報 文

遠心力による粒子汚れの除去 (第3報)^{注1)}
除去力の方向性

岩崎 芳枝・李 相姫・矢部 章彦

*郡山女子大学 (〒963 郡山市開成 3-25-2)

**東京学芸大学 (〒184 小金井市貫井北町 4-1-1)

***文化女子大学 (〒151 東京都渋谷区代々木 3-22-1)

Detachment of Solid Particulate Soils by Centrifugal Force. III.
Properties of Direction for Removal Force

Yoshie IWASAKI*, LEE Sang-Hee**, and Akihiko YABE***

*Koriyama Womens College (3-25-2, Kaisei, Koriyama-shi, Fukushima-ken, 〒963)

**Tokyogakugei University (4-1-1, Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo, 〒184)

***Bunka Womens University (3-22-1, Yoyogi, Shibuya-ku, Tokyo, 〒151)

The following results were obtained using an ultracentrifuge provided with a rotor of adjustable angle for removing polystyrene-latex particles adhering to a glass substrate. The direction of the removing force could be varied widely by adjusting the rotor angle θ between 0° and 60° . The ratio of the vertical component F_v to the horizontal component F_h was varied from 1:0 to 1:1.73 by adjusting this angle. The surface on which the particles adhered was turned between the direction of the centrifugal force F_c and the vertical direction of that of by the centrifugal force (angles θ' of the surface with centrifugal force were $0\sim60^\circ$ and $180\sim240^\circ$).

1) The less the contribution of F_v to the constant F_h , the greater was the extent of removal. Removal was maximum at $F_v=0$ or when the resultant centrifugal force $F_c=F_h$. Also, the greater the contribution of F_h to the constant F_c , the more was the extent of removal.

2) F_v acted negatively for particle removal when the surface had been turned to the direction pressed by centrifugal force. In such a case at constant F_c , removal decreased with increase in washing time. Adjusting θ' (θ) so as to turn the surface in the direction vertical to that of the centrifugal force increased removal. That is the contribution of F_v decreased than the direction of centrifugal force, and removal increased at $F_v>F_h$ when its force was small. Removal in the former case was about 20% less than in the latter at $F_c=F_h$ even without any contribution of F_v .

1 緒 言

著者らは、洗浄における機械エネルギーの寄与を定量的に明らかにすることを目的として、固体粒子汚れの除去に関して流体力^{1)~3)}及び遠心力⁴⁾を用いて研究を行い、同一の系を洗浄した場合、流体力の方が遠心力よりはるかに小さな力で粒子を除去できることを確かめている。

遠心力洗浄では、超高速遠心機を用い、基準として

30° の傾きをもつ角度型ロータを使用し、遠心力を基質表面に対して水平方向と垂直方向に分力して洗浄した。さらに、ロータに装着する基質ホルダーを工夫して基質表面を傾斜させることにより、ロータを変えることなく、幅広く水平分力と垂直分力の寄与を変えて実験を行った。その結果、同一の除去力を加えても、その方向により、粒子除去率が異なることが明らかとなった。

すなわち、第1報⁴⁾ではポリスチレンラテックス粒子-ガラス基質の系について、遠心機の回転軸に対する粒子付着面の角度(θ)を $20\sim40^\circ$ に変えて実験し、一定の遠心力が与えられた場合、水平分力の寄与が大きくな

注1) 前報: 1報 油化学, 36, 254 (1987),

2報 油化学, 39, 654 (1990)

るほど除去率が増し、垂直分力の寄与が大きいほど除去率が減少することを明らかにした。

第2報⁵⁾ではガラス粒子-ガラス基質の系について、 θ を15~45°と、さらに広範囲に変えて実験し、第1報でのポリスチレンラテックス粒子-ガラス基質において認められた粒子除去に対する水平分力及び垂直分力の寄与に関する結果が、この系にも成立することを明らかにした。また、一定の水平分力が与えられるように、各 θ ごとに回転数を変えて洗浄し、それぞれの垂直分力と除去率との関係を検討した。この場合、一定の水平分力に対して垂直分力の寄与が少ないほど除去率が増大し、両者間に直線関係が認められたので、外挿値から垂直分力が0、すなわち、水平分力のみが与えられる時の除去率を推定したところ、最大となることがわかった。このことから遠心力洗浄より層流洗浄の方が、はるかに小さな力で同じ除去率が得られることについての、解明の手掛かりを得ることができた。

本報では、ポリスチレンラテックス粒子-ガラス基質の系について、粒子付着面を従来行ってきた方向と逆に、遠心力が圧着する方向に向け、 θ を0~60°、180~240°として洗浄し、第2報で推定した水平分力のみが与えられた時の除去率を直接に測定して、水平分力と垂直分力とのかわりを、よりいっそう明確にすることができ、粒子汚れの除去力の方向性と除去率との関連について興味ある知見が得られたので報告する。

