



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Sievingによる砂の粒度解析 (1)
Author(s)	柏村, 正和; Kashiwamura, Masakazu; 早川, 和夫 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 22, 15-34
Issue Date	1959-12-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40658
Type	departmental bulletin paper
File Information	22_15-34.pdf



Sieving による砂の粒度解析 (1)

柏村 正和*

早川 和夫**

(昭和34年9月30日受理)

Size Analysis of Sand by Sieving (1)

Masakazu KASHIWAMURA

Kazuo HAYAKAWA

Abstract

A sieving is the most popular method to determine a grain-size distribution for comparatively rough particles larger than 50 microns. But the mechanism of sieving is not well known for its complication caused by many factors. The authors intend to clarify the dynamic feature of sieving. This is the first report of the experiment made about the process of sieving by a Ro-Tap shaker. The relation between the weight of retained sand on a sieve and time was examined by rotation of the sieve with tapping and no tapping. The above-mentioned relation was ascertained to be considerably uniform over many experiments. The effects of jamming and the sample weight on sieving were also examined. Furthermore, a brief theoretical treatment of sieving was made for decision of the course on future investigations.

序 文

粒子の径を測定するにはその粒径の程度によつて多くの方法がある。測定の対象となる粒子は種々の立場により 10^{-5} mm 程度の大きさから 1~10 mm に至るまで広範囲にわたつている。粒径の直接測定は粗粒では拡大鏡又は直視により微粒では限外顕微鏡、電子顕微鏡等によつて全範囲を行うことができるが、このような測定方法から粒度分布を求めることは非常に労力と時間を必要とする。従つて一般に粒子の持つ集団的な性質を利用して粒度分布又は平均粒度を求める方法がよく行われる。例えば流体の permeability や気体液体の表面吸着の現象から表面積を求めて換算する方法、又光の scattering や液中の turbidity から求める方法、又よく知られている sedimentation や微粒子の示す媒質中の diffusion によつて得る方法等多くの手法がとられている。最近ではテレビの原理と同じく粒子をまいた板上を光で走査し粒子のかげによる光の断続を電流にかえて求める方法が発達して来ている。以上の他に比較的粗な粒子

* 理学第一研究室 講 師

** 理学第一研究室 研 究 生

に対し(約 50 μ 以上) 最も古くから又最も広く普及している方法として **sieving** の方法がある。即ち種々の目を有するフルイを上方に向かつて目が次第にあらくなるように多段式に積み重ね資料を上から入れてしんとうするのであつて、完全にふるい終つた時にはフルイの目の開きに応じて粒子は各粒度毎に分けられ、これを秤量すれば直ちに粒度分布(質量頻度)が得られる。この方法は原理的には一見簡単に思われ、一般にあまり立ち入つて興味が持たれないようであるが、実際にはその機構は予想以上に複雑であつて詳細に検討すればする程多くの問題を含んでいることが認められる。現在フルイの目の均一性にはかなり厳格な規約があるが、実際に **sieving** を行う際の規約はごく簡単でしかもその根拠は薄弱である。これは機構が複雑で未解決であるために他ならない。他の粒度解析の方法が相当進歩をとげつつあるのに対し、最も古くから普及したこの方法の機構が解明されていないことは不思議に思われるが、これもその機構の複雑さが妨げになつてゐるためであろう。最近この方法が機構的に興味深いものであつて他の方法との関連上その解明は非常に重要であるとの意見を聞くのも当然と思われる¹⁾。

筆者等は、海岸の砂礫の粒度について研究を行つて来たが、その粒度解析の必要上から **sieving** に対し力学的な興味を持ち、その機構を詳細に解明することを目的として実験を始めた。今回は 5 段のフルイを層状に積み **Ro-Tap shaker** を用いて 300 gr の天然砂を試料として各フルイに残る量と時間の関係を求めその傾向を追求すること、及びその同じ過程を数多く繰り返した場合に各結果がどの程度の均一性を持つかの検討に主眼を置き、さらに **shaker** の **rotation** に **tapping** を加えた時と加えぬ時との効果の相違について実験を行つた。以下はその報告である。今後はフルイの目に対する粒子の **jamming** の効果、**shaking** の方式による影響、或いは又粒子の形状、粒径分布、試料の重量、目の開きの分散、湿度等の **sieving** に及ぼす影響を調べて行くつもりである。

今回の実験に使用した器械と試料は下記の通りである。

1. Ro-Tap 型しんとう機 (Rotating and tapping shaker)

rotation 回数	156/min.
tapping 回数	290/min.
回転半径	3 cm
電動機	1/4 H.P.

2. フルイ

0.075 mm	(200 meshes)
0.110 "	(150 ")
0.149 "	(100 ")
0.250 "	(56 ")
0.440 "	(35 ")

3. 試料

石狩海岸砂丘の砂

1. sieving の結果の均一性

ある試料を sieving により分析した場合に得られた結果が同一試行をくりかえした時、どの程度の均一性を有するものであるかを検討してみる。

前記の石狩海岸の天然砂を四分法により取り分け 300 gr の試料を多数作り、この中から at random に 10 個ずつを抽出し、その各 10 個につき同一の条件を以て sieving を行つた。shaker の tapping の効果は別に調べることにし、この場合フルイには rotation のみを与えた。又 sieving の時間を 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 30, 60, 180 分を選び、各々につき上記のように 10 個の試料を測定した。sieving を終つて各フルイに分けられた試料は注意深く他の容器

第 1 表

May-June 1959. Sample weight 300 gr.							
Opening	passing 0.075 mm (gr)	on 0.075 mm (gr)	on 0.11 mm (gr)	on 0.149 mm (gr)	on 0.25 mm (gr)	on 0.40 mm (gr)	Sum
Sieving Time 1 min.							
Test 1	0.44	0.18	3.2	40.5	227.1	27.4	298.82
2	0.47	0.34	3.5	42.6	225.1	27.1	299.11
3	0.50	0.30	4.1	44.2	225.0	25.4	299.50
4	0.47	0.20	3.6	41.2	222.9	30.8	299.17
5	0.55	0.32	3.5	45.8	223.0	26.1	299.27
6	0.55	0.37	3.8	42.6	224.5	26.8	298.62
7	0.62	0.40	3.8	45.4	222.2	26.7	299.12
8	0.50	0.35	3.6	41.3	225.7	28.4	299.85
9	0.46	0.28	3.4	41.7	225.2	27.9	298.94
10	0.48	0.27	3.7	43.1	224.7	26.7	298.95
Mean	0.504	0.301	3.62	42.84	224.54	27.33	299.135
Sieving Time 2 min.							
1	0.62	0.40	7.0	46.1	224.0	24.7	302.82
2	0.50	0.32	3.8	45.7	223.7	25.1	299.12
3	0.58	0.32	3.7	49.3	221.0	24.2	299.10
4	0.58	0.37	3.9	44.8	224.0	25.6	299.25
5	0.55	0.30	3.8	48.5	221.6	24.4	299.15
6	0.70	0.45	4.4	50.0	220.5	23.3	299.35
7	0.57	0.46	4.3	46.2	224.7	23.9	300.13
8	0.60	0.35	3.9	45.2	222.2	26.6	298.85
9	0.46	0.20	3.7	49.4	222.1	22.6	298.46
10	0.44	0.35	3.8	49.3	220.7	24.1	298.69
Mean	0.560	0.352	4.23	47.45	222.45	24.45	299.492

