

入門「粘度と粘性」

鈴木利郎

- 1.はじめに 2.原理 3. 各種粘性とニュートンの式との関連
4.粘度計の種類 5. 粘度の単位と換算表 6.動粘度について
7.国連危険物の容器等級と粘度 8. おわりに

1.はじめに

粘性は軟らかい、しゃぶしゃぶしている、粘っこいなど生活に身近な物性である。ところが、そのような商品を購入しても、粘性に関する情報は少ない。精々、ペースト状とか表示されているだけである。生活に身近なわりには分かりにくい物理量なのである。

また、SDSを作成の際の参考にと、4項には換算表を加え、動粘度の意味合いについては6項で記載した。

本稿により粘度、粘性への理解の端緒になれば幸いである。

2.原理

粘度粘性について、特に高粘度の物質に関してはレオロジーからのアプローチがベターであろうが、レオロジーは数式の塊で極めて理解しにくい。

実際、液体～ペースト状の物質に関しては、ニュートンの式から十分説明できるのである。また、ほとんどの流動性のある製品はレオメーターでなく回転粘度計で品質管理されている。

2.1. ニュートンの式

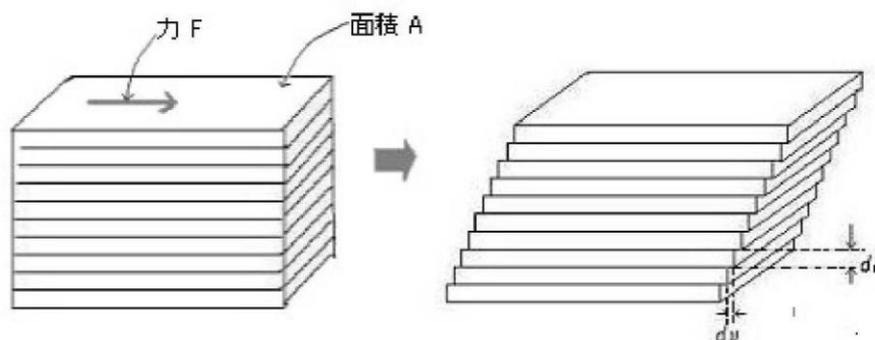


図1

図2

図1 のように直方体の厚み h の試料を仮定し、下部を固定、上を右方向にずらして行く力を加えると図2 のようになる。試料は下の方は僅か(速度が小さい)、上の方は大幅に右に流れる(速度が大きい)。流れは層流を前提とする(この後の記述に関しても層流が前提である)。

微少部分 dv/dh を考える、即ち微少の厚みの変化に対する微少の速度変化で、これがずり速度である。これはどこでも一定で、 $dv/dh=v/h$ になる。

力を面積で割ったのが F/A がずり応力で、下記の式が成り立つ。

$$F/A(\text{ずり応力}) = \eta \cdot v/h(\text{ずり速度}) \dots\dots(1)$$

η が粘性係数(粘度)で、これがニュートンの式である。

モデル図は現実離れしているように見えるかも知れないが、塗料を刷毛でこすり広げる状態、図3のようなパイプの中を液体が流れる状態を考えればあながち観念的とは言えない。

