HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	走査型電子顕微鏡写真による土の粒度分布と凍上性
Author(s)	石崎, 武志; 福田, 正己; 賈, 偉一
Citation	低温科學. 物理篇, 49, 65-73
Issue Date	1991-03-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18595
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p65-73.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Takeshi ISHIZAKI, Masami FUKUDA and Weiyi JIA 1990 Relationship between soil particle distribution obtained by scanning electron microscope and frost susceptibility. *Low Temperature Science, Ser. A, 49.* (With English Summary p. 72)

走査型電子顕微鏡写真による土の粒径分布と凍上性*

石崎武志・福田正己
(低温科学研究所)
賈　偉一
(黒龍江省水利科学研究所)

(平成2年10月受理)

I. はじめに

土の凍上性を判定する手法としては，三つのレベルが考えられる。第一のレベルは，土の物性値から凍上性を判定するもので，この物性値として土の粒度組成，比表面積，毛管上昇量，液性限界，塑性限界等が用いられている[1]。第二のレベルは，室内の凍上試験である。これは，道路関係で用いられているような，凍上性を判定するための試験，いわゆる，インデックス試験と，地盤凍結工法などに関連して用いられている，荷重と温度条件を変えて行うモデル試験[2]に分けられる。第三のレベルは，現場凍上観測である。後者に進むに従って凍上性の判定精度は高まるが，それと同時に凍上性判定のための労力と時間も増すことになる。第一のレベルで土の凍上性を判定する手法も幾つか提案されている。カサグランデの凍上性判別法[3]がその一例である。このカサグランデの凍上性判別法は，土の凍上性を土の粒度組成から推定する方法である。これは，土の透水係数が土粒子の直径が大きくなると増加する一方，水を吸い上げる力は小さくなるという経験的な関係より提案されたものである。

本研究においては，凍上性の大きい苫小牧シルトと藤の森粘土の電子顕微鏡写真を撮影し，その土粒子の微細構造を見ると共に粒度分布を測定し，従来の手法により求められた粒度分布との比較を行った。さらに，苫小牧シルトと藤の森粘土の凍上性の違いを粒度組成の違いに関連づけて考察したので，以下に報告する。

II. 土試料の物性値と電子顕微鏡写真

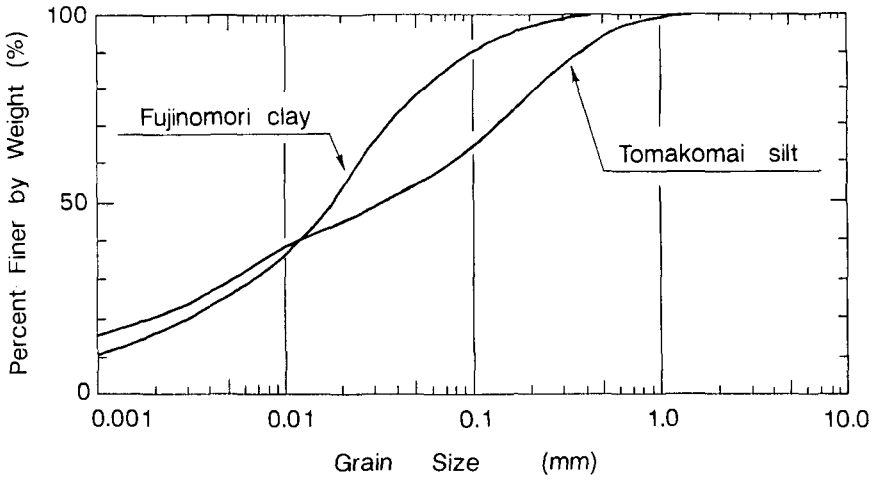
解析に用いた苫小牧シルトと藤の森粘土の物性値を第1表に示す。また，それぞれの土試料の粒径加積曲線を第1図に示す。第1表と第1図は，武田[4]による。

