

## 第II章 土壤の摩擦力

第I章に於て土壤の緊硬限界と相対密度の定義を行つたが、これに依れば自然界に現はれて来る種々の土の性質及び状態を簡略に記述することが出来る。併し乍ら土壤の記述からその性質の物理的本性の認識へと一步踏みこむ爲には吾々は、各土壤が單獨の粒子群から成立ち、且化學的な結合ではなく單に摩擦力に依つてお互に移動を妨げて居るにすぎないといふ事實を振返らねばならない。面摩擦の概念は土壤中の應力の成立に對する假定を造り上げた。従つて摩擦力の研究は當然土質力學の研究に於ける出發點となつたのである。

砂の内部摩擦に就ては、實に不明瞭な觀念が横行して居る。之等の觀念は膠質的に小さい土粒子間の摩擦に對しては全くあてはまらない。その上、膠質塊の性質はその本質を説明するに當つて此の現象の本質と同じ程不明瞭な要素が多いため複雑な説明を與へられて居る。従つて少しも目的に近かず又進歩もしない。それ故に著者は膠質物質の性質を、吾々が顯微鏡的物質中に於て觀測しうる様な力の作用に歸せしめる様努力した。この方法は粗粒子物質の性質がその粒徑を減少するにつれて漸次に膠質物質の性質に移つて行く、即ち粒徑の減少と共に他の性質に變るといふ事情からみれば妥當であらう。

### 第6節 膠質浮泥

#### a). 剛性膠質の性質

剛體を粉狀々態に於て或る液體と共にゆすぶると、粉體は不變のまゝで

あるか(物體は不溶解)又は粒子はその液體中に溶解する。即ち分子はお互に分離し、イオンに分解し、異質混合物は結晶膠質溶液に變化する。この際溶解した物體のイオンは一つの閉ざられた空間中に於けるガス體の分子のやうな作用をする。溶液は次の様な特徴ある性質を有して居る。イオンは正負反對に帶電し液體中を大きな速度で運動する。溶解した物體は一つの膜を通して擴散し、この上に一つの滲透壓を作用させる。溶液の沸騰點及び氷點は純粹な液體とは異つて来る。

理論的には不溶性の物體を機械的な方法でその分子に分解し、適當な液體と攪拌することに依つて眞の溶液に變化させることが出来るのである。實際上はせいぜい、各粒子が尙未だ多數の分子から成立つて居る、といふ程度に分解出来るだけである。此の状態に於ける物體は剛性膠質と呼ばれ、液體と膠狀粉體との混合物は膠質溶液と稱される。多くの場合比較的粗い粉體を一つの液體と共に單に攪拌したゞけでは粒子の分割が進行して行くにすぎない。それで Olschewsky<sup>49)</sup> に依れば細粉化した珪酸を煮沸水と共に攪拌した際膠質狀の細さの粉體に變化したが、剛性土壤膠質の粒子も冷水と接觸させたとき同じ様に細粉化が進行することは否めなかつた。併し乍ら粒子の分子の分解は決して觀測されないし、又、混合物即ちゾルは二つの鋭敏にお互に分れた相から成る異相系である。即ち固體相又は分散相及び液相又は分散媒質である。膠質部分の細さに應じて、高度又は低度の分散性或は膠質度と稱する。

懸濁粒子の細さに對してはその膠質溶液が眞の溶液と或る相似性を示すことが期待される筈である。この相似性は主として懸濁粒子は底に沈澱せずその上劇しい運動、即ちブラウン運動を行ふといふ點に在る。分散相の分子が分割されて居ないといふ事情は膠質溶液と結晶膠質溶液との間の或

る根底的な區別を條件付けて居る。分散相の全粒子は同じ記號の帯電をして居るか溶解鹽の溶液のイオンは正負に負荷されて居る。固體相が電氣的に負荷されることは固體粒子と液體の間の摩擦に歸せられるし、又その正負は二相間の電媒常數に關係するのである。Köehn の法則に依れば二つの材料のうち大きな電媒常數を有するものが正に帯電する。分散媒質が水であるときは、通常

正：水酸化金屬（鹽基性）鹽基性色素、硅酸等

負：金屬、鹽化金屬、多くの土壤礦物質

正反對に帯電したゾルは相互に中和し、同じ符號に帯電したものは中和しない。固體相の存在は分散媒質の水點及び沸點に目立つ程度迄には影響しないし、又膠質溶液は滲透壓を作用することもなく、又一つの膜を通して固體相が擴散することもない。

分散度の減少と共に膠質溶液の特性も亦その程度に従つて減少する。高度の膠質溶液に於ては、粒子は劇しいジツクザツク運動を行ひ、低い膠質度のときは粒子は一定の中間位置にゆらゆらして居り、粒子が $3\sim 6\mu$ より大きいときは靜止の位置に止つて居る。このときは最早一つの膠質溶液としてではなく懸濁質として取扱ふ。これより尙固體相の粒子が大きくなるとこれを懸濁質とは稱しえない。何故ならば粒子は混合物の攪拌の直後底に再び沈澱し簡単な沈澱物を形成するからである。それ故に膠質度、又は懸濁粒子の大きさは分散系を分類する手段となる。そしてこれは Wo. Ostwald 及び P. P. von Weimarn に依つて次の様に分類された。

### 1. 本來の即ち粗い分散質（懸濁質）

粒子  $> 0.1\mu$  (0.0001 耗), 比表面  $< 6\cdot 10^5$

### 2. 膠質溶液 粒子、 $0.1\mu$ と $1\mu$ の間 (0.0001 ~ 0.000001 耗)

比表面、 $6\cdot 10^5$  と  $6\cdot 10^7$  の間

### 3. 分子膠質及びイオン膠質はグレーハムの結晶膠質溶液に對應するものである。

膠質溶液と懸濁質の區別は、懸濁質に於ては固體相は次第に重力の作用に依つて下方に沈むが膠質溶液でこの様なことは起らないといふ事實を基礎として行はれる。粗い機械的懸濁質の下限界はほぼ粒徑  $1\mu$  であり、膠質の外見上均質な溶液の上限界は  $20\mu$  である。又この二つの限界の間にその性質に従つて細懸濁質、又は粗懸濁質と稱する中間形態が存在する。

膠質溶液を濾過すると分散質は分散媒と同じ様に濾紙を透過する。分散質の固體相を分離する爲には中和するか、凝結させねばならない。これは數滴の電解質に依る溶液の轉移に依つて行はれるが、この際浮遊して居る粒子の電氣的負荷は正反對に負荷した電解質のイオンの負荷に依つて中和される。粒子が結合して雪片状になり底に沈むと、ブラウン運動は終了する。ゾルはゲルに轉化する。電解質が有効に働く爲には分散質中の電解質の濃度は或る最少値以上でなければならぬ。500 瓦の水中の 100 瓦のクレイを沈澱させる際その極少値は 2.5% アムモニア又は 0.026% の硫酸、鹽酸等である。この限界値が電解質の化學性に關係するのは電解質の分子的沈澱能力の差に依るのである。負電荷膠質では沈澱能力は陽子の原子價に依り、又正電荷膠質では電子の原子價に依り決定される。

或る可逆性有機質膠質は他の膠質の粒子を包む様に取り囲むことに依つて、電解質で中和されるのを防ぐといふ性質を有して居る(防禦膠質)。金數 (Goldzahl) といふのは 10 糶<sup>2</sup> の金の溶液を 1 糶<sup>2</sup> の溶解鹽に依つて中和するのを丁度防護することが出来る防禦膠質の量を底で示したもので

ある。自然界に於ては吸着性の不飽和な腐蝕土は防禦膠質の役割を演ずる。それは溶液中に水酸化鐵及び硅酸水加物を含出し、それを水に溶解させてカルシウム及びマグネシウム鹽の中和作用を妨害する。この性質はローム及びクレイの物理的性質に非常に影響する。極端な場合には Ramann に依れば、腐蝕土分の多い泥灰土は石灰含有量 70% に及ぶにも拘らず、ミュンヘンの畫室に於て彫刻用粘土として利用されたといふ可塑性を有して居た。<sup>50)</sup>

中和に依つてゾルはゲルに移つて行く。乾燥した状態に於てはゲルは多くは無定形であり、脆い粉状の塊（水酸化鐵、又硫酸等）を成すか又は剛性の多少硬い物質（粘着性土壌の膠質浮泥）を形成する。乾燥せるゲルを再び一つの分散媒と共に攪拌すると、それは再び一つの膠質に（可逆膠質）に変化するか又はゲルのままで（非可逆膠質）ある。可逆膠質としてはゼラチン、膠、ゴム、モリブデン酸、非可逆膠質としては亜鉛鹽、酸化鐵、金、白金、クレイ等である。

#### b). 粘着性土壌の膠質浮泥<sup>51)</sup>

多くの無機質膠質の物理性と粘着性土壌の物理性とはこの様な相似性を有してゐるから粘着性土壌の膠質部分は殆どこの土壌の物理性の保持者と看做される。

既に述べた様に化學では  $1\mu$  を粗い懸濁質の粒子の直径の下限界として居る。  $1\mu \sim 0.02\mu$  の直径の粒子は細かい懸濁質及び粗い膠質溶液となる。土壤學に於ては  $2\mu$  よりも小さい部分全部を“膠質浮泥”と稱する。土の眞の膠質部分の含有量 Ultraton は最も膠着質のクレイに於てさへも決して 3% 以上にはならない。膠質浮泥の粒徑の上限界を  $2\mu$  で決定する慣例は、<sup>52)</sup> 鑛物から人工的に造つた粉體ではこれより小さい粒徑では既に

表-12<sup>52)</sup>

物質	浮泥生物	液性限界	粘着限界	塑性限界	塑性指數	Atter-berg に依る剛	摘要
カオリン	粗沈泥	55	59	なし	0	0.9	僅か硬性
	細沈泥	55	58	≧	0	0.18	
	膠質浮泥	68	53	43	20	2.8	
石英	微細砂	34	不明	なし	0	0	殆ど 0 非常に少 少
	粗沈泥	—	≧	≧	0	0	
	細沈泥	34	40	≧	0	0	
	膠質浮泥	35	36	≧	0	0	
カリ長石	微細砂	37	不明	なし	0	0	少 ≧ 2.6
	粗沈泥	38	≧	≧	0	0	
	細沈泥	38	51	≧	0	0	
	膠質浮泥	39	39	≧	0	2.6	
滑石	微細砂	33	46	なし	0	0	棒はゆるく、硬 性なし
	沈泥	48	68	≧	0	0.2	
	膠質浮泥	76	98	48	28	5.5	
蛇紋石	沈泥	41	51	なし	0	少	8.5
	膠質浮泥	76	70	59	8	8.5	
綠泥石	微細砂	33	39	なし	0	0	非常に少 12
	沈泥	44	54	≧	0	0	
	膠質浮泥	72	83	47	25	12	
カリ雲母 (白雲母)	沈泥	49	77	なし	0	少	} 僅か硬性
	膠質浮泥	91	95	77	14	10	
	粗 ≧ 細 ≧	98 100	123 99	82.2 81	16.2 19	3 19	
マグネシア 雲母 (黒雲母)	沈泥	46	?	なし	0	1.3	} 酸化され 非常に硬い
	膠質浮泥	53	52	45	8	13.0	
	粗浮泥	60	73	44	16	10	
	細浮泥	87	65	44	43	28	
褐鐵鑛	膠質浮泥	36	34	27	9	3	可成り硬い
赤鐵鑛	膠質浮泥	36	25	20	16	9	非常に硬い

粘着性土壌のすべての特性的性質を示し、又それ故に剛性膠質の性質を示すといふ事情から考へて妥當である。Atterberg がこの實驗的な證明を行つて居る。この研究者は種々の礦物を粉末化し、沈澱分析に依つて粗沈泥、細沈泥、粗及び細膠質浮泥に分類し、(圖-1 表-14) そしてこれら沈澱生成物の緊硬限界を決定した(表-7)。この結果は表-12 にまとめた。研究した膠質浮泥から次のことがわかる。

**非 塑 性** : 石英、長石。

**塑性なるも非硬性** : カオリン、滑石、蛇紋石、綠泥石、白雲母、褐鐵礦。

**塑性且非常に硬** : 黒雲母、赤鐵礦。

塑性はそれ故に礦物が鱗片状又は葉状粒子へ分解する際生ずる處のすべての礦物の膠質浮泥に共通な性質である様に思はれる。黒雲母、赤鐵礦の浮泥の高度の硬性から Atterb. は、Terra Rossa、ラテライト、ノルエーのクレイの異常な硬性と塑性は、この種の土が黒雲母、赤鐵礦を多量に含んで居ることに歸せられるといふことを考へた。重いノルエーのクレイは大部分黒雲母花崗岩のノルエーの分布區域から生成したものである。その色は地下水位以下では灰色であり、地下水面以上では酸化のため青色に變化して居る。<sup>55)</sup>

クレイの塑性はクレイ粒子の鱗片形状に歸せられるであらうといふ見解は既に Vogt (1897)、Orton (1901)、Le Chatelier (1909) 及び他の研究者達に依つて主張されて居たが、Atterberg の研究に依つて初めて一つの確實なる根據をえたのである。これは著者が行つた次の實驗で尙一層明

瞭になつた。即ちクレイの透水係数はこれと等價の粒徑を有する砂(硬い粒子)の透水係数の僅か數%にしかならぬといふ事實に依つて廣い確證をえたのである(公式(44)及び(60)参照)。透水係数の關係からすると、クレイ粒子群の空隙は等價粒徑の硬い粒子(圓形)の空隙に比して著しく小さくなければならぬし、又クレイ粒子の大きさが他のものと較べて非常に小さいときのみ可能であるといふ結論になる。これ迄の研究の結果から粘着性土壌をコンクリートと比較することが出来る。即ち砂、微細砂、沈泥が骨材の役割を、膠質浮泥がセメントの役割を爲して居る。骨材の粒子がよく混合して居ればセメントの粘着作用は大きくなる。