Opening	passing 0.075 mm (gr)	on 0.075 mm (gr)	on 0.11 mm (gr)	on 0.149 mm (gr)	on 0.25 mm (gr)	on 0.40 mm (gr)	Sum
Sieving Time 3 min.							
Test 1	0.67	0.45	4.5	56.5	216.8	20.5	299.42
2	0.60	0.45	4.1	52.3	220.6	21.4	299.45
3	0.65	0.40	4.6	50.9	220.6	22.0	299.15
4	0.55	0.35	4.1	48.8	222.4	22.9	299.10
5	0.52	0.30	3.8	49.0	220.7	24.5	298.82
6	0.55	0.35	4.1	50.6	221.7	22.1	299.40
7	0.54	0.30	4.2	49.0	222.7	22.3	299.04
8	0.65	0.40	4.4	50.5	220.9	22.0	298.85
9	0.60	0.30	4.3	49.8	221.5	22.7	299.20
10	0.70	0.34	4.8	52.0	221.0	20.8	299.64
Mean	0.603	0.364	4.29	50.94	220.89	22.12	299.204

Sieving Time 4 min.							
1	0.67	0.37	4.5	51.5	219.4	23.0	299.44
2	0.65	0.35	4.4	50.6	220.2	23.2	299.40
3	0.65	0.30	4.4	52.3	219.6	23.2	300.45
4	0.57	0.28	3.7	49.8	221.3	23.6	299.25
5	0.62	0.32	4.5	51.1	220.6	21.8	298.94
6	0.58	0.28	4.3	49.3	222.0	23.2	299.66
7	0.55	0.30	4.4	51.4	221.5	21.0	299.15
8	0.70	0.30	4.5	51.1	220.9	22.2	299.70
9	0.60	0.30	4.1	52.1	219.3	22.5	298.90
10	0.65	0.31	4.9	51.9	220.8	20.3	298.86
Mean	0.624	0.311	4.37	51.11	220.56	22.40	299.375

Sieving Time 5 min.							
1	0.55	0.29	4.5	51.9	221.5	20.9	299.64
2	0.61	0.30	4.7	53.0	219.4	20.9	298.91
3	0.52	0.30	4.3	50.7	221.3	22.0	299.12
4	0.70	0.38	4.6	52.5	219.4	21.3	298.88
5	0.54	0.32	4.3	50.2	221.8	22.0	299.16
6	0.65	0.35	4.2	52.5	220.3	22.2	300.20
7	0.77	0.45	4.8	54.5	219.3	20.2	300.02
8	0.72	0.52	4.9	54.9	218.8	19.6	299.44
9	0.64	0.42	4.6	55.5	218.0	20.0	299.16
10	0.70	0.45	4.7	53.9	218.7	19.8	298.25
Mean	0.640	0.378	4.56	52.96	219.85	20.89	299.278

Opening	passing 0.075 mm (gr)	on 0.075 mm (gr)	on 0.11 mm (gr)	on 0.149 mm (gr)	on 0.25 mm (gr)	on 0.40 mm (gr)	Sum
---------	-----------------------------	------------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	-----

Sieving Time 7 min.

Test 1	0.75	0.40	4.7	56.6	216.5	20.0	298.95
2	0.85	0.50	5.3	58.4	215.3	18.8	299.15
3	0.70	0.42	4.5	56.0	219.9	21.1	302.62
4	0.65	0.36	4.7	52.4	220.2	20.3	298.61
5	0.72	0.40	4.8	55.0	218.5	19.9	299.32
6	0.70	0.31	4.3	49.7	222.0	22.2	299.21
7	0.62	0.39	4.3	48.8	223.1	22.1	299.31
8	0.61	0.30	4.5	51.0	221.3	21.0	298.71
9	0.76	0.40	5.2	53.1	220.3	19.6	299.36
10	0.60	0.32	4.6	49.8	222.4	21.2	298.92
Mean	0.696	0.380	4.69	53.08	219.95	20.62	299.416

Sieving Time 10 min.

1	0.82	0.41	5.1	58.9	213.5	21.1	299.83
2	0.67	0.37	4.7	54.7	217.4	21.0	298.84
3	0.61	0.30	4.4	54.4	217.5	21.7	298.91
4	0.58	0.29	4.7	52.3	220.8	20.0	298.67
5	0.60	0.30	4.1	50.4	222.5	21.8	299.70
6	0.80	0.45	5.6	56.3	218.2	17.7	299.05
7	0.61	0.40	4.6	52.6	220.7	19.9	298.81
8	0.85	0.50	5.5	56.3	217.5	18.2	298.85
9	0.62	0.31	4.9	54.7	219.4	19.3	299.23
10	0.70	0.38	4.7	56.2	217.5	19.9	299.38
Mean	0.686	0.371	4.83	54.68	218.50	20.06	299.127

Sieving time 15 min.

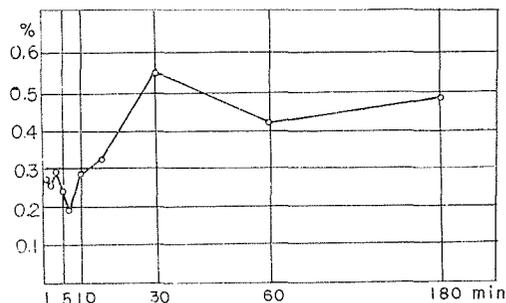
1	0.85	0.46	5.5	57.2	217.1	18.3	299.41
2	0.88	0.48	5.5	58.4	214.7	18.5	293.46
3	0.93	0.45	5.6	59.5	215.8	17.2	299.48
4	0.82	0.47	5.3	57.8	216.2	18.9	299.49
5	0.71	0.46	4.8	54.1	219.5	19.7	299.27
6	0.68	0.42	4.6	50.9	221.8	20.1	298.50
7	0.77	0.45	5.4	56.5	218.1	18.4	299.60
8	0.73	0.41	4.8	53.4	218.8	19.8	297.94
9	0.83	0.43	5.9	59.5	214.4	17.9	298.90
10	0.85	0.43	5.6	56.2	218.0	17.9	293.93
Mean	0.809	0.446	5.29	56.35	217.44	18.67	299.005

Opening	passing 0.075 mm (gr)	on 0.075 mm (gr)	on 0.11 mm (gr)	on 0.149 mm (gr)	on 0.25 mm (gr)	on 0.40 mm (gr)	Sum
Sieving Time 30 min.							
Test 1	0.85	0.49	5.1	59.8	214.8	17.4	298.44
2	0.94	0.55	5.6	56.7	218.1	16.9	298.79
3	0.78	0.40	5.0	61.3	212.2	17.8	297.48
4	0.80	0.47	5.1	55.3	217.6	18.7	297.97
5	0.92	0.51	5.7	59.3	214.2	18.0	298.63
6	0.87	0.43	5.3	59.3	214.1	17.9	297.90
7	0.82	0.46	5.3	60.7	212.9	18.3	298.48
8	0.76	0.40	5.1	60.4	213.2	18.1	297.96
9	0.78	0.40	5.1	60.1	213.3	18.2	297.88
10	0.83	0.44	5.7	59.5	213.4	18.7	298.57
Mean	0.835	0.455	5.30	59.24	214.38	18.00	298.210