藤の森粘土は，85% 以上が 74 μm 以下である。一方，苫小牧シルトの粒径はもっと大きく，かつ分布が非常に広く 2 mm から，サブミクロンに及んでいるという特徴がある。また，比表面積は苫小牧シルトが 86.2 m^2/g，藤の森粘土は 24.5 m^2/g である。アンダーソンら[5]は，凍土中の不凍水量が，土試料の比表面積が増加するにつれて，単調に増加することを実験的に

* 北海道大学低温科学研究所業績　第3403号

第1表 試料土の物性値は武田[4]による

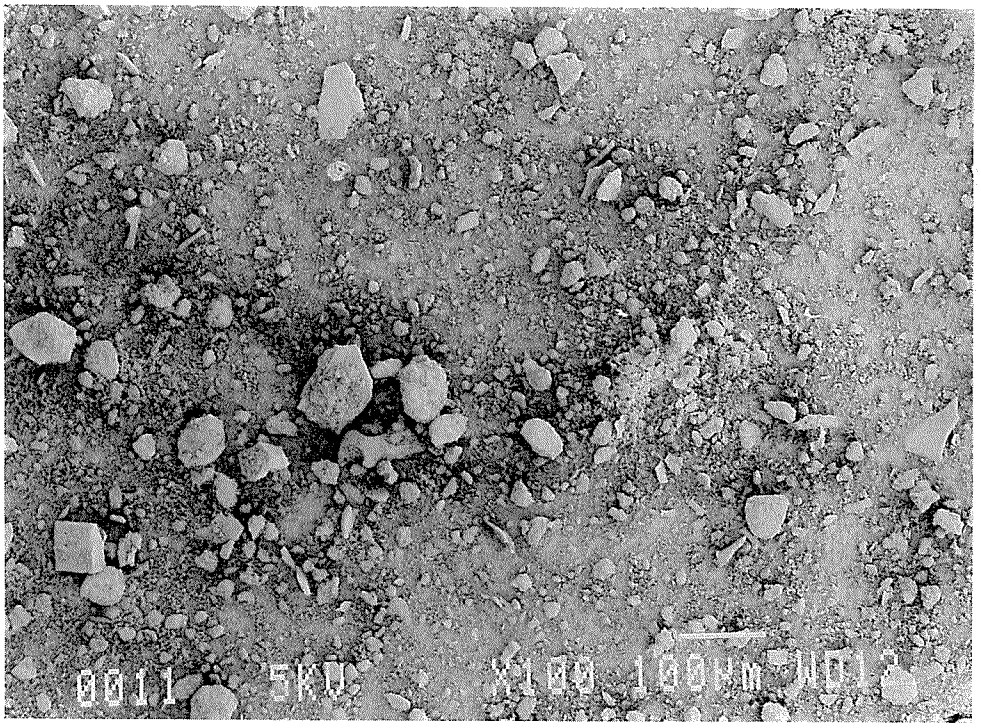
試料土	苫小牧シルト	藤の森粘土
採取地	北海道	京都
土粒子比重 Gs	2.65	2.61
液性限界 WL %	57.7	46.5
塑性限界 WP %	42.6	20.6
塑性指数 IP	15.1	25.9
砂 (20.0 -0.074 mm) %	39	15
シルト (0.074-0.005 mm) %	32	61
粘土 (0.005 mm-) %	29	24
比表面積 m^2/g	86.2	24.5
透水係数 cm/s	$5.41*10^{-7}$	$2.22*10^{-7}$
一次造岩鉱物	石英，長石（少ない）	石英
二次造岩鉱物	カオリン，モンモリロナイト，黒雲母（少ない）	カオリン，モンモリナイト，黒雲母（少ない）
非晶質鉱物	アロフェン	微小