クレイ、酸化鐵、又は他の土壌中に現はれて來る礦物質物質は非可逆膠質の類に屬するにも拘らず膠質浮泥が可逆膠質であることは意外なことである。吾々はこの原因を膠質浮泥は眞の膠質溶液の固體相の分散度(粒子 $<0.02\mu$ )とは遙かに異つて居るといふことの中に求めることが出来よう。併し乍らかゝる思想は Anderson 及び Fry<sup>56)</sup> が Ultraton (恐らく粒子は $0.2\mu$ 以下 Atterberg,<sup>57)</sup>に依る) に関して行つた實驗と矛盾する。Ultraton はクレイの 12 疋を 60 疋の蒸溜水と共に廻轉する圓筒中で混合し、粗粒子を 24 時間沈澱させ残留せる濁つた液體を取出し、遠心器にかけて 260~100 疋の量のクレイから抽出されるのである。こうしてえられた乳光を發する眞の膠質溶液から固體相は Pasteur-Chamberlain の濾過法に依つて取出される。それは粘液性の粘着力ある硬い塊である。これを化學分析すると、水酸化鐵、硅酸、水酸化アルミニウム、有機物質、微量のカルシウム、マグネシウム、カリウム及びナトリウムを、交互に含んで居る硅酸アルミニウムの水加物である。超顯微鏡下では、粒子は強いブラウン運動をする黄琥珀色の小滴として現はれる。中和の際利用した電解質を

洗ひ流した後、ゲルを水と攪拌すると再びゾルに變化しうる。乾燥した状態に於てはそれは樹脂様の黄琥珀色の塊を示し、濕潤なる状態に於ては高度の塑性の、非常に硬い粘着性捏粉である。このゲルはそれ故に Atterberg がそれから人工的に生成した膠質浮泥に就て觀測したすべての性質を Ultratron を含有して居ないにも拘らず殆ど又は全く所持して居るのである。Ultratron と砂の混合物に就いて行つた剛性實驗の結果を 表-13 に再び掲げたが、その結果は非常に注目の價値がある。供試體は高さ 2.5 糎、

表-13<sup>58)</sup>

結合材の含有量 (%)	壓縮強度 坩 (壓縮面積 4.92 糎 <sup>2</sup> )			
	結合材の種類			
	カオリン	ポルトランドセメント	cecil.-Ult.	Susquehanna Ultratron.
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
0.50	0.0	0.0	3.13	5.42
1.00	0.0	0.0	7.35	6.70
2.00	—	0.0	13.48	—
5.00	0.0	3.28	61.57	54.81
—	—	19.18	122.57	96.39

直徑 2.5 糎 の圓筒形である。Ultratron 砂の混合物は實驗の前に 18% の水を加へて硬い糊狀物にし、126 氣壓の壓力で成型時に加壓し 100 °C で乾燥した。

クレイの物理的性質と鱗片状を示す礦物から造られた膠質浮泥の性質との間には既に説明した様な一致があるにも拘らず粘着性土壌の物理的性質の本來の保持者に關する見解は未だ非常にまちまちである。Hermann<sup>59)</sup> 其他の人々は多くの礦物性膠質は非可逆性であることを示して居る。併し乍ら Anderson 及び Fry の研究の以上報告した結論は明確に

Ultratron は一つの可逆性の礦物質膠質であることを證明して居る。それ故にかゝる膠質の存在は證明されたと看做さなければならない。Van Bemmelen<sup>60)</sup> は膠質は老衰する。即ち時間の経過につれてその膠質性を失ひ結晶質に變化するといふことを強調して居る。地質的に古いクレイの礦物質膠質はそれ故にクレイ自身よりも若い筈である。扱てこの若い膠質が外部からクレイの内に入りこんで來るといふことは考へられない。これが珪酸粉末と煮沸水との混合物中に於て起る加水分解の途中では常に考へられるけれども、古いクレイの塊中には成層して結晶體になつた本來の土壌膠質が存在しなければならぬ。これは未だ發見されて居ない。それ故に吾々は直ちに、土壌の礦物質膠質は多くの礦物質膠質とは異つて可逆性である程非常に緩慢に變化するといふことを承認しなければならない。それは岩石の風化の際加水分解 (大體流れに依る運搬の際の粉碎に依る力學的方法に依つてはならない) に依つて形成され、粗い岩石片の風化生成物の運搬の際分別され洪水のときに運ばれ、鹽分のある湖又は海邊の河口に於て鹽分の電解作用に依つて中和される。かくしてえられたる沈澱物は高壓力及び高温度の影響の下に於てはその膠質的性質を失ひ粘板岩へと變化する。この二つの要素が働かないときには土壌膠質は多くの地質學的變化が続いてもその膠質性格を保有して居る様に思はれる。

塑性の物理的原因に就ても 重要な意見の相違がある。Aron はそれを球形に、Zschokke、Biedermann、Herzfeld、Atterberg 其他の人々は鱗片形狀に、Bourry は單に粒子の小さいことに歸して居る。Le Chatelier はクレイは塑性緊硬形態に於ては、0.01 糎よりも小さい粒徑を持つた無数の空氣泡を含んで居り、この氣泡がクレイの塑性に對して支配的なのであると主張して居る。Seeger と Schumacher は塑性の原因

を乾燥實質の分子状態に求めた。Ashley は土壌の粗い非膠質的粒子と、粘着性膠質性中間物質の或る一定の段階の含有量では塑性を示すことは許されないと考へた。Rohland は分散媒質中に含まれる可溶鹽への重力を考へた。塑性の本源に就てのこの廣範なる見解の相違は、明らかに一般にゲルの構造に關する見解の間の同じやうに根本的なる差異と密接な相關々係が在る。著者は第 III、IV 章に於て報告する觀測の結果に基いて、粘着性土壌の全物理的性質は三つの要素、即ち水の表面張力、剛性粒子の摩擦力及び鱗片形狀に依つて説明されるといふ結論に到達した。この三つの要素の他に非常に狭い毛細管内の水の粘性の増加が加はる（第16節）。著者は粗い膠質浮泥のみではなく、粘着性土壌から洗滌して除かれた細かい部分もまた適度の塑性を所有して居るといふ事實からこの考へを強くした。細いシルトでは Ultraton の際考へられたやうな特別なゲル構造は問題にならない。

### 第7節 クレイの力學的性質に對する 溶解鹽の影響

多くの鹽溶液中にひたしに剛性物體は一つの層に取圍まれて居る。この層の内部の濃度は層の外部にある溶液の濃度とは異つて居る。剛體の溶液へ作用する形式は、鹽が剛體の表面張力を減少せしめるか高めるかに依つて異なる。鹽が表面張力を減少せしめる場合には剛體の周りの溶液の濃度は増加し（正吸着）、それを高める場合には表面附近に於て溶液は稀薄になる（負吸着）。増加の程度は吸着平衡の法則に依つて決定される。粗い機械的懸濁質に於ては正吸着の際表面附近に於て増加する鹽基は懸濁質中に存在する同體相の量に較べて、比較にならぬ程小さい。これに反して膠質

溶液に於ては吸着鹽の量は表面が非常に擴大する結果非常に大きい。そしてこれは膠質と溶解鹽の間の吸着結合と云はれる。例へばクレイの糊狀物を滿した濾過器に依つて強いアルカリ性反應を呈する水酸化カリウムの溶液を通すと、濾過物は中性になる。即ち鹽基はクレイに吸着されるのであつて、この作用はクレイが鹽基で吸着的に飽和する迄繰返へされる。飽和した後は溶液をクレイの糊狀物を通して鹽基量は減少しない。吾々はこの經過を物理的反應と稱する。物理的反應と化學的反應との間の重要な差異は化學的轉移の強度は溫度と共に増加し、物理反應の強度は減少することである。又化學的平衡は緩慢に達せられるのであるが、吸着平衡はこれに反して急速に達せられるといふ點にある。この差異を認識すれば溶液と膠質との交互作用の際化學的轉移として取扱ふべきか、又は物理的轉移として取扱ふべきかといふ實に困難なる區別が容易になる。多くの場合種々の様式の轉移が起る。Cushman は 10瓦の煙突製造用粘土を鹽基性クロームアムモニウムと鹽化バリウム 1/10 の規定溶液 500cc で處理した。最初の五分間で既に 3 日間で吸着する鹽基量の 100% 又は 80% を吸収した。此の場合に於ては純粹に物理的轉移が主なのである。Peter に依れば土は吸着可能なカリウムの 66% を直ちに吸収したが殘量はこれに反して、2 日後にやつと吸収した。即ち物理反應並びに化學反應が起つたのである。

吸着された物質を吸着媒質から分離することは非常に困難である。これは洗滌したときのみ可能である。併し乍ら恐らく吸着鹽は他の方法で簡単に分離されるであらう。即ち附加された鹽が固體相の表面張力を高度に減少せしめる場合がある。鹽基は酸よりも劇しく吸着される。分解した物質のイオンは獨立物體の様な作用をする。それ故に酸及び鹽基が吸着可能

である鹽は全體として吸着されるのではなく、分離生成物の吸着はお互に獨立に起るのである。

クレイの吸着飽和はその膠質的性質の強度を減少させる。それ故飽和したクレイの物理的性質に対する可溶性鹽の大きな影響は此處に原因があるのである。例へばクレイは石英を吸着飽和した場合石英の作用が無機質の防禦膠質に依つて相殺されぬときはその成型性を失つてしまふ。粘着性土壤は決して單に一種類の礦物から成立つて居るのではないからお互に混合した化學的並びに電氣的特性の等しくない、細かく分たれた礦物質は物理的交互作用を行ひ吸着的に吸収され、貯へられたる物質と共に複合膠質を合成するのである。粘着性土壤の結合材は殆ど全部この様な複合膠質から成立ち吸着飽和の程度及び様式の差異がクレイの物理的特性の變化を條件付けて居るのである。Mellor、Green 及び Baugh<sup>61)</sup> は硬液性のクレイ糊狀物の作用に従つて吸着物質を次の様に分類した。

1. 少量では硬液性塊を薄液性に、大量ではこれに反して濃液性に變化させる物質：ナトリウム及びコバルトの炭化物。
2. 少量で濃液性に、大量ではこれと反對に薄液性に變化させる物質：稀薄アムモニア、硫酸銅等。
3. すべての状態で濃液性にする物質：マグネシウム及びナトリウム鹽類等。
4. あらゆる状態で濃液性にする物質：葡萄糖、腐蝕土酸、鹽化アンモニウム、鹽化カリウム。
5. 緊硬度へ何等作用のない物質：アルコール等。

塑性度は分散媒の性質、並びに吸着された物質の性質に依つて影響される。液相がグリセリン又は他の粘着質の液體から成立つて居るときには固

体相の空隙から水を排除したときでもゲルは塑性になる。吾々がアルコール、エーテル又はテレピン等を液相として選ぶときは正反對になる。土壤ゲルを、水とは異つた種々の液體中に浮遊させるときは液相が固体相に對する大きな親和力に依つて水膜を驅逐しない限りは最初にゲル中に含まれた濕氣的に結合して居る水を爐の中で乾燥して追出さねばならない。

アムモニア、カリ石灰、水酸化ナトリウム、石灰及び氷ガラスはクレイの塑性成分を中和するからクレイの塑性を減少させる。この添加物を更に中和すると本來の塑性度を再び示すことが出来る。腐蝕土物質の作用は既に述べた。個々の場合に就ては“腐蝕土物質”といふ總稱で表はす物質は非常に性質が多様性を示すから未だ明かにされて居ない。

濕氣的な水分は空氣の水蒸氣が吸着するのであるから、濕氣的に結合して居る水分は空氣の湿度及び温度と共にその含有量が變化する。著者は濕氣的な水分をクレイの乾燥重量の5%迄確認した。濕氣として結合した水分は明かに乾燥したクレイの剛性のみに影響する。既に述べた様に Atterberg は乾燥クレイの剛性は物質の湿度飽和の場合には爐乾燥直後より約50%低いことを確認した。

吸着された物質は微量でもクレイの物理的性質へ徹底的に影響するから土質を批判するに當つて土壤の機械的分析だけでは十分でない。従つて機械的分析は粘着性土壤の實際上有效な分類法に對する基準としては適當でない。そして吾々は既に Atterberg 及び Johansson が研究した様に分類する手段として物理的性質を有効に使用する必要がある。機械的分析の結果は單に土壤の物理的記述の一つの補足として役立つにすぎない。何故ならば物理的性質は土壤の機械的組成が殆ど等しい際でも非常に廣い限界内で變化しうるからである。吸着した微量の物質の影響を利用して土壤の

性質を技術上の目的に應ずる様に人為的に變化させることが出来るのである。

### 第8節 沈澱、沈降速度及び沈澱分析

粉體を水と共に攪拌して放置して置くとき水中に浮遊した粒子は次第に底に沈降する。この際水の粘性抵抗が作用する。沈降速度は沈降する粒子の大きさ、形状、重量に関係し平らな形の粒子は同じ重量及び容積の圓形の粒子よりも沈降速度は緩慢である。このことは平らな粒子は常に水平状態で下方に沈むといふ Owens<sup>62)</sup> に依つて観測された事實から説明しうる。鱗片形状の粒子と同じ速度で沈降する同じ比重の球の直径を“等價粒徑”と稱する。沈澱分析の際の沈澱時間から見出した粒徑は常に等價粒徑と考へるべきである。そこで Atterberg は 0.02 から 0.002 耗迄の等價粒徑を有するクレイ粒子は顯微鏡下では 0.05 から 0.005 耗の直径を示すことを確認した。著者はこれより尙大きい差異を見出した。

Stokes<sup>63)</sup> に依れば直径  $d$  厘、比重  $\gamma_1$  の球形の粒子の比重  $\gamma$ 、粘性  $\eta$  の液體中に於ける平均速度は 厘/秒 で次の如くなる。

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma}{\eta} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0.0556 \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma}{\eta} \cdot d^2 \dots \dots (8)$$

$\gamma_1 = 2.85$  (クレイ粒子の平均比重)、 $\gamma = 1.00$ 、 $\eta = 1.165 \times 10^{-5}$  瓦厘/秒<sup>2</sup> とすると (温度  $T = 15^\circ \text{C}$  の際) 公式 (8) は次の如くなる。

$$v = 0.873 \times 10^4 d^2$$

$$d = 0.002 \quad 0.02 \quad 0.2 \text{ 耗}$$

$$v = 0.00035 \quad 0.05 \quad 3.5 \text{ 厘/秒}$$

A. M. Williams<sup>64)</sup> は  $d$  の小さい値ではこの上、吸着的に結合した水膜

の厚さを考慮しなければならぬことを指示して居る。この厚さは木炭粉末では  $18 \times 10^{-6}$  厘になる。それ故に細かい浮泥粒子の沈降速度には相當の影響を與へる。

#### a). 沈澱分析の方法

細粒子土壌の機械的組成を決定する際に用ひられて居る沈澱分析の方法は沈降速度と粒子直径の關係を基礎として居る。土壌が 0.02 耗 よりも小さい粒子 (微細砂) を少しも含んで居ない場合には篩分析に依つて粒子の大きさに従つて分離することが出来る。何故ならば粒子は乾燥した状態に於てはお互に粘着しないからである。併し乍ら土壌が 0.02 耗 より小さい部分を含んで居るときには粒子片は濕氣的に結合した水の表面張力の爲にお互に粘着する。従つてそれを最初に水と一緒に浮遊させ、ばらばらに分離しなければならない。併し乍らこの浮遊に依る分離はせいぜい土を細かに分けた状態で水中に投じたときだけ目的を達することが出来るのである。それ故に粘着性の氣乾状態の土壌を粉末化し、細かい土壌の研究は 0.6 耗 目の篩を通過する粒子に限つて行ふ。土壌の粗い粒子部分の含有量は篩上に残つた残量を洗滌し篩分けすることに依つて決定することが出来る。