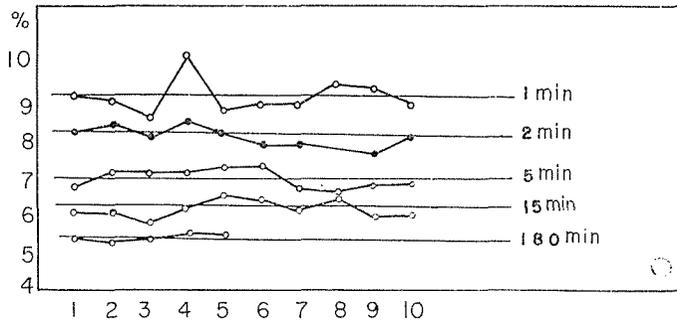
Sieving Time 60 min.							
1	1.00	0.52	6.1	69.1	206.5	17.0	300.22
2	0.88	0.40	5.4	64.8	208.7	18.9	299.08
3	0.80	0.40	5.9	59.2	215.3	16.6	298.20
4	1.02	0.50	6.5	65.2	208.2	16.7	298.12
5	0.86	0.45	6.2	60.9	213.2	16.8	298.41
Mean	0.882	0.454	6.02	63.84	210.38	17.2	298.806

Sieving Time 180 min.							
1	0.70	0.69	7.4	66.4	206.7	16.4	298.29
2	0.94	0.50	9.4	66.5	205.3	15.8	298.54
3	1.00	0.50	9.3	63.2	207.8	15.9	297.70
4	1.30	0.52	7.2	67.4	205.5	16.9	298.82
5	1.20	0.55	7.7	70.3	203.0	16.7	299.45
Mean	1.03	0.55	8.2	66.8	205.7	16.3	298.58

にあげ、目につまつた粒子も軽くだたいて同じ容器に入れた。これがその時間の残留量となるがこれを天秤で秤量した結果が第1表に示す通りのものである。これら各300grの試料は sieving の終了後秤量すると僅か減少しているが、実験全部を通じて減少量はせいぜい1.5gr(0.5%)で平均は0.9gr(0.3%)であった。減少の原因は微粒子が空中に散逸したり、あるいはフルイの隅や目につまる事も一応考えられるが、それよりも試料の含有水分が sieving による激しい粒子の運動と温度上昇



第1図 sieving 終了後の全試料の重量はもとの300grに達しない。その差の300grに対するpercentageの平均を sieving 時間に対し plot したものを表している。



第2図 ある sieving 時間に対する 0.40 mm フルイ上の残留量百分率が実験の都度変動する有様を示す
横軸は実験の回を表す。

によつて解放されるためのものが大きいようである (第1図参照)。

今結果の均一性を調べるために 0.400 mm のフルイ上に残つた量の 10 回の実験結果を図に画いてみると第2図のようになる。これから 0.400 mm のフルイ上では時間の経過と共に値のばらつきが減少していく様子が知られる。ばらつきは比較的少なく1分に於ける結果でもそれ程大きなものではない。このばらつきの程度は標準偏差を計算して比較することが出来る。又これらの10回と同じ過程の結果から、これを無限にくり返した場合に得られる各時間に於ける残留量の母集団平均値信頼区間を危険率1%で推定してみた。以上 0.400 mm フルイ上の各時間に於ける残留量 (gr) の標準偏差と母集団平均値信頼区間は下記のようなになる。

	標準偏差 (gr)	母集団平均値信頼区間 (gr), 危険率 1%
1 分	1.410	27.33±1.53
3 "	1.075	22.12±1.16
7 "	1.037	20.62±1.13
15 "	0.906	18.67±0.98
30 "	0.524	18.00±0.57
180 "	0.432	16.34±1.00

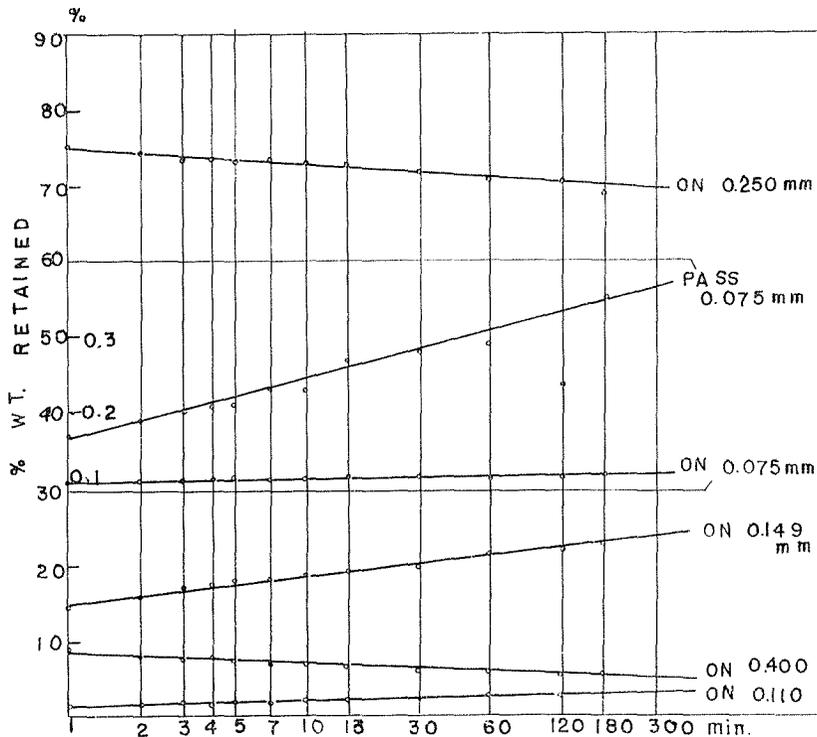
以上の結果から Ro-Tap shaker を用いた場合の結果の均一性はかなり高いものである事が結論され、さらに次節で述べる残留量の時間的変化の曲線は残留量の母集団平均値の推定区間の値を考慮すれば充分高次に直線に近似していると考えてよい。

2. sieving の進行過程

各フルイの残留量と時間との関係を前節に述べた実験結果から調べてみる。各時間に対し10個の資料の平均値をそのフルイの残留量として採用することになると、第2表の如き結果が得られる。これを図上に示したものが第3図である。これによると各フルイ共1~15分の間に

第 2 表

Opening	1 min. (%)	2 min. (%)	3 min. (%)	4 min. (%)	5 min. (%)	7 min. (%)	10 min. (%)	15 min. (%)	30 min. (%)	60 min. (%)	120 min. (%)	180 min. (%)
Weight Percentage retained on Sieves												
on 0.400 mm	9.12	8.15	7.40	7.48	7.02	6.87	6.70	6.26	6.03	5.75	5.37	5.45
on 0.250 mm	75.10	74.30	73.84	73.68	73.37	73.50	73.05	72.73	71.91	70.44	70.40	68.77
on 0.149 mm	14.30	15.82	17.00	17.07	17.74	17.70	18.28	18.82	19.85	21.36	21.80	22.50
on 0.110 mm	1.21	1.42	1.44	1.46	1.53	1.57	1.62	1.77	1.78	2.01	2.06	2.74
on 0.075 mm	0.10	0.12	0.12	0.10	0.13	0.13	0.12	0.15	0.15	0.15	0.14	0.19
pass 0.075 mm	0.17	0.19	0.20	0.21	0.21	0.23	0.23	0.27	0.28	0.29	0.23	0.35
Cumulative Percentage passing through the Sieves												
on 0.40 mm	90.88	91.85	92.60	92.52	92.98	93.13	93.30	93.74	93.97	94.25	94.63	94.55
on 0.250 mm	16.78	17.65	18.64	18.84	19.61	19.63	20.25	21.01	22.06	23.81	24.23	25.78
on 0.149 mm	1.48	1.73	1.76	1.77	1.87	1.93	1.97	2.19	2.21	2.45	2.43	3.28
on 0.110 mm	0.27	0.31	0.32	0.31	0.34	0.36	0.35	0.42	0.43	0.44	0.37	0.54
on 0.075 mm	0.17	0.19	0.20	0.21	0.21	0.23	0.23	0.27	0.28	0.29	0.23	0.35