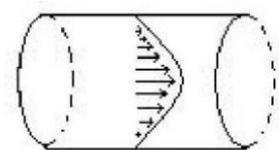


図3

(1)の式は

$$\eta = (\text{ずり応力}) / (\text{ずり速度}) \dots\dots(2)$$

に書き換えられる、粘性係数即ち粘度はずり応力をずり速度で除した値である。

2.2 ニュートンの式の簡易化

ニュートンさんには失礼だが、大幅に簡易化して

$$\eta (\text{粘度}) = (\text{ずり応力}) / (\text{ずり速度})$$

の式は

$$\text{粘度} = (\text{ずり応力}) / (\text{粘度計の回転数}) \dots\dots(3)$$

もっと極端に

$$\text{粘度} = (\text{混ぜるときの抵抗}) / (\text{手で混ぜる速さ}) \dots\dots(4)$$

と考えてもよいだろう。粘度式には他にストークスの粘度式、アインシュタインの粘度式などがある。

3. 各種粘性とニュートンの式との関連

以下、各種の粘性について説明を加える。

大きく分けて、ニュートンの式に沿ったニュートン流、ニュートンの式から外れる非ニュートン流、非ニュートン流の中で時間のファクターを考慮したチキソトロピーがある。

3.1. ニュートン流

ニュートン流に沿う(近い)物質は水、溶剤、一部オイルである。

図4 がニュートン流で、ずり速度とずり応力が比例関係にあるのである(縦軸はずり応力で粘度ではない、以下同様)。

粘度 = (ずり応力) / (ずり速度) は、粘度計の回転数(ずり速度) は変わっても粘度は一定ということなのである。

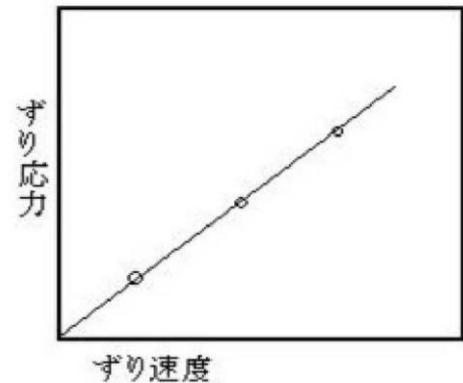


図4

3.2. 非ニュートン流

通常の工業製品に於いては分子の相互作用があり、なかなかこのニュートン流のラインには載ってこない。塗料、接着剤はすべて非ニュートン流と言っても差し支えないであろう。

3.2.1. ダイラタンシーと擬塑性流体

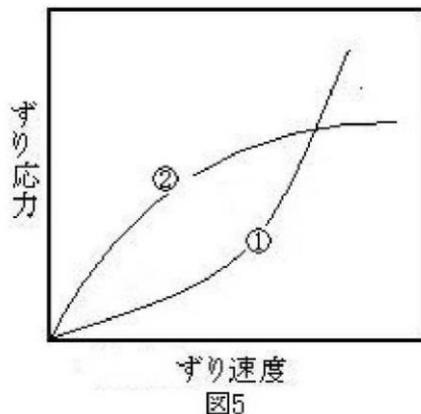
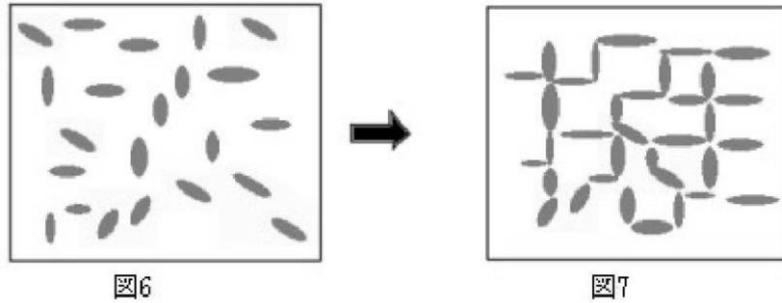


図5

図5 の①の曲線がダイランシー(ダイラタント)でずり速度が上がるに連れて、ずれ応力がグググと上がってくる、粘度も上がってくるのである。粘度計の回転数があがると粘度も上昇するのである。

家庭において片栗粉を水でとく際、ゆっくり混ぜる分には抵抗が少ないが、力を入れて早く混ぜようとする、ググと急に抵抗感が出てくる。これがダイランシーである。ダイランシーのある物質は工業的には少ない。

ふわふわ浮いた状態の片栗粉の表面の相互作用は小さいが、力を加えられると表面どうしが近づき相互作用を起し、構造が形成され高粘になってくるのである(図6 図7)。



渚のドライブウェイ、車が走ってもタイヤがのめりこまない砂浜(石川県・千里浜ドライブウェイ)、これもダイランシーによるものである。

粒子が球ではなく変形した形状の分散体に観察されることが多い。

図5 の②の曲線が擬塑性流体である。

ずり速度が上がる割合にはずり応力は上がっていかない。言い換えるとずり速度が上がるに従って粘度が下がってくる。

例えば木工用ボンド類であれば、回転数6rpm、12rpm、30rpm になるに従い、おおよそ30,000mPa・s 20,000mPa・s 10,000mPa・s と下がってくる。

通常、このような材料が多い。

回転数が多くなると、高分子の絡み合い、粒子同士の相互作用の構造が壊れて、粘度が下がってくるのである。このように粘度が下がってくるのが大きいのを構造粘性が大きいと表現する。水性の材料は弱い水素結合が外れることになり、溶剤系より水性系の方が構造粘性が大きい。

