



土の物理化學的特性と 土木工學に於ける應用 (1)

島 田 八 郎

要約、土壤の安定等の理論の一としての土壤膠質吸着の理論的考察をなし、岩石より各種型式の土壤の形成される状態を述べ、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 比と風化作用の關係より膠質表面に於ける置換性吸着（イオン電換）容量、吸水膨潤、土壤安定度増進法に於ける化學藥品法の意義及び漂白乳劑處理に於ける豫備處理の意義を論じ、主成分金屬物と土壤鹽基との關係置換（S 値）等との關係を述べたもので、土を取扱ふ技術者に必要な土壤膠質物の主要表面特性（Surface Characteristics）に就き記述したものである。

§ 従來各種の土工に於て、工事の目的に適合する壤土性を改良する場合腐植土（Humus Soil）を除去したり粘土（Clay）に砂質量の大なる砂土（Sand）を混和する如き方法を行ひ適當な水分と輾壓等を利用し目的を達してゐる。然るに全く同

じ粒度分布を有する埴土、砂土と同じ水分を使用するも全く同じ結果の混和物を得られない場合が数多ある。更に卑近な例は粘土のの場合にも同様の事が云へる。即ち同一機械的分析値を有するも其塑性限界、透水率等の異なる事がある。粒度の分布による歯合以外の原因によるものである。殊に路床の安定度を増大する爲め又は防塵等の爲め土面に瀝青乳劑を撒布浸透せしめたり、土塵埃等の内部其他防水層の必要ある場合瀝青乳劑を土層砂層に注入してゐる。瀝青乳劑の外化學藥品例へば CaCl_2 、珪酸ソーダ、 KOH 等が混和される場合がある。又 Leo Casagrande, Lutz Erlenbach 等は或る種の含水量大なる粘土質土壤に電氣を通じ力學的土性の改善を試みてゐる。以上雜然と斷片的に列擧した特種工法をして更に効果を擧げしめる爲めには従來土木工學に行れてゐる土性の研究項目のみでは不充分である。異なる觀點に立つて考察する必要がある。今 Hans F. Winterkorn, K. Endell, U. Hoffmann の論文等此種の研究が土木方面にも近來行れて來た、上述のものを参照し、二三顯著な土の特性を考察する。

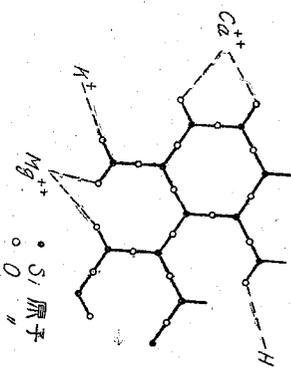
§ 一般に粘土（埴土）とは土壤中の或る極限以下の微粒子の集團に與へられた名稱なる事は説明を要しない、我國にては 0.010 mm (10 μ) に其の極限直径をとつてゐる、外國に於ては更に細かい部分を指すものであるが要するに半径の減少するに伴い、單位體積當りの面積（比面積 Specific Surface）は著く増大するものである。例へば第 1 表の如く半径の減少に伴い有効に作用する總面積に相當する比面積が逆比例的に増大するものである。

第 1 表

半徑	r mm	1	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001
比面積	$4\pi r^2 / 3$	3	30	300	3000	30000	300000

