

学 位 論 文 要 旨

氏 名 メルデイ テイエネケ マグダレナ シノルンガン

題 目 インドネシア・トンダノ湖および佐賀平野クリーク底泥の土質化学的性質ならびにジオポリマーによる固化特性について
(Geochemical and Solidification Characteristics of Deposits in Tondano Lake, Indonesia and in Creeks of Saga Plain Mixed with Geopolymer)

インドネシアの北スラベシのマナドにあるトンダノ湖は汚染や土砂の堆積といった問題に直面している。適切な対策方法の確立が求められている。一方佐賀平野では軟弱な有明粘土からなる農業用クリークが老朽化してきており水蝕による被害を受けつつある。ここでもこれらを修復するための適切な方法の確立が求められている。

本研究では、まずトンダノ湖沈積土の土質化学的・物理的特性を明らかにし、次いで湖水浄化のための石膏添加法について検討する。最後にフライアッシュをベースとしたジオポリマー混合による有明粘土とトンダノ沈積土の安定化法について検討する。

研究成果をまとめると以下のようなものである：

1. トンダノ湖沈積土には、Cr、Cu、Hg、およびZnといった重金属が含まれていること、この内 Cr および Zn は沈積土品質ガイドライン (Sediment Quality Guideline、SQG と略称する) の基準以下であったが、Cu および Hg は SQG の許容基準以内にあることが明らかとなった。有機物含有量は湖北の河川流入口で最大で湖南の河川流出口で最低であった。

2. トンダノ湖沈積土をフルイにかけて作成した粘土に石膏を添加した場合の沈降特性を調べた結果、石膏5%添加の場合、沈降パターンおよび沈降/圧密速度に変化が見られた。石膏添加の影響は、含水比3000%以上の圧密沈降が生じない範囲において顕著で、含水比2000%以下ではそれほど効果は見られなかった。

3. 有明粘土の場合、ジオポリマー混合割合 δ および材令 t の変化につれ圧縮応力 σ ~ 圧縮ひずみ ε 曲線は緩やかに変化し、一軸圧縮強さ q_u (σ ~ ε 曲線のピーク値で定義される) は典型的な軟弱粘土のものからコンクリートに近いものにまで変化した。トンダノ粘土の場合、ジオポリマー混合により σ ~ ε 曲線はいずれの混合や材令に対しても明瞭なピーク値を示した。トンダノ粘土へのジオポリマー混合の効果は有明粘土に対する場合より顕著であり、トンダノ粘土の $\delta=30\%$ および 50% 混合の $t=28$ 日における q_u 値はそれぞれ有明粘土の場合のそれぞれ5倍および7倍であった。

学 位 論 文 要 旨

氏 名

Meldi Tienieke Magdalena Sinolungan

題 目

Geochemical and Solidification Characteristics of Deposits in Tondano Lake, Indonesia and in Creeks of Saga Plain Mixed with Geopolymer

(インドネシア・トンダノ湖および佐賀平野クリーク底泥の土質化学的性質ならびにジオポリマーによる固化特性について)

Tondano Lake in Manado, North Sulawesi Indonesia is facing some problems such as pollution and sedimentation. An appropriate countermeasure methods are required to establish. On the other hand in the Saga Plain creeks for agricultural use which are made of soft Ariake clay have been becoming old and many of them are getting damage by water erosion. It is also required to establish an appropriate method to fix them.

In this research, firstly, the geochemical and physical characteristics of Tondano Lake sediments were clarified. Nextly the gypsum addition method to make clear the lake water were examined. Lastly the stabilization method of Ariake clay and Tondano lake sediment were examined by mixing the fly ash-based geopolymer.

Research results are summarized as follows:

1. The Tondano Lake sediments were clarified to contain some heavy metals, such as Cr, Cu, Hg, and Zn; where Cr and Zn were less than the Sediment Quality Guideline (SQG), but Cu and Hg were well within the permissible levels of SQG. Organic matter content was highest at the northern outlet area, with the lowest amount at the southern inlet area.
2. According to the analysis of sedimentation characteristics of Tondano clay sieved from the sediments by using gypsum addition, the addition of 5% gypsum to this clay influenced the settling pattern and settling/consolidation rate. In the region which consolidation settling does not occur (above 3000% water content), the effects of gypsum addition are significant; whereas the consolidation settling occurs (under 2000% water content), the effects of gypsum addition are not so much significant.
3. In the case of Ariake clay, a mixture ratio δ of geopolymer and a curing period t gave a gradual changes of compressive stress $\sigma \sim$ compressive strain ε curves and the unconfined compression strength q_u which is defined as the peak values of $\sigma \sim \varepsilon$ curves changed from the typical remolded clay to the similar concrete. In the case of Tondano clay, the mixture of geopolymer shows clear peaks in the $\sigma \sim \varepsilon$ curves for any mixture ratio δ and t . The effectiveness of geopolymer mixture to Tondano clay was more remarkable than to Ariake clay in which at $t = 28$ days, q_u values for δ of 30% and 50% of Tondano clay were five and seven times higher than that of Ariake clay, respectively.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏 名	Meldi Tienneke Magdalena Sinolungan
審査委員	主 査 佐賀大学 教授 甲本 達也
	副 査 佐賀大学 准教授 近藤 文義
	副 査 琉球大学 教授 宜保 清一
	副 査 佐賀大学 教授 瀬口 昌洋
	副 査 琉球大学 教授 上野 正実
審査協力者	
題 目	<p>Geochemical and Solidification Characteristics of Deposits in Tondano Lake, Indonesia and in Creeks of Saga Plain Mixed with Geopolymer (インドネシア・トンダノ湖および佐賀平野クリーク底泥の土質化学的性質ならびにジオポリマーによる固化特性について)</p>

インドネシアの北スラベシのマナドにあるトンダノ湖は汚染や土砂の堆積といった問題に直面している。適切な対策方法の確立が求められている。一方佐賀平野では軟弱な有明粘土からなる農業用クリークが老朽化してきており水蝕による被害を受けつつある。ここでもこれらを修復するための適切な方法の確立が求められている。

本研究は、トンダノ湖沈積土の土質化学的・物理的特性を明らかにし、湖水浄化のための石膏添加法について検討するとともに、フライアッシュ（石炭灰）をベースとしたジオポリマー混合による有明粘土とトンダノ沈積土の安定化法について検討したものである。

本研究により得られた主な成果は以下のようである：

1. トンダノ湖沈積土には、Cr、Cu、Hg、及び Zn といった重金属が含まれていること、この内 Cr および Zn は沈積土品質ガイドライン（Sediment Quality Guideline、SQG と略称する）の基準以下であったが、Cu および Hg は SQG の許容基準以内にある。有機物含有量は湖北の河川流入口で最大で湖南の河川流出口

で最低であった。

2. トンダノ湖沈積土をフルイにかけて作成した粘土に石膏を添加した場合の沈降特性を調べた結果、石膏 5%添加の場合、含水比 3000%以上の圧密沈降が生じない範囲において顕著で、含水比 2000%以下ではそれほど効果は見られなかった。

3. 有明粘土の場合、ジオポリマー混合割合 δ 及び材令 t の変化につれ圧縮応力 $\sigma \sim$ 圧縮ひずみ ε 曲線は緩やかに変化し、一軸圧縮強さ q_u ($\sigma \sim \varepsilon$ 曲線のピーク値で定義される) は典型的な軟弱粘土のものからコンクリートに近いものにまで変化した。トンダノ粘土の場合、ジオポリマー混合により $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線はいずれの混合や材令に対しても明瞭なピーク値を示した。トンダノ粘土へのジオポリマー混合の効果は有明粘土に対する場合より顕著であり、トンダノ粘土の $\delta = 30\%$ 及び 50% 混合の $t = 28$ 日における q_u 値はそれぞれ有明粘土の場合のそれぞれ5倍および7倍であった。

以上のように、本研究は、トンダノ湖湖底沈積土の土質化学的・物理的特性を明らかにし、トンダノ湖湖水浄化のための石膏添加法について知見を得るとともに、フライアッシュをベースとしたジオポリマー混合による有明粘土とトンダノ沈積土の安定化法について現場施工の指針を得たものであり、地盤環境学的に意義あるものと評価できる。したがって、審査員一同は、本論文が博士（学術）の学位論文として十分な価値があるものと判定した。

最終試験結果の要旨

学位申請者 氏名	Meldi Tienneke Magdalena Sinolungan		
審査委員	主査	佐賀大学 教授	甲本 達也
	副査	佐賀大学 准教授	近藤 文義
	副査	琉球大学 教授	宜保 清一
	副査	佐賀大学 教授	瀬口 昌洋
	副査	琉球大学 教授	上野 正実
審査協力者			
実施年月日	平成 21年 1月 14日		
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。)			<input checked="" type="radio"/> 口答・筆答
<p>主査及び副査は、平成 21年 1月 14日の公開審査会において学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士(学術)の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに識見を有すると認めた。なお、本研究は農学と工学にまたがる内容であるので博士(学術)が相応しいと判定した。</p>			