式(4) に絡めて表現すれば、サラダオイルは強く混ぜると、それなりに抵抗を感じ、ニュートン流に近く、溶き片栗粉は混ぜるとググと抵抗が高くなり、ダイランシーである、でんぷんのは流れにくくねばそうだが、強く混ぜても抵抗感が少ない、これを擬塑性と言う風に考えることができる。

3.2 .2.塑性流体(ビンガム流体と非ビンガム流体)

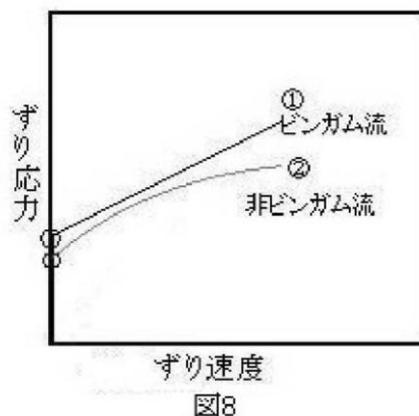


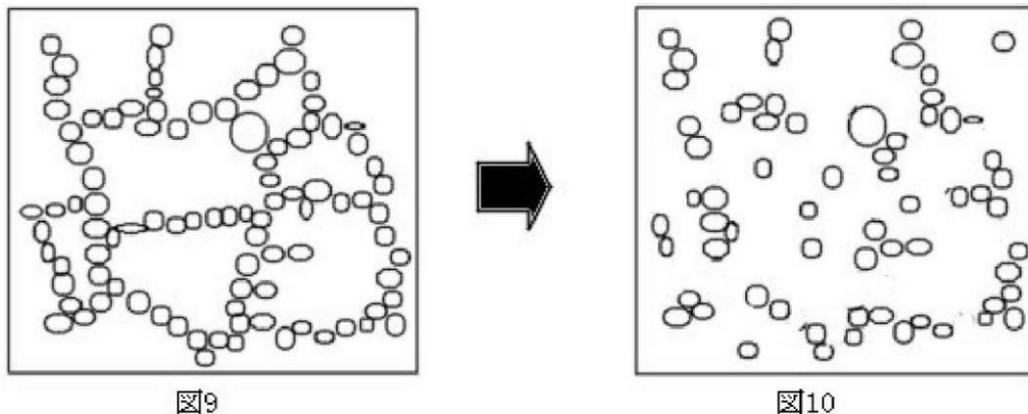
図8 が塑性流体で、ある程度以上のずり速度がないと流動しない材料である。

粘土、シーリング材この例で、地球の引力程度のずり速度では簡単に流動しないが、それ以上の力が加わるとすぐ流動するのである。

図の○で囲んだy切片になるところが降伏値で、流動の始まる目安で、降伏値から先がニュートン流と同じ直線を示す①がビンガム流で、湾曲する②が非ビンガム流である。

このような流動を起こさせる添加物の一例として著名なのがアモルファスシリカである。

アモルファスシリカは 0.1μ 以下の粒径でシーリング材などに配合され、図9のような状態で凝集している。このようなネットワーク構造を持っているので、垂れない性質を発現するのである。

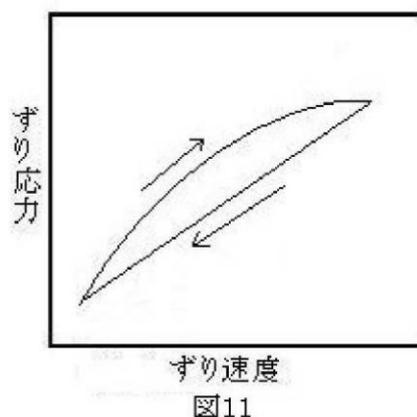


攪拌によってこの構造が壊れ図10のようになると粘度が下がって流動してくる。

3.2.3.チキソトロピー

3.2.2. まではそれぞれの測定値をプロットし、グラフにしたものである。時間の経過は考慮されていない。

時間の経過を取り込んだのがこのチキソトロピーである。 図11 にそれを示した。



ずり速度を上げるに従い湾曲するような曲線を描き、終点で反対にずり速度を下げて行くと直線状に元のずり応力に戻って行く形がチキソトロピーである。

「チキソトロピー(遥変性) :かくはんすることによって粘度が低下し、次に放置することによって粘度が増大する性質。」(JIS K 6800 接着剤・接着用語)、この説明が分かりやすい。