微粒子の 0.001 mm(1 μ) 以下のものを膠質物 (Colloid matter) と稱へられる、勿論膠質物の粒子の限界は人により異なるものであるが、所謂粘土部内には膠質物を含むのでゲルコロイド (Gedrois) は吸着性複合體 (Adsorbierende Bodenkomplex) と呼んでゐる様に粒子の表面にて各種のイオンが物理的に離合する特性を有するものである。即ち吸着性を有する事が其顯著な特性である。粘土部が鹽類等と接觸して生ずる反應は單なる所謂化學反應ではない、主に微粒子の表面に於けるイオンの分布の變化によるものである。一般に吸着とは或る界面に於ける濃度の變化にて定義されるもので此現象は分子に於ける化學的聯結に對する場合と同じ種類の力に起因するもので、其の形式にイオンの (又は有極型 Polartyp) 無極型並に其の中間に屬するものがある、有極型は大體靜電氣的作用によるもので ClNa 溶液中で岩鹽の表面に (+) の Na^+ , (-) の Cl^- イオンが吸着される如き場合で無極型とは木炭に氣體が吸着される如き場合で取扱ひが複雑で、例へば Langmuir, Polanyi 等の理論があるが近來は波動力學等によつてゐる。

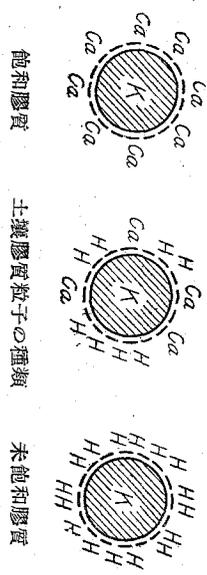
幸に土性工學に於ては吸着現象は主に靜電氣的のものであり、最近 X 線の研究により土壤膠質物は結晶的である事が明かにされて來た、即ち表面には活性原子が排列されてゐる吸着性は表面積の總量と單位面積當りの (+) 又は (-) 電氣量による事が分る。膠質物の表面には置換性陽イオン (Exchangeable Cation) が吸着される。此の量は化學的又は電氣化學的に決定し得るものである。第 1 圖は粘土結晶物體の Si-O 層に Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , K^+ ……のイオンの吸着されてゐる有様を示すものである。



土壤膠質結晶物 Si-O 層に於ける Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , K^+ イオンの吸着を示す 第 1 圖

土壤膠質物は珪酸鹽土複合體、腐植複合體で主に酸性膠質で一般には第1圖の様に明確に圖示する事が出来ない今又別に説明的に圖解し得、即ち内部に陰電氣層があり吸着せるイオンが其の周圍に圍繞してゐると考へる。

第2圖に其の一例を示す K 部は膠質物の本體を示すもので陰イオン帯を外側に有するものである、吸着せるイオンは K 部の餘剰原子(一)と對應し Helmholtz の電氣二重層をなすものである。第2圖は夫々 Ca, Ca と H, H イオンの吸着せる場合を示すもので餘剰原子價の全部が金屬イオンのみを吸着する場合は飽和膠質と稱へ、水素イオンを含むものを未飽和膠質と呼ぶ。



第 2 圖

土壤膠質の表面には種々のイオンが吸着しをり且つ、イオンは他の同性質のものと置換し得るものでイオンに其の難易がある。即ちイオンには和水度の順位を示す離液順位 (Lyotropic ion series) がある、これは $Li > Na > K > NH_4 > Rb > Cs > Mg > Ca > Sr > Ba$ にてイオンの直徑で示すと順位は大體逆であるものである。Jenney の研究によれば Permunitie (人工沸石) にてイオン置換侵入力は $Li < Na < K < Rb < Cs < H$ 、置換浸出力は $Li > Na > K > H$ で水素を除いては粒子半徑の大もの程、侵入容易にて浸出困難である。斯の如く土壤膠質の表面には種々複雑な現象の存在せるもので其の表面の状態を支配する要素は母岩の成分と土壤の形成された氣候状態によるもので特に氣候の影響が著しい、今一例として花崗岩が氣候の異なる地方にて凡化する過程を考察す。

§ 花崗岩は例へば下記の三種の礦物成分より成る。即ち石英、正長石、黑雲母 SiO_2 , $KAlSi_3O_8$, $K_2HAl_3Si_3O_{12}$ -