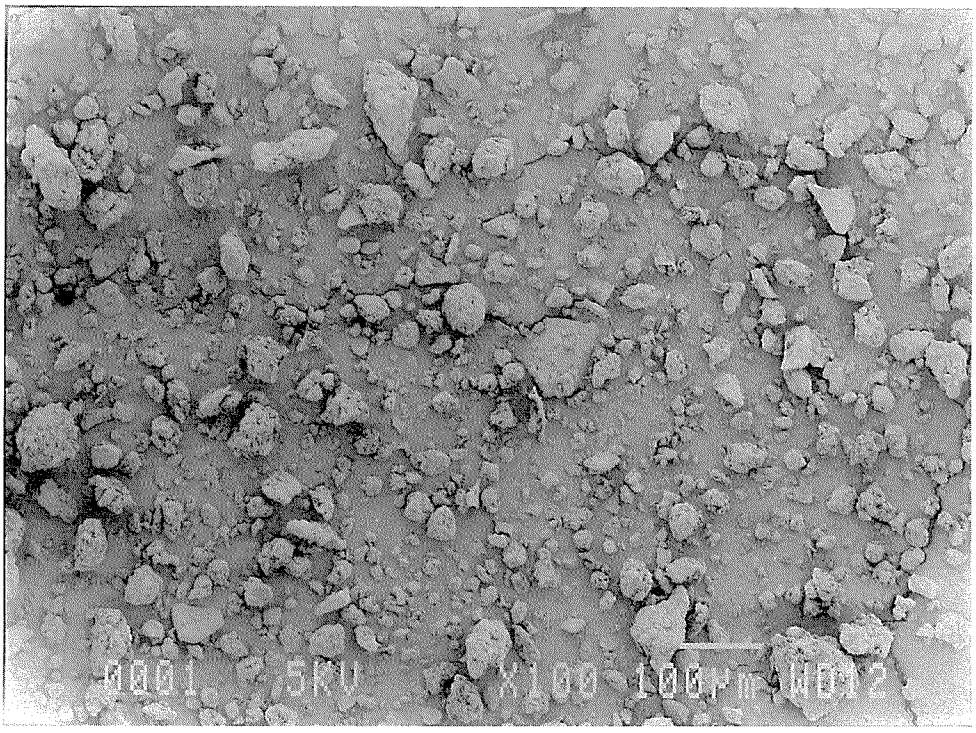
第1図 試料土の粒径加積曲線（ふるい浮ヒョウ法による）

示した。これから苫小牧シルトの方が不凍水分量も多く土の凍結の際の吸水力も大きくなることが予想される。

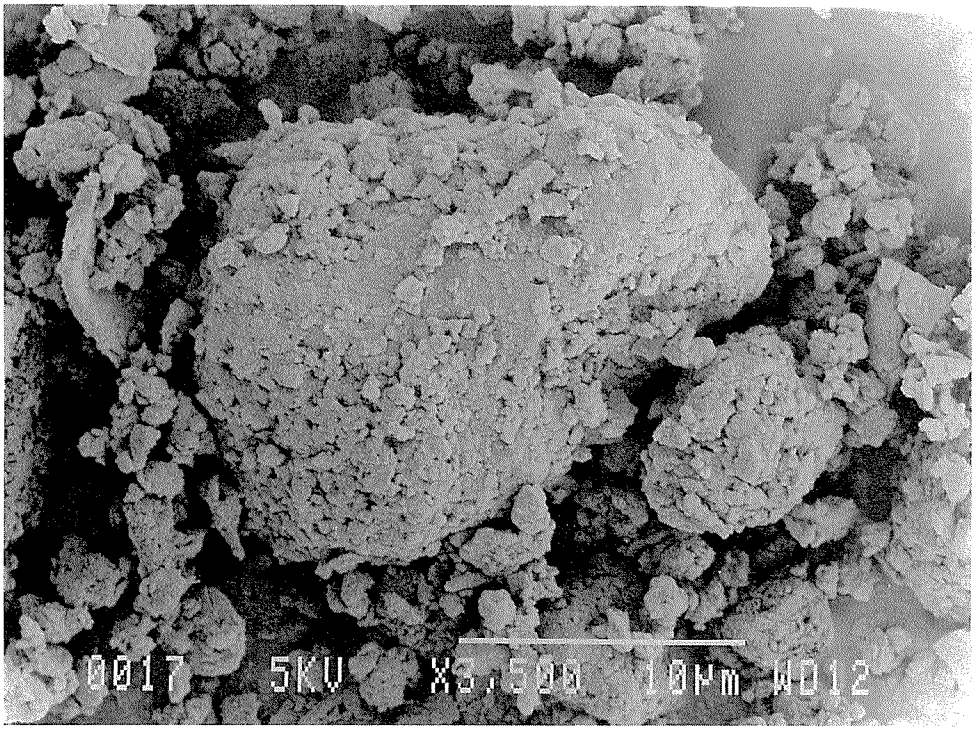
第2図は，苫小牧シルトの走査電子顕微鏡写真である。使用した装置は日本電子㈱社製走査電子顕微鏡（JSM-840 A）である。この装置の分解能は4 nmで，倍率は10倍から300,000倍である。よく乾燥させた苫小牧シルトを400 μm以上ふるいで取り除いた後に粘着テープに疎にふりかけ，100倍の倍率で撮影した。