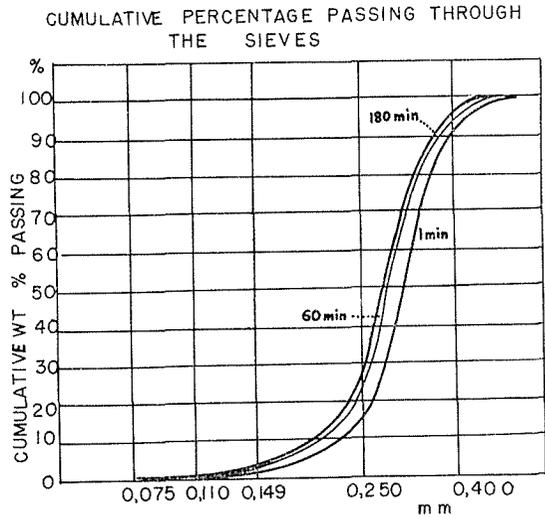


第 3 図 no tapping で試料 300 gr の場合の各フルイ上の残留量の平均と時間との関係を表す。横軸は対数目盛で時間を表してあるが上記の関係は殆ど直線的である。

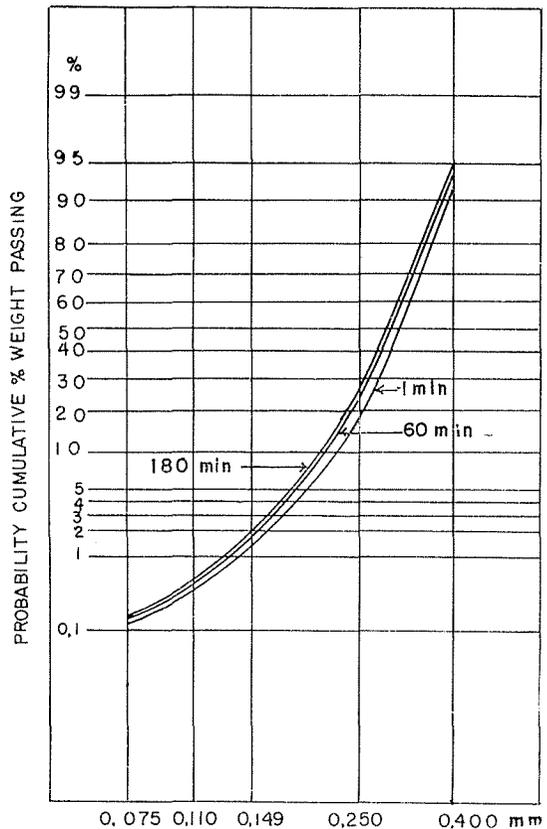
フルイ分けが急速に進行する様子が判る。15分以後はその進行速度は小さくなるが依然としてフルイ分けが行われ180分に至つてもわずかながら進行していて残留量が一定値に落ち着かない。第3図の横軸は対数目盛で時間を表しているがこの図によると進行過程はほぼ直線である。もしこの直線性が時間を無限大にしても成り立つと仮定すると残留量も又 $\pm\infty$ に近づく事になつて明らかに不合理である。実際には時間を無限大にとれば各フルイの残留量が一定値に収束するのが当然と考えられるから、第3図の直線性はあくまでも過渡的な一部分と考えなければならない。しかし通常 sieving に費す時間はこの範囲内にあると思われるので、実用的な意味で直線性を容認することができる。

第2表から粒度加積曲線を試みに画いてみると第4図の如くなる。時間の経過と共に曲線は左に移動し粒径の中央値は次第に小さくなるが見られる。この移動量はわずかであつても厳密に中央値を決める場合には看過出来ない量である。この移動量を補正する為にフルイの目の分散を parameter とし sieving の時間の関数で補正量を求める公式があるが²⁾ これの内容はもつと複雑なので検討を要すると思われる。

第4図の曲線を確率紙上に移して画いたのが第5図である。よく知られているように確率紙上の曲線が直線に近ければ粒度分布は対数正規分布に近いという事ができるが、この実験に用いた試料は



第4図 試料の粒度百分率加積曲線。横軸は対数目盛である。時間は sieving の時間(分)を表す。



第5図 確率紙上に画いた粒度百分率加積曲線 縦軸は確率目盛である。

第 3 表

Weight % Retained on Sieves
Sample wt. 100 gr, tapping

Weight Retained on Sieves
Sample wt. 100 gr, tapping

Time	Opening							Sum (gr)	Time	Opening						
	0.075 mm pass (gr)	0.075 mm on (gr)	0.110 mm on (gr)	0.149 mm on (gr)	0.250 mm on (gr)	0.400 mm on (gr)	0.075 mm pass (%)			0.075 mm on (%)	0.110 mm on (%)	0.149 mm on (%)	0.250 mm on (%)	0.400 mm on (%)		
0.2 min.	0.100	0.100	1.03	15.4	72.2	10.2	99.00	0.2 min.	0.102	0.101	1.01	15.5	72.8	10.30		
0.5	0.100	0.100	1.25	18.7	71.0	7.9	99.00	0.5	0.102	0.101	1.21	18.9	71.6	7.98		
0.7	0.150	0.100	1.25	19.6	70.9	6.8	98.80	0.7	0.152	0.101	1.26	19.8	71.5	6.87		
1	0.180	0.130	1.30	20.5	70.3	6.5	98.91	1	0.182	0.131	1.31	20.7	71.0	6.56		
2	0.200	0.150	1.42	21.6	69.3	6.3	98.97	2	0.202	0.151	1.43	21.8	70.0	6.36		
3	0.220	0.170	1.50	22.1	68.8	6.0	98.79	3	0.222	0.172	1.51	22.3	69.4	6.06		
4	0.240	0.190	1.60	22.7	68.5	5.8	99.03	4	0.242	0.192	1.62	22.9	69.2	5.86		
5	0.250	0.200	1.68	23.1	68.1	5.7	99.03	5	0.252	0.202	1.70	23.3	68.7	5.76		
7	0.260	0.210	1.70	24.0	67.2	5.6	98.97	7	0.262	0.212	1.72	24.2	67.8	5.65		
9	0.290	0.220	1.75	24.5	66.8	5.5	99.06	9	0.292	0.222	1.77	24.7	67.4	5.56		
10	0.300	0.220	1.80	24.7	66.8	5.4	99.22	10	0.302	0.222	1.82	24.9	67.4	5.46		
14	0.320	0.230	1.90	25.3	66.1	5.35	99.20	14	0.322	0.232	1.92	25.5	66.6	5.40		
16	0.330	0.230	1.95	25.4	65.9	5.30	99.11	16	0.332	0.232	1.97	25.6	66.5	5.35		
29	---	---	---	---	---	---	---	29	---	---	---	---	---	---		
30	0.350	0.250	2.40	26.0	65.1	5.20	99.30	30	0.352	0.252	2.42	26.2	65.7	5.25		
59	---	---	---	---	---	---	---	59	---	---	---	---	---	---		
60	0.380	0.260	2.50	27.1	64.0	5.00	99.24	60	0.382	0.262	2.52	27.4	64.6	5.05		
119	---	---	---	---	---	---	---	119	---	---	---	---	---	---		
120	0.380	0.270	3.00	27.7	63.0	4.90	99.25	120	0.383	0.272	3.02	29.7	63.5	4.95		