3MgSiO₄ の如き化學成分を有してゐる。

今熱帯で降水量著しく少く、晝夜の温度差の大なる地方には岩石には膨脹力等の機械的作用を主とする風化作用が加はり、略ぼ大なる粒子より膠質程度の微粒子まで分布して破壊されるが、特に大なる粒子は原岩石と同じ組成を有し土壤全體としても類似のものである。然るに蒸發量が降水量より少く植物の成長に充分の温度の北部の氣候では全く異なる風化過程をとるものである。斯かる時には化學作用が著しく影響を及すものである、幾分酸化された有機物が腐植酸として堆積する事等により水素イオンが生じ岩石鹽物の碎片の表面のアルカリ、アルカリ土イオンと置換される、此等の陽イオンは無機膠質物と共に下方に洗ひ流され滲透するが、有機保護ゾルにて包れ電解質が充分多量に達しなければ凝固沈澱しない。此種土壤の酸性は珪酸鹽を分解し、徐々に溶解するもので斯かる溶液イオン、膠質生成物も下方、沈澱層まで洗ひ流されて来る。

一方腐植酸は Fe, Al~酸化物に對しては保護ゾルの作用を呈するから Fe, Al~酸化物は珪酸の場合より遠くまで移動する。従つて表層(洗出層)沈澱層に於ても SiO₂ の堆積が比較的増大するもので、此種の經過で形式される土壤は、3層より成る、即ち上層 A. (Leached Zone) は腐植を含み充分風化され洗出されし部分で SiO₂ を多く含び、其の下に續く堆積層 B. (Zone of Accumulation) は暗褐色乃至赤褐色を示す粘土部分を含むもので、更に其の下に母岩(O)がある、各層は全く物理的化學的に異なるものである。表層は灰白色であるから、此種の型の土壤を灰土(ロシア語の)ポドゾール(Podsol)と云ふ。

斯かる凡化の形式を Podsolio (ポドゾール化作用、脱澱作用)と云ふ。我國で純粹のポドゾールは北海道の北部等に

るが Podsolic 作用により三層に分れた土壌は可成り存在するので三層型土壌と言ふ、又森林を形成するから森林土壌とも稱す、褐色土 (Brown Earth) も此の一種である氣温稍々高く、土壌反應は中性にて腐植酸少く且つ基層の明かでない場合が多い沈澱層は黄褐色を呈す、我國の武藏野等に此種のものが餘多存在してゐる。

更に風化の一形式としては熱帯濕性地方に於て高温の爲め有機物の酸化速度が増加し、腐植酸の形成堆積が出来ない場合、斯かる高温度、高濕度状態では SiO_2 が溶解し、共存してゐる一價二價の陽イオンと共に流出し Fe , Al の酸化物が堆積するものである。表層は煉瓦赤色又は褐赤色で下層は淡赤色で化學的特徴としては遊酸が流出し腐植を含まず上層は酸化鐵礬土に富むもので此種の凡化作用を Lateritic 作用と呼び土壌を ラテライト (Laterite) と稱す。

上述した三種の代表的凡化過程を考察するに最も分解し易き礦物が先づ氣候風化條件と平衡に達す。逆に風化形成物を分析する事により風化過程を知る事が出来る、勿論微粒子部分即ち粘土、土壤膠質は分解し易く、斯かる特性の判斷に適してゐるものである。

ポドゾール形式の場合…………… SiO_2 の堆積がある

ラテライト形式の場合…………… $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ の堆積がある

等の事實よりして、



を土壤膠質物に就き求める事とする。岩石中の比は 6 内外のものであるが上述の場合には土壌粘土に就き $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 > 2$ のものを Podsolic, < 2 のものを Lateritic と稱す。勿論土壌全體としての場合、膠質物のみの場合とにて比率は異なるもの

で、常に膠質による事が必要である、例へば船引氏に試みられた我國の沖積土壌の分析表をみるも原土と Bradfield 法による膠質物 S, E とにて $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ が異なるものである (第 2 表)。

