

第5章 ベントナイトの液性限界と膨潤力

ベントナイト混合土(BMSL)の主材であるベントナイトの特性を明らかにすることは、三要素複合ライナーを構成するベントナイト混合土(BMSL)を難透水性にするため必要不可欠である。しかしながら、ベントナイトの品質と性能を示す世界的な規格は、石油ボーリング用途に用いるAPI規格だけである。市販ベントナイトの品質に関しては、掘削泥水に向けた希薄な懸濁液のレオロジー特性が中心であり、土の工学的性質に関する情報が十分に提供されていないのが現状である。

ベントナイトの品質の良否は原鉱石の特性に大きく影響され、用途により規格は異なるにもかかわらず200, 250, 300メッシュなどのメッシュ番号(篩)でベントナイト混合土(BMSL)の製品規定として仕様書に記載されている。同一メッシュでも産地により品質に差があるため、市販ベントナイトの品質と性能を明らかにすることが急務である。

本章では、商業的に市販される日本国内産及び米国産のNa型ベントナイト及びCa型ベントナイト18点と、第3章で使用したGM/GCLから機械的に分離採取したベントナイト2点を用いて、膨潤力と液性限界特性を評価した。

5.1 ベントナイトの膨潤能と水封止力

ベントナイトは、数千万年以前又は以上の火山噴出物から生成した粘土鉱物で、2:1型結晶質でスメクタイト群に属する。**図5.1**に示すように左側(ワイオミング州, サウスダコタ州, モンタナ州)は米国におけるNa型ベントナイト主要生産地を示す。白亜紀とは地球の地質時代のひとつで、およそ1億4,000万年前から6,500万年前を指す。**図5.1**右側は白亜紀の北アメリカの状態を示す。Na型ベントナイト生産地は、古くは海底であったことが判る。また、**写真-5.2**はベントナイトと一緒に掘り出されたサメの歯の化石。サメの祖先はデボン紀の初期、4億年前に現れた。**写真-5.2**からもベントナイトは海で生育した海成粘土であることが判る。

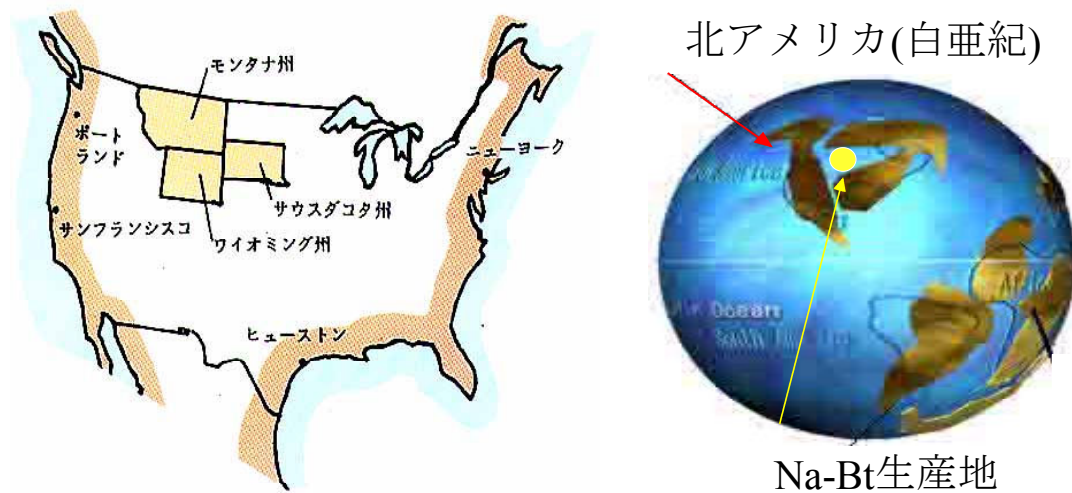


図5.1 米国における Na 型ベントナイト生産地



写真-5.1 ベントナイトと一緒に掘り出されたサメの歯の化石

ベントナイトの呼び方は、主成分であるモンモリロナイトと夾雑物を含めた岩石名の名称である。天然に産出するベントナイトの原鉱石には成因や生成年代の違いにより、同じ地域でもその性質が異なり、随伴鉱物と言われる石英、長石、クリストバライト、雲母、ゼオライト、その他が混在している。また、ベントナイト以外の粘土鉱物も含んでいる場合もある。ベントナイトの性質は大部分が含水珪酸アルミニウムであるモンモリロナイトに依存している。モンモリロナイトは薄片状の結晶癖を有し、単位結晶格子には不整が多く大きな負電荷を持っている。この負電荷を補償するために Na^+ や Ca^{++} のような陽イオンを単位結晶層間に吸着している。これが交換性陽イオンである¹⁾。

モンモリロナイトの膨潤能と水封止力に関するキイはその結晶構造の内部にある。モンモリロナイトの薄片粒子は、乾燥モンモリロナイト粒子として 1 cm^3 を水中に完全分散させたとき、数億個の超微粒子に分割して数 100 m^2 の全表面積を有するシート状結晶子の集合体からなっている。写真-5.1に示すように乾燥状態下でのモンモリロナイトの形態は、ESEM 画像に示されるように、不規則な薄板状粒子の集合体であることが判る。

通常の風乾状態では、この薄いシートは平行平板状に配列しており、水分子を緻密に保有した水の単分子層がシート状結晶子の基本面上に形成されている。さらに水で濡らすといっそう多数の水分子がその双極子会合によりシート層間に挿入して（インターカレートという）シート間隔を離すように広げ単位シートの厚さ（1 ナノメートル= 10^{-9} m ）よりも何倍も厚い水和殻が静電力によってシート間に拘束されて保持される。モンモリロナイトは水和したとき負（-）に荷電し、取り巻いている水和殻中に正（+）の電場を生じて水分子とモンモリロナイトの結晶シート間に静電的引力が働く結果となる。膨潤の大きさの程度と水分子の留保はモンモリロナイト結晶構造中の支配的な陽イオンの種類とそのイオン化傾向に依存する。

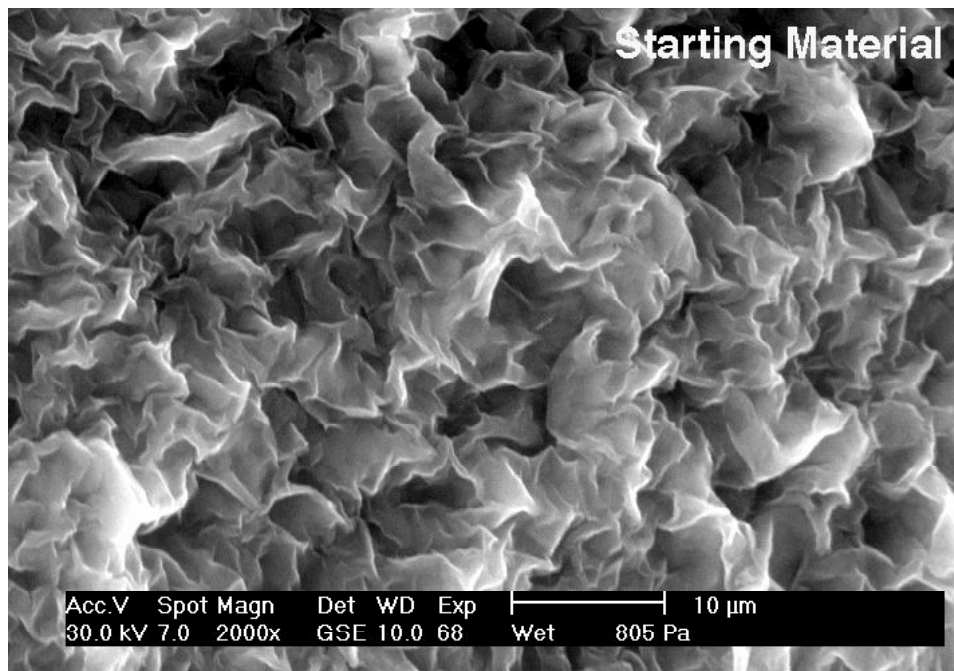


写真-5.2 環境制御型走査型電子顕微鏡(ESEM)を用いた山形県月布産の精製モンモリロナイト・Kunipia-Fの微細形態画像

海成粘土であるモンモリロナイトは、他の粘土鉱物例えば陸成粘土であるカオリナイトに比べて極めて大きな比表面積と陽イオン交換容量を有する薄片状超微粒子である。ナトリウムイオンに富んだベントナイトでは、モンモリロナイト結晶層間の Na^+ が周囲の水と結合して水分子層を何重にも発達させ結晶層間を広げて、巨視的な体積膨張すなわちオスモチック膨潤を発現する。したがってベントナイトの膨潤能は当該ベントナイトと水との相互作用の特性をあらわす総合的なインデックスである。このように、モンモリロナイトと水との相互作用によって生成した複合体の水は自由水でなく、その移動は強く拘束される。この作用を水インピーダンス (Water Impedance) とも云う。これがベントナイトの遮水性の源泉である⁴⁾。

5.2 液性限界と膨潤力試験の課題

ベントナイト混合土のバリア機能は、ベントナイトと水とのポテンシャルな相互作用に基づいている。このためベントナイトの品質と性能を知るためには、ベントナイトの水に対する膨潤能を評価することによって達成できる。しかしながら膨潤能はベントナイトのポテンシャルな特性であるから、その評価方法は絶対的でなく恣意的であり相対的である。ベントナイトの膨潤能の評価方法としては幾つかの方法がある。それらは、膨潤力試験法 (自由膨潤試験)、液性限界試験法、エンスリン試験法、重量法、膨潤圧試験法などである。実用的な簡便性からは膨潤力試験と液性限界試験がある。

液性限界は土のコンシステンシー限界 (液性限界, 塑性限界, 収縮限界) の一つで地盤工学者になじみの試験法である。液性限界はベントナイトと水を練り合わせ、固体状態を維持するのが困難となる最大含水比である。膨潤力試験法は無拘束雰囲気下でベントナイトの水中における自然沈降体積で示される。無拘束雰囲気下であるため自由膨潤試験とも云う。これら二つの方法を比較すると、液性限界試験は練り合わせと云う機械的操作が入ることによってベントナイトの二次粒子がほぐれ、緻密なゲルを形成するために真の膨潤能を反映する点で優れていると考えられる。しかしながら、練り合わせにオペレーターの個人差がでやすく、再現性のよいデータを得るためには熟練を要する⁷⁾。

膨潤力試験法は、2 g のベントナイト粉末試料を水 100 ml 中に分割して投

入し、自然沈降させてその見かけの体積をもって膨潤力として表示するのであるが、ベントナイトの粉末の細かさや二次粒子の集合状態など二次的なファクターが測定値に介入しやすい。膨潤力試験は熟練を必要としない再現性のよい方法として古くから各国の薬局方ベントナイト試験法に取り入れられており、近年ではジオシンセティックス用ベントナイトの試験法としても ASTM で標準化されるようになったが、液性限界に比較して相対評価の面が強く、真の膨潤力というよりもその製品の特性値として捉えられる要素を内包している。このため、市販されている 20 種のベントナイトを用いてコンシステンシーと基礎的特性を調べた。

