

土壌分析による海底軟弱底質の特性評価について

Characterization of Marine Soft Mud by Physical and Chemical Analysis

前野 賀彦*・宮野 敏男**

Yoshihiko MAENO and Toshio MIYANO

Both the soft mud sampled in an estuary and the silica materials artificially prepared were characterized by means of electron microscopic observation, X-ray diffraction method and chemical analysis. Comparison of the results for both materials indicated problems to use the artificial materials instead of the sampled materials for physical modeling. The sampled materials is cohesive because of their including water-soluble salts, weathered materials and organic materials. The reasonable materials for physical modeling were obtained by adding fired clay minerals, salts and organic materials.

Keyword: soft mud, chemical analysis, electron microscope, X-ray diffraction

1. 序 論

大河川の河口付近の沿岸域にはシルト質の軟弱海底地盤が多く認められる。このような軟弱海底地盤からなる沿岸域に波浪が侵入した場合に顕著な波浪減衰が生じることが知られている。この波浪減衰については既にいくつかの理論モデルも提案されており (Jiang, Kioka & Ishida, 1990; Dalrymple & Liu, 1978; Foda, 1989; Hsiao & Shemdin, 1980)、一方では造波水槽内での実験も行われている。著者の一人も軟弱シルト地盤上での波浪減衰と地盤内の間隙水圧応答に関する実験を行っている (Foda, Tzang & Maeno, 1991)。この種の実験を行おうとする場合、実験床を作成するための材料の確保が問題となる。砂を用いた実験の場合には試料を得ることは比較的容易であるが、シルトに関しては、多くの困難が伴う。それは、砂地盤の場合には砂層中の間隙水圧の発達特性は粒径分布等の特性 (排水特性) に依存する割合が高いが、シルト地盤が存在する場所では海洋生物の活動も盛んであり、河川から供給される動植物の腐敗物も多いことから有機物や塩類の存在による影響が無視できないことによる。そのために、粒径に基づき実験試料を選択した場合には実地盤とは大きくかけ離れた結果を誘導する恐れがある。実際に現地から採取したシルト質試料を実験に用いれば良いのであるが、乱さずに大量の試料を得ることは困難である。

そこで、実際に大河川河口付近の軟弱海底地盤から採取した試料と粒径に基づいて得たシリカ試料の両者について、①電子顕微鏡による観察、②X線回折装置による分析、③化学分析を行い、特性評価を行った。さらに、両者の比較により実地盤の軟弱シルトに代えて人工シリカ試料を用いるに当たっての問題点と改善方法について考察した。

2. 実験方法

(1) 試料

広大なデルタを伴う大河川河口域から採取された実地盤シルト試料とそれに対応して粒度調整された赤褐色のシリカ質人工試料を実験試料として用いた。

採取シルト試料は緑黒色で水に懸濁させると植物繊維状の浮遊物が多く観察され、かなり強い汚泥臭を放つ。また約100℃の乾燥器中で1日乾燥させた後には、白色粉末が析出し、黒褐色となった。白色粉末は海水中の塩類が析出したものである。さらに約800℃で赤熱し、有機物を完全除去すると色は赤褐色となり、Fe³⁺の存在が予想された。

シリカ質人工試料は工業的につくられたもので非粘着性を有している。メーカーの説明によれば主成分はシリカであるとされているが、試料が赤褐色を呈することから、Fe³⁺がかなり含まれていることが予想される。また、水と混合し、陽イオン・陰イオン検出を行なったが、明瞭な反応はなかった。したがって、人工試料は水溶性塩類は含まず、不溶性岩石成分が主である。

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校土木工学科
(625 舞鶴市字白屋234番地)

** 舞鶴工業高等専門学校自然科学科

(2) X線回折分析

X線回折分析は、粉末X線回折装置を用いて行なった。装置の概略は図-1に示す通りである。試料を少量(約0.5g)取り、これを約100℃の乾燥器中で1日乾燥した後、瑪瑙乳鉢中でよく摺りつぶし、微粉末状にする。この粉末にアセトンを加えペースト状にしてよく練り、試料ホルダーに塗り付ける。これをX線回折試料とした。