第 2 表 我國沖積地土壌膠質の化學的組成

土 壤	灼 損 燼 灰	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$
佐賀市 原土	6.85	64.50	8.60	12.61	0.59	1.86	0.27	3.64	1.85	6.56
神野町 S	21.31	43.61	17.42	13.54	0.77	1.40	1.01	0.68	0.37	2.87
表 土 E	17.65	40.19	16.45	24.31	0.52	1.06	0.69	0.36	0.14	2.13
長崎縣 原土	11.85	49.11	23.25	10.21	1.29	0.63	0.32	5.10	0.51	2.80
諫早町 S	15.95	39.47	31.21	9.69	0.80	0.72	0.51	0.60	0.29	1.79
表 土 E	15.65	37.89	34.69	12.41	0.39	0.18	0.12	0.56	0.12	1.50

更に重要な事は此の化學的組成が土壌膠質物の表面的特性 (膠質物理化學的特性) に如何なる影響を持つや考察する必要がある。

§ 電場内に於ける膠質粒子の性状を考察するに珪酸は負の電荷を有し Fe_2O_3 , Al_2O_3 は溶液の状態により (+) 又は (-) 電荷を有する兩性物より成つてゐる。土壌膠質物複合體は SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 より成つてをり一般的に述べると、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 増加すれば負電荷を増し正電荷が減少するが、斯かる自由電荷は長時間其の儘に存在せずイオンを吸着し中和

状態になる第2圖は斯かる一つの構造の説明圖である。上述の吸着されたイオンは分子構造の内のイオンの如く緻密に附着してをらず同じ性質のイオンと容易に置換され得るものである。

斯くの如く土壤膠質は(+)又は(-)イオンに對して、置換容量を持つもので100grの土壤に對して置換容量を多少にS値と呼びmilli當量/100gmで示す、ポドリツク土壤では陰イオンの置換容量の物理化學的特性に對する影響は少いが、ラテライト型の場合には陰イオン置換は重大な影響を持つものである。

§ 土の安定を増加するときには水に對する土壤膠質物の親和力が非常に大なる關係を持つもので、親和力の測定には

第3表 土壤膠質の水に對する親和力

膠質種別	水素飽和膠質					
	ベントナイト	Larkin 粘土	Wabash 粘土	Putnam 粘土	Susquehanna 粘土	Cecil 粘土
SiO ₂ /R ₂ O ₃	5.0	3.8	3.2	3.2	2.3	1.3
鹽基置換 mlc/gm	0.95	0.82	0.78	0.65	0.47	0.13
膠膨潤 cc/gm	2.20	1.18	0.54	0.81	0.57	0.05
吸濕水 %	21	20.1	14	18.1	15.5	6.1
潤熱 cal/gm	(16.0)	15	14	14	12	6
膨潤/潤熱	0.14	0.08	0.07	0.06	0.05	0.01
膨潤/鹽基置換	2.44	1.44	1.20	1.24	1.21	0.41
潤熱/鹽基置換	(16.8)	18.3	17.8	21.2	24.9	46.4

種々の方法がある。例へば

- i) 吸濕水：或る一定の水蒸気壓の状態に於ける吸濕量を求む。
- ii) 吸水膨潤：土壌が自由水面と接觸状態に於てとる水量にて水を吸収して膨脹する現象、即ち膨潤 (Swelling) を測るもので、粘性實驗及び潤熱 (Heat of Wetting) の測定より推定し得、第3表は $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ と鹽基置換性が水に對する親和度を示す潤熱膨潤熱との關係を示すものである。

此表より種々有益な事柄が示されてゐる。例へば膨潤、吸濕等も $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ の増加に伴い増加するが、潤熱又は鹽基置換に對する膨潤の比を見るに $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ により増加する事を示す、換言すれば膨潤度が吸着のエネルギーより急激に