Weight % retained on Sieves Sample wt 300 gr, tapping		Opening						
Time	0.075 mm pass (%)	0.075 mm on (%)	0.110 mm on (%)	0.149 mm on (%)	0.250 mm on (%)	0.400 mm on (%)	0.400 mm on (%)	
0.5 min.	0.740	0.100	1.24	14.0	73.9	10.25		
1	0.181	0.100	1.37	17.3	72.0	8.70		
3	0.184	0.107	1.54	19.8	70.5	7.42		
5	0.191	0.110	1.67	20.3	70.0	7.02		
10	0.200	0.134	1.77	22.2	68.7	6.55		
20	0.220	0.151	1.87	23.7	68.4	6.15		
30	0.234	0.157	1.97	24.2	67.2	5.95		
60	0.234	0.167	2.17	25.0	66.2	5.71		

Weight % retained on Sieves Sample wt 200 gr, tapping		Opening						
Time	0.075 mm pass (gr)	0.075 mm on (gr)	0.110 mm on (gr)	0.149 mm on (gr)	0.250 mm on (gr)	0.400 mm on (gr)	um (gr)	
0.5 min.	0.52	0.30	3.7	42.0	221.5	30.7	298.72	
1	0.54	0.30	4.1	51.6	215.6	26.0	298.14	
3	0.55	0.32	4.6	59.2	211.1	22.2	297.97	
5	0.57	0.33	5.0	61.9	209.7	21.0	293.50	
10	0.60	0.40	5.3	66.5	205.8	19.6	293.20	
20	0.66	0.45	5.6	70.2	202.7	18.4	293.01	
30	0.70	0.47	5.9	72.3	201.0	17.8	298.17	
60	0.70	0.50	6.5	74.7	198.3	17.1	297.80	

Weight % retained on Sieves Sample wt 200 gr, tapping		Opening						
Time	0.075 mm pass (gr)	0.075 mm on (gr)	0.110 mm on (gr)	0.149 mm on (gr)	0.250 mm on (gr)	0.400 mm on (gr)	um (gr)	
0.5	0.35	0.22	2.3	31.7	144.5	19.9	198.97	
1	0.37	0.20	2.6	37.2	142.2	16.3	198.87	
3	0.39	0.22	3.2	43.2	137.8	14.4	199.21	
5	0.40	0.22	3.5	46.2	135.5	13.4	199.22	
10	0.43	0.25	3.8	48.9	133.2	12.6	199.18	
20	0.48	0.30	4.1	51.2	131.0	12.1	199.18	
30	0.49	0.32	4.4	52.5	129.6	11.7	199.01	
60	0.50	0.35	5.1	54.9	127.5	11.4	199.75	

Weight retained on Sieves		Weight % retained on Sieves													
Sample wt 100 gr, no tapping		Sample wt 100 gr, no tapping													
Time	0.075 mm pass (gr)	Opening								Time	0.075 mm pass (%)	0.075 mm on (%)	0.110 mm on (%)	0.250 mm on (%)	0.400 mm on (%)
		0.075 mm on (gr)	0.110 mm on (gr)	0.149 mm on (gr)	0.250 mm on (gr)	0.400 mm on (gr)	0.075 mm on (%)	0.075 mm on (%)	0.110 mm on (%)						
0.2 min.	0.050	0.050	0.80	14.0	71.7	12.5	99.10	0.2 min.	0.050	0.050	0.81	14.1	72.4	12.60	
0.5	0.100	0.100	16.5	72.0	9.7	99.35	0.5	0.101	0.101	0.95	16.6	72.6	9.80		
0.7	0.170	0.120	18.1	71.6	8.4	99.59	0.7	0.171	0.121	1.21	18.2	72.0	8.50		
1	0.170	0.120	19.0	70.8	8.3	99.61	1	0.171	0.121	1.23	19.1	71.2	8.35		
2	0.170	0.130	20.5	69.8	7.5	99.49	2	0.171	0.131	1.31	20.6	70.0	7.55		
3	0.170	0.130	21.3	69.3	7.3	99.52	3	0.171	0.131	1.33	21.4	69.6	7.35		
4	0.170	0.130	21.8	69.0	7.2	99.62	4	0.171	0.131	1.34	21.9	69.3	7.25		
5	0.180	0.140	22.0	68.7	7.0	99.37	5	0.181	0.141	1.36	22.1	69.0	7.05		
7	0.190	0.150	22.3	68.2	6.8	99.19	7	0.192	0.151	1.53	22.5	68.7	6.85		
9	0.200	0.170	22.7	68.0	6.7	99.37	9	0.201	0.171	1.61	22.8	68.4	6.75		
10	0.200	0.180	22.9	67.8	6.5	99.28	10	0.201	0.181	1.71	23.1	68.3	6.55		
14	0.210	0.190	23.1	67.6	6.4	99.28	14	0.212	0.191	1.79	23.2	68.1	6.45		
16	0.220	0.190	23.2	67.5	6.3	99.30	16	0.222	0.191	1.81	23.4	68.0	6.35		
29	0.220	0.210	23.6	67.0	6.2	99.48	29	0.222	0.211	2.26	23.7	67.5	6.23		
30	0.230	0.210	23.6	66.8	6.15	99.27	30	0.232	0.212	2.30	23.8	67.3	6.20		
59	0.230	0.210	24.9	65.6	5.90	99.44	59	0.232	0.212	2.62	25.0	67.2	5.93		
60	0.230	0.210	24.9	65.6	5.70	99.44	60	0.232	0.212	2.62	25.0	67.2	5.93		
119	—	—	—	—	—	—	119	—	—	—	—	—	—	—	
120	0.230	0.210	25.6	64.5	5.80	99.29	120	0.232	0.212	2.97	25.8	65.0	5.83		
179	—	—	—	—	—	—	179	—	—	—	—	—	—	—	
180	0.250	0.220	25.8	64.1	5.60	99.27	180	0.252	0.222	3.32	26.0	64.4	5.63		