図11 の曲線はチキソトロピックループと称され、この囲まれた面積は構造破壊の数値と関連づけられる。

時間が経過し、もとに戻る性質は重要で、シーリング材がシーリングガンから容易に吐き出され、施工後は垂れないという性質

に係わってくるのである。

ケチャップやマヨネーズも同様な性質を持っている。

ここで注意すべきことは、工業の分野においては、チキソロピーが擬塑性流体、非ビンガム流体と混同されていることである。粘度計で r_1 回転の粘度と r_2 回転の粘度の比をチキソ係数と表す場合がある。

また、JIS Z 3284(溶ダペーパースト(はんだペーパースト))の流動特性試験では、チキソロピー指数(TI) = $\log(\eta_1 / \eta_2) / \log(D_2 / D_1)$ と決められている。

η_1 : ずり速度 D_1 の時の粘度

η_2 : ずり速度 D_2 の時の粘度

(かつてはこれを構造粘性指数と称していたのだが。)

擬塑性流、非ビンガム流を示すものはチキソロピーを示すことが多く、混同はやむを得ないかも知れない。

むしろ、混同とは考えず、チキソロピーは擬塑性流をも含めて示すようになったと考えるべきなのだろう。

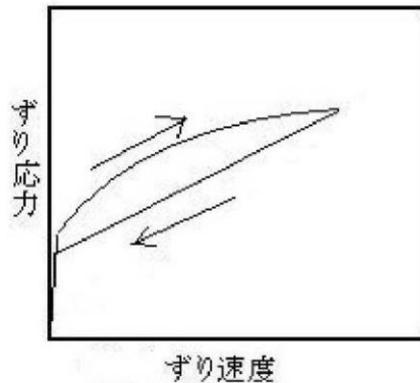


図12

図12 にシーリング材の粘性測定の模式図を示した。3分間で 0rpm から100rpm に連続的に測定し、同じ3分で100rpm から0rpm に測定しながら戻る設定である。

降伏値は y 軸には載らず、少しずれる。超微速度で測定すれば y 軸上に観察されると推定されるが、実際の測定速度では少しずれてしまうのである。同じずり応力のところに戻ってこないのも同様な理由による。かなり時間をかければ、きれいなグラフが書ける可能性があるが、低沸点成分の蒸発、吸湿などの影響を受ける。

ペーパースト状と言われる物質はこのようなグラフを示す材料である。

消防法、ASTM における液状確認試験の液体/ 固体もこのグラフの降伏値に関連してくるのだが、関連させたデータは寡聞にしている。

粘度の数値は、測定の際の回転数、温度により変わってくるので、物理量として信頼性に欠ける面があるは事実だが、B 型回転粘度計においては高粘度のものは6rpm・・・、中粘度のものは12rpm・・・とかで、おおよそ決まってくるものである。低回転のゆっくりした速度だと時間がかかり過ぎ、高回転では泡を噛んだりするので、そうなるのである。

また、安定な作業条件の要求から温度による差異は少なくなるように設計されているので、粘度は材料選定の目安のひとつになっている。

シーリング材の回転粘度計での測定例を示すと、2rpm 1,200,000mPa・s、 10rpm 370,000mPa・s、

粘度計の回転数によってかくも違う(スピンドル(回転子)によっても異なる)。こんなに違ってはと疑問をもたれるかもしれない。

見方を変えれば、これは回転数が変わってもずり応力の変化は少ないことであり、シーリングガンからシーリング材を押し出す場合、ゆっくり押し出しても早く押し出しても抵抗感はほとんど変わらないことを意味し、有用なものなのである。

チキソ係数 = $1,200,000 / 370,000 = 3.2$ と して表示される場合が多い。

4. 粘度計の種類

4.1. 回転粘度計

最も多いのがスピンドル(回転子)を回転させ、そのトルクから、粘度を表示する粘度計である。B型粘度計(ブルックフィールド)