沈澱分析の方法は三つの群に分けられる。即ち水を下方から上方へと流し細かい粒子を重力の作用に逆つて上方に押上げる方法 (Nöbel, Schöne 等) 土壌粒子を靜止水中を下方に沈降させる方法 (Kühn, Schlösing, Atterberg 等) 及び下方に沈降する土壌粒子を、スタンドグラス中の水が追上げる方法 (Wiegner) である。

第1群： 代表的例として Schöne の装置に就て述べる。色々の直径の圓筒形の容器中を下方から上方へと、最初は最も狭い容器に入り、次の



で次のそれよりも大きい容器へと達する様に水を流過させる。各容器中には沈降速度が上昇する水流の速度よりも大きい粒徑を持つた土性粒子が沈澱する。併し乍らこの方法やこれに似た洗滌方法では小さい粒子の沈降速度はあまりにも小さすぎるから單に 0.01 耗よりも大きい直徑の粒子のみが分離されそして分類されるだけである。

第2群：完全に分離する迄 50瓦の細かい土を十分煮沸し水と土の混合物を高さ 30 糎、内徑 3.5 糎の圓筒内に入れる。底から 28 糎及び 5 糎の所に記しをつけて置く。強く攪拌してから 10 分たつた後上澄みをサイフォンで取り出す。この際サイフオンの下端は下の記しの高さの所に置く(粒子の沈降路  $28 - 5 = 23$  糎)。次いで新しく水を加へこの操作を、サイフォンで取り出す水が透明になる迄繰返す。この取り出した水は 0.1 耗よりも小さい土壌粒子(微細砂、沈泥浮泥<sup>65)</sup>)を含んで居る。そして、残留物は粗い粒子である(細砂以上)。

Schlösing は磨り潰して 5~10瓦の細かい土を分離し、磨り潰した塊を鹽酸とアムモニアで處理しこれらの混合物を高さ 20 糎の圓筒中に入れて攪拌した後に沈澱物上の液體をサイフォンで取除きこの残留物に就て操作を上澄液が透明になる迄繰返す。この方法で彼は土壌から最も細かい部分(膠質浮泥)を抽出した。この際浮泥の分離の爲に、鹽化カリウムを電解質として利用して居る。

Fadejew-Williams の折衷法に依れば土壌から最初に洗滌方法に依つて細砂及び粗い土壌粒子部分を取除き(第1群)、次いで第2群の沈澱方法に依つて細い粒子に分解する。

Sven Oden<sup>66)</sup> は沈澱分析を行ふに際して自動的に記録する方法を考案した。この原理から考へるとこれは第2群に屬するものである。装置は沈

澱圓筒の底に在る板の上に沈澱する粒子の重量を時間の函數として記録する。

Atterberg<sup>67)</sup> は沈澱分析の際低い廣いガラス圓筒を使用した。沈澱物上に在る液體柱の高さは 10 糎である。沈澱時間と沈澱生成物の記號は表-14 に掲げた。浮泥は鹽酸で中和して居る。

表-4

沈澱生成物の記號	粒子の大きさ 耗	沈澱時間	摘 要
膠質浮泥	細	<0.0006	強いブラウン運動 (上限界 0.005~0.002耗 = 5~2 $\mu$ )
	粗	0.0006~0.002	
沈 泥	細	0.002~0.006	—
	粗	0.006~0.02	
微細砂及び砂	—	>0.02	—

凝結物は二重の濾過器で集めこの濾過器上の餅狀物を取り出して 100 °C 爐中で乾燥し粉末化し 0.6 耗目の篩を通過させる。

多くの土壌は沈澱分析を始める前に 24 時間、又はもつと長く水と共に粒子に分解する迄煮沸しなければならぬ。併し乍らこのとき土壌膠質の特性が煮沸を繼續したために變化する危険がある。煮沸の方法を利用するときは 2 時間毎に上部の液體をサイフォンでくみ出し煮沸を常に新鮮な水で行ふべきである。

煮沸しても石灰質又は腐蝕土質土壌の分解は不完全である。この様なときには土壌を豫め酸や、アルカリで處理することは必要缺くべからざることである。土壌を皿に入れ幾分かの水を加へてつぶすと濃い糊狀物が出來上る。次いでこの混合物を温め乍ら多くの水を加へる。次に液體がわずか

酸性に反応する程度に二三滴の鹽酸を加へて沈澱せしめ蒸留水で濾過器上で洗滌し、次いで弱アルカリ性の濾過器で處理して酸を中和させる。酸は多くの土壌構成粒子を結合させるが同時に腐蝕土成分、炭化物、従つて土壌鹽中に存在する結合性要素を溶解する。

著者は沈澱分析の際、35瓦の土壌試料に就て 12 糎の直徑の沈澱圓筒を用ひる Atterberg の方法を利用した。酸又はアルカリで土壌を豫め處理する必要のない場合には粗い土壌粒子 (>0.6 糎) を粉末化し篩分けした後皿に入れて次第に水を加へて指でつぶしつゝ、薄液狀の糊狀物に變化させる。次いで煮沸した水を入れた容器中に糊狀物を入れ 5 分間強く攪拌する。冷却した後混合物を沈澱圓筒に入れる。サイフォンで取出した浮泥懸濁質を凝結させるには通常 3~4 滴の鹽酸で十分である。浮泥又は細沈泥懸濁質をサイフォンで取り出すには、上澄液體が半分程透明になる迄 10~12 回 行はねばならぬ。粗沈泥の分離の際には 6~8 回 取り出せば十分である。眞の粒子の大きさの決定は沈泥生成物を濾過する前に顯微鏡下で行ひ、この際同時に特性的粒子を着色して置かねばならぬ。經驗に依れば粘着性土壌の細沈泥、粗沈泥を取扱ふと鱗片狀粒子を粉碎するといふことになるからこの物質を乾燥した後に粒子の大きさを顯微鏡で決定すると小さな斷面值を生ずることになる。又、沈澱物上の液體を 10~12 回 サイフォンで取出した後でさへも尙末だ幾分濁つて居るといふ事は沈澱物を攪拌する際、沈泥片の分解に依つて浮泥粒子が新しく形成されて居ることを示して居る。

沈澱生成物の緊硬限界を決定する場合には、沈澱分析を 4 本の圓筒で (土量  $4 \times 35 = 140$  瓦) 同時に行ふ。沈澱分析結果を圖上に表示したものは圖-1 に在る。

第3群 : 附録参照

### b). 沈澱分析の際の土塊の状態を基とした土壌の記號法

土の試料を鹽やアルカリで、上に述べた様な取扱ひをなさずに實驗を行ふ際には粘着性土壌を次の群に區別することが出来る。

群 A : ローム及びクレイ : これらの分析は極めて困難である。煮沸され分割された土壌をガラス棒で攪拌した後鋭く境された表面を持つた特に多孔質の沈澱物として容器の底に沈澱するが、一方沈澱物上に在る液體は透明のまゝである。それ故浮泥は攪拌するにも拘らず沈泥及び微細砂から分離されて居ないのである。沈澱物の空隙率は 6~7 になるがこの様に高い空隙率は雪片構造の際にのみ可能なのである (圖-3 d)。分析を遂行する爲には二三滴の水酸化ナトリウムを加へねばならない。これらの事情があるにも拘らず分析の結果は重要である。著者が研究した所の自然の成層位置にある風化土壌は群 A に屬するが、これは高度の浮泥含有量にも拘らず殆ど膨脹せず、滑出しに對し何等の危険性を有して居ない。この群の土壌は“難沈澱”と記される。

群 B : 分析はナトリウム水を加へずに行はれ且信用しうる結果を與へる。この群には主として、沈澱性 (海洋及び lakstrine) ローム及びクレイが屬して居る。これは強く膨脹しそして多くは滑出しの危険がある。沈澱分析の際の状態から“正常”と記される。

群 C : 分析は圓滑に行はれる。併し乍ら沈澱物から抽出された浮泥を凝結するには 3~4 滴ではなく 8~10 滴の鹽酸が必要である。この群には暗青色及び黒色の沈澱物 (浮泥成層) があり、有機物の含有量が多い (難凝結)。

一つの土壌が如何なる群に屬するかを急速に決定する爲には乾燥され粉

體化した土壌の0.7瓦を1.5糎直径のEprouvette中で水と共にゆすりこみ、そしてえられた懸濁質を同じ方法で群Aの代表的なクレイ0.7瓦で製造したものと比較する。研究すべき試料が群B、Cに属する場合は、沈澱物は比較すべきクレイ（蜂窩構造 圖-3c、雪片構造 圖-3dではない）の容積より本質的に容積が小さくなる。これに反して上澄液は攪拌した後2、3時間では、比較すべきクレイ上の上澄液とは違つて非常に濁つて居る。群B及びCはその色と生成の状況に依つて區別される。

### 第9節 土粒子間の摩擦

沈澱物が沈澱容器の底に沈澱すると、直ちに各土粒子には二つの力が作用する。即ち重力及び相隣れる粒子間の接觸點に働く摩擦力である。沈澱物中に於て観測される現象を説明するに當つて、此の二つの力で十分であるかどうかを決定する爲には先づ第一に摩擦に関するかの有名な法則は單に巨視的な物體に就て行つた観測を基礎として誘導された法則であるといふことに注目しなければならない。此の法則の取扱つて居る物體は多少は凸凹があつても廣い表面でお互に接觸して居る物體である。其れ故に此の法則は非常に複雑な現象を記述して居るのであつて、その一つ一つの現象は未だ認識されて居ないのである。従つて膠質的に微少な粒子間の摩擦にその儘應用することは出来ない。

#### a). 摩擦法則及び潤滑剤の作用

$W$ を摩擦抵抗、 $P$ を摩擦面に垂直方向の全壓力とすれば Coulomb の<sup>69)</sup>法則に依つて、

$$W = fP \dots\dots\dots(9)$$

$f$ は摩擦係數と稱し、摩擦面の廣さ及び滑る速度には無關係である。

Reinnie<sup>70)</sup>(1829及び1861)は此のCoulombの主張の妥當性に疑問を持つた。彼は色々の種類の鐵に就て行つた實驗から摩擦係數は單位面積當りの壓力増加と共に増加するといふ結論を出した。彼は鋼鐵と鑄鐵の間の摩擦實驗を行つたのであるが此の實驗では、面壓力が8.79から47.25 斤/糎に増加したとき單位面積當りの摩擦係數は0.166から0.403に上昇した。又Morin<sup>71)</sup>は1833年にCoulombの第二の主張を否定した。即ち彼は摩擦係數が滑る速度の増加と共に減少することを示した。Coulombは摩擦抵抗を摩擦面の粗さに依つて生ずる純粹に力學的な抵抗に歸して居るのである。此の様な考へ方は今日でも尙多くの物理學の教科書に掲げられて居る。何れにせよ誰も摩擦法則は決して簡單な自然法則の性質を有して居るのではなく、且摩擦抵抗は多くの異質の要素の綜合作用に依つて現はれて來るといふことを疑はなかつた。併し此等の要素の本質に對する認識は極く最近迄非常に不完全なものであつた。

1919年にW. B. Hardy及びT. K. Hardy<sup>72)</sup>は活性及び不活性液體に關する彼の研究結果を發表した。此の研究者は完全に滑らかな化學的に純粹なガラス表面間の摩擦係數は一定であり、ガラスの性質に依つて、0.84から1.1の範圍内であるといふことを決定した。摩擦實驗の際承臺としては磨かれたガラス板を用ひ、滑る物體としては時計皿を利用した。滑る物體の接觸個所には常に接觸面の破損が生じて居る。このことから面壓力が作用した際滑る前に接觸面の熔融が先づ起つて居るといふ結論をしなければならぬ。實驗は密閉した塵埃のない人工的に乾燥した空氣を満たした暗室内で行つた。此の様にして實驗を行はないと、係數は常に本質的に小さく且一定値にはならぬのである。此の現象の原因を研究者達は裝置の承臺の接觸面が材質移動(クリープ)に依つて不純にされることに依ると考

へた。材質移動の経過を詳細に研究する爲に T. K. Hardy は下側の摩擦面（平らな）上の接觸點から數厘離れた所に一滴の醋酸を滴下した。此の滴は鋭利な縁を持つた凸形を成し如何なる變化も起らない。即ちガラス板上に擴がらない。それにも拘らずこの滴を置くとき時計皿と承臺の間の摩擦係数は直ちに 0.92 から 0.47 に低下する。それ故に醋酸はこの滴を中心として、不可視の膜の形でガラス表面に擴がるといふことを承認しなければならぬ。

化學的に純粹な鋼鐵表面間の摩擦係数は  $f=0.72$  である。W. B. Hardy に依れば摩擦係数が“高く且完全に一定値である”ことは表面の純粹さの規準になる。此の際純粹な表面が吸着したガス層に依つて蔽はれて居るかどうかといふ問題は明かに残つて居る。とにかく水銀中で破壊された銅片の新しい破壊面はアマルガム面で覆はれて居るが既に空氣と接觸した純粹な鋼表面ではアマルガム化は起らないことは確かである。それ故に純粹な表面といふものは新鮮な表面とは物理的に等しいとは限らない。

潤滑化された表面間の摩擦の研究から W. B. Hardy は表流に依る潤滑、摩擦面附近に滴下した滴の不可視な初期的膜の形成に依る潤滑及び潤滑剤の蒸氣と表面の接觸に依る潤滑の區別を行つた。一つの膜に依つて表面を潤滑化した際の摩擦係数は單に潤滑剤の化學的性質に關係するのみではなく潤滑化された物體の化學的性質にも關係するのである。パラフィン及びその誘導體に依る潤滑膜に於ては摩擦係數と潤滑剤の分子量とは正比例する。<sup>73)</sup> パラフィン系同族列に依つて一つの固體を膜潤滑化した際に生ずる摩擦係數と同じ系の同族列に依つて潤滑化された他の固體に對する摩擦係數とは單に潤滑剤の分子量とは無關係な常數が異なるだけであ