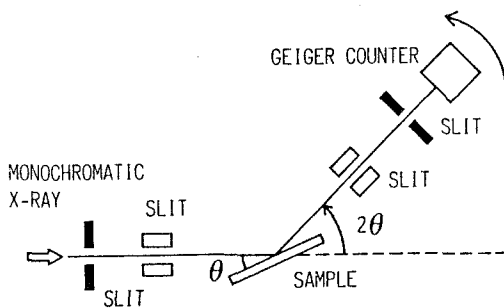


図-1 粉末X線回折装置

用いたX線は加速電圧40kV、フィラメント電流80mA、銅ターゲットである。単色X線を試料に照射しながら試料を θ で回転させる。同時にガイガー計数管を 2θ で回転させ、試料からの回折X線の強度を計数する。得られたデータは、横軸に回折角 2θ 、縦軸にX線回折強度cpsを取ったX線回折パターンとしてチャート紙に記録する。得られた試料のX線回折パターンと標準鉱物試料のX線回折パターンを比較することにより試料成分の同定を行なった。

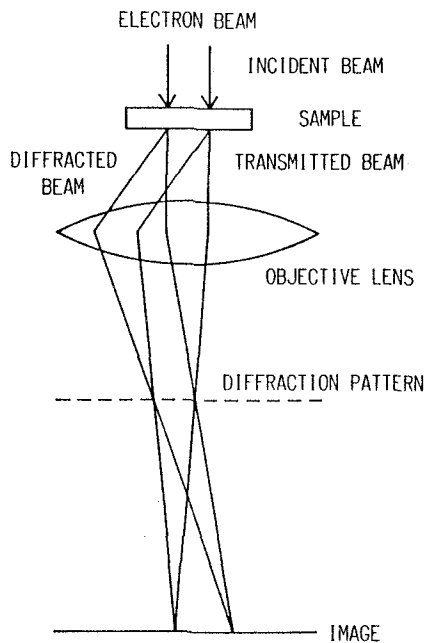


図-2 電子顕微鏡の電子光学系

(3) 電子顕微鏡観察

電子顕微鏡観察は加速電圧100kVの透過型電子顕微鏡を用いて行なった。図-2は、電子顕微鏡の電子光学系の概略である。電子銃から出た電子線を試料に収束照射させる。試料を透過した電子線、試料により回折された電子線は、試料真下に配置された対物レンズによって、後焦点面上に電子回折パターンを結像する。また、像面には試料の透過像を結像する。これらの像を投射レンズにより拡大し写真乾板に記録する。

極く少量(耳搔き1杯程度)の試料に水を加え懸濁液とする。これを数滴、支持膜を張った直径3mmの銅製電子顕微鏡用シートメッシュ上に落とし、これを検鏡試料とする。電子顕微鏡観察により、試料粒子の粒径ならびに形状の観察を行ない、併せて電子回折パターンにより試料の同定も行なった。

(4) 化学分析

試料の化学分析は通常の陽イオン系統分析と陰イオン検出分析を併用して行なった。陽イオン系統分析は図-3に示す要領で行なった。一部の成分の定量は重量法によった。陰イオン検出は表-1の試薬を用いた。化学分析の前処理の第一段階として、試料中の水溶性成分の除去とその検出を行ない、第二段階として、塩酸による溶解成分の検出を行なった。