2 実験

2.1 試料

固体粒子及び基質は、第1報⁴⁾と同じポリスチレンラテックス粒子、ガラス基質を使用した。ポリスチレンラテックス粒子の粒子径は、5, 10, 15 μm のものを使用し

た(以下、それぞれ5 μm 粒子、10 μm 粒子、15 μm 粒子と略記する)。

2.2 洗浄装置

洗浄装置には、第1報⁴⁾・2報⁵⁾と同じ超高速遠心機(日立分離用超高速遠心機 MODEL 55 P-72), 角度型ロータ($\theta=30^\circ$), アダプター, 基準の基質ホルダー及びロータ角度調整用基質ホルダーを使用した。ロータ角度調整用基質ホルダーは、基質面が ϕ° 傾斜するようにしたもので、傾斜面を回転軸方向及び反対方向に向けると、 θ を ϕ° 増減することができる。従って $\theta=30^\circ$ の角度型ロータに15, 30°の傾斜をもつ基質ホルダーを用いることにより、 θ を0, 15, 30, 45, 60°に変化できる。

この場合、Fig.-1に示すように基質の粒子付着面を従来と同様に遠心機の回転軸と反対方向、すなわち遠心力方向に向ければ、粒子付着面は回転軸に対してロータ角度と同じだけ傾斜することになり、遠心力と粒子付着面との角度 θ' は θ° 、すなわち0, 15, 30, 45, 60°となる。また、粒子付着面を回転軸方向(遠心力に圧着される方向)に向けると、 θ' は $\theta+180^\circ$ 、すなわち180, 195, 210, 225, 240°となる。以下それぞれの θ については、図中の番号(position no.)で略記する。同番号、例えば、p-1, p-1'は同じ基質ホルダーを用いて、粒子付着面を前者はアダプターの底面側に向け(従前の方法)、後者は反対に水面側に向けている。

2.3 実験方法

2.3.1 基質及び粒子の調製, 付着方法

ガラス基質及びポリスチレンラテックス粒子の調製、粒子の付着方法は第1報⁴⁾のとおりである。

2.3.2 洗浄方法, 粒子除去率の算定法

洗浄方法及び粒子除去率の算定法は第1報のとおりである。洗浄はすべて蒸留水を用い、温度は20℃として

Fig.-1 Angle of substrate vs. centrifugal force (removal force).

Fig.-2 Effect of washing time on particle removal (p-3').

Fig.-3 Effect of washing time on particle removal (p-1').

Fig.-4 Effect of washing time on particle removal (p-1).

次の条件で行った。

洗浄時間	3, 5, 10, 30, 60 min
回転数	2,000, 5,000, 10,000, 20,000, 30,000, 40,000 rpm
θ'	0, 15, 30, 45, 60, 180, 195, 210, 225, 240° (position no. 1, 2, 3, 4, 5, 1', 2', 3', 4', 5')

3 結果及び考察

3-1 洗浄時間の影響

5, 10, 15 μm 粒子を, $\theta' = 210^\circ$ (p-3'), $\theta' = 180^\circ$ (p-1') 及び $\theta' = 0^\circ$ (p-1) について, 回転数を 5,000 及び 10,000 rpm とし, 洗浄時間 3~60 min, 温度 20°C で洗浄した。結果を Fig.-2, 3, 4 に示す。なお, p-3' に対応する p-3 については, 第 1 報で報告したが, 比較のため

Fig.-5 Effect of washing time on particle removal (p-3).

Fig.-6 Effect of vertical component F_v on substrate.

めに Fig.-5 に示す。いずれの場合も粒子径が大きい粒子ほど除去されやすい。

p-3', p-1' (粒子付着面上向き) と p-3, p-1 (粒子付着面向下向き) とでは、かなり異なる傾向が見られた。すなわち、前者では、3~5 min の洗浄で除去率が極大値を示し、その後、洗浄時間が増すとともに低下した (p-3', 5,000 rpm の場合には 30~60 min でやや上昇)。後者では 30 min までは洗浄時間とともに除去率が上昇し、その後ほぼ一定になった。

粒子付着面上向き、すなわち遠心力が粒子付着面を圧着する方向に加えられたときの、全遠心力 F_c 、水平分力 F_h 、垂直分力 F_v との関係を図 Fig.-6 に示す。 θ の角度で粒子に加えられた F_c は F_h と F_v とに分力される