(1) コンシステンシー試験方法

日本国内産及び米国産の Na 型ベントナイトおよび Ca 型ベントナイト 18 点と、高密度ポリエチレン・ジオメンブレンと粒状ベントナイト層から構成されているジオシンセティッククレイライナー (GM/GCL と略記) から機械的に分離採取したベントナイト 2 点である。GM/GCL ベントナイトについては約 10 % の水溶性有機高分子系接着剤が付着しているが除去することなくそのまま試料とした。**図5.2**に液性限界、塑性限界試験を示す。コンシステンシー限界は、JIS A 1205 及び JIS A 1209 により液性限界、塑性限界、収縮限界における含水比 w_L (%), w_P (%), w_S (%) を測定した。これらの測定値から定法に従い塑性指数 I_P (%) を付記しないで表記される) 及び塑性指数を $-2 \mu m$ 粒径区分含有率 (%) で除した比率で表される活性度 A を求めた。各コンシステンシー限界の測定に先行して測定操作の訓練を十分に行い再現性を確認した。特に収縮限界の測定は、含水比を液性限界に調整した試料を室内で静かに自然乾燥させることにより、亀裂のない均一な収縮試料を得るようにし、良好な再現性を達成した。収縮パラメーターとしては、液性限界、塑性限界及び収縮限界における試料のそれぞれの体積 V_L , V_P 及び V_0 を土粒子の体積 V_s で除した体積比 f (必要により f に液性限界、塑性限界、収縮限界を意味する下付き文字 L, S, 0 を付記する)、体積比を収縮限界における体積比 f_0 で除した体積比変化 f/f_0 、及び収縮限界以上の含水比における体積の変化量とそれに対応する含水比の変化量との比である収縮比 R を求めた。

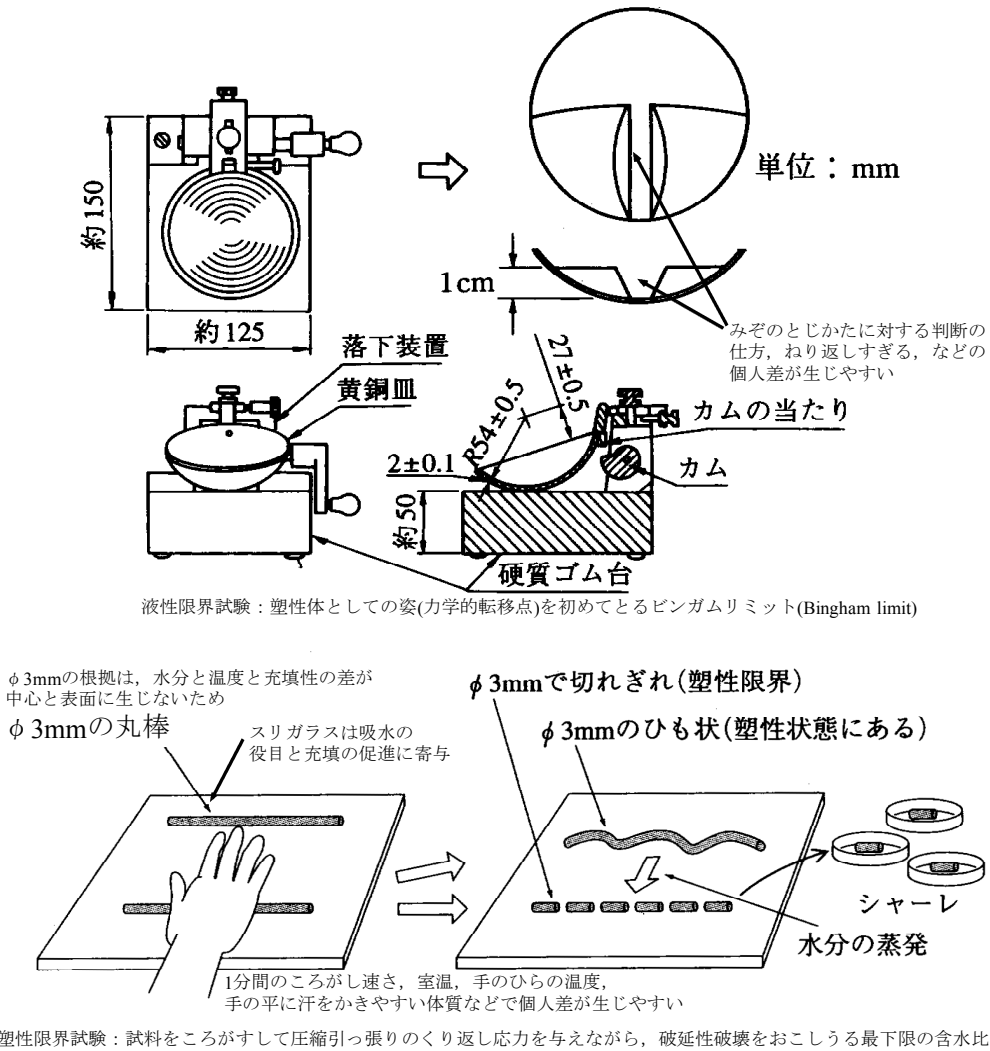


図5.2 液性限界，塑性限界試験概要図 東山(1974)³⁾，清水(1997)²⁾らに加筆

(2) 基礎的特性の測定方法

膨潤性は、日本薬局方ベントナイト試験法に従って膨潤力を測定した。すなわち水分 8.0%に調整した試料 2.0g を、蒸留水 100ml を入れた 100ml の共栓メスシリンダーに約 10 回に分けて加える。このとき、前の添加物がメスシリンダー底に沈着してから次ぎの添加を行う。24 時間放置するとき、メスシリンダー底部の試料の塊が膨潤した見掛けの体積をメスシリンダーの目盛から読み膨潤力 $S_p(\text{cm}^3/2\text{g})$ として表示した。粒度は、蒸留水 500 ml に分散剤としてヘキサメタリン酸ナトリウム 0.2 g を加え溶解した後、試料 5.0 g を加えてディスク型高速攪拌機 (ハミルトンビーチミキサー) で 30 分間攪拌し、一夜放置後さらに 1 分間攪拌して懸濁液を調製した。この懸濁液からアンドリアゼンピペ

ットを用いる沈降法で $5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 及び $1\ \mu\text{m}$ (ストークス相当球径) の通過百分率 (%) を求めた。土粒子の密度は、溶媒にケロシンを用いたピクノメーター法によった。

陽イオン交換容量 (CEC) 及び浸出陽イオンは、最も標準的な酢酸アンモニウムを用いるショーレンベルジャー法⁸⁾により CEC を測定した。また、その分析過程で得られる最初の酢酸アンモニウム浸出液中の陽イオンを原子吸光分析法により定量した。したがって浸出陽イオンは試料中に含まれる交換性陽イオン及び水溶性塩由来の陽イオンの全てを含むが定量は Na^+ 、 K^+ 、 Mg_2^+ 、 Ca_2^+ の4元素とした。可溶性シリカ切片値は、還流冷却器を付した三口フラスコ中で $90\text{ }^\circ\text{C}$ の 1 N-水酸化ナトリウム水溶液 500 ml に試料 5.00 g を投入し、攪拌しながら所定時間間隔で内容液を取り直ちに遠心分離して上澄液を採取しモリブデンイエロー法により溶出シリカ (いわゆる比色シリカ) を比色定量した。

図5.3にベントナイト中の溶出シリカ質量百分率の求め方を示す。同溶出操作は 300 分間行い時間平方根に対してプロット⁹⁾し、回帰直線を外挿して時間ゼロにおける比色シリカ濃度から、ベントナイト中の溶出シリカ質量百分率を求め、可溶性シリカ切片値 S_{itc} (% $\text{SiO}_2/\text{Bentonite}$) とした。鉱物組成は、粉末 X 線回折法又は定方位 X 線回折法によった。

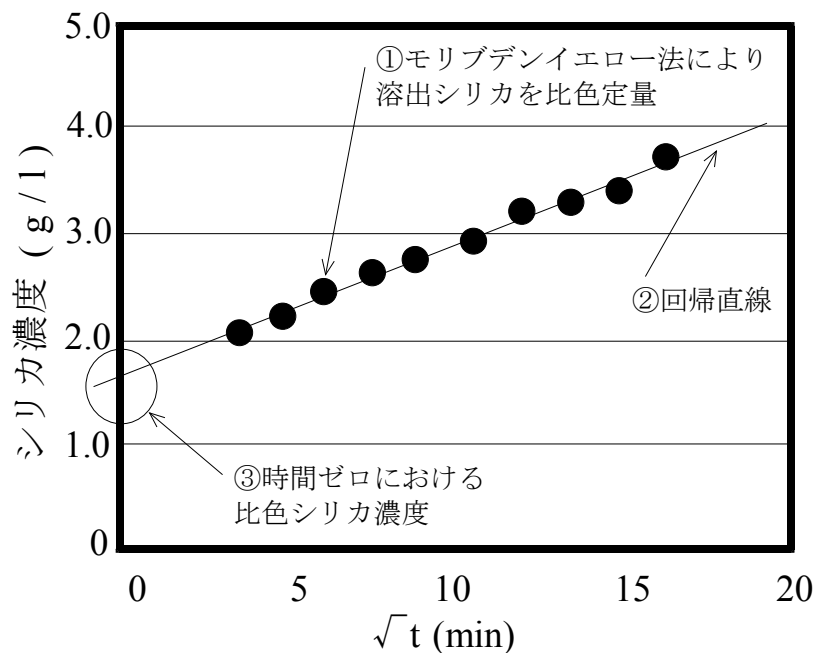


図5.3 ベントナイト中の溶出シリカ質量百分率の求め方

(3) コンシステンシー限界並びにその他の基礎的特性の測定結果(1)

ベントナイト試料 20 種のコンシステンシー限界ならびにその他の基礎的特性の測定結果を液性限界の高い方から低い方の順に並べて表-5.1～表-5.3（各特性値の平均値と中央値を付記）に、またその散布図を図5.4に示す。試料 S-19 と S-20 は GM/GCL から剥離した特殊ベントナイトであり、ベントナイト粒子は水溶性有機高分子系接着剤で表面処理されたものであるので序列とは別にプロットしてある。