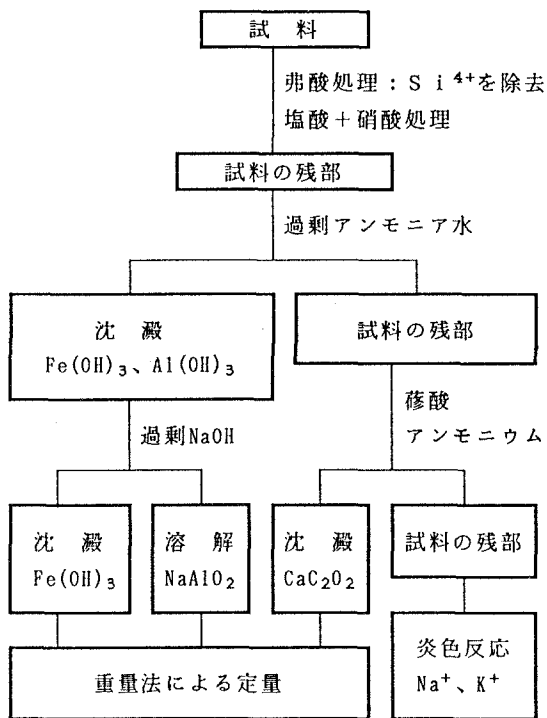


図-3 陽イオン系統分析の概要

試料中の珪酸成分の定量は、弗酸処理により珪酸塩鉱物を溶解し、珪素を SiCl_4 として蒸発せしめ、

残存 Si^{4+} は SiO_2 として沈殿除去することによって行なった。また、一部のアルカリ金属、アルカリ土類金属の検出には炎色反応を利用した。

表-1 陰イオン検出分析

陰イオン	検出試薬
Cl^-	AgNO_3
CO_3^{2-}	HCl
SO_4^{2-}	BaCl_2
$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	CaCl_2
S^-	AgNO_3

3. 実験結果と考察

(1) X線回折分析結果

図-4 (a)、(b)はそれぞれ採取シルト試料およびシリカ質人工試料のX線回折パターンである。これらの回折パターンはピークの数少なく、その位置が系統的である。したがって、それぞれの試料はその主成分が単一成分であることがわかる。図-4 (c) は同定用の石英標準試料についてのX線回折パターンである。これらを比較すると、実験試料の回折ピーク位置は石英標準試料のそれとほとんど一致する。その他の造岩鉱物や粘土鉱物、たとえば、カオリン、タルク、カンラン石、輝石などのX線回折パターンと比較したが、どれも実験試料と類似の回折パターンを示すものがなかった。

いずれの実験試料も不純物の混入などの結晶格子の変形があるが、そのX線回折パターンを石英標準試料のそれとと比較すると、基本的にはピーク位置はほとんど一致する。したがって、両実験試料とも石英に類似の構造であるといえる。

