効果が表れることから、将来非常に有効な減容化手法になり得るといえる。

これらの結果から、今後は、電気浸透圧密による脱水効果について様々な粘土試料を対象に実験を行い検討することで、電気浸透脱水効果と土質定数の関係について整理する。また、本実験で用いた電位差よりもさらに大きな電位差を与えた実験や、電流を段階的に大きくする等電流の与え方を様々に変えた実験を行うことで、最適な通電方法についても検討する。さらに、模型実験により最適な電極配置や電流の与え方について検討し、現場施工仕様の提案に繋げたいと考えている。加えて、電気浸透圧密脱水の基礎研究として、様々な試料を用いた電気浸透圧密試験を実施してデータを蓄積するとともに、電気浸透現象を表現可能な数理モデルを提案することで、電気浸透を現場に適用した場合の地盤変状等について数値解析を用いた検討も行いたいと考えている。

(2022年4月26日受付)

#### 参考文献

- 1) 小林正樹, 土田孝 (1984): 錦海湾における真空圧密工法現地実験, 港湾技研資料, No.476.
- 2) 藤井敦, 林芳文, 下田義治, 嶋田康宏, 祐保芳樹 (2003): 既存土砂処分場の減容化における真空圧密工法の適用, 第38回地盤工学研究発表会, pp.481-482.
- 3) 海野寿康 (2018): 土骨格の構造破壊を応用した埋立処分場ない土砂の減容化技術の開発, (一財) 港湾空港総合技術センター平成30年度研究開発助成成果報告書, 第23-4号.
- 4) 桑原拓馬, 御手洗義夫, 椋木俊文, 弘楓, 宮内陸 (2018): 分散剤添加による浚渫粘土の圧密特性の改質と減容化技術としての適用性, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol.67, No.1, pp.79-82.
- 5) Preece, E.F. (1947): Geotechnics and geotechnical research, *Proc. Highway Res. Board*, Vol. 27, pp.384-417.
- 6) Winterkorn, H.F. (1947): Fundamental similarities between electroosmotic and thermoosmotic phenomena, *Proc. Highway Res. Board*, Vol. 27, pp. 443-445.
- 7) Bernatzik, W. (1948): Contribution to the problem of seepage pressure in electroosmosis, *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol. 7, pp.63-66.
- 8) Geuze, E.C.W.A., Bruyn, C.M.A. & Joustra, K. (1943): Results of laboratory investigation on the electrical



- treatment of soils, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.3, pp.51-57.
- 9) Casagrande, L. (1949): Electro-osmosis in soils, *Geotechnique*, Vol. 1(3), pp.159-177.
  - 10) 三瀬貞 (1959): 電気浸透による土の脱水機構について, *土木学会論文集*, 第 64 号, pp.73-78.
  - 11) 三瀬貞 (1960): 粘土の電気浸透による脱水工法の一考察, *土木学会論文集*, 第 69 号, pp.22-28.
  - 12) Reddy, K.R., Urbanek, A. & Khodadoust, A.P. (2006): Electroosmotic dewatering of dredged sediments: bench-scale investigation. *Environ Manage* 78(2), pp.200–208.
  - 13) Fourie, A.B. & Jones, C.J.F.P. (2010): Improved estimates of power consumption during dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics (EKGs), *Geotext Geomembr* 28(2), pp.181–190.
  - 14) Lockhart, N.C. (1992): Combined field dewatering—bridging the science-industry gap. *Drying Technol* 10(4), pp.839–874.
  - 15) Lockhart, N.C. (1983): Electro-osmotic dewatering of clays, influence of voltage. *Colloids Surf A* 6(3), pp.229–238.
  - 16) Kalumba, D., Glendinning, S., Rogers, C., Tyrer, M. & Boardman, D. (2009): Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics, *J Environ Eng* 135(11), pp.1227–1236.
  - 17) Kaniraj, S., Huong, H.L. & Yee, J.H.S. (2011): Electro-Osmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain, *Geotech Geol Eng* 29(3), pp.277–295.
  - 18) Bjerrum, L., Moum, J. & Eide, O. (1967): Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian Quick Clay, *Geotechnique* 17(3), pp.214–235.
  - 19) Casagrande, L. (1952): Electro-osmosis stabilization of soils, *J Boston Soc Civil Eng* 39(1), pp.51–83.
  - 20) Brian, A.C. & Peter, L.B. (1975): Electro-osmosis applied to unstable embankment, *Journal of the Geotechnical engineering division*, Vol.101(8), pp.733-740.
  - 21) Bo, M.W., Choa, V. & Zeng, X.Q. (2001): Laboratory investigation on electro-osmosis properties of Singapore marine clay, *Soils and foundations*, Vol.41(5), pp.15-23.
  - 22) Hu, L.M., Wu, W.L. & Wu, H. (2012): Numerical model of electroosmotic consolidation in clay, *Geotechnique*, 62(6), pp.537–541.
  - 23) <http://www.electrokinetic.co.uk/index.htm>
  - 24) Fourie, A.B., Johns, D.G. & Jones, C.J.F.P. (2007): Dewatering of mine tailing using electrokinetic geosynthetics, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44(2), pp.113-242.
  - 25) Casagrande, L. (1941): Zur Frage der Entwässerung feinkorniger Boden, *Deutsche Wasserwirtschaft*, 36, pp.556-559.
  - 26) Brian, A.C. & Peter, L.B. (1975): Electro-osmosis applied to unstable embankment, *Journal of the Geotechnical engineering division*, Vol.101(8), pp.733-740.
  - 27) Wang, J., Fu, H., Liu, F., Cai, Y. & Zhou, J. (2018): Influence of electro-osmosis activation time on vacuum electro-osmosis consolidation of a dredged slurry, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.55, pp.147-153.
  - 28) 諏訪靖二, 嘉門雅史, 木山正明, 福田光治 (2012): 真空圧密工法—わが国での発展の経緯と現状—, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol.61, No.1, pp.2-6.
  - 29) 日置和昭 (2019): 未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策—4. 代表的な地盤沈下対策方法, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol.68, No.6, pp.506-510.
  - 30) 山本卓生, 渋谷啓, 大島昭彦, 折橋恒春, 南部光広, 野並賢 (2012): プラスチックボードドレーンで改良された超高含水比状態にある浚渫粘性土の原位置挙動, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol.68, No.4, pp.583-596.
  - 31) 中道正人, 河野正文, 梅山崇, 山本修司, 川原修, 片桐雅明, 大石幹太 (2015): VD による土砂処分場の堆積土砂の沈下挙動の計測と評価, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, Vol. 71, No.2, pp. I\_1125-I\_1130.
  - 32) 藤井敦, 林芳文, 下田義治, 嶋田康宏, 祐保芳樹 (2003): 既存土砂処分場の減容化における真空圧密工法の適用, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.961-962.
  - 33) 新舎博, 熊谷隆宏, 宮本健児, 濱谷拓 (2013): 水平ドレーンを利用した真空圧密工法による浚渫土の減容化施工, *地盤工学ジャーナル*, Vol.8, No.1, pp.97-108.
  - 34) 小野正揮, 新舎博, 中川大輔, 丸岡弘晃, 堤彩人 (2015): 東京都新海面処分場 C ブロックにおける粘土の減容化施工, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol.71, No.4, pp.365-379.
  - 35) 中道正人, 山口誠, 梅山崇, 山本修司, 川原修, 大