表-5.1 ベントナイト試料 20 種のコンシステンシー限界並びにその他の基礎的特性の測定結果 1

Samples		Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index	Shrinkage limit	Swelling power	Activity	Particle size distribution (µm, %)		
No.	Trade mark	w_L (%)	w_P (%)	I_P	w_S (%)	S_P (cm ³ /2g)	A	-5	-2	-1
S-1	WesternBond	678.0	55.3	622.7	15.5	28	7.27	89.3	85.7	81.1
S-2	SuperClay	615.5	47.6	567.9	22.3	23	6.86	88.0	82.8	77.4
S-3	Volclay	567.0	50.2	516.8	13.7	27	6.40	86.1	80.8	74.1
S-4	Federal FB-3	560.9	60.3	500.6	23.1	23	6.34	87.1	79.0	75.8
S-5	Federal FB-2	542.0	55.8	486.2	23.4	23	6.13	86.8	79.3	76.0
S-6	Federal FB-1	522.6	60.7	461.9	21.0	23	5.86	87.4	78.8	75.5
S-7	Kunigel WB	512.6	44.2	468.4	15.7	23	6.43	84.4	72.8	67.9
S-8	PremiumGel	511.2	43.9	467.3	14.0	26	6.31	80.0	74.1	71.5
S-9	NeoKunibond	510.5	63.9	446.6	27.3	21	6.43	78.4	69.5	62.9
S-10	Asama	481.0	54.6	426.4	25.5	22	5.79	84.7	73.6	66.5
S-11	Kunigel V1	470.7	30.8	439.9	17.2	17	8.53	60.3	51.6	49.9
S-12	Kunigel VA	408.4	47.9	360.5	14.9	23	6.46	68.7	55.8	52.6
S-13	Kunigel VAS	391.4	57.2	334.2	15.2	23	4.83	80.2	69.2	62.6
S-14	Akagi	360.1	57.1	303.0	22.1	13	4.89	72.4	62.0	55.1
S-15	Hotaka	310.5	54.1	256.4	18.9	19	4.18	75.1	61.4	51.9
S-16	NewHotaka	290.2	64.1	226.1	17.2	14	3.76	70.0	60.1	52.5
S-17	Kunibond	192.2	59.7	132.5	19.4	6	2.50	64.4	53.1	46.3
S-18	PantherCreek	119.4	52.3	67.1	17.0	6	2.07	42.8	32.4	26.6
S-19	Paraseal *	460.0	50.8	409.2	8.5	21	5.42	78.8	75.4	74.5
S-20	GundSeal *	500.0	52.9	447.1	3.7	23	5.26	87.3	85.0	81.0
Average (S-1~S-18)		446.9	53.3	393.6	19.1	20	5.61	72.7	64.2	59.2
Average (S-1~S-20)		450.2	53.2	397.0	17.8	20	5.59	73.7	65.7	61.0
Median (S-1~S-18)		495.8	55.0	443.3	18.1	23	6.22	80.0	69.5	62.9
Median (S-1~S-20)		490.5	54.4	443.3	17.2	23	6.00	80.0	72.8	66.5

* Bentonite samples from high-density polyethylene geomembrane-supported geosynthetic clay liners (GMGCLs), which are coated with about 10 percent of water-soluble polymer adhesives (as reference samples).

表-5.2 ベントナイト試料 20 種のコンシステンシー限界
並びにその他の基礎的特性の測定結果 2

Samples		Density of soil particles	Specific volume			Specific volume-change		Shrinkage ratio	Specific swell volume	Specific swell volume-change
			Liquid limit	Plastic limit	Shrinkage limit	Liquid limit	Plastic limit			
No.	Trade mark	ρ_s (g/cm ³)	f_L (%)	f_P (%)	f_0 (%)	f_L/f_0 (%)	f_P/f_0 (%)	R	f_{sp}	f_{sp}/f_0
S-1	WesternBond	2.578	1848	243	140	1320	173	1.841	3923	2803
S-2	SuperClay	2.459	1614	217	155	1042	140	1.589	3074	1985
S-3	Volclay	2.525	1532	227	135	1138	168	1.880	3706	2753
S-4	Federal FB-3	2.532	1520	253	159	959	159	1.598	3165	1997
S-5	Federal FB-2	2.648	1535	248	162	948	153	1.635	3310	2044
S-6	Federal FB-1	2.647	1484	261	156	953	168	1.701	3309	2127
S-7	Kunigel WB	2.775	1523	223	144	1060	155	1.932	3469	2416
S-8	PremiumGel	2.513	1385	210	135	1024	156	1.859	3551	2627
S-9	NeoKunibond	2.405	1328	254	166	802	153	1.451	2745	1657
S-10	Asama	2.461	1284	234	163	789	144	1.512	2743	1685
S-11	Kunigel V1	2.540	1296	178	144	902	124	1.768	2347	1633
S-12	Kunigel VA	2.551	1142	222	138	827	161	1.849	3189	2311
S-13	Kunigel VAS	2.532	1091	245	139	788	177	1.828	3165	2285
S-14	Akagi	2.555	1020	246	157	652	157	1.632	1805	1154
S-15	Hotaka	2.548	891	238	148	601	161	1.720	2631	1776
S-16	NewHotaka	2.457	813	258	142	572	181	1.727	1870	1314
S-17	Kunibond	2.636	607	257	151	401	170	1.745	860	569
S-18	PantherCreek	2.721	425	242	146	290	166	1.859	887	606
S-19	Paraseal *	2.305	1160	217	120	970	182	1.927	2630	2199
S-20	GundSeal *	2.289	1244	221	109	1147	204	2.109	2861	2638
Average (S-1~S-18)		2.560	1241	236	149	837	159	1.729	2764	1875
Average (S-1~S-20)		2.534	1237	235	145	859	163	1.758	2762	1929
Median (S-1~S-18)		2.544	1312	242	147	865	160	1.736	3120	1991
Median (S-1~S-20)		2.536	1290	240	145	925	161	1.757	2968	2020

* Bentonite samples from high-density polyethylene geomembrane-supported geosynthetic clay liners (GMGCLs), which are coated with about 10 percent of water-soluble polymer adhesives (as reference samples).

表-5.3 ベントナイト試料 20 種のコンシステンシー限界
並びにその他の基礎的特性の測定結果 3

Samples		Intercept of soluble silica (%)	Cation exchange capacity (meq/kg)	Leached cations with 1N-ammonium acetate solution (meq/kg)					Identification of minerals in bentonite ** (X-ray diffraction)						
No	Trade mark	S_{dc}	CEC	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Total	Mt	Qz	Cr	F	Ca	M	Z
S-1	WesternBond	0	833	273	380	597	20	1270	4+	+	-	-	-	-	-
S-2	SuperClay	19.1	723	55	272	618	13	958	4+	-	+	+	-	+	-
S-3	Volclay	0	807	68	277	617	16	978	4+	2+	-	+	-	-	-
S-4	Federal FB-3	-	626	46	240	629	9	924	3+	+	2+	-	-	+	-
S-5	Federal FB-2	-	642	44	200	623	6	877	3+	+	2+	+	-	+	-
S-6	Federal FB-1	-	647	42	191	622	6	861	3+	+	2+	+	-	+	-
S-7	Kunigel WB	-	754	67	353	608	19	1047	4+	2+	+	+	-	-	-
S-8	PremiumGel	0	924	89	466	662	14	1231	4+	2+	-	+	+	-	-
S-9	NeoKunibond	24.7	770	75	407	806	21	1309	3+	+	2+	+	-	-	+
S-10	Asama	31.7	701	101	820	593	36	1550	3+	-	2+	-	+	-	-
S-11	Kunigel V1	0	625	75	518	574	11	1178	3+	2+	-	+	+	-	-
S-12	Kunigel VA	-	660	64	423	640	9	1139	3+	2+	-	+	+	-	-
S-13	Kunigel VAS	-	610	44	357	498	35	934	3+	2+	-	+	+	-	-
S-14	Atagi	5.8	842	63	746	653	55	1517	3+	2+	+	-	+	+	+
S-15	Hotaka	12	851	66	651	727	60	1504	3+	2+	2+	+	+	+	+
S-16	NewHotaka	5.6	956	104	479	912	48	1543	3+	2+	-	-	-	-	+
S-17	Kunibond	13.1	827	128	490	308	28	954	3+	+	2+	+	-	-	-
S-18	PantherCreek	-	814	131	780	0	16	927	3+	+	-	+	-	-	-
S-19	Paraseal *	-	750	131	321	491	19	961	4+	+	-	-	-	-	-
S-20	GundSeal *	-	874	148	324	472	22	966	4+	+	-	+	-	-	-
Average (S-1-S-18)			756	85	447	594	23	1150							
Average (S-1-S-20)			762	91	435	583	23	1131							
Median (S-1-S-18)			762	68	415	620	18	1093							
Median (S-1-S-20)			762	72	394	618	19	1013							

* Bentonite samples from high-density polyethylene geomembrane-supported geosynthetic clay liners (GMGCLs), which are coated with about 10 percent of water-soluble polymer adhesives (as reference samples).
**Mt: montmorillonite; Qz: quartz; Cr: α -crystalite; F: feldspar; Ca: calcite; M: mica; Z: zeolite. Gypsum was not detected in the all samples.

(4) コンシステンシー限界並びにその他の基礎的特性の測定結果(2)

液性限界は代表的 Ca 型ベントナイトである S-17 と S-18 が 110 ～ 200 % であり，その他の一般の Na 型ベントナイトが 300 ～ 700 % の範囲である。特に米国ワイオミング産ベントナイト (S-1 ～ S-8) は 500 % 以上の高い液性限界を示している。収縮限界は GM/GCL からの S-19 と S-20 がとくに低い値を示しているのは水溶性有機高分子系接着剤処理の効果と考えられる (表-5.1)。この 2 試料を除く 18 試料については約 15 ～ 23 % (平均約 19 %) の範囲で大略一定の値にある。したがって塑性限界と収縮限界の差は約 20 ～ 50 % (平均約 30 %) となり，全試料について塑性限界と収縮限界の逆転は現れなかった。

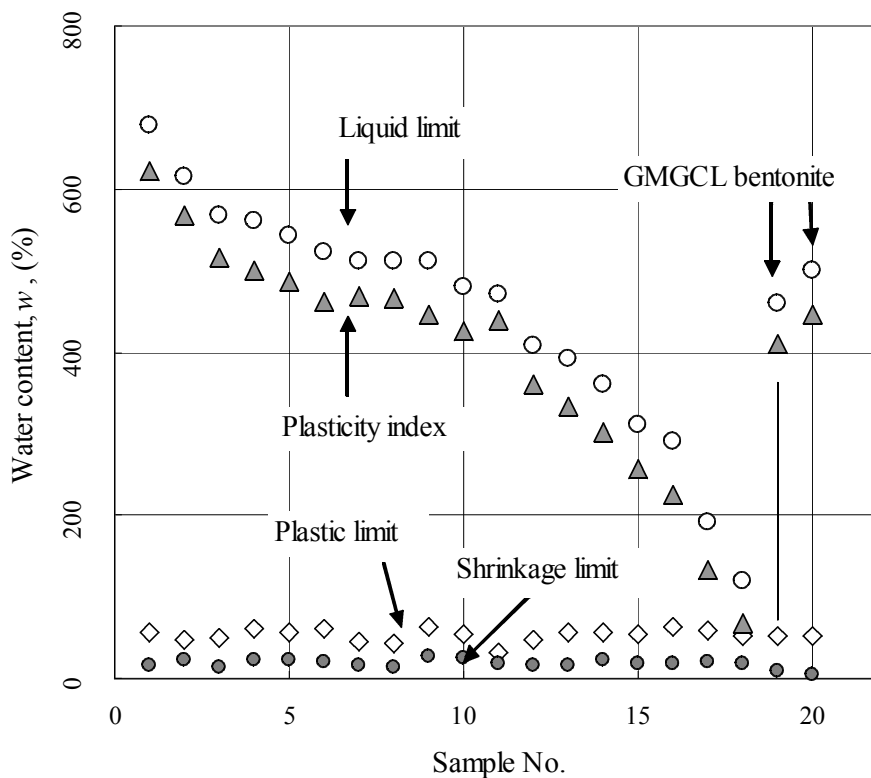


図5.4 ベントナイト試料 20 種の散布図

(5) ベントナイト塑性体の含水比の変化に応じる体積の変化

ベントナイト塑性体の含水比の変化に応じる体積の変化の考察には、三笠¹⁰⁾の提唱する体積比を用いて解析を行った。さてベントナイトのコンシステンシー限界における含水比と体積の関係は次式で表される。

$$f(\%) = \frac{V}{V_s} \times 100 = \frac{m_w / \rho_w + m_s / \rho_s}{m_s / \rho_s} \times 100 \quad (1)$$

f は体積比、V_s は試料土粒子の体積、V は各限界値における試料の体積、m_w は水の質量、m_s は土粒子の質量、w は含水比(%), ρ_w は水の密度、ρ_s は土粒子の密度であり、ρ_s/ρ_w は土粒子の比重である。