が、 F_v は粒子を基質に圧着する力となり、粒子除去に対しては負の効果を与えることとなる。p-3' の場合、 F_h と F_v との比は 1 : 0.58 (Table-1) であり、この系では、 F_v は粒子を基質に押し付ける力として働くため、付着面積を増大させたり、一たん離脱した粒子が再び押し付けられるなどのため、除去率が低下するものと考えられる。洗浄の初期にはこの現象は明らかでなく、時間が長くなり、また、除去力が大きい場合に現れる。

p-1' と p-1 はともに F_h のみが働き、 F_v の寄与はないにもかかわらず、異なる挙動がみられた。

3.2 回転数の影響

洗浄時間の影響に関する実験において、5 μm 粒子と 10 μm 粒子は同じ傾向を示したので、回転数の影響は 5 及び 15 μm 粒子について p-3', p-1', p-3 及び p-1 を比較した。

回転数は、p-3', p-1' は、5,000~40,000 rpm、p-1 は 2,000~20,000 rpm とし、20°C、10 min 洗浄した。結果を図 Fig.-7 に示す。p-3 については、第 1 報⁴⁾で報告したが、比較のため Fig.-8 に示す。

いずれも、大粒子の方が除去率が高かった。p-3 では除去率と回転数間に直線関係が認められているが、p-3' では回転数が小さい範囲では直線関係がみられている。p-1' と p-1 は回転数の影響があまりみられなかった。

3.3 ロータ角度の影響

回転数 5,000, 10,000, 20,000, 30,000, 40,000 rpm について、ロータ角度 (遠心力と粒子付着面の角度 θ') を 180° (p-1'), 195° (p-2'), 210° (p-3'), 225° (p-4'), 240° (p-5') とし、20°C で 10 min 洗浄した。結果を図 Fig.-9 に示す。

前報^{4),5)}までの粒子付着面を下向き (p-2, p-3, p-4) にして洗浄した場合には、ロータ角度が大きくなるほど除去率が低下したが、粒子付着面を上向きにした今回の場合は異なる現象が認められた。

Fig.-7 Effect of rotation speed on particle removal (p-3', p-1', p-1).

Fig.-8 Effect of rotation speed on particle removal (p-3).

さしあたり以下のように考察した。

Table-1 に示すように、 $\theta' = 180^\circ$ では水平分力のみであり、ロータ角度が増すにつれて垂直分力の比が増し、 225° では両者が等しくなり、それ以上では垂直分力の比の方が大きくなる。前述したように、粒子付着面を遠心力が圧着する方向に向けると、垂直分力は粒子を基質に押し付ける力となる。従って、垂直分力が水平分力より大きくなり、その絶対値が大きい場合には、ポリスチレンのような弾性体では、弾性限界を越えて塑性変形を生じ、粒子付着面積が増大したままとなって除去率が低下する。しかし、垂直分力の絶対値があまり小さくなく、弾性変形の範囲内にある場合には、力が除かれる時に復元する力が加わり、除去率が增大するのではないかと考えている。

Table-1 Roter angle and $F_h : F_v$.

$\theta^\circ(\theta')$	180	195	210	225	240
$F_h : F_v$	1 : 0	1 : 0.27	1 : 0.58	1 : 1	1 : 1.73

Fig.-9 Effect of rotor angle on particle removal (particle diameter 5, 10, 15 μm).

すなわち、 $10 \mu\text{m}$ 粒子では 30,000 rpm 以上、 $15 \mu\text{m}$ 粒子では 20,000 rpm 以上で洗浄した場合には、角度が大きくなるにつれて除去率が低下したが、 $5 \mu\text{m}$ 粒子の全部、 $10 \mu\text{m}$ 粒子の 20,000 rpm 以下、 $15 \mu\text{m}$ 粒子の 10,000 rpm 以下では、除去率は 225° まで低下するが、 240° では上昇する傾向が見られた。

除去率が 225° まで低下し、 240° で上昇する傾向は小粒子や回転数の小さい場合、すなわち、除去力の小さい場合に見られるので、 $15 \mu\text{m}$ 粒子について 4,000 rpm で 3 min 洗浄してみたところ、Fig.-10 の結果がえられた。

すなわち Fig.-9 の場合より回転数を減じ、洗浄時間を短くしたところ、Fig.-9 の 5,000, 10,000 rpm よりさらに明らかに 240° で除去率が上昇した。この原因については、さらに詳細な実験により確かめる必要があるが、

Fig.-10 Effect of rotor angle on particle removal (particle diameter 15 μm).

3.4 一定水平分力に対する垂直分力、及び一定垂直分力に対する水平分力の寄与

粒子除去力すなわち全遠心力 F_c 、水平分力 F_h 、垂直分力 F_v の算出方法は前報^{4), 5)}のとおりである。

各粒子ごとに、 θ' を $0 \sim 60^\circ$ (p-1, p-2, p-3, p-4, p-5) 及び $180 \sim 240^\circ$ (p-1', p-2', p-3', p-4', p-5') に変化した場合の各回転数における F_h , F_v の関係をプロットした。15 μm 粒子について Fig.-11 に示す。

Fig.-11 Relationship between F_h and F_v (particle diameter 15 μm).