第 4 表 吸着イオン種類の土壤膠質の對水親和力に對する影響

粘土種類	膨潤 cc/gm						
	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$	イオン種類					
		H	Li	Na	K	Ca	Ba
ベントナイト	5	2.22	10.8	11.1	8.6	2.5	2.5
Putnam 粘土	3.2	0.81	0.5	4.0	0.5	0.9	0.9
Walbash 粘土	3.2	0.9	3.1	3.7	0.6	0.8	0.7
Iredell 粘土	1.8	0.2	0.4	0.6	0.02	0.3	0.4
潤熱 cal/gm (Putnam 粘土)		14	12	12	10	15	14

増す、即ち $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ の大の場合の方水が地く、膠質に吸着されてゐる事を示す。

$\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 比は風化過程によるもので土木技術者が容易に變化し得るものではないが、膠質表面に吸着されてゐる陽イオンの種類は變じ得るので實際上斯かる操作を行ふものである。第4表は吸着されてゐるイオンの種類を變ずる時膨潤が如何に著しく變化するものなるかを示してゐる。Na-飽和粘土は Ca, H-飽和のものより著しく吸水膨潤するが、其の膨潤に要するエネルギーは少い。Na~粘土の膨潤速度は小であるから道路の安定を害する影響は減する。

K 粘土は膨潤、吸着エネルギーの點よりするも水に對する親和力は著しく小であるから大抵の場合望しいものであるが、Na 粘土が優れてゐる事がある。此の事實は沸化(Slaking of Soils) 試験によく現れてゐる。露國の土壤學者は Na-粘土が少量エネルギー吸着で著しく膨潤する特性は重要な事である。即ち Na-粘土の膨潤し解絮固(deflocculation)する傾向により乾燥した土塊が水に接する時、土の表面に於て間隙が閉られ、内部へ水の滲透する事が防止されるから土砂道の安定増進には重要な役割をなす、第5表に沸化時間と吸着イオンの一つの關係を示す。

第 5 表 吸着イオンの沸化時間に及ぼす影響

土 質 種 類	沸 化 時 間 (分)									
	H	Na	K	Ca	Mg	Nat	Ba	Al	Fe	
Oecil	122	24	121	24	209	61	65	65	93	
Hagerstown	26	341	35	23	49	32	20	20	15	
Putnam	35	420	24	26	31	36	28	28	26	

遊離 NaCl を洗ひ去つた NaCl 處理路面は分散し易く、容易に侵蝕されるから凝固劑で處理する必要がある、従つて有機物や石灰を充分含み微砂程度に凝固し得る場合には大變有効である。

又道路技術者が注意する塑性指數 (Plastic Index) P. I. に對する吸着イオンの影響を考察するに Ca, Mg, Na イオンは P. I. を増大し K イオンは減少する傾向を持つが H イオンは場合により異なるものである。K, Na イオン或る場合には Mg イオンも土壤を解凝固する傾向を示す。

粘土中の鹽物の差異による見方も全く同一の範疇に入るものである。即ち最近 X 線的研究により土壤膠質は漸次其性狀が明かになつて來た、Ross は最近粘土鹽物質を二屬即ち Kaoline 屬と Montmorillonite 屬に分けてゐる、各層での主成分をなすものは下記の様にとされてゐる。

- 1) Kaolinite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), Anauxite ($Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$)
- 2) Montmorillonite (Mg, CaO) $Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 5H_2O$ ±
- 3) 1, 2 に非らざるもの。

Kaolinite, Anauxite Montmorillonite は陶土、ベントサイトの主成分で粘土中に多量含有してゐるものである。Kaoline 屬のものは通常結晶と同様空間格子の一定せる構造を有するもので、アナウキサイト (Anauxite) は Kaolinite と誤認されたもので粘土、陶土には Kaolinite より廣く存在するものである。Montmorillonite 層は條件に應じ變動する空間格子の層列を有するもので未だ結晶形判然としない粘土の吸収膨潤性は之にする事が多い。第 6 表は其の一特性を示すものである。