- 石幹太, 片桐雅明 (2016): 浚渫粘土地盤に対する真空圧密工法の適用と嵩上げ築堤時の地盤挙動, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I\_402-I\_407.
- 36) 三田地利之, 高橋秀彰, 香西篤 (2002): 真空圧密工法による地盤の変形と強度増加—三軸試験によるシミュレーション—, 土木学会論文集, No.722, III-61, pp. 245-252.
- 37) 今井五郎 (2005): 「真空圧密工法」のさらなる発展に向けて—真空圧を利用した地盤改良の原理とその適用—, 土木学会論文集, No. 798, VI-68, pp. 1-16.
- 38) 荒井亜紀, 竹山智英, 青木孝憲, 中熊和義, 本田周成, 太田秀樹 (2008): マクロエレメント法の真空圧密工法への適用 (その 2), 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.889-890.
- 39) Y. Sugiyama, S. Tachibana, H. Sakaguchi & A. Iizuka (2018): Analytical investigation of disturbance on seabed-sampled soil specimens and its influence on unconfined strength, *Soils and foundations*, Vol.58 No.3, pp.689-70.
- 40) 平田昌史, 福田淳, 信田潤一, 山田耕一, 川井田実 (2010): 真空圧密工法を用いた超軟弱地盤における載荷盛土の施工事例, 土木建設技術発表会2010概要集, 土木学会, 建設技術研究委員会, pp.171-178.
- 41) 御手洗義夫, 田中洋輔, 西田浩太 (2013): 乱れが自然堆積粘性土の圧密特性に及ぼす影響とその積極的な利用方法について, 第 68 回土木学会年次講演会, III-210, pp.419-120.
- 42) K. Matsumoto, H. Horie & T. Okumura (1969): Studies on Boring and Sampling of Saturated Alluvial Clays(4th Report), 港湾技術研究所報告, 第 8 巻, 第 2 号, pp.3-20.
- 43) 藤下利男 (1965): 荷重除去に伴う粘土の膨張について, 港湾技術研究所報告, 第 4 巻, 第 1 号.
- 44) Tsui, Y. & Helfrich, S. (1983): Wave-induced pore pressures in submerged sand layer, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, Issue 4.
- 45) A. Asaoka, T. Noda, E. Yamada, K. Kaneda & M. Nakano (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and foundations*, Vol.42, Issue. 5, pp.47-57.
- 46) 桑原拓馬, 御手洗義夫 (2015): 粘土粒子の界面付近における電気化学的作用を利用した改質技術と浚渫土砂の有効利用, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 309-314.
- 47) 榎牧子, 佐藤道佑, 金田航大, 関山亮太, 中川明子, 浦木康光, 兼廣春之 (2008): 海藻ペーストを用いた浚渫用凝集剤の開発—アルギン酸抽出を伴わないワカメペーストの調整とその泥水凝集性能—, 日本水産学会誌, Vol.74, No. 4, pp.688-693.
- 48) 早野公敏 (2016): 凝集剤を利用した浚渫土砂処分場の受入容量拡大技術の開発, (一財) 港湾空港総合技術センター平成 28 年度研究開発助成成果報告書, 15 港企第 22-4 号.
- 49) 松下英次, 山本哲郎, 鈴木素之 (1999): 土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響, 土木学会論文集, No.617, No. III-46, pp.283-297.
- 50) 黒田芳弘, 中石克也 (1996): アルカリ状態における Na-モンモリロナイト・水系の分散・凝集に及ぼす塩濃度の影響, 粘土化学, 第 36 巻, 第 1 号, pp. 1-8.
- 51) 片岡沙都紀, 川口貴之, 山下聡, 渋谷啓 (2013): 間隙水中の塩分濃度低下が海底土の土質変化に与える影響, 建設工学研究論文報告集, 第55号, pp. 27-36.
- 52) JSCE-G574-2013: EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法 (案), 2013 年制定コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準, 土木学会, pp.387-400.

港湾空港技術研究所資料 No.1404

2022.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2022) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。