図中のスケールは，100 μmの長さを示す。第3図は，同一条件による藤の森粘土の電顕写真である。両者を比較すると，苫小牧シルトは，藤の森粘土と比べてより多くの細粒成分を含んでいることが分かる。これは，苫小牧シルトの方が粘土化が進んでいることを示している。第4図，第5図には，それぞれ苫小牧シルトと藤の森



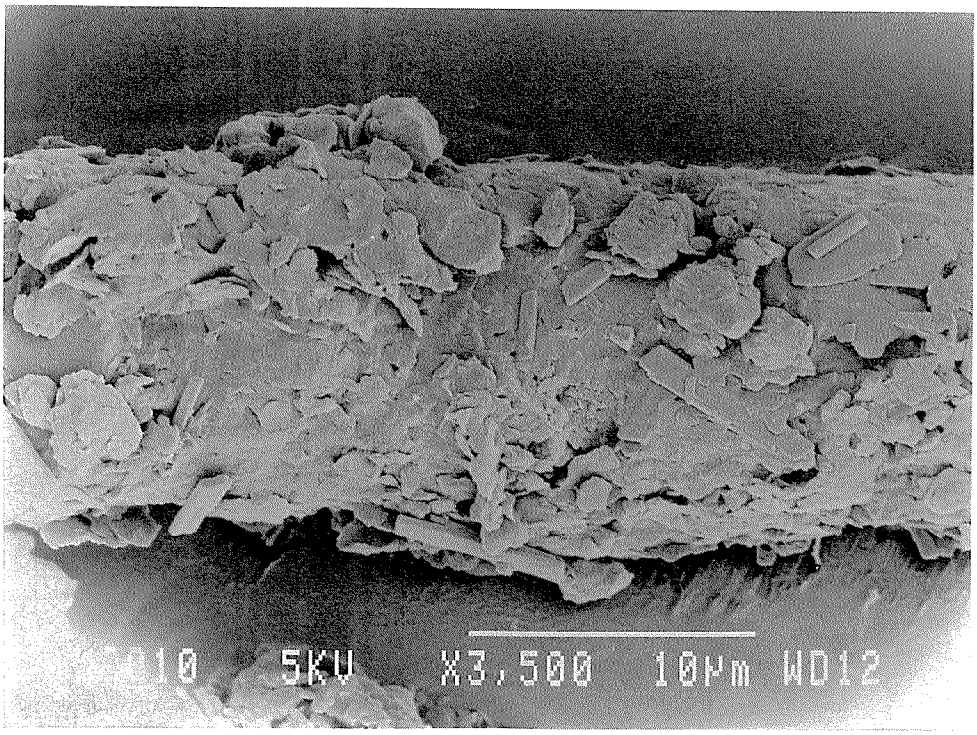
第2図　苫小牧シルトの電顕写真（100倍）



第3図　藤の森粘土の電顕写真（100倍）



第4図　苫小牧シルトの電顕写真 (3,500 倍)