る。即ち  $f$  を摩擦係數とすると次式が成立つ、

$$f = b - aM$$

こゝに  $b$  は潤滑剤及び潤滑化されたる表面の化學的性質に關係する常數、 $a$  は單に潤滑剤の化學的性質にのみ關係する常數を指す。

二つの異つた固體の潤滑化されたる表面の間の摩擦係數の常數が  $b_1, b_2$  であるときには

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}$$

尙摩擦係數の値は膜の厚さが或る限界値を超えない限りは潤滑剤の量には無關係であることが示される。この限界値は潤滑剤の蒸氣と平衡状態に在る膜の厚さ又は Devaux<sup>74)</sup> の様に分子の單純な層と考へれば密度で與へられる。表面を單に潤滑剤の蒸氣と接觸させることに依つてのみ、潤滑化するならば、高度の飽和度に於ては摩擦係數は空氣1立當りの潤滑剤の互分子の數と逆比例して減少し、又飽和せる蒸氣の際にはその極少値に達する。又、摩擦係數の値は乾燥せる表面並びに膜で被はれた（被覆）表面に對して 15°C から 110°C の溫度では溫度に無關係であることがわかつた。潤滑膜が固體の状態から液體の状態へと移行する瞬間に於ては摩擦係數は 0 になる。<sup>75)</sup>

種々の化學的性質を有する膜の摩擦係數値に對する作用に依つて膜を構成して居る液體は**活性**又は**不活性**と稱される。後者としては水、エーテル、アルコール、醋酸エステル、ベンジン及び中和せる鹽化アムモニウム溶液がある。水は活性液體の膜の作用（摩擦を減少せしめる）及び此れに類する不純化の作用を放棄させるために摩擦係數を高めるといふ注目すべき性質を持つて居る。それ故に水は**反潤滑剤**として作用する。テレピン油

も同じ作用をする。活性液體としては機械に用ひられるすべての潤滑剤が擧げられる。W. B. Hardy は彼の観測の結果から潤滑剤の活性度は分子量と共に増加するといふ結論に達した。表-15 は潤滑化されたガラス表面に對する Hardy が見出した静止摩擦係数を抜萃したものである。摩擦抵抗の原因を Hardy は分離表面の兩側に在る分子の結合に在るとした。この結合は一種の剪斷抵抗(分離層に沿つての)の作用をする。併し乍ら Hardy の意味に於ける剪斷抵抗が存在するときには、吾々は同時に引張抵抗の存在を期待せねばならない。即ち互に接觸して居る物體の分離に對する抵抗を期待せねばならない。併し乍らこの様な抵抗は決して観測されない。Hardy はこの事實を境界線の兩側に在る分子は分極されて居るといふ假定に依つて説明しようとした。この分極化に依るならば抵抗は單に切線方向のみに作用するのである。

表-15<sup>70)</sup>

潤滑剤	ガラスとガラスの摩擦係數		
	潤滑方法		
	膜	潤滑	表流
酢酸	0.62	0.73	0.73 <sup>71)</sup>
硫酸	0.58	—	0.75
トリプロピラミン	0.26	—	0.27
油酸	0.10	0.10	0.17 <sup>72)</sup>
カストール油	0.10	0.10	0.10

事實上ガラス面の滑りの際割れたガラス破片は二重になつて居る。これはたしかであらう。他方、分子の分極は上述の意味に於ては單に豫め起つた水平方向の滑りの結果としてのみ考へられる。水平移動が起る前には分子も分極しない。それにも拘らず分離に對する抵抗は何等決定されない。Hardy の假説はそれ故未だ十分にはこの現象を説明して居ない。

論文集“潤滑に関する討論”<sup>99)</sup>は潤滑剤の粘性(粘性)とその摩擦を遞減せしめる能力の程度(油性)の間の法則的な相互關係の缺如の原因といふ事に主力を置いて居る。多くの礦物質の潤滑油は高度の粘性があるにも拘らず潤滑化された接觸平面が大きな速度でお互に滑るときにのみ十分有効なのである。この場合、即ち接觸面は相當大きな厚さの液體層に依つてお互に分離されて居り且摩擦抵抗は單に液體層の内部に生ずる粘性に依つて作用される液體摩擦から成立つて居る。滑り速度が僅少であり面壓が大きいときはこれに反して分離液層は存在せず、又、液體摩擦の代りに潤滑膜を持つた静止摩擦が生ずる。膜の摩擦遞減の性質は潤滑剤の粘性度には無關係でありお互に滑る物體の膜と表面の間の化學的交互作用に依つて條件づけられるといふことが確認された。この交互作用は明かに Hardy に依つて記述された所の化學的交互作用に條件づけられる液體の活性と相間々係に在る。結局次の結果になる。即ち觀察された潤滑剤の活性度はその不飽和分子の含有量と共に増加する。それ故に摩擦減少といふことは滑る物體と膜の間の物化學的作用の結果に依るのであらう。

以上報告した研究結果は、摩擦抵抗は Coulomb の意味に於ける純粹に力學的な抵抗ではなく、物化學的結合に歸せられねばならぬといふ事實に對する疑問を取除いたわけである。他方、壓力と摩擦抵抗の間の比例性の原因が何處に存在するかといふ疑問が示された。

#### b). 化學的に完全には純粹でない表面間の摩擦

摩擦現象は實際には多少塵埃を含んだ大氣中に於て不純化された面の間で起るから、如何なる程度迄公式(9)の意味に於ける壓力と摩擦の間の比例性が成立しうるかといふことは興味深い。潤滑化された場合及びされない場合の平滑なガラス面及び粗いガラス面の間の摩擦に關して、著者が行

つた実験から次の結果が出て来る。粗い潤滑されたガラス面及びきれいな面に於てもリジン油で潤滑化された平滑なガラス面に於ても摩擦係数は0.02から10.0 疋/糎<sup>2</sup>の面圧力が加へられたとき可成り一定である。この外

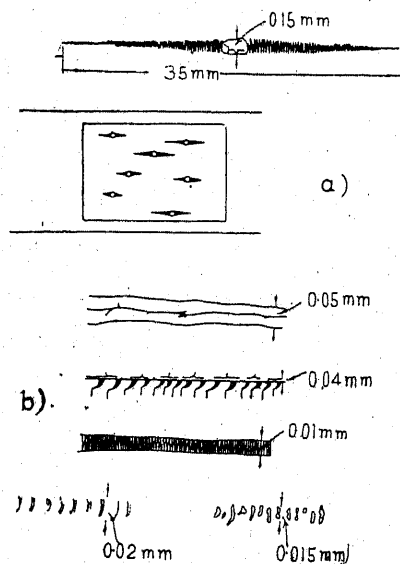


図-5

すべての場合(平滑なガラス表面、乾燥して水、又はテレピンで潤滑したもの)には摩擦係数は異常に変化することが見出された。摩擦係数の上限値は乾燥表面では面圧力の増加と共に著しく増加し、5 疋/糎<sup>2</sup>以上の面圧力に於ては W. B. Hardy に依つて平滑な化学的に純粹なガラス表面の摩擦係数(面圧力には無關係な)に對して見出されたる値(0.86~1.1)に迄達する。滑り面上の滑る状態の種類は面圧力が同じの場合にはその摩擦係数に依つて異なる。

A). 摩擦係数が0.20よりも小さい場合の滑動經過は何等可視的な痕跡を残さない。

B). 摩擦係数が0.20から0.35のときは多くはガラス板上に直線の平行な縁を有し幅略々 $2\mu$ 程の搔跡を確認しうる。

C). 尙摩擦係数が大きいときは殆ど常に W. B. Hardy に依つて観測された様な滑動する板と承臺の間の局所的融解が起る。滑動するガラス板の面は楔形のケバ立つた滑動痕跡を示して居る。それは承臺では鏡像に

なり同じ大きさ性質の滑跡を示す。二つの楔の中點には常に鋭利な縁を持つた卵形の透明な部分がある。これは顯微鏡下で観測すると融解されたガラスと同じである(圖-5a)。この滑り作用は摩擦係数が高い際、水又はテレピンで滑り面を潤滑したる場合に起る。

D). 鋭利な石英砂と滑らかなガラスの間の摩擦係数は小さな面圧力の際は小さい(殆ど0.18~0.20)。そして滑りは何等痕跡を残さない。3 疋/糎<sup>2</sup>以上の面圧力の際は摩擦係数は0.5迄昇り、ガラス表面は圖-5bに示した様な滑りの痕跡を示す。

E). とうごま油で滑り面を潤滑化すると0.1~10 疋/糎<sup>2</sup>の面圧力では摩擦係数は可成り一定である。そして滑りは何等痕跡を残さない。

滑らかな、化学的に完全には純粹でないガラス表面に對する静止の摩擦係数の異常な可變性及び滑り痕跡の多様性は、今の場合滑り抵抗に影響を及ぼす要素が同じ様に大きな多様性を有して居ることからも結論される。既に著者が行つた準備實驗では重ねたガラス板は決して直接々觸はして居ないし、又それ程綿密に純粹にすることも出来ないといふことを示して居る。板を綺麗にした後でも細かい塵埃がガラス表面に固着し、この塵埃が板の接觸を妨げる。干渉色をみると荷重をかける前の板の間の距離は0.001 疋(1 $\mu$ )よりも決して小さくないと斷言しうる。その上、板は綿密に綺麗にしても化学的には純粹でない。それは W. B. Hardy に依れば、特別な準備手段をせず観測を行つた實驗の際には避けられない。塵埃及び膜の不純化(contamination)といふ二つの妨害要素の存在から摩擦係数の可變性を理解しうる。A)の場合には、上のガラス板は下の板の上では滑らず、塵埃の上で滑つて居るのであり、面圧力は不純化されたる膜を通して塵埃を押しつける程迄十分大きいのではない。膜は有効であり、又摩擦係

数は低い。B) の場合では幾分塵埃は膜を通して入りこみ又ガラス面を引掻く。C) の場合は全塵埃が膜を通してガラス中に入りこみ、又ガラス

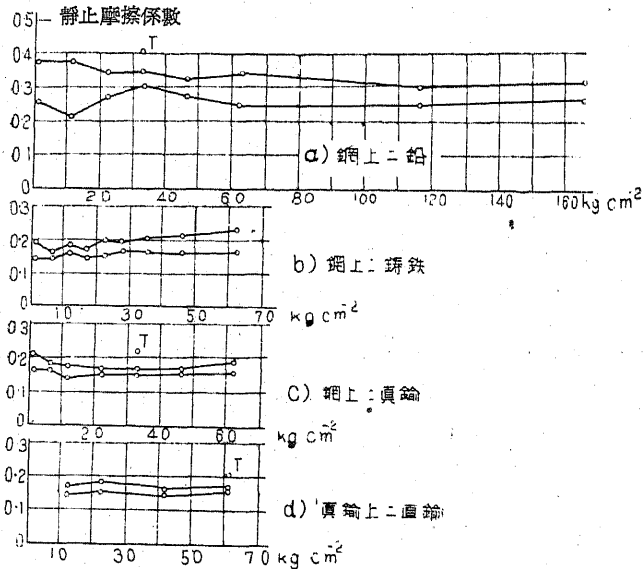


圖-6

表面は局所的には互に直接々觸をする。塵埃粒子の大きさとその位置とに依つて、接觸の緊密さの差異があり、W.B. Hardy に依る化學的に純粹な表面で常に行はれる局所的融解へと導きうるのである。それ故摩擦係数は如何に多くの塵埃が板を分離して居るか、又何處でそれが表面の平滑な波形の非平面性に關聯して存在して居るにかゝつて居る。

粗い表面の間の摩擦に際しては塵埃片は妨害要素とはならない。何故ならば接觸面の凸凹の大きさは塵埃片のそれよりも單位が大きいからである。亦恐らく、接觸面間の大多數の接觸點に於て作用して居る面壓力は比較的

小さいといふ理由から如何なる妨害をも與へない様に見えるから、第二の要素である膜は高い荷重では傷けられないのである。經驗に依れば粗いガラス表面の間の摩擦係数は可成り一定である。

圖-6 には色々の金屬に就ての摩擦實驗の結果を示した<sup>81)</sup>。Rennie とは反對に、0.15~70 匠/輝<sup>2</sup> の面壓力の際の摩擦係数は面壓力には無關係であるといふことを確言しうる。摩擦係数の平均値からの偏倚はせいぜい ±15% である。潤滑化されない研磨仕上面の間の摩擦係数が一定であることからこの係数の値は塵埃片の存在に依つて潤滑化されない平滑なガラス面に於けるよりもはるかに、且高度に影響されないことが是認される。 $f = 0.74$  (W. B. Hardy に依る化學的に純粹な表面の鋼の間の摩擦係数) に比して小さい摩擦係数は不純化に依る潤滑はあらゆる場合が實驗前に綿密に綺麗にするにも拘らず非常に影響が大きいことを暗示して居る。

### c). 潤滑膜の物理的特性

W. B. Hardy は潤滑に關する彼の論文に於て、潤滑劑膜は潤滑化された物體の分子の影響の下で固體及び液體の間である一つの聚合状態に在るといふ見解を公表した。著者は水膜の状態に關する觀測から同じ結論に到達した。<sup>82)</sup> 水滴を受け板の上にのせ 0.15 耗の厚さの覆ひガラスをかぶせる。2~3 時間後に 28 °C の室温で水は蒸發し、多くの灰色のニュートン環で圍まれた水の斑點が残る。顯微鏡下では水の全斑點中に小さな結晶鱗片が認められる。これは平滑なガラス板の間の直接々觸を妨げる所の前述の塵埃なのである。一組の板を數日間太陽にさらすと、風に當てたにも拘らず水斑點は不變のまゝであつたから、著者は水斑點の像の特性的な部分の擴大像を作成し、時々刻々元のものと比較した。觀測は 2~3 年續け

た。それにも拘らず単に些細な外見上週期的な變化が確認されたのみである。水は膜の状態になつて二つの滑り面間に閉ぢこめられその物理的特性である蒸發性を失つて居た。それは分子的に結合して居る。膜の厚さは干渉縞から見積ると  $100 \mu\mu$  になる。この厚さは Quincke<sup>83)</sup> に依ればガラスが銀の位置を通して銀と自由水面の間の接觸角に影響を與へることが出来る距離の2倍である。

又乾燥したクレイの粘着力は分子結合水膜の存在に依つてのみ説明される。氣乾状態のクレイ塊の粒子は單に濕氣的に結合した水の表面張力に依つて凝聚して居るのである(第13節 e)。この水が通常の様蒸發出来るならば、供試體は爐中で  $100^\circ\text{C}$  で乾燥して居る際その固體片は分解してしまふ筈である。何故ならばこの温度では尙未だ化學的結合は起つて居ないからである。膠質は可逆のまゝである。併し乍ら供試體は分解しない。加熱は寧ろその剛性を高め且結局は土粒子の融解を誘致し、その際外見上の凝聚は事實上の凝聚へと移行するのである(第14節参照)。