第 6 表 土 壤 の 特 性

集 團	カ オ リ ヲ	ベ ン ト ナ イ ト		
結 晶 構 造	Kaolinite	Montmorillonite		
置換陽イオン me/100gm	? 3~15	? 60~100		
種 類	Ca 膠質 (自然)	Na 膠質 (人工)	Ca 膠質 (自然)	Na 膠質 (自然)
液状限界に於ける含水率	60	50	150	50~700

Na 膠質の水に對する吸着性大にて水中に在る場合分解性大なる事は既に述べた、Ca ベントナイトは水中にても崩壊しない、水中にてこの膨潤を減少すれば可塑的流出を防止し得るが常に時間の關係があり、又供試體表面の間隙を塞ぐ場合は又趣を異にするものである。又膠質外部の半固状水膜と自由水の比を以て安定度の標準となし得る場合もある、斯かる時には此の比率の大なる方安定度が大きい。

斯く土壤膠質の特性を研究する事は應用工學上重要なものであるが、詳細は又別の機會に述べる事とし、二三の專柄を簡単に述べる。

不飽和又は水素飽和土壤に中性鹽酸を加へると、H⁺イオンを遊離し金屬イオンと置換される、之現象は土壤の安定度を増進する場合種々利用されてゐる。

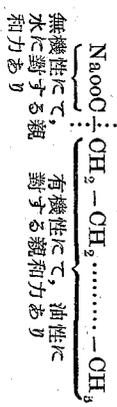
二價、多價イオンは、特に有機物の存在に於て、土壤膠質を堅硬土層の構造に固めるものである、路床の硬化法に利用される特性である。

石鹼脂肪酸等も土壤膠質の表面のイオンと作用しイオン置換等に準じ其の表面の特性を變ず瀝青乳劑にて土壤を硬化する場合、土壤膠質の吸水（水に對する吸着性）性を逆に反水性にする必要がある、第7表は二三の材料の水並にフスマルトに對する親和力を示すものである。

第 7 表 水及びフスマルトに對する親和力表

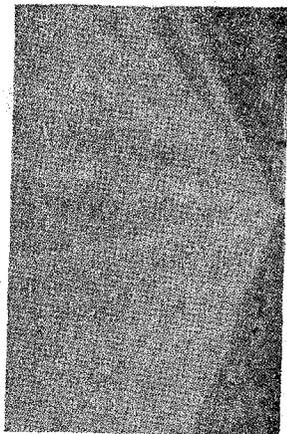
水に對する方も親和力大なるもの	フスマルトに對する親和力大なるもの
石灰、Fe ₂ O ₃ 、Al ₂ O ₃ 、石膏、重晶石、 石灰石（不純）、硅藻土、粘土	（純粹）石灰石塵、水硬石灰 石灰岩 等

粘土類に瀝青乳劑を混じ硬土層を形成するには必ず油性に對する親和力を増加する必要がある。石鹼等は



の如き性質を有してゐるから、金属イオン Na が土壤膠着の H イオンと置換する時に丁度求める條件を満足する様になる。

第3圖は水素飽和土壤膠質膠及び、X 不飽和土壤膠質に於て二價陽イオン X⁺⁺ が水素イオンと置換する時の形式を示すものである、但し [S] は土壤膠質の略號とす。



第 4 圖 土壤變質處理を加へず瀝青乳劑處理を施せし土砂道



第 5 圖 土壤變質處理を加へ瀝青乳劑處理を施せし場合

第 4, 5 圖によるも土壤の膠質物理化學的研究が如何に適切な効果を齎らすかを示す。

以上非常に断片的であるが道路技術者として主要な土壤を取扱ふに際し、心得をく必要なる土壤膠質の特性に就き述べたもので、必要に應じ特性を變化せしむる手段方法に就き若干の原理を擧げたもので、將來此方面の技術の發展を期して止まない。