型粘度計)のアナログタイプが
価格も安く簡便で実績が多い
(もちろん電子的、デジタルもある)。

スピンドル(回転子)の一例を
図13 に示した。高粘度には
棒状のものが、低粘度には円筒
状のものがある。

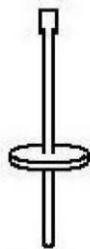


図13

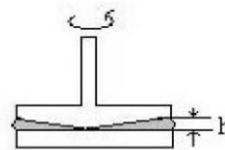


図14

このスピンドルをビーカーに入れて回
転させ測定する方式であるので、底面からの距離など、ニュートンの式に関連付けが難しい点がある。

図14 がコーンプレート型である。下部のプレートが固定され、コーンが回転し粘度を測定するのである。端の h の厚みに種々あり、ニュートンの式への関連性が高い。

高粘度の試料にも適し、0~500~回転と連続的に測定できるのもこのタイプである。

4.2 毛細管粘度計

最もポピュラーなものがオストワルド粘度計であろう(右図(榎草野科学のホームページより転載)。直径 0.5 mm 程度の細い管の中を落下させ、目盛から目盛までの秒数を測定するのである。

その形状から当然低粘度(100mm²/s 以下)の試料に限定される。落下は密度に関連性があり、ここでは動粘度が測定される。

動粘度(mm²/s)=C · t

C : 粘度計定数(mm²/s²)

t : 流下に要した時間(s)

となる。

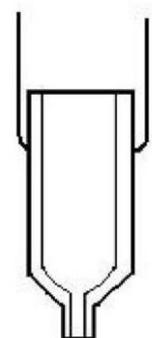
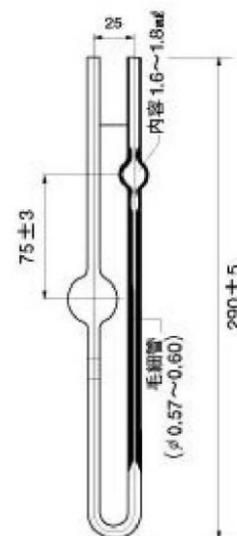
動粘度と粘度の関係は「4. 粘度の単位」でも示したが、次のような関係になる。

動粘度(mm²/s) = 粘度(mPa · s) / 密度(g/cm³)

オストワルド以外に精度の高いキャノン・フェンスケ型、ウベローデ型などがある。

これらのタイプは精度が高く、微妙な温度の影響を受け易く、0.1 °C まで制御できる恒温槽の中で測定する。

かつて高分子の重合度はこのタイプの粘度計で測定された。なお、洗浄には手間がかかるものである。



4.3 カップ型(オリフェス型)

カップの底に小さな穴が開いており、一定量の試料を入れて何秒で出てしまうかを測定する。接着剤、塗料を希釈したりして工場の現場で使うことが多い。

数1,000mPa · s 以下が実際には対象であり、高粘度のものは時間がかかり過ぎ不適である。

その種類にはISO標準カップ、フォードカップ、イワタカップ、ザーンカップなどがある。

4.4. その他の粘度計

他にも落球式、泡粘度計などがある。新しいタイプとしては振動式があり、振動子の振動がどう変わるかでもって測定す

る方式である。

残念ながら筆者には振動式の使用経験がない。

5. 粘度の単位と換算表

SI 単位では Pa・s(パスカル秒)で、cgs単位では、ps(ポイズ)が使われていた。

mPa・s(ミリパスカル秒)=cps(センチポイズ or シーピーエス)であることから、 mPa・s が使用されることが多い。

他に St(ストークス) の単位がある。これはps を密度で割った単位で動粘度と称されるものである。当然密度1の場合は St=ps になる。

1 cSt= 1mm²/s=(ニュートン流で密度が1であれば1 cps) の関係になる。

他に、流動時間を測り、単位を秒数(sec) とするものもある。

粘度の数値換算

密度1.1 g/cm³ の流体を仮定した。

粘度				動粘度				流下方式	
cgs 単位系		SI 単位系							
P, ps (ポイズ)	cP, cps (センチポ アズ、シー ピーエス)	P・s (パスカル 秒)	mP・s (ミリパスカ ル秒)	m ² /s	mm ² /s	St (ストークス)	cSt (センチスト ークス)	毛細管 粘度計 (mm ² /s)	ザンカップ No.2 (内径 約2mm)
0.226	22.6	0.226	22.6	0.0000205	20.5	0.205	20.5	20.5	約20 秒
10	1000	10	1000	0.000909	909	9.09	909	-	-
100	10000	100	10000	0.009091	9091	90.31	9091	-	-