潤滑化された面に於ける摩擦抵抗は明かに表面をお互に分離して居る膜の剪斷剛性と同一意味がある。剪斷剛性が單に2~3層の分子から成立つて居る膜の部分にのみ限られて居るかどうか、或は亦膜が大きな厚さを有する際剪斷剛性を有して居るかどうかは今日尙決定されない。とにかく接觸面に作用して居る壓力の上昇は常に潤滑劑の横方向への絞り出しを伴ふ。固體表面間の狭い隙間内に於ける潤滑劑の分子は固體の隣接せる分子に依つて部分的に結合されて居るから(非常に狭い毛細管内に於ける水の粘性の増加、第16節 f) 絞り出しが大きな速度で起ることは不可能であり、吾々は低壓から高壓へと急激に移行する際の摩擦係数は長時間の後初めて、上昇せる壓力に對應する値をとるといふことを期待しなければな

らない。表-16はリジン油の中に在る平らなガラス板で行つた摩擦實驗の結果を示して居る。3.2 匁/匁<sup>2</sup>の荷重を加へた後初めの14分で既に摩擦

表-16<sup>84)</sup>

時間(分)	摩擦係数の増大値	摘 要
0	0	摩擦面は(ガラス上にガラス)リジン油で表洗させる。面壓 3.2 匁/匁 <sup>2</sup> 第一欄は壓力を加へたときから摩擦抵抗を測定したとき迄の時間を與へて居る。
14	0.079	
19	0.100	
29	0.139	
54	0.168	
94	0.188	
207	0.188	

係數 0.079 といふ増大値を持つてゐる。滑りに當つて切線力がこの値を超過しない限りは板はお互に粘着し合ひ、この期間に於て既に板は液層に依つてではなく、剪斷剛性を有する半固體性の膜に依つてお互に別れて居ること(Reynoldsの境界條件)の一つの證據である。荷重を加へたのち14分で膜の厚さは尙壓力に對應する程度迄減少して居ない。

#### d). 壓力及び摩擦抵抗間の比例性の物理的原因

これ迄報告した實驗結果に依ると壓力及び摩擦抵抗間の比例性は平滑な滑り面でも、粗い滑り面でも、又有効な潤滑がある場合も、又ない場合でも事實上成立する。そして成立しないのは單に一つの摩擦の型から他の型への轉移の際のみであることがわかつた。摩擦法則からの偏倚は妨害要素(塵埃粒子及び不純化等)に歸せられる。丁度これは化學的に完全には純粹でないガラス表面の間の摩擦の例に現はれるのと同じである。それ故各摩擦の型は一群の現象を形成してをり、各群の現象の間には壓力及び摩擦抵抗間の比例といふ特質が存在するのである。扱て今問題となることはこの



様な周知の比例性が如何なる物理的原因に歸せられるかといふことである。

観測された現象から次の結論が生れて来る。即ち摩擦抵抗はお互に接觸してゐる物體間の物理化學的交互作用に歸せられる。或る程度迄表面間に固體又は半固體性の中間相が形成され、そして摩擦抵抗はこの中間相の剪斷剛性を示してゐるのである。今問題を二つに分けて考へよう。

(A). 接觸面が化學的に純粹である。即ちそれは如何なる潤滑膜に依つても分たれてをらず、中間相は接觸面の兩側に在る分子のお互の引力から成立つてゐる。かゝる結合の剪斷抵抗はお互に接觸してゐる物體の特性が與へられてゐるときには、その分子的相互作用が行はれてゐる面の領域以外の要素に關係することはない。Hertz の公式に依れば二つの固體間の接觸面の大きさはこの面の彎曲率に大いに關係する。そしてその上に、壓力  $p$  と正比例するのではなく、 $p^{\frac{2}{3}}$  に正比例して増加する。扱て分子的交互作用が Hertz の公式に依つて決定された全接觸平面上に於て行はれるとすれば彎曲率とは無關係な壓力及び摩擦の間の關係及びこの二つの大きさの間の簡単な比例性は成立しなくなる。従つて著者はヘルツの公式は唯總接觸面を決定するにすぎず、この内部に於て本質的に小さい島形の實際の接觸箇所が存在すると考へる。實際の接觸面の領域は純接觸面と稱される。

純接觸面の領域を決定する爲には先づ最初に中間相の剪斷抵抗はせいぜい中間相に依つて結合されてゐる物質の剪斷抵抗と同じ大きさに達しうるにすぎないと決定して置かう。扱て前に述べた様に W. B. Hardy は、摩擦係数は化學的に純粹なガラス表面に於て 0.84~1.1、純粹な鋼表面に於て 0.74 になることを見出した。異つた物體の表面間の摩擦係数は 0.5 より

小さな値が生ずるといふことは殆ど考へられない。二つの金屬面間で一つの面を粗にし、他の面に鑢の如く作用する様になると摩擦係数は 0.4~0.6 になる。扱て一つの粗い面が鑢の如く平滑な面に作用するときには全純接觸面上で軟かい物體の剪斷抵抗を超えない間は如何なる滑りも起らない。何故なれば粗い表面の凸起部は平滑な表面を持つた物體に齒の様に喰込むからである。純接觸面の單位面積當りの壓力  $p$  は  $P:F_n$  になる。こゝに  $P$  は全壓力である。  $f$  を摩擦係数とするならば摩擦抵抗は公式 (9) に依れば  $Pf = F_n \sigma_r$  になる。この關係から

$$P = \frac{F_n \sigma_r}{f} \text{ 及び } p = \frac{P}{F_n} = \frac{\sigma_r}{f} \dots\dots\dots(10)$$

扱て前の場合では摩擦係数は 0.4 と 0.6 の間に在り平均 0.5 である。純接觸面の單位面積當りの壓力はそれ故に次の様になる。

$$p = \frac{\sigma_r}{0.5} = 2\sigma_r \dots\dots\dots(11)$$

$2\sigma_r$  は物質の壓縮強度程度の大きさである。平滑な表面に於ては摩擦係数が同じか、又は大きいかであるから、平滑な表面に於ては純接觸面の單位面積當りの壓力は抵抗能力の小さい物質の壓縮強度程度の大きさであると思へてもよい。この假定を用ひて平滑な接觸平面に對する壓力及び摩擦抵抗の間の比例性が説明される。如何に二つの表面が平滑であらうとも分子の作用球の直径に比較すれば、非平面と看做されるべきであり、又壓力が非常に僅かなときは單に三點に於て接觸してゐるにすぎない。壓力を増大すると初めは點狀の接觸場所が擴大して行く。併し乍ら壓力が一つの表面から他の表面へ行くには單に分子から分子へと傳達されるにすぎないし、又この際分離面の兩側に在る分子の作用圏は重なり合つてゐなければならぬ。扱て著者は次の假定をした。この重なり合ひは雜然たる分子の軸の方向性に一つの變化を起させ、且この變化は單に物質の壓縮強度程度

の大きさの圧力の影響の下に於てのみ起りうる。但し圧縮強度を超過することはない。何故ならば面圧力をこれ以上上昇させると材料の“流れ”従つて純接觸平面  $F_n$  の増大を惹起する。それ故全圧力を柔かい方の物質の圧縮強度で割つた値で純接觸平面の面積を見積ることが出来る。それは Hertz の公式に依つて決定される總接觸面積の數分の一になり、面圧力と正比例して増大し、純接觸面積とは異り彎曲率には無關係である。

摩擦抵抗は、吾々の考へでは接觸個所に現はれて來る中間相の剪斷抵抗と同一である。扱て剪斷抵抗は引張抵抗なしには考へられない。それにも拘らず摩擦抵抗は經驗に依れば單に滑りのみならずお互に接觸してゐる物體の浮出りの作用を及ぼす。この矛盾は圖-7 に示した事實から説明しうる。abc は

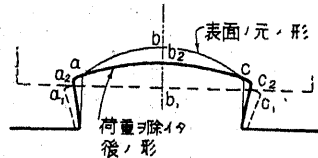


圖-7

物質から成立つてゐる凸起の凸形表面を示す。この凸起にピストンで壓力をかけて押しつけると凸起の表面 abc は平らにされて  $a_1 b_1 c_1$  になる、この際弾性的並びに塑性的變形を受ける、面  $a_1 b_1 c_1$  はピストンと凸起の間の純接觸面を示してゐる。何故ならばこの面の各點に於ける壓力強度は流動限界と等しくなつてゐるからである。分離面の兩側に在る分子はお互に引き合ふからお互に接觸してゐる表面の間の分子結合は切線方向のみならず垂直方向にも働いてゐる。ピストンを上げて面  $a_1 b_1 c_1$  から荷重を取去ると面内部に存在する凸起の分子には二群の力が作用する。即ち分離面上側に在るピストンの分子に依る引張及び凸起の表面の彎曲の一部は再び恢復せんとする ( $a_2 b_2 c_2$ ) 傾向を持つた弾性反撥力とである。接觸面の領域を支配してゐる應力状態は鑄物に現れてゐる殘留應力と比較

しうる。凝聚力がほんの僅かでも附着力より大きいときには弾性反撥力の影響下に在る凸起とピストンの間の接目は荷重を取去つたときに開いてしまふ。そして純接觸面積は全壓力が作用してゐる際の純接觸面積の領域に比較して非常に小さくなる。同じ様なことが簡単な摩擦實驗の際壓縮された物體が接觸してゐる小さい凸起に於ても小規模に起つてゐる筈である。浮上りに對する物體の抵抗を測定しようとするならば先づ最初に面壓力を零にしなければならぬ。荷重を軽減して行く途中では壓力が働いてゐた時には完全にお互に密着してゐた面が突出して來て、純接觸面積はこの際著しく小さくなる。浮上りに對する測定可能な抵抗が存在しないといふことは決して物體が荷重を除去した後にお互に附着してゐるといふ假定に對應してゐるのではなく、單に二つのお互に壓縮されてゐる物體の各點に於て、凝聚力が幾分中間相の引張抵抗よりも大きいといふことを意味してゐるにすぎない。

(B). 接觸平面が潤滑剤膜に依つてお互に分離されてゐる 壓力傳達が一つの物體から他の物體へと膜を通して行はれるから膜は壓縮抵抗を持つて居る筈である。分子的結合膜の剪斷抵抗がその壓縮抵抗の數分の一になるときは壓力及び摩擦抵抗間の簡単な比例關係が兎に角成立しなければならぬし、又これは經驗に依れば事實上起つて居る。扱て摩擦抵抗の壓力に對する比は潤滑化された表面に對しては化學的に純粹な表面に對するよりも本質的に小さい。何故ならば潤滑剤の化學的性質に依つて(その活性度) 0.05~0.3 の間を (0.15~0.25 が最も多い) 移動する。著者はこの事實を潤滑剤の分子は隣接せる固體分子の影響の下に於ては固體の接觸面とその主軸が垂直になるといふ假定に依つて説明した。液體の自由表面を覆ふてゐる膜の分子に對しては N. K. Adams<sup>85)</sup> 及び J. Langmuir<sup>86)</sup>

の研究に依つて、主軸の方向に於けるこの様な合法則性は既に異論ない迄に證明されてゐる。固體の表面を覆ふてゐる膜が造られる場合同じ様な法則性を假定することはこれを基としたのである。これ迄決定された最大の摩擦係数は潤滑化されない化學的に純粹なガラス表面間の摩擦係數である(0.84~1.1)。ガラスの分子はガラスが一つの過冷却した液體であるから方向性もなく配列されてゐる。潤滑劑の摩擦軽減作用はそれ故に接觸面の法線方向と一致する潤滑劑の分子の主軸の方向は最大抵抗の方向をそしてこれに垂直な方向は最小抵抗の方向を示すといふ事情に歸せられる。法則的に造られてゐる結晶に於ては色々の方向に従つて分離抵抗が異つてゐる。

W. B. Hardy は摩擦係數は潤滑劑の量には無關係であることを確認したが著者はこれは摩擦係數が溫度には無關係であることと同じ原因に歸せられると考へる。純接觸面の範圍は物質の壓縮強度に依つて決定されるから、壓縮強度の變化は單に純接觸面の範圍の變化の結果なのであつて、摩擦係數は不變のまゝである。膜の固體状態から液體状態への轉移に際しては膜の内部に於ける分子の配列は飛躍的に變化する。この瞬間迄存在してゐた分子結合は一時分解し、摩擦抵抗は分子の相互の結合に基礎を置いてゐたのであるから、この現象が行はれてゐる間は一時零にならなければならない。このことは W. B. Hardy が實驗的方法で證明した。

壓力の消滅と共に潤滑劑膜に依つてお互に分たれてゐた表面の彈性變形は消滅し、そのため膜に依つて造られてゐたお互に接觸して居た固體間の凝聚力は、潤滑化されない表面の間の結合の際と同じ様に大部分分解されてしまふ。それで潤滑化された表面を持つ二つのお互に接觸してゐる固體の浮上りに對する抵抗の缺如が説明される。併し乍ら二つの物體の内の何

れか、非常に低い面壓力の際でも主として非彈性變形を受ける場合には壓力が減少しても摩擦係數は摩擦法則に従て減少しないといふことが期待される筈である。この考への妥當性を檢定する爲に著者は一つの平滑なる。ガラス面とリジン油をかけたパラフィン立方體の間の摩擦係數を見出した。壓力が増加して行くときは摩擦係數は殆ど一定であり 0.18 である。次いで壓力を 6 疋/疋<sup>2</sup> から 2 疋/疋<sup>2</sup> へと減少し 24 時間後に摩擦係數を測定した。それは普通の値の 2 倍よりも大きい 0.44 になつた。これから又 24 時間後實驗を繰返したら正常の値 0.18 になつた。

潤滑劑を用ひて機械を運轉する場合の經驗に依れば潤滑劑は面壓力が非常に大きいときにはその摩擦軽減の特性を一部分失つてしまふ。この事實は非常に高い面壓力の際には各表面の凸凹は他の面に非常に深く入りこむから滑りは潤滑膜内部に起つてゐる場合もあるが所に依つてはこれに反して齒狀に喰ひこんだ凸凹の剪斷に依つて起るといふ事情に依つて説明される。<sup>87)</sup> 硬い物體の縁を潤滑劑の膜が損はれない様に、平らな潤滑化された表面上を動かすと有効な潤滑に對する摩擦係數がえられる。これに反して平らな表面に縁を押しつけることはその中に入りこみ柔かい物體は傷けられ、摩擦係數に對して本質的に高い値を生ずる。潤滑が有効な状態から無効な状態へ轉移する際には摩擦法則が成立する爲に必要な壓力及び摩擦抵抗間の比例性は成立しない。同じ様に非常に小さい壓力の際には摩擦法則はその適用性を失ふ。何故ならば二つの物體が接觸した際吸着された(即ち分子結合の)膜が相互に分子交互作用を行ふからであり、又この面に加つてゐる壓力が零に等しくなるときに接觸面間に一つの結合状態が成立するからである。<sup>88)</sup> それ故に壓力零の際には摩擦係數は無限大になる。そして壓力が増加すると初めてその正常の値に達する。その上壓力零に於ては二つの物