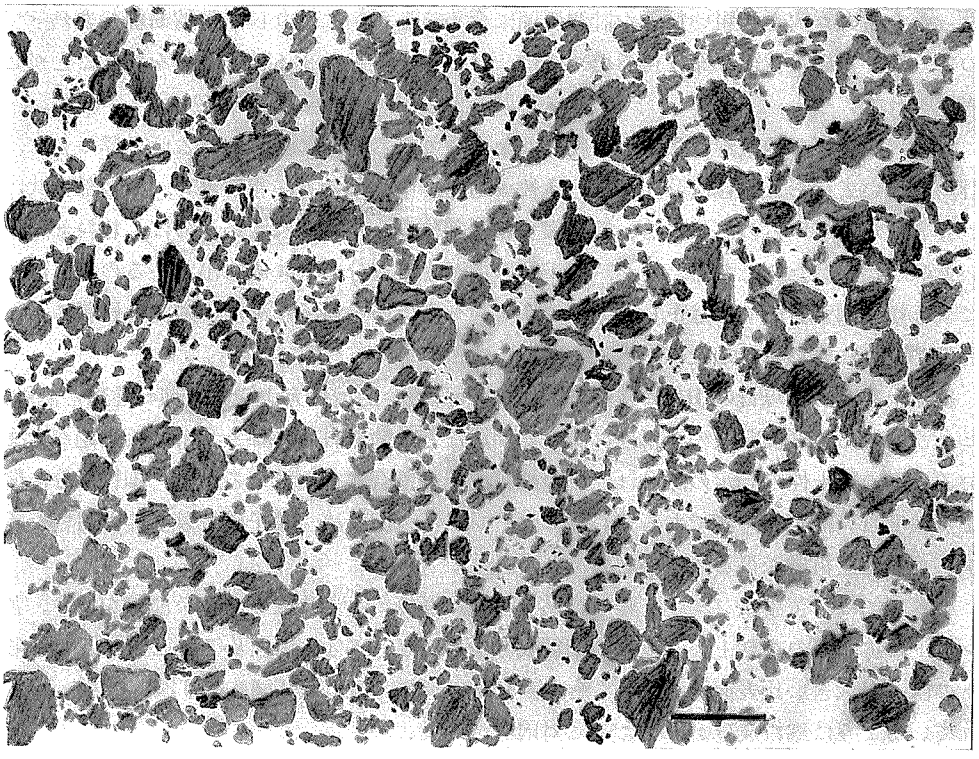
第5図　藤の森粘土の電顕写真 (3,500 倍)

粘土の3,500倍の倍率で撮影した電顕写真を示す。それぞれ，スケールは10 μmの長を示す。この両者を比較すると，苫小牧シルトの表面構造は，藤の森粘土より複雑で，より微粒な成分(数 μm以下)が積み重なっているように見える。これは，苫小牧シルトの鉱物組成中の非晶質のアロフェンの持つ複雑な構造を示しており，結果として，大きめの比表面積をしめす。