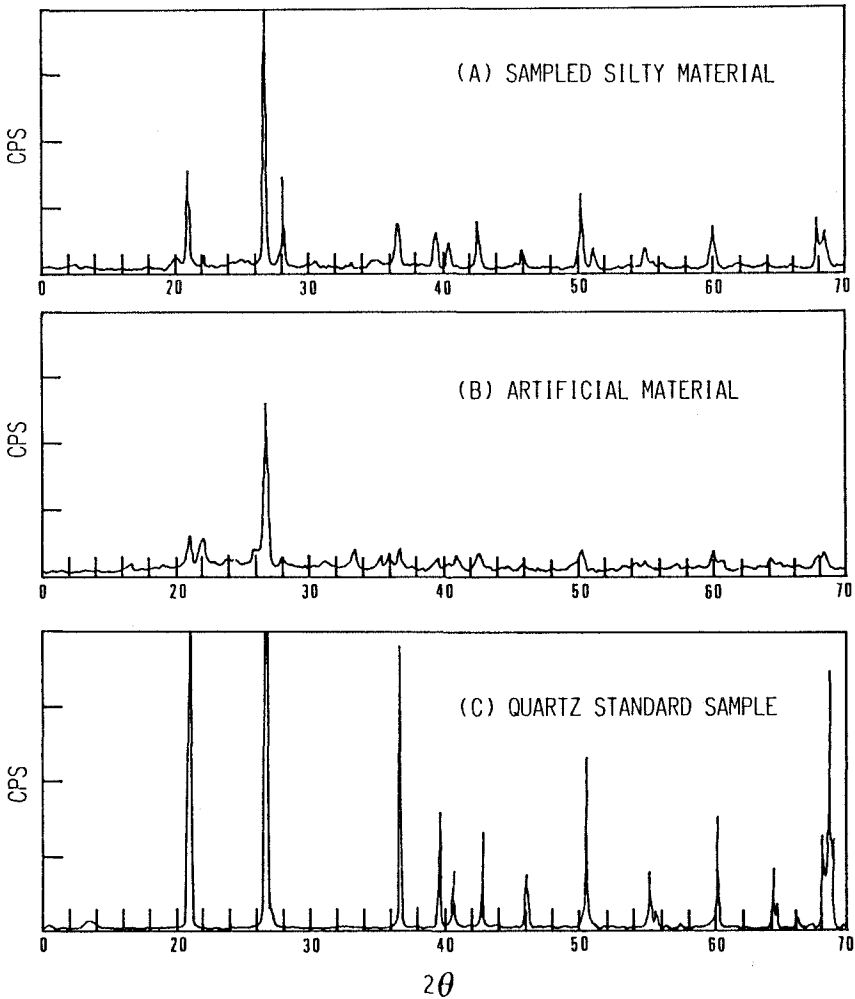
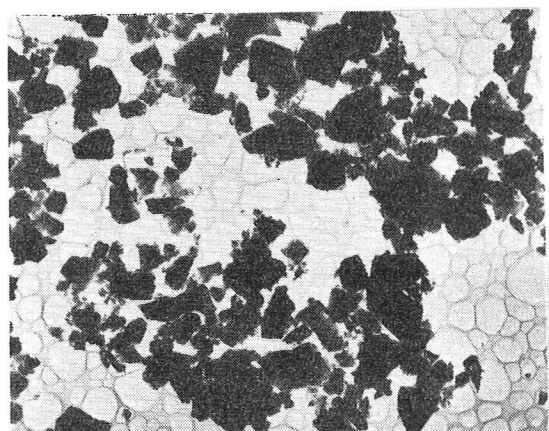


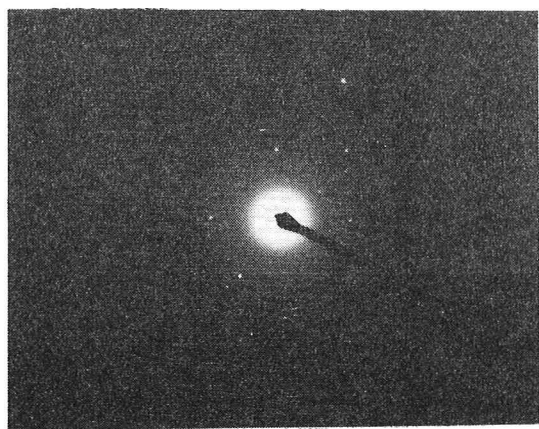
図-4 X線回折パターン

採取シルト試料では20度付近の主ピークの両サイドに弱いピークが認められ、26度付近の主ピークより少し高角度側にやや強いピークが認められる。これは試料が純粋な石英ではなく異種原子（鉄またはアルミニウムなどが考えられる）が混入しているため石英の六方晶格子が少し歪み偽六方晶格子（三斜晶格子）になったためと考えられる。

シリカ質人工試料では20度付近の主ピークが二つに分裂し、26度付近の主ピークの両サイドに弱いピークが認められる。これは採取シルト試料と同様に結晶格子の変形に起因するものと考えられる。また、採取シルト試料に比較して回折ピークのシャープネスが弱く、回折強度も全般に小さい。さらに、20度から30度にかけてバックグラウンドが認められる。これらのことはシリカ質人工試料の方が採取シルト試料に比較して結晶性が悪く、不純物の混入が多いことを示している。