Weight retained on Sieves Sample wt. 300 gr, no tapping		Opening						
Time	0.075 mm pass (gr)	0.075 mm on (gr)	0.110 mm on (gr)	0.149 mm on (gr)	0.250 mm on (gr)	0.400 mm on (gr)	Sum (gr)	
0.5 min.	0.47	0.35	3.7	41.3	223.0	30.5	299.32	
1	0.60	0.47	4.1	47.2	220.5	26.4	299.27	
2	0.62	0.50	4.4	52.1	218.7	23.2	299.52	
3	0.68	0.52	4.7	54.7	216.5	22.0	299.10	
4	0.70	0.52	4.7	56.2	215.9	20.9	298.92	
5	0.70	0.50	4.9	57.3	215.5	20.4	299.30	
7	0.72	0.65	5.0	59.0	213.7	19.7	298.77	
9	0.75	0.52	5.1	60.1	212.9	19.5	298.87	
10	0.76	0.60	5.3	60.9	212.4	19.3	299.26	
14	0.77	0.60	5.6	61.8	211.3	19.0	299.07	
16	0.80	0.60	5.6	62.8	210.8	18.7	299.00	
29	0.83	0.60	6.2	64.7	208.5	18.2	299.03	
30	0.85	0.60	6.2	64.9	208.4	18.0	298.95	
59	0.90	0.62	6.5	66.4	206.9	17.5	298.92	
60	0.90	0.63	6.6	66.5	206.9	17.3	298.83	
119	0.91	0.64	7.8	67.8	205.2	16.8	299.15	
120	0.91	0.64	7.9	67.9	205.0	16.7	299.05	
179	0.98	0.69	8.0	69.2	203.8	16.3	298.97	
180	0.98	0.70	8.05	69.2	203.8	16.3	299.03	
299	1.10	0.71	9.00	73.1	199.2	15.8	299.01	
300	1.00	0.71	9.05	73.1	199.2	15.8	298.96	

Weight % retained on Sieves Sample wt. 300 gr, no tapping		Opening						
Time	0.075 mm pass (%)	0.075 mm on (%)	0.110 mm on (%)	0.149 mm on (%)	0.250 mm on (%)	0.400 mm on (%)	Sum (%)	
0.5 min.	0.157	0.117	1.24	13.8	74.7	10.40		
1	0.200	0.157	1.37	15.8	73.5	8.81		
2	0.207	0.167	1.47	17.4	73.0	7.75		
3	0.227	0.174	1.57	18.3	72.4	7.35		
4	0.234	0.174	1.57	18.8	72.1	6.99		
5	0.234	0.163	1.64	19.2	72.0	6.82		
7	0.240	0.217	1.67	19.7	71.2	6.58		
9	0.250	0.147	1.70	20.0	71.1	6.52		
10	0.254	0.200	1.77	20.3	70.9	6.45		
14	0.257	0.200	1.87	20.6	70.6	6.35		
16	0.267	0.200	1.87	20.8	70.4	6.25		
29	0.278	0.200	2.07	21.6	69.7	6.08		
30	0.284	0.200	2.07	21.7	69.6	6.01		
59	0.300	0.207	2.20	22.2	69.0	5.85		
60	0.300	0.210	2.20	22.3	69.0	5.77		
119	0.304	0.214	2.60	22.6	68.5	5.60		
120	0.304	0.214	2.64	22.7	68.4	5.57		
179	0.328	0.231	2.68	23.2	68.0	5.45		
180	0.328	0.234	2.69	23.2	68.0	5.45		
299	0.368	0.238	3.10	24.4	66.5	5.28		
300	0.368	0.238	3.20	24.4	66.5	5.28		

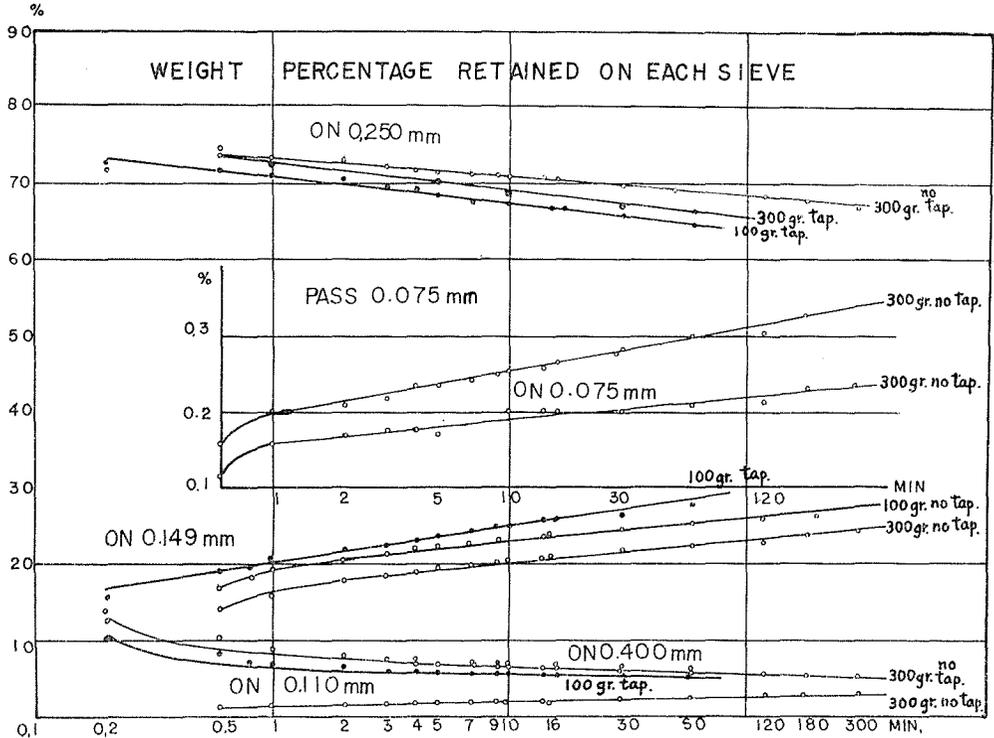
対数正規分布にはやや遠い分布であることが判る。この図でも時間によつて曲線が左にはほぼ平行に移動して行くことが知られる。

時間と共に sieving の進行していく状態は上述のようにかなりの時間を費しても一定の状態にはならない。したがつて実用上には一般に 1 分間に各フルイを通過する量がある限界値 (又は限界の percentage) 以下になつ時を以て sieving 終了の時刻と定義されている。これは厳密には粒度やその分布自体に定義を下している事に他ならないが試料間の比較を行う際とか厳密な結果を要求しない時には差支えない。

sieving の時間的推移を tapping や試料の重量の効果も加えてさらにくわしく調べるために再び次の実験を行つた。

後述のように試料によつては長時間の sieving によつて粒子が破壊されて粒度が小さくなることがある。それを避けるため前の実験試料のうち 180 分の sieving で破壊がなかつたと思われる試料を選び (これを試料 No. 5 と称する) この試料一つについて 12 秒から 5 時間の間を 21 回に区切つて残留量と時間の関係を調べた。

各時間に於けるフルイ上の残留量の秤量は出来るだけ sieving の過程を乱さないように行う必要がある。例えばフルイの目は次第に粒子によつてつまつていくので (jamming) 途中のある時間の残留量を測定する時に別の容器に粒子を移して秤量すると jamming の状態を変える



第 6 図 試料 No. 5 の各フルイ残留量と時間の関係

おそれがある。そのために測定に際してはフルイごと秤量し後でフルイの重量を差引くという方法をとった。このようにして試料 No.5 について行つた結果は第3表に掲げる通りである。さらに図示すると第6図に示すようになる。この図は縦軸にフルイ上の残留量の、もとの試料重量に対する percentage を等分目盛で表わし横軸に時間を対数目盛で示してある。