ベントナイト 18 試料(S-1 ~ S-18)の液性限界、塑性限界及び収縮限界における体積比 f を各限界値の含水比 w に対してプロットした図5.5より回帰式(2)が得られ、回帰係数 2.550 はベントナイト 18 試料の土粒子の平均密度(表-5.2)から換算した比重 2.56 と良好な近似を示した。

$$f = 2.550 \cdot w + 100 \quad (2)$$

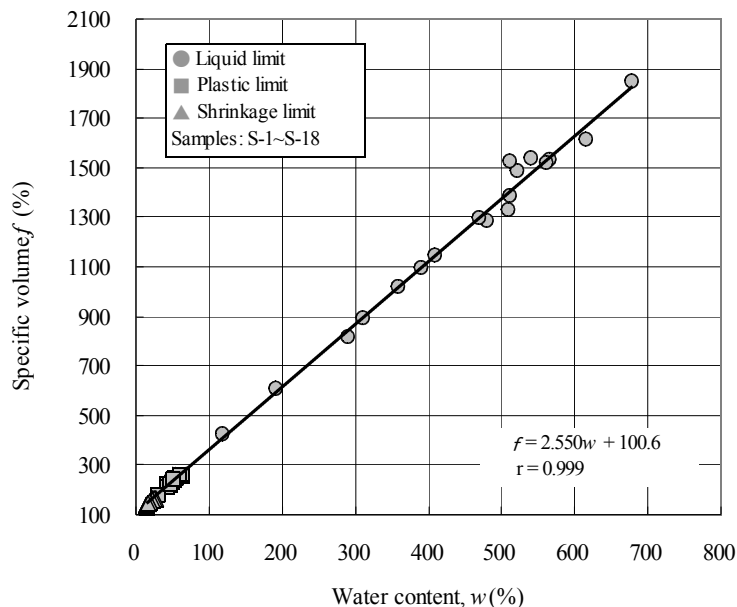


図5.5 液性限界、塑性限界及び収縮限界における体積比 f を各限界値の含水比 w に対してプロットした図

(6) 塑性図

液性限界(w_L)と塑性指数(I_P)から **図5.6**に示す塑性図が得られた。統一土質分類塑性図¹¹⁾の A 線式(3)に対して今回測定したベントナイト塑性図の特性線は回帰式(3')で与えられ、特性線の回帰係数は 1.010 で A 線の勾配よりも 1.38 倍高い塑性を示した。

$$\text{統一土質分類塑性図の A 線 : } I_P = 0.73w_L - 14.6 \quad (3)$$

$$\text{ベントナイト塑性図特性線 : } I_P = 1.01w_L - 57.8 \quad (3')$$

また式(3')と米国の代表的な土の塑性図¹²⁾から読み取ったベントナイトの塑性図の特性線と比較すると、勾配は同じく 1.0 で一致した。A 線とベントナイト特性線の交点座標は式(3)及び(3')から(154, 98)であるが、典型的な Ca 型ベントナイトである S-18 だけが A 線よりも下方(119, 67)にプロットされシルト(高液性限界)に分類される。

式(3')は、回帰係数を 1.0 と見なすと塑性指数の定義すなわち $I_P = w_L - w_P$ と同形となり、定数項 57.8 を今回測定した塑性限界の統計値に置き換えて、ベントナイトの塑性指数と液性限界に関わる一般式として表すことができる。ちなみに今回測定した塑性限界の統計計算結果は次のとおりであった。

平均値 : 53.2 ; 標準偏差 : 7.85 ; 中央値 : 54.4

有意水準 5%の信頼区間 : $\pm 3.44(49.8 \leq 53.2 \leq 56.6)$

有意水準 1%の信頼区間 : $\pm 4.52(48.7 \leq 53.2 \leq 57.7)$

図5.4の散布図からわかるように、塑性限界は収縮限界と同様に一定の値の帯状に分散しており液性限界の大小と直接の関係は見出されない。

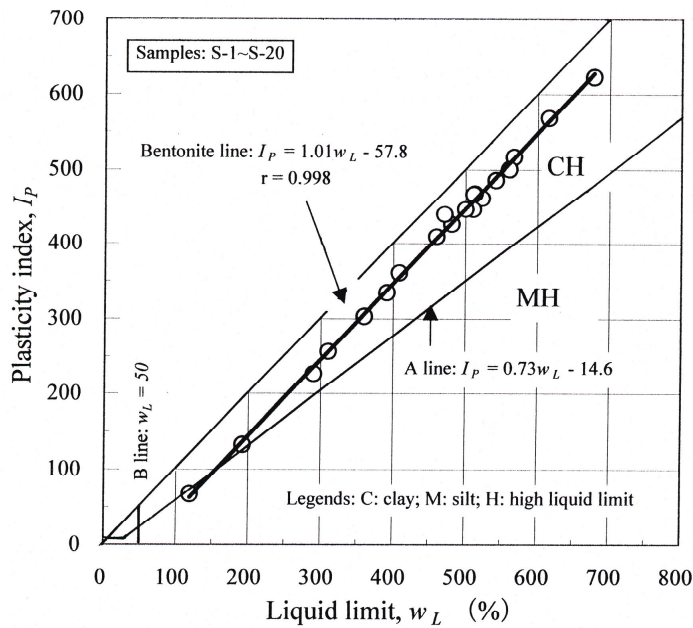


図5.6 ベントナイト試料 20 種の塑性図

(7) 各コンシステンシー限界における含水比 w と体積比変化 f/f_0 の関係

各コンシステンシー限界における含水比 w と体積比変化 f/f_0 の関係をプロットすると 図5.7 及び式(4)が得られた。

$$f / f_0 (\%) = 1.752 w + 69.6 \quad (4)$$

式(4)の回帰係数 1.752, すなわち 図5.7 の直線の勾配は液性限界から収縮限界間の統計的な収縮比であり, 実験で求めた全 20 試料の収縮比平均値 1.758 とは良好な近似を示した。式(4)を変形し一般式で表示すると式(4') となる。

$$w(\%) = \frac{\frac{f}{f_0} - C}{R} \quad (4')$$

ここに, C は定数, R は収縮比である。式(4)の回帰係数と定数項を式(4') に代入することにより 図5.6 の回帰線上に収縮限界に相当する点を求めること

が出来る。すなわち、収縮限界において $f=f_0$, $w=w_s$ と置き式(4')を解くと次式に示したとおり収縮限界として 17.4%が得られ、この値は全試料の収縮限界平均値 17.8%と良好な近似を示した。

$$w_s (\%) = \frac{f_0 - C}{R} = \frac{100 - 69.6}{1.752} = 17.4$$

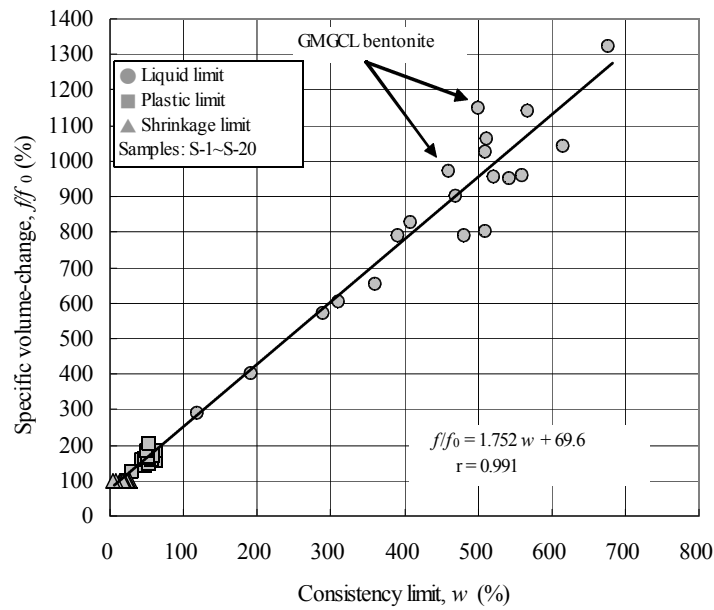


図5.7 コンシステンシー限界における含水比 w と体積比変化 f/f_0 の関係

(8) 収縮比 R と収縮限界における体積比 f_0 との関係

収縮比 R と収縮限界における体積比 f_0 との関係について考察した。 V_s , V_0 , V_L をそれぞれ土粒子の体積, 収縮限界における体積, 液性限界における体積, ρ_w を水の密度, m_w は失われた水の質量, m_s は土粒子の質量とすれば式(5)が得られる。

式(5)に基づき, $100/f_0$ に対して収縮比(R)をプロットしたのが図5.8である。式(5)の比例定数項 ρ_s / ρ_w は土粒子の比重であるから, GM/GCL ベントナイトを除く 18 試料の密度平均値より比重 2.56 の座標(1, 2.56)と原点を結ぶ直線は

ベントナイト 18 試料のプロットの中央値座標(0.679, 1.736)を通る。そしてこの中央値より収縮比の小さい試料は遊離シリカとして α -クリストバライトが顕著に検出されたベントナイトである。一方、中央値より収縮比の大きい試料は α -クリストバライトがほとんど検出されず石英を含んだベントナイトである。また GM/GCL ベントナイト 2 試料のプロットは共に直線から大きく乖離しており、特に収縮比が大きく、収縮限界における体積比が小さい（すなわち $1/f_0$ が大きい）。この特徴はベントナイト粒子が水溶性有機高分子系接着剤で表面処理されたことによって緻密な粘土集合構造を形成するためであると考えられる。

$$R = \frac{V_L - V_0}{V_0} \cdot \frac{100}{w_L - w_S}$$

$$V_L - V_0 = m_w / \rho_w$$

$$w_L - w_S = \frac{m_w}{m_s} \times 100$$

$$R = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{m_w}{\rho_w} \cdot \frac{m_s}{m_w} = \frac{m_s}{V_0 \cdot \rho_w}$$

$$f_0 (\%) = 100V_0 / V_s$$

(5)

$$R = \frac{100}{f_0} \cdot \frac{m_s}{V_s \cdot \rho_w} = \frac{100}{f_0} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