(a) 電顕像

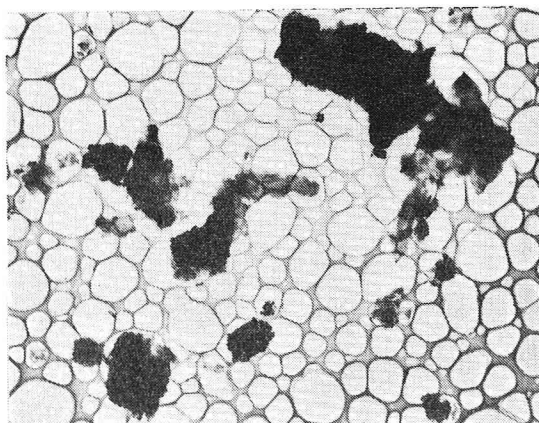


(b) 電子回折パターン

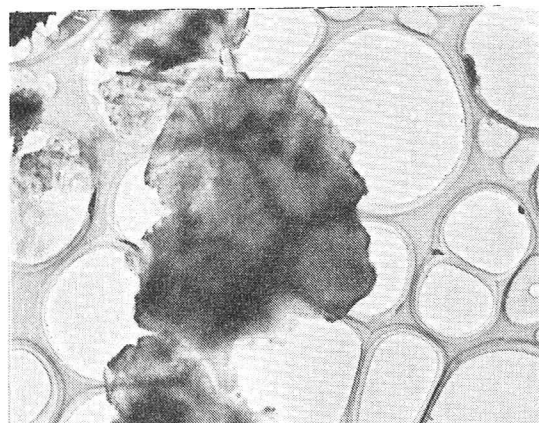
図-5 シリカ質人工試料の電顕像と電子回折パターン

(2) 電子顕微鏡観察結果

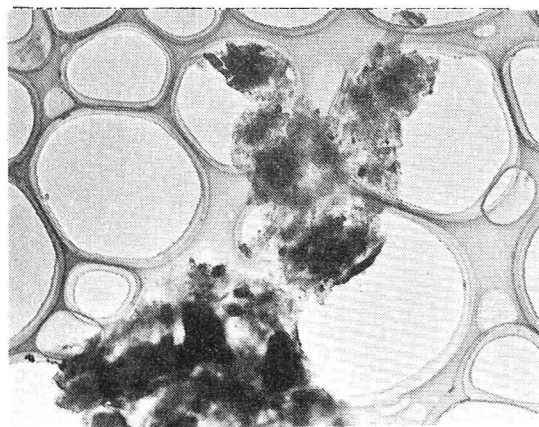
図-5 (a)、(b)はシリカ質人工試料の電子顕微鏡像（電顕像）と電子回折パターンである。電顕像より粒子径は平均約5 μm であると同定された。粒子の形状は、ほとんどが塊状で一定の晶癖をもたない。また、単一の粒子の電子回折パターンが系統的な回折斑点として現われずその強度も非常に弱い。したがって、個々の試料粒子は多結晶体で結晶性は悪いと考えられる。これはX線回折分析の結果と一致する。