體間の結合は滑りに對する抵抗のみではなく浮上りに對する一つの微小可測抵抗として現はれる。何故ならばこの場合これ迄の様な中間相の引張抵抗の測定を不可能にしてゐた所の弾性變形は決して起らないからである。壓力零のとき働く摩擦は“零摩擦”又は“始動摩擦”と稱せられる。それは顯微鏡的物體に關する摩擦實驗に於ては非常に小さい爲に觀測者に見失はれるのであるが、顯微鏡的に小さい粒子を持つ粉體に於ては接觸點が非常に多い爲に一つの重要な役割を演ずる(第10節)。圖-8に於ては壓力と摩擦係數の關係を形式的に示した。

高度の面壓力の際生ずる潤滑劑膜の摩擦遞減作用が局所的に失はれても、何等法則的に接觸平面上に分配されてゐない凸凹の存在と結合してゐるから實際に現はれて來る處の、不純化された又は潤滑化された多少凸凹のある面に對する摩擦係數は絶對的な定數なのではなく單に平均値として定數になるのである。平均値からの偏倚は粗いガラス表面及び分極化された金屬表面に關する實驗結果では21.5%になり、凸凹の分配に於ける不規則性の摩擦係數値への影響に對する一つの目安となる。

表面の凸起の他の表面への侵入は一つの殘留變形を示すから急速に起る弾性變形とは反對に多少長い時間を必要とする。このことは潤滑化されない化學的に完全には純粹でない金屬面間の摩擦係數は滑りの速度と共に減少するといふことと一致する。<sup>89)</sup> 滑り速度が大きくなればなる程表面のお互の入りこみの時間が益々少なくなり、又それ故に滑りの代りに剪斷が起る純接觸面の部分が小さくなる。<sup>90)</sup> 金屬に關して行つた摩擦實驗に際して、著者は壓力を加へて40時間後の摩擦抵抗は常に荷重を加へて5分間後に測定せる最大增加值よりも大きいといふことを確信した(圖-6點T)。

壓力及び摩擦抵抗間の比例性の物理的原因及び圖-8に圖式に示した摩擦法則(公式9)からの偏倚に關する見解は粉體塊に於て期待されるべき摩擦現象の批判に對する基礎となる。膠質を含む土壌ローム及びクレイに於ては斷面の單位面積當りの壓力傳達點の數は異常に大きいから接觸個

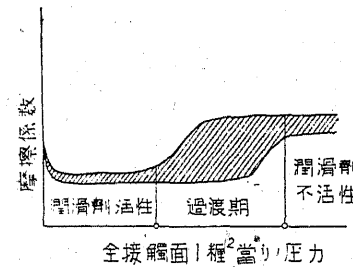


圖-8

所當りの壓力は高度の面壓力の際でも尙非常に小さい。それ故にHardyに依つて顯微鏡的物體に關する實驗から導かれた摩擦抵抗の大きさに及ぼす水の潤滑化の影響に關する結果は、これ以上檢定せずに濕潤なローム及びクレイ中に現はれて來る内部摩擦抵抗を論議するときには利用しえない。何故ならば圖-8に依れば摩擦法則の適用性は一定の壓力區間に限られてゐるからである。併し乍らこの問題に詳しく入つて行く前に粉體塊に於ける摩擦の本質を論じよう。

#### e). 粉體塊中に於ける内部摩擦

これは決して簡単なものではなく複雑な現象なのである。何故ならばかかる塊に於ては連らなつてゐる面に沿つての滑りは粒子の移動性とその齒形の嚙合せの爲に滑らかな面を有する剛體間の摩擦の際の様な現象とはなりえないからである。粉體塊の内部に於ける滑りは構造變化を必要とし、この構造變化は粒子群の捩れ及び傾斜運動を必要とする。抵抗はそれ故に單に粒子の接觸場所に於て作用する面摩擦、即ち摩擦抵抗に依るのみではなく、粒子群の位置變換に對する力學的抵抗、即、構造抵抗に依つても條件づけられる。後者は單に高度に塊の相對密度及び粒子の形狀に依存するのみではなく、又摩擦抵抗の進行中に起る形狀變化の様式にも關係す

るのである。形状変化の様式を基礎として著者は粉體塊中に於ける内部摩擦を二つの形式に區別した。<sup>91)</sup>

(A) 狹義の内部摩擦抵抗。これは塊の空間的形状変化(壓縮及び伸張)の際に生ずる。かゝる形状変化は全塊中に於て、豫め起る處の構造變化から導かれる。構造變化と共に(相互の粒子移動)内部摩擦係数は増加する。それ故に一義的に決定される値を有するのではなく、形状變化の増大と共に初期値  $f_i$  から増大し、經驗上これ以上超すことの出来ない極大値  $f_{II}$  迄増加する。極値は粒子の性質及び塊の相對密度に關係する。

(B) 一つの面に沿つての分離に對する塊の抵抗、即ち滑り抵抗。この抵抗はゆるい粒子塊に於ては形状變化の起る状態が一つの面に沿つての分離を必要としてゐるときにのみ起る。これは例へば擁壁の水に浸された凝集力のない裏込め中に於て起る。圓い粒子を持つたゆるい塊中の滑り面形成は滑り領域の範圍(第22節 a 及び b)に於て組織の弛みを必要とし、滑り抵抗の係數値  $f_s$  に對して、砂では  $f_i < f_s < f_{II}$  となる。

粉體塊に荷重をかけると空隙量は減少する。塊の空隙が水で満たされてゐるときは空隙量の減少は水の絞り出しとなつて現はれる。塊(ローム及びクレイ)の透水係數が非常に小さいときは水の絞り出しは非常に緩慢に起る。外壓は最初に空隙水中に靜水學的過剩壓力(塊の表面と内部の間の勾配差)を起させこの過剩壓力は長時間經過後に初めて零になる(第IV章)。各時間に於て、考へてゐる断面に作用してゐる單位壓力は空隙水中の靜水學的過剩壓力とクレイ-水混合物の固體相中を支配してゐる壓縮應力との和に等しい。摩擦抵抗は單に混合物の固體相中を支配してゐる壓縮應力に依つてのみ決定されるのであるから定常状態(空隙水中の靜水學的過剩壓力が零に等しい)に到達する前に行はれた摩擦實驗は摩擦係數(靜力學的摩

擦係數の眞の値  $f$  を與へるのではなく、これよりも小さな値  $f_a$  (動水學的摩擦係數)を與へることになる。この大きさは空隙水中を支配してゐる過剩壓力に關係する。この過剩壓力の大きさに従つて、即ち摩擦實驗を行ふ時間に依つて任意の物質で任意の面壓力の際  $f_a$  は零から  $f$  迄のすべての値をとりうる。それ故にローム及びクレイに在つては、靜力學的及び動水學的の内部摩擦抵抗の間の及び靜力學的及び動水學的の滑り抵抗の間の區別をしなければならない。水に浸されてゐる砂中に於ては空隙水中の靜水學的過剩壓力は荷重をのせた後ほんの2,3分で零になる。それ故砂に對しては靜力學的及び動水學的の摩擦間の區別は無用である。これに反してローム及びクレイでは動水學的應力の消滅は物質の透水性、壓力及び壓縮されたる物體の大きさに従つて數日から數年を必要とする。この事實は摩擦實驗の計畫に際しても、又基礎工事に於て殆ど透水性のない物體中を支配する摩擦状態の批判に際しても考慮しなければならない。

#### f) 砂中に於ける摩擦

此處では剛體壁と砂の間の滑り抵抗及び内部滑り抵抗のみを取扱ふ。何故なれば内部摩擦の抵抗は間接法に依つてのみ決定しうからである。滑り抵抗係數の決定の習慣的な方法(砂を満した箱を平らな砂塊の表面上を滑らせたときの抵抗)は決して議論の餘地ない結果を與へてゐるのではない。何故ならば箱の運動の際には砂の上を平らに滑つてゐるのではなく砂塊の押しつけを伴ふのである。アメリカ基礎工委員會は滑り抵抗を決定する爲に30糎の直徑を有する圓筒形の裝置でその底に裝置の垂直軸の廻りに廻轉しうる鋼球の上に置いた圓盤<sup>92)</sup>を埋込んだものを利用した。この圓盤は平滑であるか(砂と鋼の間の摩擦係數の決定)又は廻轉に際し砂を持運ぶ様に放射線型に配列した肋材を備へてゐる(滑り抵抗の決定)。裝置

は12糎の高さ迄砂で満たされ、砂の表面は試験機で載荷される。圓盤の廻轉は油壓装置で行はれ、摩擦抵抗は圓盤の廻轉に對する抵抗から計算される。

アメリカ基礎工委員會がこれ迄發表した實驗結果は全部 Ottawa の標準砂(石英砂 粒徑 0.5~0.9 糎)に就て行つたものである。鋼上の砂の摩擦係数を決定する爲に行はれた無数の實驗に依れば砂の極端な含水量(0%及び20%)の際の摩擦係数は中間の含水量(5%、10%及び15%)の場合よりも低いことが見出されてゐる。乾燥した砂に對しては摩擦係数の値は0.13から0.17の間を移動し、5~15%の含水量では0.20及び0.25の間、20%では0.18と0.24の間である。極限値の平均値からの偏倚は鋼上の砂に對しては圖-6から知りうる所の金屬と金屬の間の摩擦係数の平均値からの偏倚と略同じ大きさである。最大摩擦係数が生ずる含水量は濕潤砂が最大凝集力を指示する含水量と大體一致するから、著者は摩擦係数が砂と鋼表面の間に作用してゐる毛細管水の表面張力に依つて影響されると考へてゐる。鋼と乾燥砂及び飽和砂の間の摩擦係数間の重要な相違は表面が化學的に純粹でないといふことを示してゐるのであつて、それ故に水は W. B. Hardy の意味に於ける反潤滑劑として働いてゐるのである。

著者は完全には平滑でない鋼表面(最も細かいサンドペーパーで磨いた鋼帯の表面)と乾燥せる粉體狀の石英の薄い層の間の摩擦係數に對しては簡単な滑り實驗に依つて10回の實驗値 0.348~0.40 を得、又鋼帯上に水を表流した際は10回の實驗値 0.383~0.45 を得た。それ故にアメリカ基礎工委員會の實驗値よりも本質的に大きい値である。面壓力は全實驗に於て2 斤/糎<sup>2</sup>であつた。この實驗結果から摩擦係數は砂及び鋼表面の性質に關係し、水の存在に依つて増加するといふことが認められる。著者の決

定した係數の平均値からの偏倚は金屬間の摩擦係數のそれと同じ程度の大きさであつた。

アメリカ基礎工委員會は亦鋼上の砂の摩擦係數に對する繰返し荷重の影響を研究した。この目的の爲に砂の載荷を5回0から18~21 斤/糎<sup>2</sup>に増加し再び0にした。5回の載荷及び除荷の後、濕潤砂に關して低い面壓力に對して行つた摩擦實驗は荷重を最初に高めた際にえられた値よりも相當高い摩擦係數を與へてゐる。併し乍ら面壓力の増加と共に摩擦係數間の差異は急速に減少するから、14~21 斤/糎<sup>2</sup>の面壓力の際には摩擦係數の値は既に行つた荷重の繰返し數には關係しない。一つの繰返し載荷の際導かれる石英砂及び鋼の間の粘着力は恐らく考へることは出来ないから著者は實驗の結果から次の結論をした。即ちこの場合に於ても亦、粘着力は水の表面張力に依つて造り出される。繰返しの載荷及び除荷に依つて伴はれる砂構造の壓密に際して毛細管水の自由表面の範圍が擴大し、それと共に除荷の際現はれて來る毛細管壓力の大きさが増大する。壓密を惹起した壓力を超過すると摩擦係數は再び正常値をとる。

内部滑り抵抗係數を決定する爲に行つた實驗の結果からアメリカ基礎工委員會は最初の粒子のお互の微小可測移動(incipient motion)に對する砂塊の抵抗と、滑り面に沿つての分離に對する抵抗(actual motion)とは區別しなければならぬといふ結論に達した。最初の微小可測變位の下に於ては、大きさが唯粒徑の數分の一にしか達しない一つの運動を考へなければならぬ。一つのこの様な運動は單に僅かな粒子の廻轉に依つて作用される構造變化を條件づけるにすぎない。併し乍ら砂塊の内部に存在する一つの滑り面に沿つての事實上の滑りは滑り層に於ける組織が一つの弛みを經驗したときに初めて起るのであつて、滑り層の内部に在る粒子は自由に動

く様になるのである。砂の組織が密であるに従ひ又、滑り層が薄くなるに従ひ、粒子の運動に必要な構造變化が、益々根柢的なものになり、又構造變化に對する靜力學的抵抗(構造抵抗)も亦大きくなり、それと共に滑り抵抗も大になる。このことはアメリカ基礎工委員會の滑り實驗の結果からも明かである。廻轉する底盤の放射線狀に配列されたる肋材に依つて行はれた實驗に依ると最初の微小可測な粒子變位に對しては 0.07 (面壓力 1.7 疋/糶<sup>2</sup>) ~ 0.02 (21 疋/糶<sup>2</sup>) の摩擦係數を與へ、事實上の滑りに對しては 0.07 (1.7 疋/糶<sup>2</sup>)、0.14 (3.8 疋/糶<sup>2</sup>)、0.15 (21 疋/糶<sup>2</sup>) となつた。摩擦係數が小さいことから砂中に於ける運動は滑り面に沿つての砂塊の靜止せる部分及び運動してゐる部分の分離に依つて行はれるのではなく Martony de Kőszegs の箱の實驗に於けると同じ様に絞り出しと押付けに依つて生ずることが認められる。滑りを起させる爲に底盤の肋材の間に在る砂を同じ砂で造られてゐる砂-石膏モルタル (1:6) で置きかへた。これに依つて構造變化をばモルタルの表面上直接に存在する砂層だけに制限する様にした。事實上摩擦係數は上に記述した實驗順序で見出したものゝ約 5 倍になつた。この實驗では最初に荷重を加へたとき 0.44 (1.7 疋/糶<sup>2</sup>)、0.37 (3.5 疋/糶<sup>2</sup>)、0.25 (14 疋/糶<sup>2</sup>) となつた。14 疋/糶<sup>2</sup>迄 5 回週期的に荷重を加へた後では 0.7 (1.7 疋/糶<sup>2</sup>)、0.49 (8.5 疋/糶<sup>2</sup>)、0.31 (14 疋/糶<sup>2</sup>) 以上の値を生じた。最初の荷重週期の際に高められたる摩擦係數と 5 回の週期の際生ずるものとの間の差異から明らかに砂の壓密の増加と共に滑り抵抗の増加が認められる。實驗を低い面壓力から高い面壓力へと進めて行くと滑り抵抗の係數は面壓力の増加と共に減少する。この現象は著者の見解では各々の場合に起る滑りは組織の一つの殘留弛みを造り出し、これが次の滑りに對する抵抗を減少するといふ事情に依つて説明されると思ふ。