学位申請者

氏 名

Meldi Tienneke Magdalena Sinolungan

〔質問 1〕凝集剤としての石膏の長所について、他の例えばアルミニウム系または高分子系の凝集剤との比較からもう少し説明を加えてください。

〔回答 1〕石膏添加による代掻き濁水の凝集処理に関しては岡山大学の赤江の研究（1992 年）が著名であり、本研究においても実用性は高いと考えています。特に、アルミニウム系のものは魚毒性の点に問題があり、また高分子系のものは価格の点で問題があります。

〔質問 2〕あなたの研究ではジオポリマーを混ぜ合わせることによって柔らかい有明粘土の強さを強化できるようですが、柔らかい粘土が乾燥して硬くなると亀裂を生じます。ジオポリマーで固化した場合の粘土の挙動はどうですか。

〔回答 2〕この新しい方法で固めた粘土は、乾いた状況の下で粘土混合物を速く固められます、またその強度も大きく乾燥による収縮亀裂は生じていませんでした。

〔質問 3〕2000 年にサンプリングされた重金属の分析結果では、一部に不明確な結果（As、Cd、Pb、Ni、Ag）が示されていますがその理由を説明してください。

〔回答 3〕この時の分析に使用したサンプルは絶乾状態に近いものであったため、精度良く分析できなかったことによるものです。従って、底質基準および底質の物理・化学的性質との比較検討においては分析結果が明確な重金属についてのみ行いました。

〔質問 4〕これらの重金属の分析をカナダで行った理由は何ですか。

〔回答 4〕当時は私の大学には十分な設備がなく、指導教員の紹介のもとにカナダで行いました。

〔質問 5〕ジオポリマーの固化機構について説明してください。

〔回答 5〕ジオポリマーとは、一般にアルミノシリカ粉末（フィラー）とアルカリシリカ溶液（水ガラス）との反応により形成された非晶質の縮重合体（ポリマー）全体を指すものであり、もしフィラー中に重金属などを含む場合には、フィ

ラーから溶出した金属イオンが水ガラス成分（Si、O、H）と反応してお互いを連結（架橋）して固化する。これより、重金属を含むスラッジをジオポリマーで固化改良した場合、重金属は化学的に改良体中に取り込まれることになり、コンクリートを用いてスラッジを単に固化した場合よりは安全かつ安定であるといえる。

〔質問6〕2000年と2006年にサンプリングされた底質において、全ての地域において粒度分布に大きな違いが見られますが何故ですか。

〔回答6〕2000年の測定はピペット法によるものであり、結果は国際法によって整理しました。一方、2006年の測定はハイドロメータ法によるものであり、結果は地盤工学会法によって整理しました。国際法が粘土の粒径区分が $<2\mu\text{m}$ であるのに対し、地盤工学会法はASTM法に準拠して $<5\mu\text{m}$ を粘土区分と定めていますので、2006年の測定結果においては粘土分が過大評価された結果となっています。

〔質問7〕なぜ、有明粘土とトンダノ粘土のジオポリマー混合物ではそれほど強度に差があるのですか。

〔回答7〕今回の実験では、供試体作成条件が有明粘土では液性限界より大きく、トンダノ粘土では液性限界よりも小さかったことと、ジオポリマー作成条件が有明粘土の場合とトンダノ粘土の場合と作成時期の違いにより若干異なっていたことが原因であると考えます。

〔質問8〕有明粘土とトンダノ粘土へどのようなジオポリマーを混合したのですか。

〔回答8〕有明粘土へは松浦発電所産のフライアッシュと珪酸ソーダ1号溶液と水とを加えて作成したジオポリマーを、トンダノ粘土へは苓北発電所産のフライアッシュとメタ珪酸ソーダ粉末と水を加えて作成したジオポリマーをそれぞれ混合しました。

〔質問9〕あなたが使用しジオポリマー材料の価格について。

〔回答9〕フライアッシュはいずれも九州電力産業株式会社からの提供品ですが、珪酸ソーダ1号溶液は8000円/30kg、メタ珪酸ソーダは1700円/20kgです。