(a) 広領域の電顕像



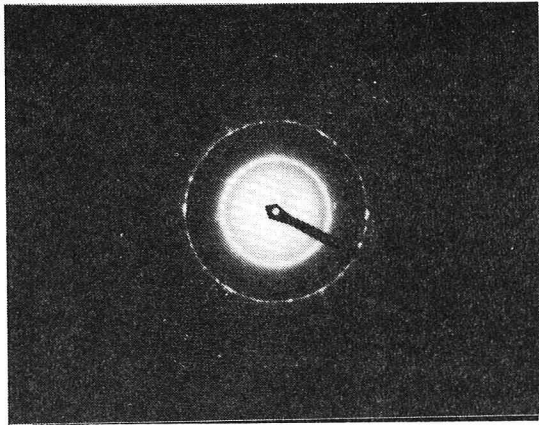
(b) 板状粒子の電顕像



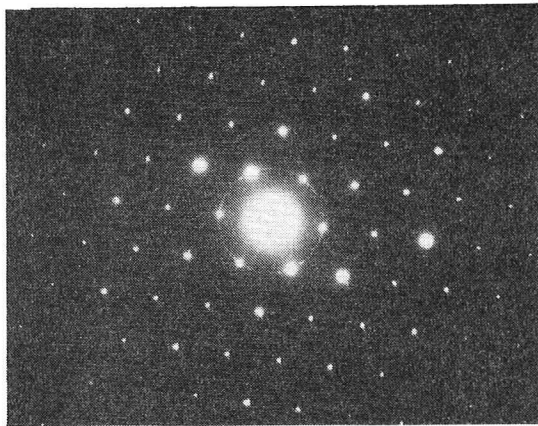
(c) 綿状非晶質体の電顕像

図-6 採取シルト試料の電顕像

図-6 (a)、(b)、(c) は採取シルト試料の電顕像である。シリカ質人工試料では比較的均一な大きさの粒子からなるのに対して、採取シルト試料では図に示すように塊状粒子(a)、板状粒子(b)、微結晶粒子を含む綿状非晶質体(c) からなる。塊状粒子、板状粒子の粒径は平均約 $5\ \mu\text{m}$ である。試料の粒径は採取シルト試料とシリカ質人工試料とではほぼ同じであることが電顕像よりわかった。また、板状粒子の厚さは電子線の透過能から約 $1\ \mu\text{m}$ と推定される。このように試料粒子が晶癖をもつ粒子や綿状非晶質体であることは、この試料が天然岩石が細かく破碎され、また風化されてきたものであることを示す。



(a) 広領域からの電子回折パターン



(b) 板状粒子の電子回折パターン

図-7 採取シルト試料の電子回折パターン

図-7 (a) は塊状粒子、板状粒子、綿状非晶質体を含む広領域からの電子回折パターンである。図7 (b) は、板状粒子一個からの電子回折パターンである。これがネットパターンを示すことから板状粒子は単結晶であることがわかる。また、ネットは六方格子をつくる。これはX線回折分析で同定された石英が六方晶結晶であることと一致する。ネットパターンに重なるリングは図7 (a) の電子回折パターンのリングと一致す

る。したがって、採取シルト試料中に含まれる鉱物粒子は石英に類似した鉱物のみからなっていると考えられる。これはX線回折分析の結果と一致する。

(3) 化学分析結果

化学分析の前処理では次のことがわかった。採取シルト試料は水溶性塩類を含むが、シリカ質人工試料は水溶性塩類を含まない。採取シルト試料中の水溶性塩類は、陰イオンでは塩化物イオンのみが検出され、陽イオンではナトリウムイオン、カルシウムイオンが検出された。試料の採取場所から考えてマグネシウムイオンが含まれると思われたが検出されなかった。これは、その存在量が微量であるため検出されなかったと思われる。

塩酸による溶解成分は、シリカ質人工試料、採取シルト試料とも認められなかった。したがって、両試料ともその主成分が珪酸塩化合物であることがわかる。これはX線回折分析結果と一致する。

化学分析の結果、これら珪酸塩化合物の成分は、珪素、鉄、アルミニウムであることがわかった。その成分比は重量百分率で表-2に示す結果となった。採取シルト試料における珪素、鉄、アルミニウムの化合比で存在する天然鉱物はみあたらない。したがって、X線回折分析、電子顕微鏡観察の結果と併せて、シルト質試料は石英を主成分とする岩石が細かく破碎されたもので不純物として鉄やアルミニウムを含むものと考えられる。

表-2 化学分析結果

	人工試料	採取試料
酸化珪素	53.0 %	71.1 %
酸化鉄(Ⅲ)	20.0 %	8.8 %
酸化アルミニウム	27.0 %	2.3 %
塩化ナトリウム	—	5.9 %
塩化カルシウム	—	1.8 %
有機物	—	10.1 %