アメリカ基礎工委員會の1920年に發表した第二の實驗<sup>95)</sup>では同じ様に、低い面壓力に對しては高い面壓力に對するよりも本質的に大きい摩擦係數を與へてゐる。權威者達はこの現象を凝集力(初期剪斷及び凝集効力)に歸した。この考へ方は粗い乾燥した砂の際は何等役に立たず、又、觀察の結果は實驗の進行と共に増加して行く砂組織の弛みに依つてとにかく支障なく説明しうる。この理由から 5 回の砂の載荷及び除荷の後に行つた摩擦實驗では所謂凝集力に對する最初の 5 回の實驗よりも本質的に高い値を與へるのである。高い面壓力の際には、前に行つた滑り實驗に依つて伴はれた組織の弛みの爲、實驗は最初の載荷週期に對しては 0.34~0.46 の摩擦係數を、5 回目のそれに對しては 0.39~0.46 を與へる。

アメリカ基礎工委員會の細心の注意を拂ひ鋭敏な装置で行つた實驗の結果は砂の構造狀態及び其の他の粒子性質には無關係な諸要素の滑り抵抗に及ぼす大きな影響を明確に描寫してゐる。それに依ると壓力と滑り抵抗の間の比例性は、上に述べた滑り抵抗に影響を及ぼし粒子性質には無關係な要素は一義的である、と假定するときのみ云ひうる事がわかる。アメリカ基礎工委員會が滑り抵抗に對して與へた値は單に理論的な興味に應じうるだけである。何故ならばモルタル表面上の砂の滑りは決して滑りの際砂塊の内部に起る此の経過を完全には描寫してゐないからである。

垂直擁壁の移動の際裏込め中に形成される滑り面の位置及び裏込めが最初の滑りの瞬間に擁壁上に作用する土壓から、滑り抵抗係數をどうにか決定することが出来る。この場合に於ては經驗に依れば滑り経過は非常に薄い層に限られてゐる。滑り面の位置は滑り抵抗の係數と同様砂の成層の密度に非常に關係する。そして著者が土壓實驗の結果から計算した滑り抵抗の係數は 0.66~1.4 の範圍内に在る。この實驗は小さな縮尺で(擁壁の高さ

10 糎) 行つた。それ故に與へられた限界は尙未だ決定的なものは看做されない。實驗條件(同じ方法で砂をつめる)を出来るだけ完全に同じ様にして繰返すと金属と金属との摩擦係數に於けると同様に平均値からの偏倚は±15%の大きくなる。滑りが一つの滑り面に沿つて起つた場合には、この面は最小抵抗の面であることがわかる。<sup>96)</sup> 同じ面に沿ふて次々と續いて起る變位に對する滑り抵抗の係數は最初の滑りに對する抵抗の係數よりも本質的に小さい。即ち滑り面の形成に對する抵抗係數よりも小さいのである。

#### g). ロームとクレイの摩擦係數及び水の潤滑作用

ローム及びクレイの摩擦に關する議論も亦、剛體の表面上に於ける二つの物質の摩擦及び滑り抵抗に限定することにする。項c)に於て、粉體化された物質中の内部摩擦の抵抗は二つの要素、即ち摩擦抵抗及び構造抵抗の合成作用に依つて惹起されることが確認された。砂中の内部摩擦抵抗は高度に構造抵抗の大きさに支配されるのであるが、これはローム及びクレイにあつては圓い粒子の含有量が少ければ少い程、眼にみえない鱗片狀粒子の屈曲性の爲に目立つて現はれて來る。滑りは砂に於ける様に粒子の廻轉と動搖に依つてではなく組織の伸長に依つて進行して行くのである。この際鱗片狀の構成粒子はお互に滑る。斷面の單位面積當りの接觸點の數は砂塊の斷面の單位面積當りのそれに比較して非常に大きいから潤滑化された表面に對して摩擦法則の適用性の限界に關して詳論する際には吸着された水の層が摩擦を遞減せしめる様に作用する可能性を考慮に入れねばならない。同じ理由から面壓力が低い際には零摩擦の微小可測な影響に依る摩擦法則からの偏倚を期待しなければならない。

潤滑劑の活性に對する粒子の細さの影響は“<sup>97)</sup>剛體潤滑劑”に關して行

はれた實驗から明かにされる。最も重要な潤滑劑は最も細かく粉碎した黒鉛、滑石、雲母、鉛華、硫黃華である。これは細かく分割された状態に於てロームやクレイの最も細かい構成粒子と同じ様に小さな鱗片や葉狀片から成立つてゐる完全な固體である。この粉體を絹の袋に満たしこの袋でたたくと表面はこの粉體に依つて潤滑化される。絹の隙間から漏れた粉末はたかれた面に附着する。扱て剛體の潤滑劑に液體の潤滑劑を混するときには、經驗に依ればこの液體の潤滑劑は高い面壓力の際にはこれを混じない状態に於けるよりも本質的に摩擦を遞減する様に作用する。潤滑油の摩擦遞減作用を相當高める爲には重量比 0.35% の黒鉛を加へれば充分である。石割機械の製造人はその製品の軸承の潤滑化のために石鹼成分(ハドソン石鹼の抽出分)重碳酸ナトリウム及び水の混合物を利用してゐる。この場合は上述の混合物中に於て反潤滑劑の水が唯一の液體成分を構成してゐるから特に注目に値する。

潤滑劑が働いてゐない總接觸面の單位面積當りの壓力  $p_s$  (圖-8) の値は單に潤滑劑及び潤滑化された表面の化學的特性に關係するばかりではなく、又その粗性の程度にも關係する。潤滑劑膜を貫いてゐる凸起の數が少ければ少い程それは大きくなる様に思はれる。この假定から出發して、著者は剛體潤滑劑の作用を、これが液體(人工的に加へた、又は不純化のとき生じた)潤滑劑の作用領域  $0-p_s$  を接觸面の平面化に依つて擴大するといふ事情に歸した。

扱て次の問題が現はれる：水も亦その中に溶解して居る物質と結合して非常に低い面壓力のとき潤滑劑として作用することが可能であらうか。顯微鏡的物體に關する摩擦實驗の際現はれて來る摩擦係數を高めるといふその特性はかゝる假定とは決して矛盾しない。何故ならばこの特性は單に



水膜は比較的高い面圧力の際は複雑な化学的特性を有する潤滑剤膜を中和するか、又は驅逐するといふことを示してゐるに過ぎないからである。摩擦抵抗に對する水の影響を研究する爲に著者は一群の摩擦實驗を行つた。その結果は表-17 に掲げた。

表-17<sup>98)</sup>

番號	物 質	面圧力 斤/糎 <sup>2</sup>	摩擦係數の範圍、面	
			乾 燥	水 中
1	平滑なガラス上の鋼	1.0	0.198~0.224	0.823~0.468
2	粗い 〃	1.0	0.158~0.171	0.171
3	平滑なガラス上の鉛	10.0	0.143~0.177	0.898~0.475
4	粗い 〃	10.0	0.892~0.668	0.412~0.640
5	鋼上の石英結晶 <sup>99)</sup>	5.0	0.217~0.251	0.262~0.275
6	石英結晶上の 〃	2.0	0.171~0.197	0.355~0.407
7	鋼上の膠質浮泥 <sup>100)</sup>	1.0	0.415~0.482	0.100~0.132
8	平滑なガラス上の 〃	1.0	0.544~0.584	0.182~0.225

乾燥した膠質浮泥の摩擦實驗は(實驗 Nr-7) 塑性の膠質浮泥捏粉を乾燥して作つた小さな角柱の下面を加工して鋼帯の上に置き載荷して行つた。濕潤な膠質浮泥に關する實驗は平らな亜鉛の盤の中で行つた。膠質浮泥は硬塑性状態に於て鋼帯上に3耗の厚さの捏粉層として乗せ木材角柱をかぶせる。木材角柱の三側面は厚い灰色の二重の濾紙層で蔽ひ一側面は糎當り12目の眞鍮の金網をかぶせる。角柱に載荷したときに絞り出された捏粉は取除き盤には水を満たして置く。24時間経過した後、浮泥は濾紙を傳つて荷重に對應する水量を吸ひ込みそして鋼と眞鍮金網の間に約2耗の厚さの一つの層が出来る。扱て摩擦實驗は木材角柱に水平方向に作用してゐる引張力を次第に高めることに依つて行ふ。摩擦係數はこの様な方法で繰返した度毎に決定したが摩擦係數の平均値からの偏倚は約10%であつた。

巨視的物體(實驗1~6)の間の摩擦に對する水の影響と膠質浮泥と剛體表面の間の摩擦に對する水の影響との間の差異は著しい。恐らくこれは水が7~8の場合に於てはクレイ粒子間の緊密な結合を解體することに依つて、間接に潤滑剤として作用するといふ假定以外では殆ど説明されないであらう。何故ならば乾燥した浮泥角柱の構成要素としてのクレイ粒子は不純化に依つて潤滑化された剛體の表面上に鏽の如く作用するのであるが、7~8の場合に於ては水で潤滑化した際、即刻剛體の表面を密着するからである。それ故に砂の内部摩擦に對する水の作用と、クレイ中の水の作用との間の相異も説明される。砂中に於ては水は接觸個所當りの壓力が高いために反潤滑剤として作用し、又これが膜の切斷を助長するのであるがクレイ中に於ては接觸個所當りの壓力が著しく僅少である結果膜は傷はれずに残つてゐるのである。クレイの内部に於ける潤滑作用が吸着された水の層に依るか又は溶解せる物質の吸着された層に依つて行はれるかといふ疑問は當分は未だ答へることは出来ない。

以上の膠質浮泥の採取に使用したクレイと鋼の間の摩擦係數(表-19材料IV)は5糎の厚さの平らな角のある鋼帯(flachkantig gestelltes Stahlband)を試験機のピストンに依つて載荷されてゐるクレイ層から水平方向に引き抜くに必要なる力に依つて決定される(圖-13 c及び d に於ける様な實驗順序)。各實驗はクレイ捏粉に24時間一定壓力をかけた後行つた。毛細管壓力の作用はクレイの自由表面を水で被へば取除かれる。壓力0でクレイの含水量35.6%のときクレイと鋼の間の附着力は0.1斤/糎<sup>2</sup>(1噸/米<sup>2</sup>)になり、摩擦係數はそれ故に∞になる。壓力をますと摩擦係數は最初は急激に増加し次いで緩慢に減少する(0.48斤/糎<sup>2</sup>で $f = 0.333$ )。壓力が1斤/糎<sup>2</sup>以上に上昇すると摩擦係數は一定となり、平均0.15にな

る。鋼帯の最初の微小可測運動は通常、水平引張力が摩擦抵抗の50~70%に上昇した瞬間に始まり全運動量は膨脹値を超える直前で約0.1耗になる。この膨脹値を超える以前の滑り運動 (incipient motion) は、砂に關する摩擦実験の際観測された準備運動と同じ様に滑り面附近に於ける僅かの粒子變位 (組織の伸張) に歸せられる。これが起るといふことは、クレイに於ても亦最初の微小可測粒子變位に對する抵抗は事實上の滑りに對する抵抗よりも本質的に小さいことを證明してゐる。細かい運動は實に、單に變化された應力状態に對して構造が漸次に適合して行くことを示してゐるにすぎないのである。

微小運動は引張力を一定のまゝにして置く際でも進行して行く。その大きさは最初は急激に次いで緩慢に減少し、24時間後には平衡に達する。この時間経過した後では引張力を僅か上昇せしめても微小可測運動は起らない。滑りは膨脹値を超えた後は完全に突發的に起る。摩擦実験を繰返す際、最初の實驗後3時間でクレイ塊の荷重が不變の際は、微小運動は引張力がその極値に近づいたときに初めて現はれ、摩擦抵抗は通常最初の滑り實驗の際測定されたものよりも幾分小さかつた。

ガラスミクレイの間の摩擦係数は既に述べた實驗 (表-17Nr-7) を行ふ際に用ひた實驗順序に依つて決定しうる。零摩擦は數瓦/糎<sup>2</sup>になる。この値は壓力の上昇と共に幾分増加する。それにも拘らず摩擦係数は面壓力が0.5 瓦/糎<sup>2</sup> 以上になるともう殆ど一定であることがわかつた。摩擦係数は材料 I~V (表-19) では 0.18~0.22、砂質クレイでは 0.3~0.32 である。

クレイの内部滑り抵抗を決定するには亞鉛盤の底を厚い灰色の二重の濾紙の層で被ふ。この層の上に細かい目の眞鍮金網を置くから水中に在るクレイ層は完全に二つの濾紙を下に入れた眞鍮網の間に閉されるわけであ

る。この場合にも亦滑りは、或る一定の膨脹値を超えた後に起る。併し乍らこれは剛體表面上をクレイが滑る際の様に決して突發的には起らず緩慢に且非常に硬い液體の運動と略々同じ様に等速度で起るのである。材料 I~V の膠質浮泥に對しては摩擦係数は 0.23~0.28 であり、粘着質のクレイに對しては 0.25~0.40、砂質クレイに對しては 0.40~0.50 である。零摩擦は實驗に依ると 20瓦/糎<sup>2</sup> 程度の大きさである。面壓力が 1瓦/糎<sup>2</sup> より大きいときには摩擦係数はすべての場合一定と看做しうる。