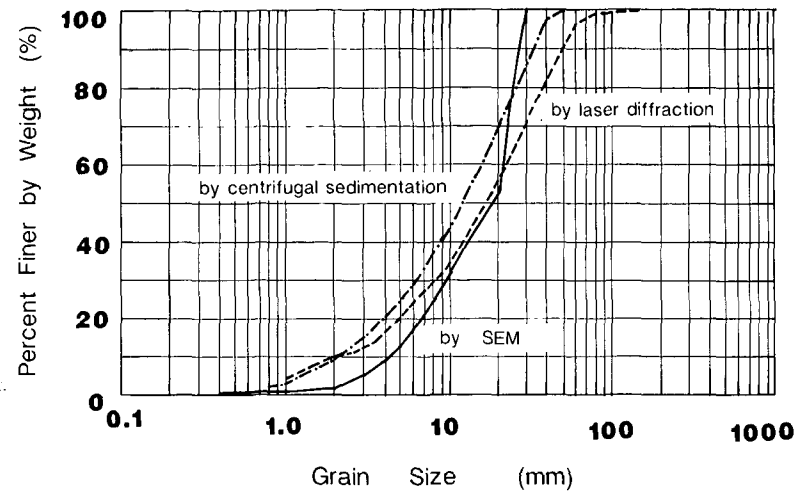
III. 土試料の粒度分布解析方法と解析結果

電子顕微鏡による土の粒度分布の解析を，以下の手順で行った。まず，400 μm以上の土粒子成分をふるいで取り除いた試料の電顕写真を撮影する。つぎに，第2図，第3図に示した電顕写真の上にトレーシングペーパーを重ね，土粒子の部分を黒く塗りつぶす。つぎに，エー・ディー・エス社製粒度分布計測システム (PIP-4000) を用いて，第6図より各粒径範囲での土粒子総重量のヒストグラムを作成する。これを粒径の小さい方から積分すると，いわゆる粒径加積曲線が得られる。この曲線を，遠心沈降法とレーザー回折法の二種類の方法により得られた粒径加積曲線と共に第7図に示す。

この遠心沈降法は，回転するディスクの中心にサンプルを注入し，遠心力により放射してゆくサンプルを光ビームでとらえ，その光の散乱および減衰をフォトダイオードで計測し，粒度分布を求めるという方法である。測定には，盟和商事㈱社製ディスククロマトパーティクルサイザー (BI-DCP 1000) を用いた。一方，レーザー回折法は，粉体を乾燥状態で分散させ，レーザー回折により粒度分布を求めるという方法である。測定には，日本電子㈱社製レーザー



第6図　電顕写真をトレースした粒子画像



第7図 苫小牧シルトの粒径加積曲線（電子顕微鏡法，遠心沈降法，レーザー回折法による）

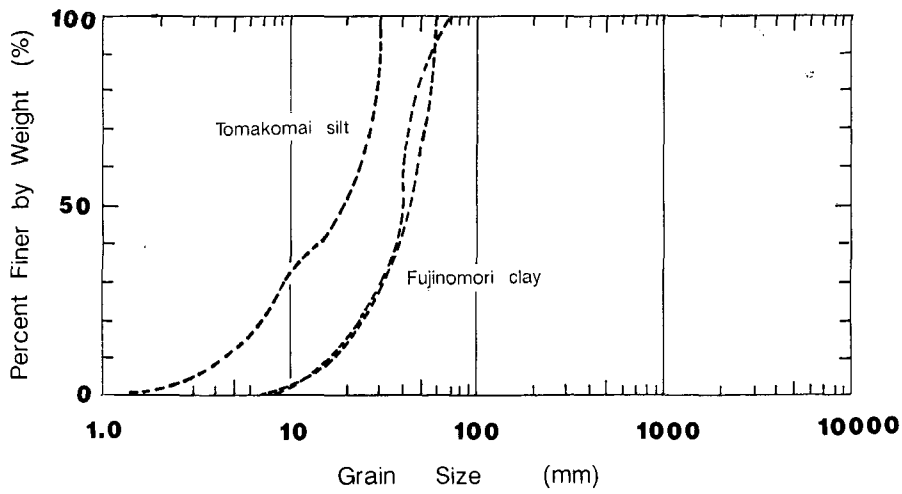
回折式粒度分布測定装置（HEROS & RODOS）を用いた。

これら3種類の測定法による粒径加積曲線は，電子顕微鏡法では粗粒土の割合が小さめになっていることを除けば，おおむね一致している。この一致は，土質試験自動化委員会でなされた比較実験結果[6]でも同様に得られている。第7図の例では，カウントした粒子の数は562であった。電顕写真上の粗い粒子を計測範囲に含めるか否かにより粒径加積曲線が変わってくるので，より正確な粒径分布を得るためには，さらにカウントする粒子の数を増すことが必要と考えられる。