前述の実験結果と同様に残留量の時間的变化の割合は sieving の時間が1分から300分までの間ではほぼ直線的である。即ちこの範囲で残留量の percentage を y , 時間を x で表すと各フルイ共

$$y = a + b \log x$$

なる式で表現することが出来る。

12秒から1分までの間は各フルイ共かなり急激な変化を示し、この部分では上述の直線性があてはまらない。1分以上の直線性を有する部分をさらに調べてみると tapping を加えた場合と加えぬ場合とで勾配が異なる事が見出される。例えば上から第2段目のフルイ (0.250 mm) では試料重量 300 gr と 100 gr との両方共 tapping を加えたときの直線の勾配は -4.0 で tapping を加えないときは共に -2.5 である。このようにフルイの振動方式を変えると勾配は変化するが、振動方式を一定にしておけば試料の重量によつては殆んど変わらず平行な直線となる。しかし試料の重量が 300 gr と 100 gr とでは同じ振動方式の場合今述べたように二つの直線は平行にはなるが、合致はしない。このくいちがいは sieving の1分以内でおこりその差は1分後は一定に保たれて上記のように平行に推移する。今第2段 (0.250 mm) のフルイについての直線は

試料	300 gr	no tapping	$y = 73.5 - 2.5 \log_{10} x$
〃	100 gr	no tapping	$y = 70.5 - 2.5 \log_{10} x$
〃	300 gr	tapping	$y = 73.0 - 4.0 \log_{10} x$
〃	100 gr	tapping	$y = 71.0 - 4.0 \log_{10} x$

で表わされる。ここに y はフルイ上の残留量の試料全量に対する percentage, x は時間で単位は分である。

これによると1分目に於けるフルイ上の残留 percentage は試料 100 gr の方が少ない事を示している。即ち試料 100 gr の方が 300 gr よりも最初の1分間で通過する割合が大きい。要するに 100 gr の方が 300 gr よりも早く sieving が進行するが試料の多い少ないはこのように最初の1分間の通過率に関係し1分後はどちらも似たような傾向をたどることになる。

つぎに tapping の有無による相違を調べてみる。tapping の主な効果はフルイの目につまつた粒子をはじき出して jamming を減少しフルイの有効通過面積の低下を防ぐ事である。従つて tapping を行う場合は一般に粒子の通過率が高くなる。しかし jamming をおこす粒子はフルイの目と同程度の大きさの粒子であるから、試料の粒度分布がフルイの目と同程度の粒径附近に極大点を持つようなときは jamming の効果が大きくなり逆にフルイの目と同程度の粒

子が少ないような分布のものはその効果は少ない。tapping は jamming の多い場合に大きな効果を発揮するから試料の粒度分布とフルイの目の大きさとの組合わせによつて tapping の効果に開きを生ずるであろう。

その他 tapping はフルイ上の粒子の混合作用に影響するから jamming のない場合でも通過率にかなり影響を与えるであろう。第 6 図に示したような tapping の有無による直線の勾配の差は上記の二つの事情によつて生ずるものと思われる。ここに使用した試料は、中央粒径が 0.29 mm 附近であるので第 2 段 (0.250 mm) では jamming が目立ち、それから下段にも影響を与えている。第 2 段では明らかに tapping によつて粒子の通過率がよくなつており、直線の勾配が急である。

Sieving の終了時刻は単独のフルイでは毎分の通過量の percentage がある限界値に達する時間を以て定めている事が多い。例えば Taggart の text-book によれば最初の試料の重量に対して 1 分間の通過重量が 0.05% に達する時間を以て終了時刻としている。

今このように通過率が 0.05% に達する時刻を第 1 段 (0.40 mm) のフルイの残留量から計算してみる。

$$y = a + b \log_{10} x$$

であるから 1 分間の通過量 y' は

$$y' = \frac{b \log_{10} e}{x} = 0.4343 \frac{b}{x}$$

故に $y' = 0.05\%/min.$ の時刻 x は

$$x = \frac{0.4343}{0.05} b = 8.686 b$$

となる。これを用いて通過率が 0.05%/min. になる時刻を計算すると 0.40 mm のフルイでは

試料	300 gr	tapping	13 分
〃	300 gr	no tapping	14 分
〃	100 gr	tapping	13 分
〃	100 gr	no tapping	14 分

という結果を得た (第 4 表参照)。Shergold によると試料 40~150 gr の範囲では 9 分以上を必要としないと述べているが²⁾ 上記の値よりやや小さい。Shergold の限界通過率は 0.05%/min. よりやや大きい値を採用していると思われる。

つぎに以上の実験から sieving の開始後 1 分目に於ける第 1 段 (0.40 mm) のフルイ上残留量の percentage を大きいものから記すと

試料	300 gr (no tap.)	100 gr (no tap.)	200 gr (tap.)	300 gr (tap.)	100 gr (tap.)
残留量	8.81%	8.35%	8.19%	7.76%	6.56%

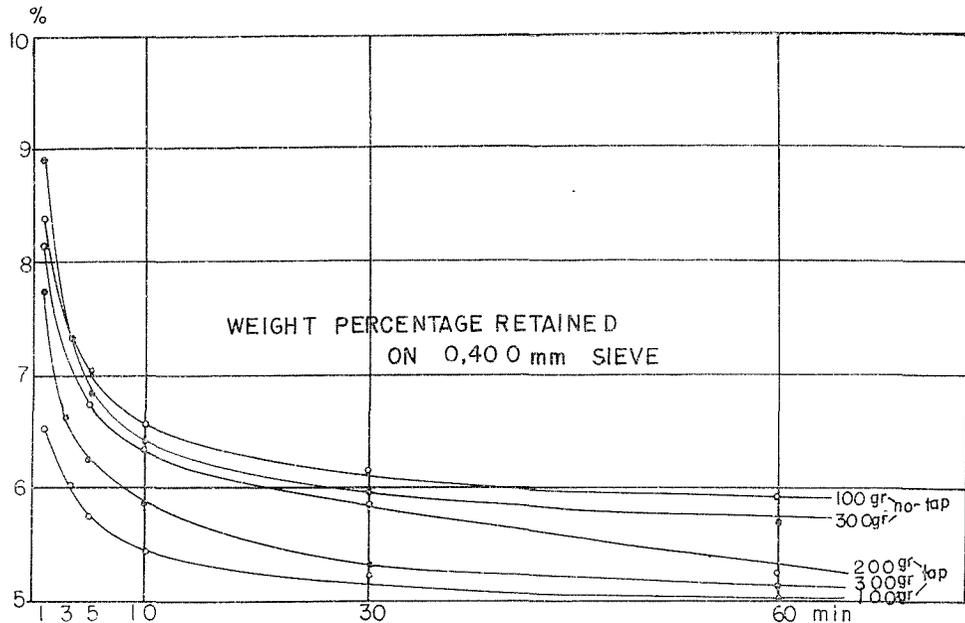
となり 1 分目では試料 100 gr を tapping を加えて処理したものが最も進行が早い。つぎに 60 分目における同じものを記すと

試料	100 gr (no tap.)	300 gr (no tap.)	200 gr (tap.)	300 gr (tap.)	100 gr (tap.)
残留量	5.93%	5.77%	5.23%	5.11%	5.05%

となつて同じく 100 gr の tapping を加えたものが最も早い。その他 tapping を加えたものが加えない場合よりもいずれも進行が早いことを示している。