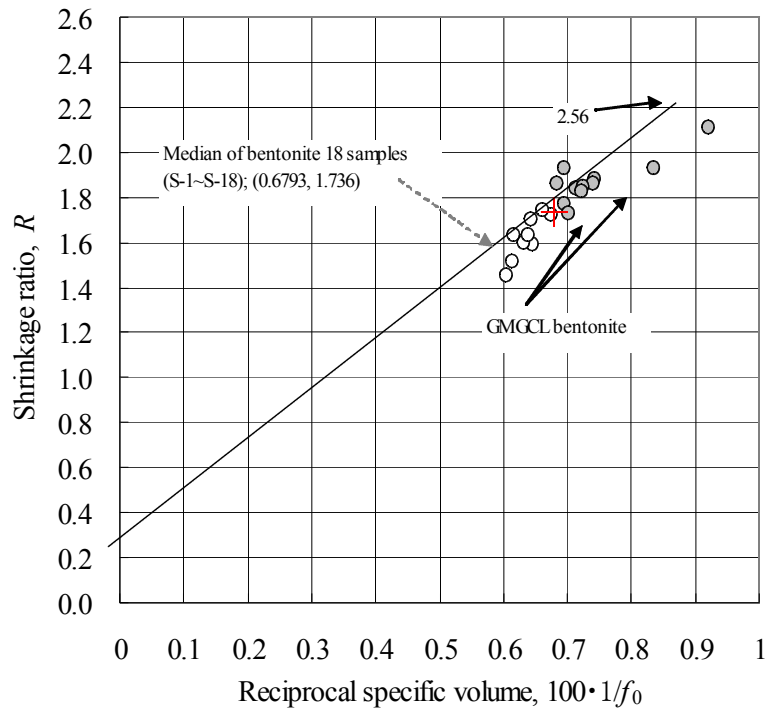


図5.8 100/f₀ に対して収縮比(R)をプロットした図

式(5)について、収縮比 R と収縮限界における体積比 f_0 の関係をプロットすると図5.9が得られた。図5.9において R の中央値と f_0 の中央値がそれぞれ破線で示してある。A グループにプロットされた試料は遊離シリカとして石英が検出され、 α -クリストバライトが検出されなかったベントナイトであり、相対的に収縮比が大きく収縮限界における体積比が小さい。特に GM/GCL ベントナイトは収縮比が大で収縮限界の体積比が小さい特徴を有している。一方、B グループにプロットされた試料は、いずれも遊離シリカとして α -クリストバライトが顕著に検出された試料であり、相対的に収縮比が小さく収縮限界における体積比が大きいベントナイトである。先に示した図5.6の体積比変化と含水比の関係図においても、回帰線の下方にプロットされた体積比変化の小さい試料が図5.8の B グループに一致する。したがって図5.6～図5.8の結果からベントナイトに含まれている遊離シリカの多形がベントナイト塑性体の収縮挙動に顕著な影響を及ぼしていると考えられる。

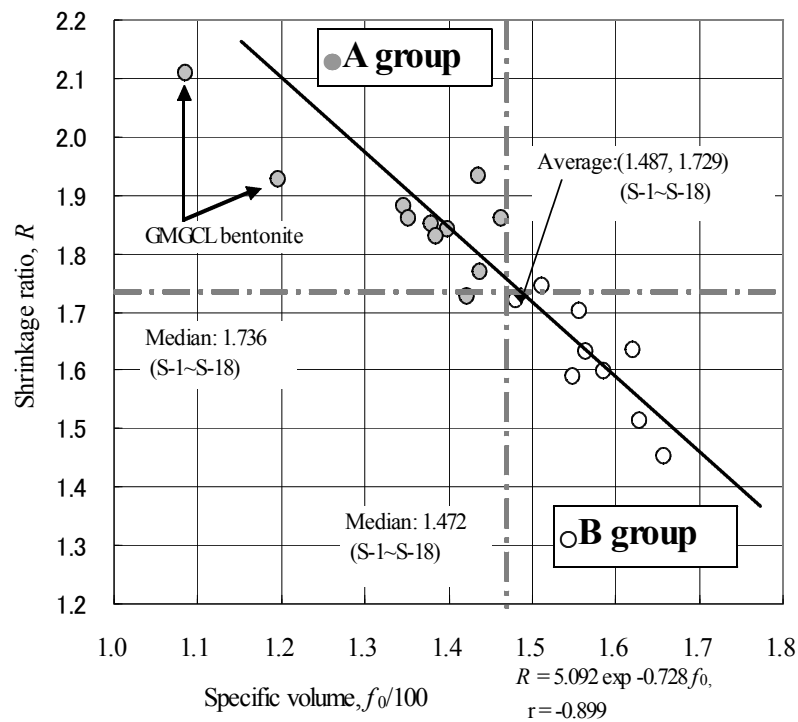


図5.9 収縮比 R と収縮限界における体積比 f_0 の関係

(9) $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有率と液性限界との関係

各国の土粒子粒径区分¹³⁾を参考にして粘土分については $-5 \mu\text{m}$ と $-2 \mu\text{m}$, コロイド分として $-1 \mu\text{m}$ の3粒径区分とし, それらの含有量と液性限界との関係を考察した。GM/GCL ベントナイトを除く 18 試料の各粒径区分の含有量百分率 c_5, c_2, c_1 を独立変数, 液性限界の含水比 $w_L(\%)$ を従属変数として直線回帰計算を行った結果は次のとおりであった。

$$-5 \mu\text{m 粘土分} : w_L = 10.05c_5 - 327.3, \quad r = 0.839$$

$$-2 \mu\text{m 粘土分} : w_L = 9.48c_2 - 196.7, \quad r = 0.888$$

$$-1 \mu\text{m コロイド分} : w_L = 9.53c_1 - 149.2, \quad r = 0.923$$

粒径区分の粒子径が小さくなるに従って相関係数は高くなり 1 に近づいている。代表的に $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有率と液性限界との関係を図5.10に示した。これらの結果から液性限界がベントナイト中のコロイド分含有量に大きく依存していることがわかる。

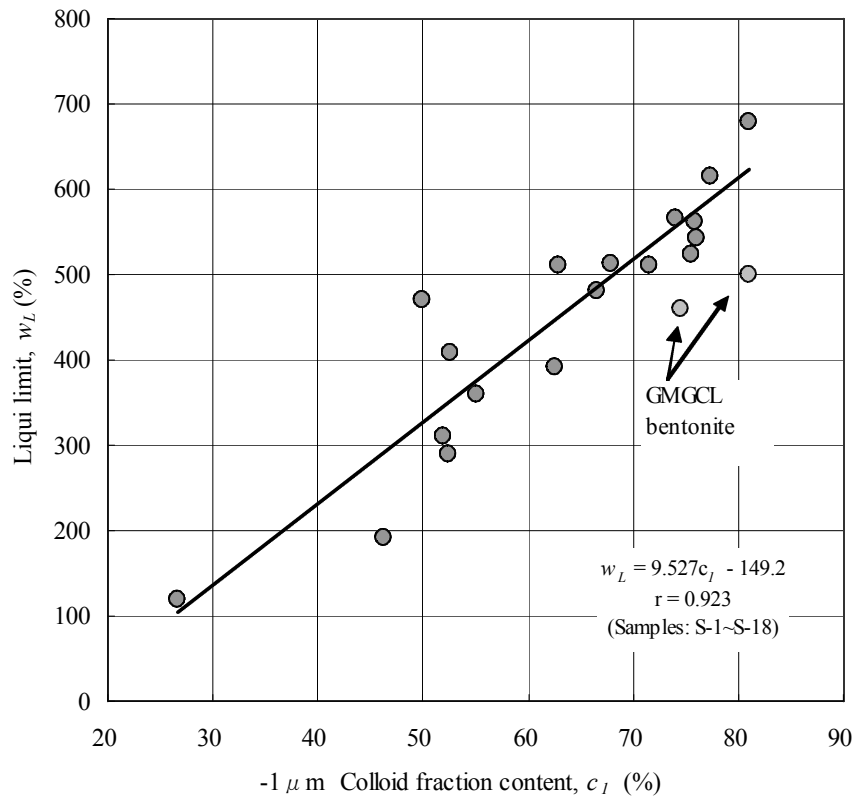


図5.10 $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有率と液性限界との関係

(10) 活性度

活性度は、塑性指数/ $-2 \mu\text{m}$ 粘土分含有率¹⁴⁾として定義されているから、それは試料粘土中の非粘土質による希釈効果を排除した粘土粒子の水に対する拘束能の尺度となる。試料ベントナイト全範囲の活性度は 2.07 から 8.53 まで広がっていることが表-5.1からわかる。 $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有率と活性度との関係を図5.11に示した。GM/GCL ベントナイト S-19 と S-20 および活性度が異常に高い S-11 とを外した回帰直線を $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有率について 100%に外挿した活性度は 8.83 であり、ほとんど 9 に近くなっている。このことはベントナイト中のコロイド分の 1 質量部が略 9 質量部の水を拘束することを示唆している。各試料の活性度の回帰直線からの乖離は、個々のベントナイトの性格として捉えるべきである。

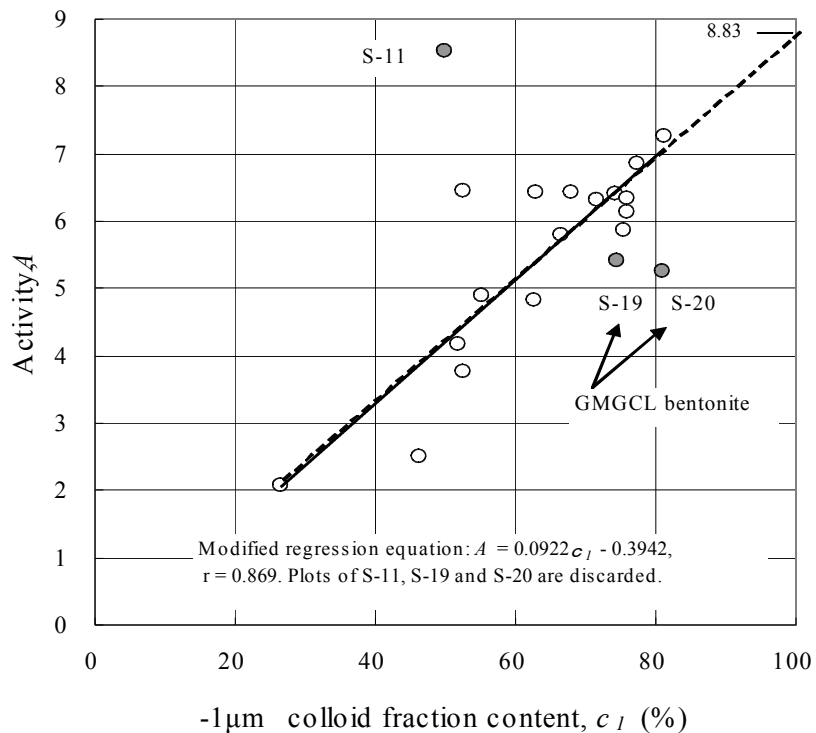


図5.11 $-1 \mu m$ コロイド分含有率と活性度との関係

(11) 陽イオン交換容量(CEC)と浸出陽イオン

ベントナイトは最も大きい CEC を有する粘土として知られている。さらにその巨視的なオスモチック膨潤特性は主成分鉱物であるモンモリロナイトの交換性 Na^+ の水和性質に基づくものであることも明らかにされている¹⁵⁻¹⁷⁾。しかしながら高橋(1995)ら¹⁸⁾は 10 試料の市販 Na 型ベントナイトについて液性限界と CEC および浸出陽イオン組成との間に明瞭な相関関係を見出さなかったことを報告しており、本研究においてもベントナイト試料 20 種からは同じく両者間に一定の関係は認められなかった。その原因としては、浸出陽イオン量の合計値が CEC の平均 1.5 倍もあり、それらの過剰イオンがベントナイトと水との相互作用を複雑にしているためと考えられる。Grim(1962)¹⁹⁾は Na^+ と Ca^{2+} のある比率例えば 60:40 で相対的に高い塑性指数が期待されると述べている。