粘度の単位はcpsが使い慣れており、SI単位が採用が採用になった際、基本単位で表示するものとなり、困ったと思
ったが、m(ミリ)の接頭辞が使え、cps=mP・sとなりホッとした記憶がある。

換算表には身近だった1000cps,10000cps、GHSで吸引性呼吸器有害性の基準となる20.5mm²/sを採用した。

6. 動粘度について

動粘度は被検体が重力の作用を受けて運動する状態を測定する場合、例えば毛細管粘度計で液体の自然落下
時間を測定するような場合の測定量である。

動粘度は Kinetic Viscosity なのか、Kinematic Viscosity なのか、それとも Dynamic か、ネットではいずれもあ
る。

Kinetic=動力学のつもりでいたが、それも正しいのかも調べてみた。

Dynamics は動力学で良さそうだ(理化学辞典、物理学辞典、物理学大辞典)。

なお、物理学大辞典には Kinetics も動力学となっている。

Kinetics、Kinematics はどうなのか。

理化学事典、物理学事典に Kinetic Energy、Kinetic Coefficient の項はあるが、Kinetics はない。

Kinematics は運動学「力の関係には立ち入らないで、物体や流体の運動の幾何学的関係を調べる学問」となっ
ている。

物理学辞典には、動粘度、Kinematic Viscosity の項があり、Kinematic Viscosity が適切であろう。

7. 国連危険物の容器等級と粘度

液体固体によって法的規制の違いはあっても粘度による規制の違いはない。

ところが、国連危険物容器等級の割当てには粘度が関係してくるのである。

容器等級をⅢに変更することができるのである。

危険物輸送に関する勧告 I 巻 モデル規則第 19 改訂版 P79 をそのまま記載する。

第 2.3 章

クラス 3-引火性液体

2.3.2 容器等級の割当て

2.3.2.2 引火点が 23℃未満の塗料、エナメル、ラッカー、ワニス、接着剤、つや出し液等の高粘性物質は、以下の条件が満たされれば、試験及び判定マニュアル第Ⅲ部、32.3 節に規定された手順に従って、その容器等級をⅢとすることができる。

(a) 流出時間(秒) で表した粘度と引火点は下表に従って求められる:

動粘性係数 (外挿値) ν (ほぼゼロのずり速度における) mm ² /s at 20°C	流出時間 (秒)	流出径 (mm)	密閉式引火点 (°C)
$20 < \nu \leq 80$	$20 < t \leq 60$	4	17 より大
$80 < \nu \leq 135$	$60 < t \leq 100$	4	10 より大
$135 < \nu \leq 220$	$20 < t \leq 32$	6	5 より大
$220 < \nu \leq 300$	$32 < t \leq 44$	6	-1 より大
$300 < \nu \leq 700$	$44 < t \leq 100$	6	-5 より大
$700 < \nu$	$100 < t$	6	制限なし

(b) 溶剤分離試験において、透明な溶剤層が 3%未満;

(c) 混合物又はあらゆる分離溶剤が、区分 6.1 又はクラス 8 の判定基準に適合しない;

(d) 450 リットル未満の容器に収納されている。

ISO 標準カップを使用

ISO 標準カップ流下時間とストークス粘度(Elcometer 株式会社 HP より)

流下時間 (秒)	ISO(オリフィス径)(cSt)				流下時間 (秒)	ISO(オリフィス径)(cSt)			
	3	4	5	6		3	4	5	6
30	6.6	34.5	91	188	65	26	86	210	440
35	9.8	42	109	225	70	28	93	226	475
40	12.7	50	126	262	75	31	100	243	510
45	15.5	57	143	298	80	33	108	260	545
50	18.2	64.5	160	334	85	35	115	276	580
55	20.7	71.5	176	369	90	38	122	293	615
60	23.2	79	193	405	100	42	135	326	684

8.おわりに

本稿はエマルジョン型接着剤を取り扱っていた筆者個人の経験に依存する部分が多く、厳密性、系統性に欠ける面はあるが、反面実際的とも言えるのではないかと考えている。

食品における粘性は食感との関連もあり、かなり重要なものと考えられるが触れることはできなかった。

以上

参考資料

塗料の流動と顔料分散1971 T. C. PATTON 植木、栃原、今岡訳
東機産業株式会社 HP