シリカ質人工試料では、採取シルト試料に比べて鉄、アルミニウムの含有量が極めて多い。これらの成分比に近い鉱物としてはカンラン石が考えられるが、X線回折パターンの結果はそれを否定している。また、これだけ多量の鉄、アルミニウムの含有量があれば、これらの成分を含む化合物の存在が予想されるが、X線

回折パターンの結果はこれも否定している。

電子顕微鏡観察の結果を併せて考えると、シリカ質人工試料は多結晶体で結晶性が悪いため、石英を主成分とする岩石に酸化鉄、酸化アルミニウムを添加して焼成したものと考えられる。焼成したために石英と添加物とが反応して、ガラス化し結晶性が悪くなったと解釈される。

4. 結 論

以上の実験と考察により次のことが結論される。

(1) X線回折分析によれば、シリカ質人工試料、採取シルト試料とも主成分は単一成分で、それは石英に類似した鉱物と考えられる。シリカ質人工試料は結晶性が悪く、一部ガラス化している。

(2) 電子顕微鏡観察の結果によれば、シリカ質人工試料はほぼ均一な多結晶粒子からなり、風化成分を含まない。このことは、シリカ質人工試料の方が粘着性が低いことを示す。採取シルト試料は単結晶粒子と微結晶粒子を含む綿状非晶質体および有機物（植物の腐敗物）の混合物である。このことは、河川上流において流出した岩石が、流下するにしたがって細かく破碎され、そのために特徴のある粒子形状（板状の晶癖）をもつにいたったことを示す。また、綿状非晶質体の存在は岩石粒子が破碎される一方で風化が進んだことを示す。

(3) 化学分析の結果によれば、主成分は酸化珪素である。これはX線回折分析結果および電子顕微鏡観察結果を支持する。その他の成分としては、採取シルト試料は酸化鉄、酸化アルミニウムを含む。これらの物質がX線回折分析で認められなかったこと塩酸に溶解する成分がなかったことから、鉄とアルミニウムは主成分である石英に類似した鉱物中に含まれる。また、塩化ナトリウムと塩化カルシウムは海水中からの成分である。塩化マグネシウムは検出されなかったが、含まれる可能性がある。

(4) シリカ質人工試料では、その他の成分として酸化鉄、酸化アルミニウムを含む。その含有量は採取シルト試料に比べてかなり多いが、これらの物質はX線回折分析で認められなかった。また、塩酸に溶解する成分がなかった。したがって、シリカ質人工試料はシリカを主成分とする岩石に酸化鉄、酸化アルミニウムを添加して焼成したものと推定される。

(5) 採取シルト試料は水溶性塩類と風化成分および有機物を含むため粘着性が高い。一方、シリカ質人工試料ではそれらの成分を含まないため粘着性は低い。

(6) 人工試料をそのまま室内実験に用いるには問題が多い。改善方法としては、焼成した粘土鉱物、塩類と腐敗した植物を一定量混入して用いれば、実地盤試料に相当類似した試料を得ることができる。

参考論文

- Dalrymple, R. A., and Liu, P. L. F. (1978): "Waves over soft muds," *J. of Physical Oceanography*, Vol. 8, pp. 1121-1131.
- Foda, M. A. (1989): "Sideband damping of water waves over a soft mud," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 201, pp. 189-201.
- Foda, M. A., Tzang, S.-Y., and Maeno, Y. (1991): "Resonant soil liquefaction by water wave," *Proc. of Int. Conf. on Geotech. Engng. for Coastal Development, GEO-COAST '91.* (in press)
- Hsiao, S. V., and Shemdin, O. H. (1980): "Interaction of ocean waves with a soft bottom," *Jour. of Physical Oceanography*, Vol. 10, 605-610.
- Jiang, L., Kioka, W., and Ishida, A. (1990): "Viscous damping of Cnoidal waves over fluid-mud seabed," *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 116, No. 4, pp. 470-491.