アメリカ基礎工委員會は含水量 10%、25%、39.54%、の Kentucky-Ball クレイの滑り抵抗係数を發表した。實驗は含水量 10%、25% のとき第1回目<sup>100a)</sup>の載荷の際には非常に僅少な凝集力と濕潤度には可成り無關係な摩擦係数 0.25~0.27 がえられた。0 から 21瓦/糎<sup>2</sup> 迄5回週期的に載荷した後は凝集力は相當に増加した。後者はこの場合含水量 10%、面壓力 0.07 瓦/糎<sup>2</sup> で、1.9~2.6 瓦/糎<sup>2</sup> になつた。それは面壓力の増加と共に當初は急激に次いで緩慢に増加し、面壓力約 1 瓦/糎<sup>2</sup> に於てその最大値 2.4~2.8 瓦/糎<sup>2</sup> に達した。含水量 25% のクレイの凝集力に對しては豫め行つた 5 回の週期的載荷後の實驗値は 2.4~3.0、場合に依つては 3.4~3.7 瓦/糎<sup>2</sup> になつた。含水量 39.45% のクレイの凝集力は殆ど 0.2瓦/糎<sup>2</sup> にも達せず、又滑り抵抗係数は 0.01 程度の大きさであつた。

實驗は既に述べたアメリカ基礎工委員會の砂の實驗の際用ひた圓筒装置で行つた。この際クレイは廻轉する底の差込み板の肋材に依つて運ばれる。實驗報告は何等觀察された現象の物理的性質に關する議論を掲げてゐない。著者の行つた壓力とクレイの含水量間の關係に就ての研究結果から、次のアメリカの實驗と同じ様な結論に達した。

含水量 39.84% のクレイは表-7 の記號法に依れば、柔い又は非常に柔

かい塑性として記述される筈であり、その含水量は圖-14に依れば數疋/糶<sup>2</sup>の壓力の影響の下に於ては、即ち壓力を 2,3日間作用させ（定常状態への誘導）且濾過層を準備して水を除去することが出来る様にして置くに25%~30%に減少する。實驗を行ふ際には勿論この様な作用を中斷させるか、さもなくば含水量の減少を測定し、重要な附隨現象として報告に記述して置くべきである。従つて實驗途中には空隙水中に静水學的過剩壓力が支配し、且摩擦實驗は静力學的ではなく、動水學的內部滑動抵抗の係数を與へて居る。實驗を行つた際の誘導事狀が明かにされて居ないからこの實驗結果からは動水學的抵抗は事實上静力學的抵抗のほんの一部分にすぎぬといふ以外に何等の結論も導かれない。

・濕潤度10%のクレイと記述した塊は勿論乾燥粉體のクレイに10%の水を混合して造つたものである。何故ならば水で空氣を含まない迄に加工しその含水量を蒸發に依つて、10%に低下させた捏粉クレイは“完全剛性”（表-7）と記されねばならぬ程のものであり、且剪斷抵抗（凝集力）は少くとも 30疋/糶<sup>2</sup>になるからである。それ故に實驗は均質なクレイ塊に就てではなく濕潤なクレイ粉末に就て行つたのである。5回の週期的載荷に依つて粒子は粉碎され、塊は細かく分割され毛細管水の自由表面の領域は數倍になる。この際 第14節に依れば毛細管水の表面張力に歸せられる處の“外見上の凝集力”も亦數倍になる。併し乍らこの様にして生成された塊の凝集力は毛細管水の蒸發に依つて柔塑性状態から完全に剛性な状態へと移行したクレイ體の凝集力と取違へてはいけぬ。何故ならば濕潤なクレイ粉末の壓密は外壓に依つて導かれたものであり、水の表面張力はこの際正の状態に在るからである。クレイの空隙量を含水量10%の氣乾状態のクレイ立方體の空隙量に迄減少する爲には外壓を少くとも 100疋/糶<sup>2</sup>以

上に高めなければならぬ。他方アメリカの研究者達に依つて測定された凝集力は著者が内部滑動抵抗を決定する爲の實驗の際決定した零摩擦と取違へてはならない。何故ならば前者は單に毛細管水の表面張力の結果であり、零摩擦は水の表面張力とは無關係な現象を示してゐるからである。

アメリカ基礎工委員會が濕潤なクレイ粉末に就て高い面壓力に對して行つた摩擦實驗は著者が空氣を含まぬ水中に在るクレイに就て行つた實驗と、同じ程度の大きさの摩擦係数を與へるといふ事實は重要である。著者は青色の粘着質クレイ IV の内部滑り抵抗に對して 0.25~0.26 の値を見出し、又膠質浮泥 IV のそれに對しては 0.24~0.28 の値を見出した。濕潤なクレイ粉末（10%の含水量）の係数は 0.23~0.27 になる。それ故に内部の静力學的滑り抵抗に對して濕潤なるクレイの空隙が空氣を含んでゐるか否かは可成り些細のことである様に思はれる。

表-18<sup>101)</sup>

材 料	静 止 摩 擦 係 數		静力學的滑り 抵抗係數 <sup>102)</sup>
	鋼上のクレイ	ガラス上のクレイ	
膠 質 浮 泥	0.11~0.13	0.18~0.22	0.23~0.28
粘 着 質 粘 土	0.14~0.17	0.23~0.30	0.25~0.40
砂分の多いクレイ	0.17~0.20	0.30~0.32	0.40~0.50

これ迄提出した實驗結果は少くともクレイ及びローム（表-18）の摩擦係數の大きさの程度に對する概念を與へてゐる。ガラス上の膠質浮泥分の多い物質の摩擦係數と内部滑り抵抗係數の間の差異が僅少なことから、最初に述べた粘着質のクレイ中に於ける構造抵抗の僅少なことを推論しうる。砂の含水量が増加すると構造抵抗が増加する結果兩係數間の差異が大きくな

る。滑り抵抗係数の決定は毛細管力を除去する爲に水中で行はねばならず、又クレイの含水量が壓力に對應する量迄減少したときに行はねばならない。そうでないと靜力學的抵抗の代りに動水學的抵抗を測定する危険がある。

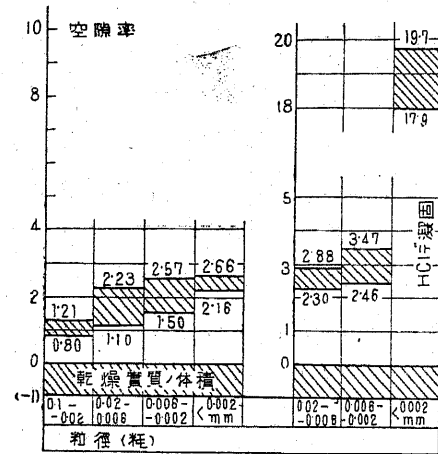
如何なる方法がクレイの滑り抵抗を決定する爲に最もよく適當してゐるかといふ問題は當分未解決の儘尙殘されてゐる。アメリカ基礎工委員會の伸張現象が問題であることは疑ひのないことであり、著者の方法では屢々滑りがクレイ層の内部に於てはなく兩廻轉金網の一つに於て起ることがある。とにかく均質なクレイ塊中に於て一定の滑り面に沿つて滑りが起るといふことは決して證明されてゐるのではない。地中の學問の中で滑り面と記述されて居る面は單に亂された部分と自然のまゝの部分の分離層を示して居るにすぎない。それはその生成から言へば(第22節e))第二次的形成と看做されるべきであり、又その存在はクレイ塊の自然のまゝの部分に硬塑性、又は半剛性の緊硬形態に在ることを假定してゐる。もしクレイ塊は滑りの後直ちに塑性状態に在るとすれば再び結合されてしまふであらうし、又その存在を確認することは出来ないであらう。著者はこれ迄の経験を基礎として、自然界に於ける均質な塑性的なクレイ中に於ける形状變化は滑り面の形成なしに行はれるといふことを假定し、この係数の値とガラス上のクレイの摩擦係数の値との比較に依つて構造抵抗の相對的意義に關する解決を獲得するといふ目的の爲にのみ靜力學的內部滑り抵抗係数を決定したのである。係數  $f_r$  はそれ故に粘着性土壤に對しては單に一つの理論的な意義を有するに過ぎないのである。内部摩擦の抵抗係数の實際上重要な限界値  $f_0$  及び  $f_{r1}$  は唯間接の方法に依つてのみ見出される(表-33)。

## 第10節 細粒の目の詰つて居ない沈澱物の蜂窩構造の原因としての零摩擦

一つの液體中に浮遊してゐる各粒子は吸着した液體層に取巻れてゐる。被ひガラスとプレパラートの間に密閉された分子結合水膜の(頁49)厚さを、著者は  $100\mu\mu$  と見積つた。A. M. Williams<sup>103)</sup> は吸着的に結合した木炭粒子の水の被覆層の厚さに對しては  $18 \cdot 10^{-6}$  糎 =  $180\mu\mu$  といふ値を見出した。Zschokke<sup>104)</sup> はクレイ粒子の水の被覆層は砂の粒子及び非塑性粉末のそれよりも厚いと主張してゐる。扱て水に依つて全周面取圍まれた二つの物體の表面をお互に近づけると吸着された層はお互に分子的交互作用を起し、物體は互に粘着する。接觸領域に於て作用してゐる牽引力は零摩擦又は始動摩擦と稱される。巨視的物體に關する摩擦實驗ではこの力の強度が僅少である結果零摩擦の存在は確定されない。併し乍ら著者は次の實驗に依つてその存在を確信することが出来る。粉體化されたクレイの少量を水に浮遊させ非常に薄い懸濁質の部分に膠でつけた硬いゴム輪(2糎高さの)を持つた被ひガラスで出来てゐる小さな圓形の皿に満たす。満たして5分後皿を被ひガラスで被ひ、空氣の痕跡も容器に留らぬ様にして、全體を廻轉する。72時間後に廻轉をもう一度行ひ尙12時間たつた後に容器の上側及び下側を顯微鏡で觀測する。 $2 \sim 3\mu$  より小さい直徑の浮泥部分は上側に、沈泥粒子は容器の下側に附着する。浮泥粒子はブラウン運動を示さない。それ故にこれは明かに分子的牽引力に依つてその位置に固着されてゐるのである。沈泥粒子の二三の特徴ある群に記號をつけて皿を廻轉させ、12時間後にこの記號をつけたものと元のものとを比較

するとその沈泥粒子も被ひガラスから剝脱されてゐない。粒子の重さはガラスと沈泥の間の接觸場所に發生した中間相の引張應力が受持つてゐる。この結果、零摩擦は凝集力と同様に面の切線方向ばかりではなく法線方向に於ても作用してゐることを證明してゐる。

零摩擦の活性は弛い沈澱粉體の構造形態中に最も著しく現はれる。圖-9には粉末化した石英の沈澱生成物及び黄色の海粘土 III (表-19) に関して行つた沈澱實驗の結果を圖上に示した。同じ大きさの球から成立つてゐる



a) 砂 b) 黄色海粘土

圖-9

最も弛い球堆積の空隙率は0.92になる(空隙量47.6%)。弛く沈澱した石英沈澱物の空隙率は容器を揺り動かすことに依つて殆どこの様な球堆積の空隙率に迄遞減しうる。併しこのことは細かい石英の沈澱物では最早起らない。又、揺りこまれた状態に於て蜂窩構造(圖-8c)を指示してゐなければ沈澱物を空隙率から批判することは出来ない。揺り込み

に依つて壓密された石英浮泥の構造は揺りこまれなかつた粗い沈泥よりも密であつた。クレーの沈澱生成物の空隙率は實驗結果に依ると同じ等價粒徑の石英の沈澱生成物よりも本質的に大きな値をとる。この相違はクレー粒子の鱗片形状に歸せられる。クレー粒子は鱗片形状である爲にクレーの沈澱生成物の空隙率に對する揺り込みの作用も亦石英の沈澱生成物

に對するよりも僅少である。

空隙率に對する粒子の大きさの影響を明かにする爲に著者は接觸點當りの零摩擦は粒子の大きさには無關係な一定な値を有して居るといふ假定から出發した。粒子が下方への沈澱して行く際既に靜止して居る粒子に當ると直ちに零摩擦が力を生ずる。粒子が約0.1耗より大きいときは動揺する力は零摩擦に打ち勝ちそして粒子は沈澱物の表面から次の深みへところがり落ちる。小さな粒子では零摩擦の方が大きいから粒子は沈澱物の表面と接觸したときに位置して居る場合に固着してしまふ。同じことが續いて来る粒子に對して起る。沈澱物の表面の凹みはこの様にして被はれて行き粒子より大きい空隙が形成される。併し乍らこれは蜂窩構造の特徴である(圖-8 e)。

鱗片形浮泥粒子は電解質に依つて中和させると初めて底へ沈澱する。圖-9は凝結したクレー浮泥の空隙率は凝結しない石英浮泥よりも5倍も大きいことを示して居る。中和の原因は電解質のイオンに依る懸濁粒子の電氣的負荷の中和にある。帯電は懸濁粒子と液相の間の摩擦に原因して居る。一滴の膠質浮泥懸濁質を顯微鏡の下で觀察すると、粒子はおのゝく様にあつちこつち運動し、且この際衝突することはない。それは明かに膠質化に際して電氣的負荷の分離作用に依つて妨げられるのである。電解質を加へて電氣的負荷を中和しても著者の見解に依ればブラウン運動は尙繼續する。何故ならば物理的根元は除去されて居ないからである。衝突する力は最早作用しない。粒子は最早お互にガスの分子の如く衝突することはない。そして二つの粒子が衝突すると直ちに零摩擦が作用し、粒子はお互に粘着して雪片状になる。雪片が他の多くの粒子との結合に依つて大きくなると底に沈降する。各雪片に於て、それは簡単な沈澱に依つて造られ

た沈澱物の空隙率 $\epsilon$ を指示して居ると假定することが出来る。何故ならばその発生は一つの機械的觀點に於て相似な経過に基いて居るからである。沈降した雪片は既に形成されて居る沈澱物の表面へ附着する際零摩擦に依つて非常に小さい單粒子の様にその位置に固着される。そして、この方法で二次配列の蜂窩構造と、空隙率 $\frac{\epsilon}{\frac{1}{2}} = \epsilon^2$ を持つた沈澱物が出来るのである。この考へ方の妥當性は觀測結果に依つて裏付けられて居る。豫め凝結せずに沈澱するときは浮泥の空隙率は $\epsilon = 4 \sim 4.5$ になる。凝結した沈澱物はそれ故に $\epsilon^2 = 16 \sim 20$ の空隙率を示す筈である。實驗に依ると19.7になつた。強い揺りこみを繰返しても空隙率は單に17.9に低下するのみである。即ち雪片構造は揺り込みに依つて密な蜂窩構造へ移行することはない。

實驗の際沈澱生成物を沈澱させるに(圖-9) 1.6 糎の直徑の試験管に於て、豫め水で土の試料を揺り込んで置いた。廣い容器中に於て、緩慢に沈澱が行はれる際には勿論空隙率は本質的に小さい。何故ならば、空隙率は壁摩擦に依つても沈澱速度に依つても影響されるからである。實驗(圖-9)は單に沈澱原理の解釋に役立つのみである。