Na^+/CEC 当量比と液性限界の関係をプロットした図5.12から略同様な傾向があり、また Na 型ベントナイトは全て Na^+/CEC 当量比が 50%以上で約 300%以上の高い液性限界であることが認められる。

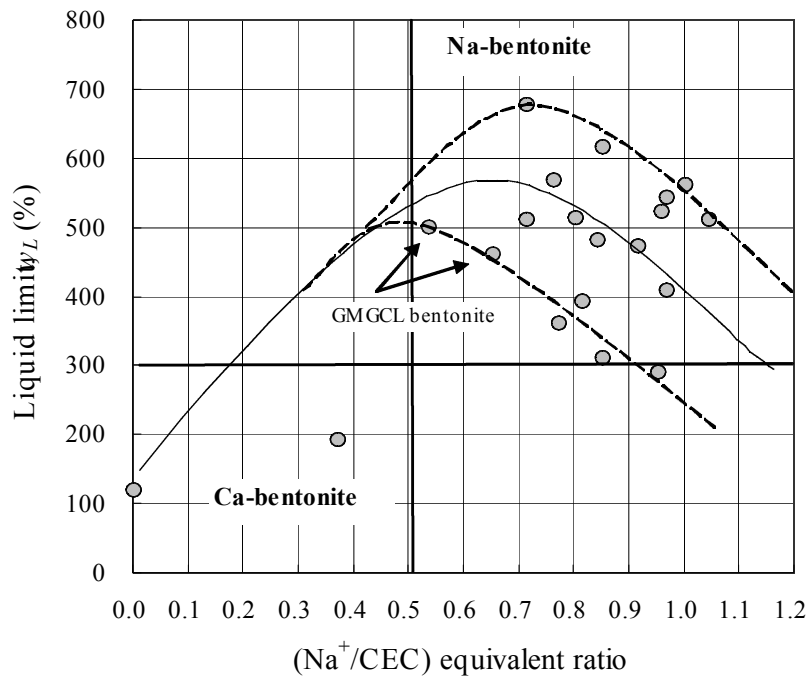


図5.12 Na^+/CEC 当量比と液性限界の関係

(12) 可溶性シリカ

図5.9の収縮比と収縮限界における体積比との散布図において、相対的に高い収縮比の群（A グループ）と相対的に低い収縮比の群（B グループ）に分類できることを述べた。このBグループに属するベントナイト（S-2, S-4～S-6, S-9, S-10, S-14, S-15, S-17）は遊離シリカとして何れも石英が少なく α -クリストバライトを夾雑しているベントナイトであり、一方、Aグループ（S-1, S-3, S-7, S-8, S-11～S-13, S-16, S-18, S-19, S-20）は石英が多く α -クリストバライトが少ない（または不含）ベントナイトであることを述べた。

ベントナイトが含有している α -クリストバライトはそのX線回折反射が何れもブロードであることから、結晶不整が大きく結晶子が微小であると推定される。Jones と Segnit(1971)²⁰⁾はこのような粘土に伴う天然の微結晶シリカは無秩序格子あるいはアモルファスに近いクリストバライトやトリジマイト様構造であり、オパールとして分類している。したがって化学的に活性であると考えられ、A, B 両グループから11試料を選び、90℃の1N-NaOH溶液に溶出してくる比色シリカ濃度の時間的変化を測定した。結果は表-5.4に示したとおり、

何れのベントナイトについても処理時間が 300 分の範囲で相関係数が 0.990 以上的一般回帰式(6)が得られた。

$$S = \alpha + \beta \cdot t^{1/2} \quad (6)$$

ここに、S は比色シリカ濃度(g/L)， α は処理時間ゼロにおける比色シリカ濃度（比色シリカ濃度の切片値，g/L）， β はシリカ溶解速度係数（g/L/min^{1/2}），t は処理時間(min)である。

アルカリ処理試験結果の代表例を 図5.13 に、またアルカリ処理前後の X 線回折パターン代表例を 図5.14 に示した。アルカリ処理後の X 線回折では α -クリストバライトの反射が消失したことを確認した。

アルカリ処理試験結果を式(6)で整理して 表-5.4 に示した。表-5.4 のベントナイトに対する可溶性シリカ切片値を収縮限界における体積比および収縮限界についてプロットした 図5.14 および 図5.16 から可溶性シリカ切片値の大きいベントナイトほど収縮限界における体積比が大であり、また収縮限界が大きいベントナイト粒子の集合構造をつくることがわかる。

表-5.4 90 °C の 1N-NaOH 溶液に溶出してくる
比色シリカ濃度の時間的变化を測定結果

Regression equation*	Samples										
	S-1	S-2	S-3	S-8	S-9	S-10	S-11	S-14	S-15	S-16	S-17
$S = \alpha + \beta \cdot t^{1/2}$											
α (g SiO ₂ /L)	-0.142	1.909	-0.133	-0.011	2.468	3.168	-0.241	0.575	1.196	0.563	1.306
β (g SiO ₂ /L/min ^{1/2})	0.1022	0.0791	0.1029	0.1047	0.0849	0.0485	0.1013	0.1395	0.1216	0.1043	0.0786
Correlation coefficient, r	0.998	0.996	0.999	0.999	0.995	0.988	0.994	0.998	0.998	0.990	0.998
Intercept of soluble silica, S_{ic} (%SiO ₂ /bentonite)	0	19.1	0	0	24.7	31.7	0	5.8	12.0	5.6	13.1

* Where S is soluble silica concentration determined colorimetrically with ammonium molybdate, t is reaction time, and α and β are a constant (that is the intercept of soluble silica concentration at zero time) and a factor with soluble silica concentrati