一方，第7図の結果を従来より一般的になされている方法，つまりふるいと浮ヒョウ（比重計）を用いて得られた粒度分布曲線と比較すると，第1図の方が粗粒部分，細粒部分共に幅広い分布になっているのが分かる。第7図で粗粒部分がカットされているのは，粗粒部分をふるいで取り除いたためである。また，第1図の方が細粒部分が大きめに出ているのは，浮ヒョウによる粒度測定方法では静止したメスシリンダー中での土粒子懸濁液の対流の影響によって含有量が過大に求められるためと考えられる[7]。

細粒土に関して現行のJISの粒度試験方法では，機会的撹拌方法や分散剤の種類と使用法，浮ヒョウによる粒度測定法の適用性に関する問題など試験法自体に種々未解決な問題が含まれている。土の凍上性の判定の際には，土の細粒成分の割合が重要になるため，細粒成分に関してより精度良い測定が可能である遠心沈降法，レーザー回折法，電子顕微鏡法等を用いた手法で試料土の粒度組成を得ることが必要である。

第8図には，苫小牧シルトと藤の森粘土の電顕写真により得た粒径加積曲線を示す。苫小牧シルトの方が藤の森粘土より多くの細粒成分を持つことが示されている。これは，苫小牧シルトのほうが大きい比表面積を持つこと（第1表），電顕写真（第2図，第3図）に明らかに示されているように細粒成分が多いことに対応している。



第8図　電子顕微鏡法による苫小牧シルトと藤の森粘土の粒径加積曲線

IV. 考　　察

今回，試料土として用いた苫小牧シルトと藤の森粘土は，共に凍上性が大きいことから，凍上機構の研究に幅広く用いられている[4,8,9]，武田[4]は，凍土・未凍土中の温度勾配をほぼ一定に保ちながら土の凍結を進行させる凍上実験装置を作成し，アイスレンズの発生条件を求める実験を行った。実験結果より，土を取り込まないで純粋にアイスレンズのみ成長する条件が，凍土の温度勾配と未凍土の温度勾配の組合せにより決まることを示し，苫小牧シルトと藤の森粘土とでこの条件の比較を行った。実験結果から，アイスレンズが成長する凍土・未凍土中の温度条件の範囲は，苫小牧シルトの方が藤の森粘土よりも広いことを示した。さらに，同じ凍土の温度勾配について比較した場合，苫小牧シルトの方が藤の森粘土よりも，土粒子を取り込まない状態でアイスレンズが成長する速度の最大値が大きくなることを示した。武田[4]は，これらの実験結果から苫小牧シルトの方が藤の森粘土よりも凍上性が大きいと結論づけた。

以上は，土の凍上性を直接凍上実験により比較した例である。一方，これらの土試料の電顕写真や粒度組成から，土の凍上性の比較を以下のように行った。まず，苫小牧シルトの表面構造の方が藤の森粘土よりも複雑で，微細な成分を含んでいること（第2図—第5図），また比表面積が大きいこと（第1表）により，土が凍結する際の，水を吸引する力は苫小牧シルトが大きいと予想できる。また，苫小牧シルトがより粗粒成分を含んでいるので（第1図），透水係数も大きく（第1表）未凍土部分からの水の供給に関しても，苫小牧シルトが大きいことを示している。これらの結果から，土の凍上性は苫小牧シルトが藤の森粘土よりも大きくなることが予測された。この予測は，武田の実験結果[4]と良い一致を示している。