第 4 表

Sieve Opening	Sample wt.	Sieving rotation and tapping	Equation y : % retained x : time in min.	Time 0.05% passing per min.
on 0.400 mm	300 gr	r and t	$y = 8.7 - 1.5 \log_{10} x$	$x = 13$ min.
		r	$y = 8.0 - 1.6 \log_{10} x$	$x = 14$ "
	100 gr	r, t	$y = 7.0 - 1.5 \log_{10} x$	$x = 13$ "
		r	$y = 8.6 - 1.6 \log_{10} x$	$x = 14$ "
on 0.250 mm	300 gr	r, t	$y = 73.5 - 4.0 \log_{10} x$	
		r	$y = 73.5 - 2.5 \log_{10} x$	
	100 gr	r, t	$y = 71.0 - 4.0 \log_{10} x$	
		r	$y = 70.5 - 2.5 \log_{10} x$	
on 0.149 mm	300 gr	r, t	$y = 17.0 + 4.0 \log_{10} x$	
		r	$y = 15.5 + 3.1 \log_{10} x$	
	100 gr	r, t	$y = 20.0 + 4.0 \log_{10} x$	
		r	$y = 18.5 + 1.9 \log_{10} x$	
on 0.110 mm	300 gr	r, t	$y = 1.40 + 0.49 \log_{10} x$	
		r	$y = 1.37 + 0.40 \log_{10} x$	
	100 gr	r, t	$y = 1.31 + 0.50 \log_{10} x$	
		r	$y = 1.23 + 0.50 \log_{10} x$	
on 0.075 mm	300 gr	r, t	$y = 0.30 + 0.04 \log_{10} x$	
		r	$y = 0.20 + 0.05 \log_{10} x$	
	100 gr	r, t	$y = 0.13 + 0.09 \log_{10} x$	
		r	$y = 0.12 + 0.06 \log_{10} x$	
pass 0.075 mm	300 gr	r, t	$y = 0.20 + 0.03 \log_{10} x$	
		r	$y = 0.157 + 0.05 \log_{10} x$	
	100 gr	r, t	$y = 0.182 + 0.120 \log_{10} x$	
		r	$y = 0.17 + 0.08 \log_{10} x$	



第7図 試料 No. 5 について 0.40 mm フルイ上の残留量 percentage と時間の関係を縦横両軸共等分目盛で画いたもの。3分のところで no tapping の 300 gr と 100 gr の曲線が交差する。

又 tapping のない場合 300 gr と 100 gr とでは 1 分目では 100 gr の方が早く残留量が減少し 60 分目では逆に 300 gr の方が早く減少しているのが注目される (第7図参照)。

先に述べた限界通過率 0.05%/min. を以て sieving 終了の時とする方法の是非はあらためて検討の余地がある。例えば 300 gr と 100 gr とでは、同一の振動方式では 1 分目の残留量の percentage は 100 gr の方が低いと 1 分目以後は両者の変化する割合を表わす直線の勾配が等しい事から、ある限界通過率に達する時間は両者とも等しい筈である。しかしその時刻では残留量は当然 100 gr の方が少ないから粒度分布を調べる場合に 100 gr の方が粒径が小さく測定されることになる。故に限界通過率は厳密には試料の重量によつて少し変える必要がある。

その他長時間の sieving の後には粒子の性質によつては破壊されるものがあつて粒度分布をわずかに変えることがあり、それについては尚実験中であるが大體 180 分頃から破壊作用が認められるようである。

この節の結果を要約すると、一般に tapping を行なつた方が sieving の進行が早いがこの効果は試料の粒度分布とフルイの目の大きさとの組合せによつて左右されること、試料は 100 gr で tapping を加えたものが最も進行が早いこと、sieving 開始 1 分後から先は残留量の変化の割合は時間の対数値に対し直線的であること、試料の多少は開始後 1 分目の残留量に差を生じしめ 1 分以後はその差がほぼ一定に保たれること、sieving の終了時間は限界通過率を 0.05%/min. にとると 0.40 mm のフルイではこの場合の試料では 13~14 分を要すること、限界通過率から終了時間を決めることにはさらに検討を要すること等を結論することができる。

3. sieving の機構の考察

ここでは簡単に一つのフルイによる sieving の機構を取り扱って今後の研究方針の決定に役立てたいと思う。

今簡単のためにフルイの目は均一であると仮定し、 r を粒径、時間を t で表わす。sieving 開始後 t なる時刻のフルイ上の粒径分布を $f(r, t)$ で表わすと $f(r, 0)$ は試料の粒度分布であり、 t なる時刻のフルイ上の残留量 $W(t)$ は

$$W(t) = \int_0^{\infty} f(r, t) dr$$

で表わされる。

つぎにフルイの目の開きを r_0 とすると、 r なる粒子がフルイ上で振動かくはんされてフルイの目に達した時に下に落下する確率を $P(r)$ とすると

$$\begin{cases} \lim_{r \rightarrow 0^+ r_0} P(r) = +0 & (\text{単調減少}) \quad r < r_0 \\ P(r) = 0 & r \geq r_0 \end{cases}$$

と考えることが出来る。さらに粒子の運動機構に対してつぎの仮定を設ける。

「しんとうによつて砂粒は常に一様に混合されている。又単位時間にフルイの目につかる量 M' は一定、即ちどの粒子もフルイの目につかる機会が均等である」

以上の仮定の下では単位時間にフルイの目につかる量と、その時刻にフルイ上にある全量との比を k とすると

$$\int_0^{\infty} k f(r, t) dr = k W(t) = M' \quad (\text{一定})$$

即ち

$$k = \frac{M'}{W(t)}$$

でなければならない。

又 jamming によつて時間的にフルイの目の有効面積 $A(t)$ は減少するから、sieving の dt なる時間の間の過程で次式が成り立つ

$$\begin{aligned} \frac{A(t)}{A(0)} \frac{M' dt}{W(t)} f(r, t) P(r) &= f(r, t) - f(r, t+dt) \doteq -f'(r, t) dt \\ \therefore \frac{f'(r, t)}{f(r, t)} &= -\frac{A(t)}{A(0)} \frac{M'}{W(t)} P(r) \\ \therefore f(r, t) &= f(r, 0) \exp \left\{ -\frac{M'}{A(0)} P(r) \int_0^t \frac{A(t)}{W(t)} dt \right\} \end{aligned}$$

を得る。

Fagerholt は $A(t)$, $W(t)$ も共に一定で $P(r)$ が $(r_0 - r)^2$ に比例するとして取扱っているが³⁾,

問題は上式に示したようにさらに複雑である。ここに $A(t)$ は又粒度分布と r_0 に関係して来るであろう。

上の式から判るように sieving の機構を究明するには今後振動によるフルイ中の砂粒の交換状態 (M), jamming と粒度分布や時間の関係 $\{A(t)\}$, 粒子の落下確率 $P(r)$ 等について立ち入って研究が進められなければならない。

以上の他に序文にも述べたようにフルイの目の分散, 粒子の形状, 湿度や含有水分による影響をも取り上げて行く必要がある。

この研究には終始, 福島久雄教授の御激励と理学第一研究室員の熱心な討論があつた。ここに深く感謝の意を表す。

又選鉱学研究室高桑教授の有益な御教示に対しあわせて感謝申し上げるものである。

文 献

- 1) British Journal of Applied Physics, Supplement No. 3, 1954, p. s187.
- 2) Cadle, R. D.: Particle Size Determination, Interscience Pub., New York, 1955, p. 175.
- 3) DallaValle, J. M.: Micromeritics, 2nd Edition, Pitman Pub. Corp., New York, 1948, p. 110.