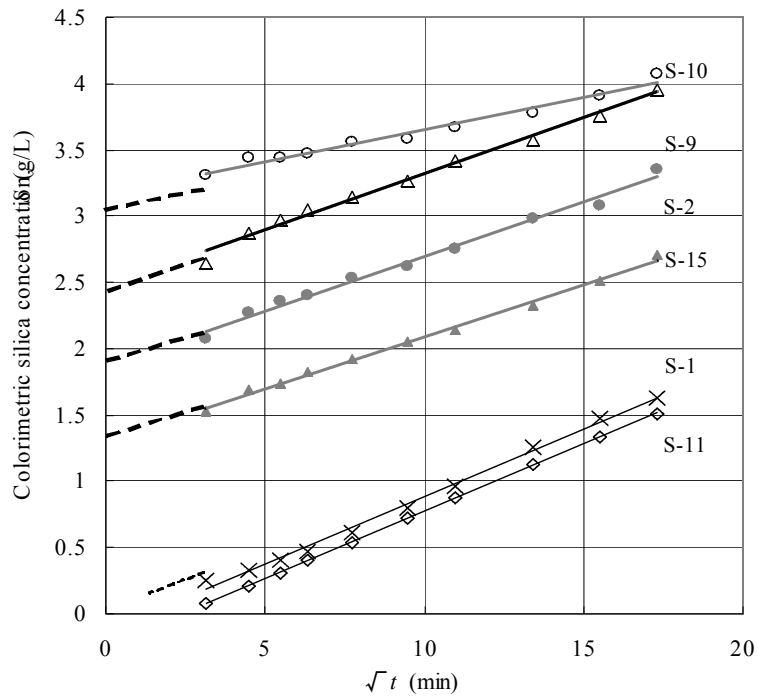


図5.13 アルカリ処理試験結果の代表例

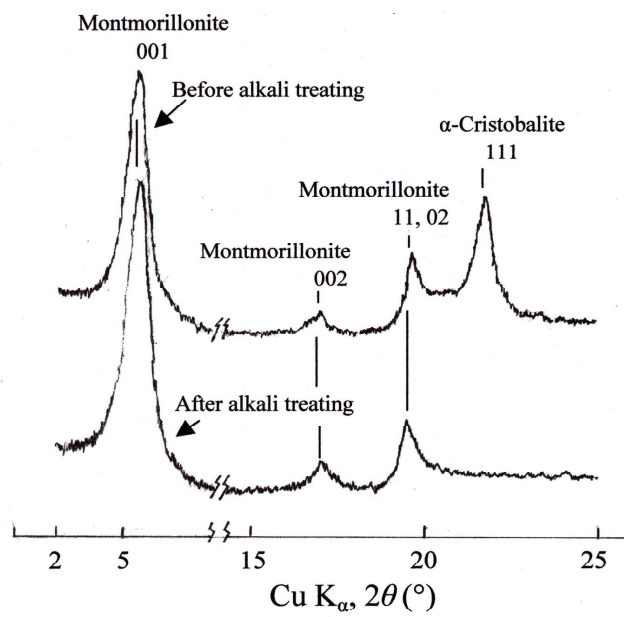


図5.14 アルカリ処理前後の X 線回折パターンの代表例

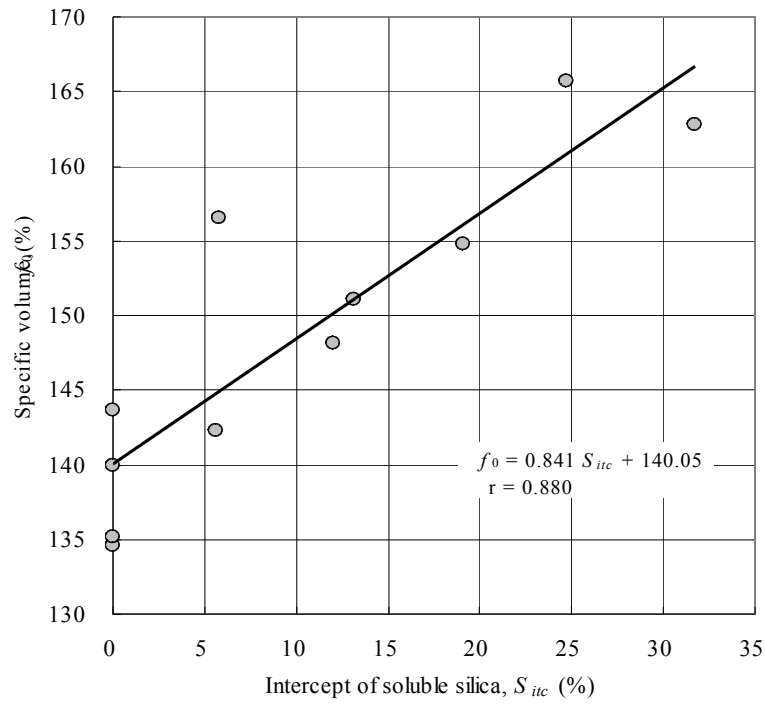


図5.15 ベントナイトに対する可溶性シリカ切片値を収縮限界における体積比

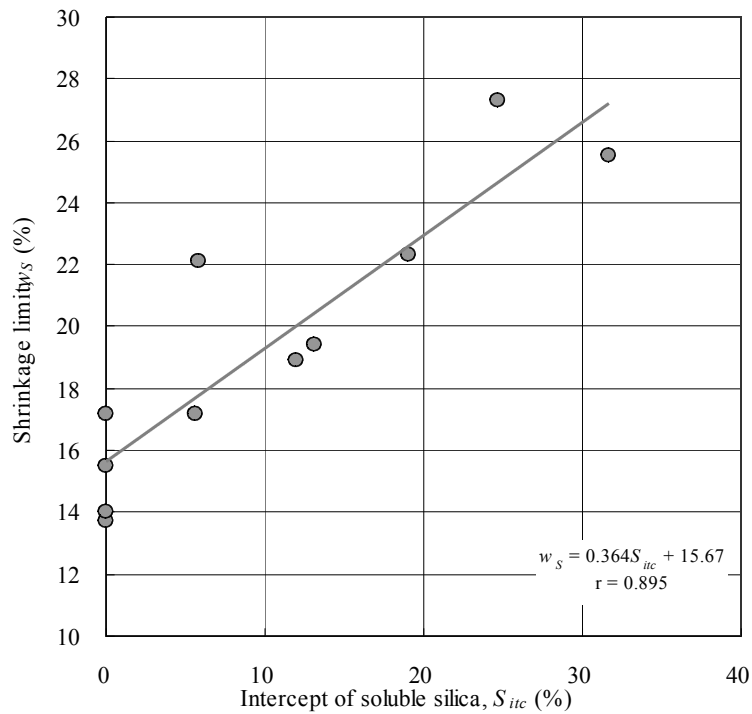


図5.16 ベントナイトに対する可溶性シリカ切片値を収縮限界における体積比

可溶性シリカ切片値と $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有量の関係を示した図5.17は、可溶性シリカ切片値の高いベントナイトほどコロイド分が多いことを示している。また図5.18に示す $-2 \mu\text{m}$ 粘土分および $-1 \mu\text{m}$ コロイド分のX線回折結果からブロードで明瞭な α -クリストバライトの反射が認められ、結晶子の小さいアモルファスに近い α -クリストバライトが可溶性の遊離シリカとしてモンモリロナイトとともにコロイド成分となって存在しているものと考えられる。

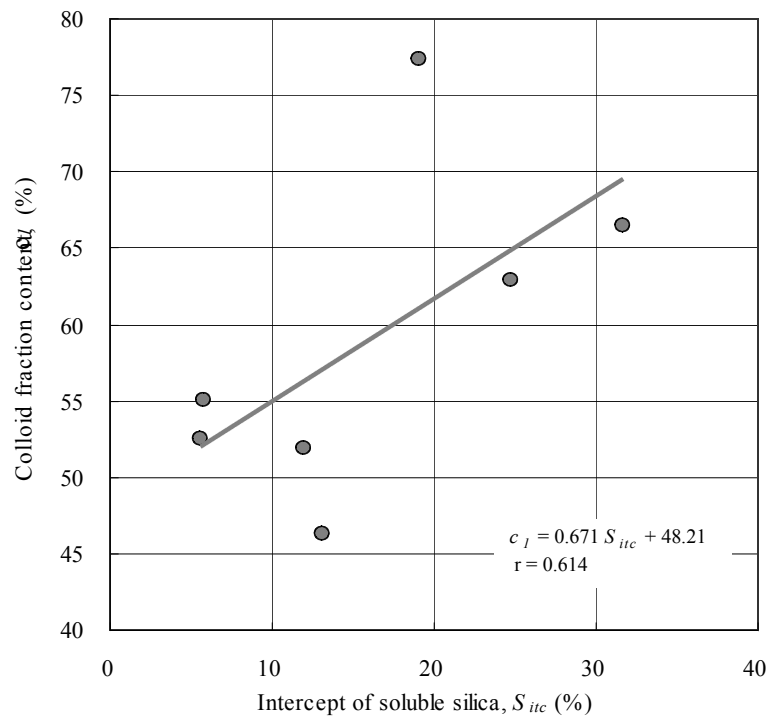


図5.17 可溶性シリカ切片値と $-1 \mu\text{m}$ コロイド分含有量の関係

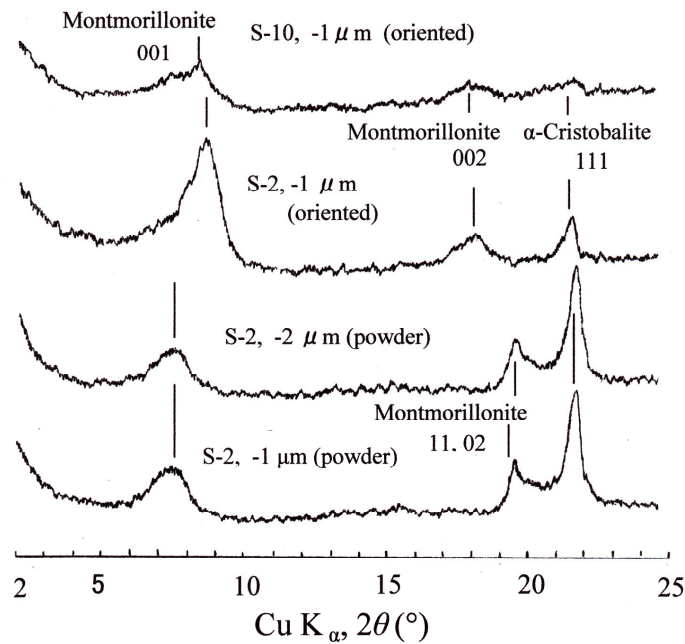


図5.18 $-2 \mu\text{m}$ 粘土分及び $-1 \mu\text{m}$ コロイド分の X 線回折結果

(13) 膨潤力と液性限界

100 ml の精製水中で試料 2 g が吸水膨潤して占める乱れていない沈降体積で膨潤性を評価する試験方法は古くから各国薬局方ベントナイトの膨潤力試験として用いられている。ベントナイトの液性限界試験は技能的な熟練を要することと特殊試験装置を必要とするのに比較して，膨潤力試験は特殊な装置を必要とせず極めて簡易に測定できる。図5.19は膨潤力と液性限界の関係を示す散布図で，回帰直線はノモグラムとして活用でき，両者の関係を式(7)で表すことができる。ここに w_L は液性限界(%), S_P は膨潤力($\text{cm}^3/2\text{g}$)である。

$$S_P = 0.04 w_L + 2.6 \quad (7)$$

Na 型ベントナイトの液性限界は 300 %以上であり，これは膨潤力 $12.5\text{cm}^3/2\text{g}$ 以上であることがわかる。一方，勝見(2002)ら²¹⁾は電解質水溶液中のベントナイトの膨潤力，透水係数および電解質濃度の関係を詳細に研究し，電解質濃度の増大とともに膨潤力は小さくなり，透水係数が増大すること，また膨潤力が

12.5 cm³/2g 以上で低透水性の閾値である透水係数が 1×10^{-7} cm/s 以下になることを明らかにしている。

膨潤力と液性限界の大きさは収縮限界以上の含水量による体積の変化に関するものであるから、それぞれ膨潤力体積比変化 f_{sp}/f_0 と液性限界体積比変化 f_L/f_0 について、両者の関係をプロットして図5.19及び直線回帰式(8)を得た。

$$= 2.28 \cdot (f_L / f_0 - 13) \quad (8)$$

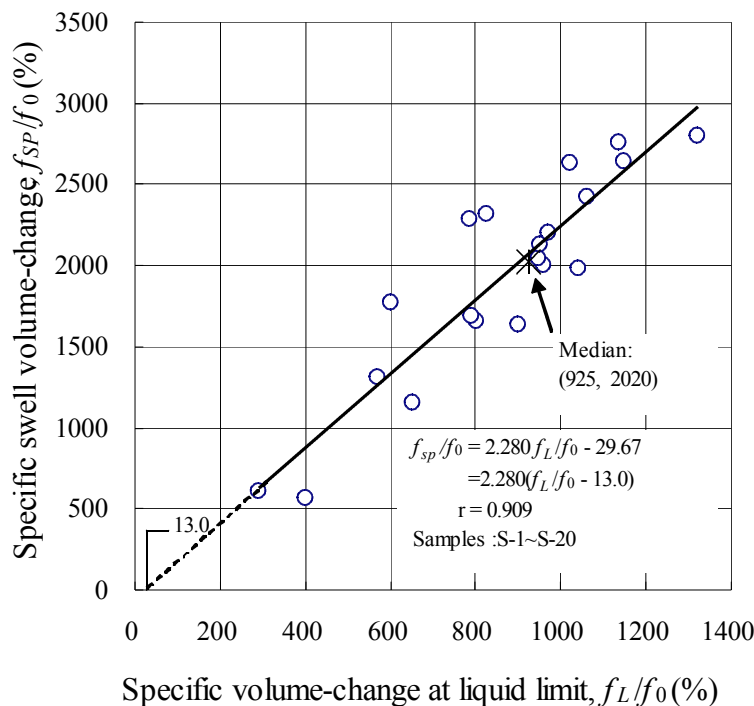


図5.19 ベントナイト試料 20 種の膨潤力と液性限界の関係

(14) 液性限界と膨潤力についての実験式の解釈

f_{sp}/f_0 は収縮限界における試料の体積比に対する膨潤した試料の体積比百分率であり、 f_L/f_0 は、同じく収縮限界における試料の体積比に対する液性限界における試料の体積比百分率であるから、それぞれ次式で表すことができる。ここに、 f_0 、 f_L 、 f_{sp} はそれぞれ収縮限界、液性限界、膨潤力における体積比、 m_s 、 m_w は試料及び水の質量、 ρ_s 、 ρ_w は試料及び水の密度、 V は膨潤した試料の体積、 w' は膨潤力試験の最初の試料中に含まれている水分率である。

上記式(8)の回帰係数 2.28 は、膨潤力に寄与している水分量は、液性限界の塑性に寄与している水分量の 2.28 倍であることを示している。定数項絶対値 29.7 は f_{sp}/f_0 の中央値 2020 に対して 1.47%にすぎないが、両者の試験方法の違いによる補正定数と考えられる。すなわち膨潤力試験は試料の水中における静的な沈降体積を測定するのに対して、液性限界は試料を水と十分に捏和して得られる塑性体を機械的に一定の変形を与えることによって達成される動的な試験方法である。このような試験方法における基本的な相違が、粘土粒子の配向性に一定の差異を発生させているためであろうと考えられる。すなわち、式(8)の右辺はこのことを明確に表しており、膨潤力試験では、ベントナイトのような高塑性粘土からなる土粒子のドメインあるいはアグリゲート間に、コンシステンシー限界試験で得られる収縮限界の体積比に加算される 13%のデッドスペースがあると **図5.19**からいえる。