V. 結　　論

土の凍上性と土試料の粒径分布，土粒子の表面構造との間の関係を求めるため土試料の電子顕微鏡写真を撮影し，その写真を用いて粒度分布解析を行った。電顕写真をもとに求めた苫

小牧シルトの粒径加積曲線は，遠心沈降法とレーザー回折法の二種類の方法によるものと良い一致を示し，藤の森粘土より細粒成分を多く含むことを示した。これは，苫小牧シルトの方が大きい比表面積を持つこと，そのため土の凍結の際の吸水力も大きくなることを示している。さらに，苫小牧シルトの透水係数が藤の森粘土より大きいことを併せて考えれば，苫小牧シルトの方が高い凍上性を持つことが予測された。一方，武田[4]の凍上実験により，苫小牧シルトの方が藤の森粘土より高い凍上性を持つことが確認されている。

以上の結果は，土の凍上性が，電顕写真のレベルの土粒子構造まで考慮に入れると，粒度分布や物性値等と良く対応づけられることを示している。ここでは，2種類の土のみしか検討しなかったが，今後，より粒度組成の異なる土に関して同様の解析を行い，土の凍上性と比較することにより，土の粒度組成をもとにした，より信頼性のある凍上性判定基準の確立が期待される。なお，電顕写真撮影には生理学部門の藤川清三助手に協力して頂いた。

文　献

1) Chamberlain, E. 1981 Frost Susceptibility of Soil-Review of Index Tests, *CRREL Monograph* (81-2), 110 pp.
2) 高　志勤・益田　稔・山本英夫 1974 土の凍結膨脹に及ぼす凍結速度．有効応力の影響に関する研究，雪氷，**36**(2), 1-20.
3) Casagrande, A. 1947 Classification and Identification of Soils. *In* Proc. American Society of Civil Engineers, vol. 73, no. 6, 283.
4) 武田一夫 1987 アイスレンズの形成条件に基づく凍上性判定の試み．雪氷，**49**(2), 75-86.
5) Anderson, D. M. and Tice, A. R. 1972 Predicting Unfrozen Water Contents in Frozen Soils from surface area measurements. Highway Research Record, **393**, 12-18.
6) 三木五三郎 1968 土の判別法の自動化．生産研究，**20**(8), 22-28.
7) 牟田明徳・渡辺薫樹 1967 関東ロームと粘土の正しい粒度分布（液中沈降粒度分布測定法問題点について）．第20回コロイド化学検討会講演予稿集，81-82.
8) Fukuda, M., Orhum, A. and Luthin, J. N., 1980 Experimental Studies of coupled heat and moisture transfer in soils during freezing. *Cold Regions Science and Technology*, **3**, 223-232.
9) 石崎武志 1979 載荷条件に於ける凍上現象．北海道大学理学研究科修士論文.

Summary

The frost susceptibilities of soils were related to the soil particle distributions and the surface structures obtained by a scanning electron microscope. The soil samples used were high frost susceptible Tomakomai silt and Fujinomori clay. The grain size curve of Tomakomai silt obtained by SEM coincided well with those determined by the laser diffraction analysis and the centrifugal sedimentation method. These analyses showed that Tomakomai silt contained more small particle fractions than Fujinomori clay. This corresponds to the fact that Tomakomai silt has larger specific surface area than Fujinomori clay, and indicates that the unfrozen water content of Tomakomai silt is higher than that of Fujinomori clay. In addition, considering that the hydraulic conductivity of Tomakomai silt is larger than that of Fujinomori clay, it is expected that Tomakomai silt has higher frost susceptibility than Fujinomori clay. This is consistent with the results of frost heave experiments which

were performed to obtain frost susceptibilities of Tomakomai silt and Fujinomori clay by Takeda 4). These results show that the frost susceptibility can be related to the soil particle distribution, surface structures and soil physical properties.