また、 $f_L = f_0$ のとき、式(7)式(8)は $f_{sp}/f_0 = 198\%$ となる。この値は体積 V の球を内接した立方体の体積が $191V\%$ となる関係に近似している。

回帰式(7)： $S_p = 0.04w_L + 2.6$ を検証する。

回帰式(8)： $f_{sp}/f_0(\%) = 2.28 f_L/f_0 - 29.7$ は、 $f_L > f_0$ において成り立つから $f_L = f_0 = 145$ とすれば収縮限界に対応する膨潤力体積比は

$$\begin{aligned} (f_{sp})' &= 2.28 \times 145 - 0.297 \times 145 = 288 \\ (S_p)' &= 288 \times (1-w') / (50 \times \rho_s) = 288 \times 0.92/126.7 = 2.1 \end{aligned}$$

すなわち、膨潤力試験の試料 2g (ただし水分率が 0.08) のカサが 2.1cm^3 である。したがって、一般式は

$$\begin{aligned} S_p &= 0.02 \times 0.92 \times 2.28w_L + 2.1 \\ &= 0.042w_L + 2.1 \quad (7') \end{aligned}$$

となり、回帰式(7)は式(7')に修正される。左辺の比例係数は膨潤力では水分 8% の試料 2g が液性限界における試料の含水比の 2.28 倍の水を拘束することの係数であり、定数項 2.1 は試料 2g の土粒子のカサ (見掛体積) である。

第5章のまとめ

コンシステンシー限界における含水比 $w(\%)$ と体積比 $f(\%)$ との関係から回帰式 $f = 2.55w + 100$ が得られ、理論値に良く一致した。統一土質分類塑性図における A 線は $I_p = 0.73 w_L - 14.6$ で与えられているが、これに対応するベントナイトのコンシステンシー特性線回帰式は $I_p = w_L - 58$ であった。この回帰式は塑性指数の定義すなわち $I_p = w_L - w_p$ と同形であり、定数項 58 はベントナイトの統計的塑性限界と見なすことができる。ちなみに実験で得られた w_p の有意水準 1% の信頼区間は $49 \leq 53 \leq 58$ であった。A 線の傾斜は $\tan \theta = 0.733$ で、Hogentogler の研究ではカオリンで 0.71、ベントナイトで 1.0 である。ベントナイト塑性図特性線： $I_p = 1.01w_L - 57.8$ と Hogentogler の値は一致することが判る。

相対的に高い収縮比を示すベントナイトの群 (A グループと呼称する) と低い収縮比を示す群 (B グループと呼称する) に分けることができ、それぞれ鉱物学的な明瞭な特徴を有し、含有遊離シリカとして A グループは石英を、B グループは微晶質 α -クリストバライトを伴っているベントナイトである。

クリストバライトは、**写真-5.3**に示すようにモンモリロナイトの微細構造の観察で、古くからその存在が明らかであったが、このおおよそ $0.1 \mu\text{m}$ 以下の超微量のクリストバライトはモンモリロナイトと互いに作用しないと考えられ今日に至った。しかし、ベントナイトの液性限界と塑性指数は本質的に粒子径区分における $1 \mu\text{m}$ 以下のコロイド分によって提供され、コロイド分はベントナイトの主鉱物であるモンモリロナイトだけでなく結晶子の微小なアモルファスに近い α -クリストバライトの寄与も明らかになった。

このような遊離シリカは 1N - NaOH 熱溶液に可溶であって比色法により迅速定量ができ、処理時間ゼロにおける同シリカ濃度軸の切片を可溶性シリカ切片値としてベントナイトを性格付けすることができた。すなわち A グループに属するベントナイトの可溶性シリカ切片値はゼロ、B グループのそれは約 5 ~ 30% (ベントナイト質量基準) の範囲であった。このような α -クリストバライトの存在は、収縮限界におけるベントナイト土粒子の集合構造の間隙を大きくすることに寄与しており、したがって収縮限界が相対的に高い。

液性限界の大きさに対する CEC や浸出陽イオン種と量の効果は明瞭でなかったが液性限界が 300%以上のベントナイトは陽イオン交換容量に対する浸出 Na^+ の当量比が 50%以上であった。

ベントナイトの薬局方試験法による膨潤力と液性限界との間の単純な回帰直線は、両者間の換算の実用的なノモグラムとして利用できる。膨潤力試験で得られる測定値は試料土粒子を内包した体積であり、一方、液性限界の値は試料土粒子に対する水の質量比である。両者に体積比変化量の概念を導入して無次元化して解析した結果、膨潤力に寄与している水分量は、液性限界の塑性に寄与している水分量の 2.28 倍であり、加えて、膨潤力試験では、ベントナイトのような高塑性粘土からなる土粒子のドメインあるいはアグリゲート間に、コンシステンシー限界試験で得られる収縮限界の体積比に加算される 13% のデッドスペースがあることが結論づけられた。

液性限界(w_L)と膨潤力(S_p)について検証し、回帰式は $S_p = 0.02 \times 0.92 \times 2.28 w_L + 2.1 = 0.042 w_L + 2.1$ であった。左辺の比例係数は膨潤力では水分 8% の試料 2g が液性限界における試料の含水比の 2.28 倍の水を拘束することの係数であり、定数項 2.1 は試料 2g の土粒子のカサ（見掛体積）である。

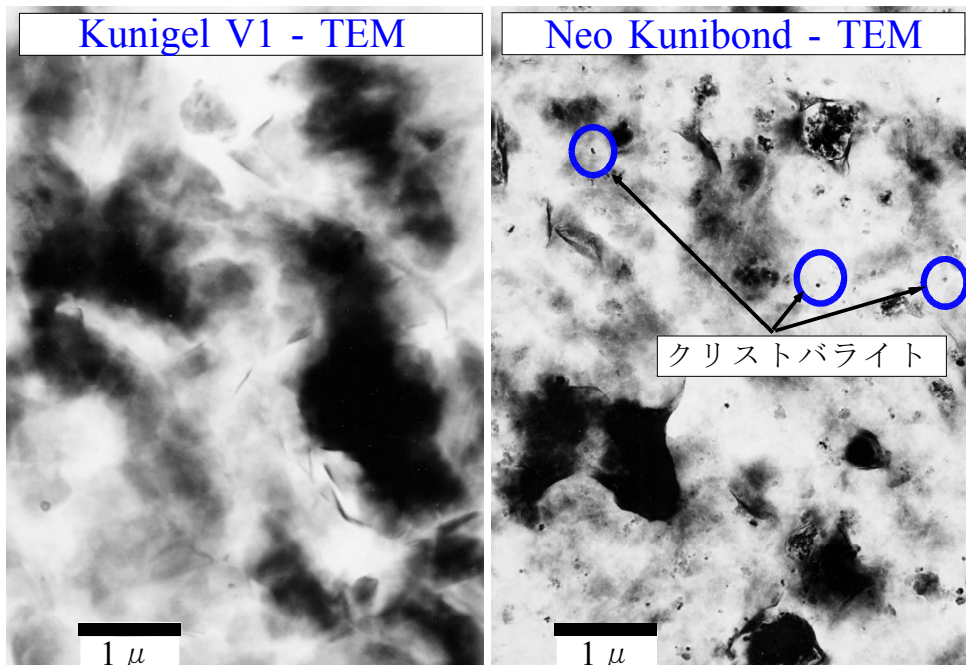


写真-5.3 透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた
山形産 Kunigel V1 と Neo Kunibond の微細形態画像

参考文献

- 01) 水野克己, 近藤三二(2001) : ベントナイトの特性と環境汚染分野への応用, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.49, No. 2, pp. 29-32.
- 02) 清水博樹(1997) : 液性限界－塑性限界試験 (土の物理的性質の試験), 京都大学防災研技術室, 技術室通信 No.65.
- 03) 東山 勇(1974) : Atterberg Limits の工学的意義, 土壤物理学会, 土壤の物理性 30, pp. 23-28.
- 04) Grim, R. E. (1962) : *Applied Clay Mineralogy*, pp.404. McGraw-Hill, New York.
- 05) Daniel, D. E. and Koerner, R. M. (1995) : *Waste Containment Facilities, Guidance for Construction, Quality Assurance and Quality Control of Liner and Cover Systems*, pp.42-130. ASCE Press, New York.
- 06) Kendall, T. (1996) : Bentonite Major market review, *Industrial Minerals* May 1996. pp.25-37.
- 07) 豊田富晴, 川上浩, 高木理枝(1996) : コンシステンシー限界と水分保持特性, 第31回地盤工学研究会発表論文集 pp.523-524.
- 08) 渡辺 裕(1961) : 粘土の塩基置換容量の測定法－Schollenberger 氏法の準法について, 粘土科学, I, 23.
- 09) 吉田 章, 松田応作(1986) クリストバライト含有珪石の水酸化ナトリウム溶液および水に対する溶解性,九州工業技術試験所報告, 36, 81-90.
- 10) 三笠正人(1969) 体積比のすすめ, 土と基礎, 17, No.2, pp.39-40.
- 11) 風間秀彦(2000) : 地質材料の工学的分類, 土質試験の方法と解説 第1回改訂版, 地盤工学会, pp.213-245.
- 12) 嘉門雅史, 浅川美利(1988) : 土の力学(I)土の分類・物理化学的性質, 新体系土木工学, 技報堂出, 16, pp.90.
- 13) *Ibidem*, pp.24.
- 14) Grim, R. E. (1962) : *Applied Clay Mineralogy*, pp.218-219. McGraw-Hill, New York.
- 15) Norrish, K. (1954) : The Swelling of Montmorillonite, *Disc. Faraday Soc.*, 18, 120-134.
- 16) Olejnik, S., Posner, A. M. and Quirk, J. R. (1974) : Swelling of Montmorillonite

- in Polar Liquid, *Clays and Clay Minerals*, 22 , 361-365.
- 17) Onikata, M., Kondo, M. and Yamanaka, S. (1999) : *Clays and Clay Minerals*, 47, 678-681.
- 18) 高橋 聡, 近藤三二, 嘉門雅史(1995) : ベントナイトのコンシステンシー限界, 土のコンシステンシーに関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.103.
- 19) Grim, R. E. (1962) : *Applied Clay Mineralogy*, pp.206. McGraw-Hill, New York.
- 20) Jones, J. B. and Segnit, E. R. (1971) : The Nature of Opal I, Nomenclature and constituent phases, *Journal Geol. Soc. Australia*, 18, 57-68.
- 21) 勝見 武, 小川篤志, 沼田修吾, 深川良一, Benson, C. H., Kolstad, D. C., Jo, H. and Edil, T. B. (2002) : ジオシンセティッククレイライナーの遮水性能に及ぼす1価および2価カチオン混合溶液の影響, ジオシンセティックス論文集, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, 17, pp.49-54.