Table-2 F_v and rotation speed at constant F_h (particle diameter 15 μm).

θ° (position no.) (θ')	$F_h = 3 \times 10^{-9} \text{ N}$		$F_h = 10 \times 10^{-9} \text{ N}$		$F_h = 25 \times 10^{-9} \text{ N}$	
	F_v (10^{-9} N)	rpm	F_v (10^{-9} N)	rpm	F_v (10^{-9} N)	rpm
180 (p-1'), 0 (p-1)	0	6695	0	12226	0	19332
195 (p-2'), 15 (p-2)	0.80	6818	2.68	12452	6.70	19689
210 (p-3'), 30 (p-3)	1.73	7186	5.77	13130	14.4	20772
225 (p-4'), 45 (p-4)	3.00	7962	10.0	14539	25.0	22990
240 (p-5'), 60 (p-5)	5.17	9451	17.4	17260	43.1	27290

水平分力が $F_h = 25 \times 10^{-9} \text{ N}$ となる各角度における回転数と垂直分力との関係を、図中の横点線と傾斜との交点から求めた。また、 $F_v = 10 \times 10^{-9} \text{ N}$ となる各角度の回転数と水平分力との関係を、図中の縦点線と斜線との交点から求めた。他の一定水平分力、一定垂直分力の値を、予備実験の値から定めて、それぞれのロータ角度での回転数を算出し、洗浄した。一定 F_h について、各 θ における回転数と F_v の値を Table-2 に示す。他の粒子についても同様に行った。

p-1' ~ p-5' について、粒子除去における一定水平分力に対する垂直分力の寄与を Fig.-12 に、一定垂直分力に対する水平分力の寄与を Fig.-13 に示す。

水平分力を一定にした場合には、垂直分力の寄与が大きいほど除去率は低下し、垂直分力 0、すなわち、水平分力のみが働くときに除去率が最大となり、垂直分力と除去率間に直線関係が認められた。この傾向は前報⁵⁾ (p-2, p-3, p-4) のガラス粒子と同様である。

反対に垂直分力を一定にした場合には、水平分力の寄与が大きいほど除去率が増し、水平分力 0、すなわち、垂直分力のみが働く場合に最小となり、水平分力と除去率間に直線関係が認められた。しかし、一定にした垂直

Fig.-12 Contribution of F_v at constant F_h for particle removal (particle diameter 5, 10, 15 μm).

Fig.-13 Contribution of F_h at constant F_v for particle removal (particle diameter 5, 10, 15 μm).

Fig.-14 Contribution of F_v at constant F_h for particle removal (particle diameter 15 μm).

分力による除去率の差はあまり大きくなかった。この傾向は、前報³⁾で粒子付着面を遠心力方向に向けて、ガラス粒子を洗浄した場合と異なっている。これも、垂直分力による負の効果のためであろう。

一定水平分力の場合の傾向は、前報³⁾と同様であったので、15 μm 粒子のみ、p-1, p-2, p-3, p-4, p-5 について実験した。結果を p-1' ~ p-5' と比較し、Fig.-14 に示す。

両者とも、垂直分力の寄与が大きいほど除去率が減少する傾向は同じであったが、同一の水平分力が与えられているにもかかわらず、粒子付着面を遠心力が圧着する方向に向けたほうがいずれも除去率が低く、また、垂直分力の影響が大きかった。垂直分力の影響が大きい理由は前述したとおりと考えられる。しかし、 $\theta' = 0, 180^\circ$ では垂直分力の寄与はないにもかかわらず、粒子付着面が

上向き（洗液の水面方向）、下向き（アダプター底面方向）の違いにより、約 20% の除去率の差が認められた。

この一原因としては、基質上部の自由表面をもつ水が下部の水と全く通じないと仮定すれば、遠心力による上部の水の圧力が粒子を基質表面に圧着することが考えられるが、なお詳細に実験し、確認したい。前述した洗浄時間の影響の実験での p-1' と p-1 の挙動の相違も同様に考察され、上部の影響が時間が長くなるにつれて大きくなるものと考えられる。

$F_v = 0$ すなわち $F_v = F_h$ の除去力が加えられたときの除去力と除去率とを、各粒子について Table-3 に示す。 $\theta' = 180^\circ$ の場合、約 80% の除去率を与える除去力は、5 μm 粒子： 1.5×10^{-9} N, 10 μm 粒子： 1.5×10^{-9} N, 15 μm 粒子： 25×10^{-9} N であった。著者らは、粒子径の異なるガラス粒子 (4.0 ~ 28.0 μm) を層流洗浄した場合に、4.0 μm 粒子が他の粒子に比べて除去されにくく、大きな除去力を必要としたが、分子間力を考慮して粒子除去力を算出したところ、連続した値が得られ、微小粒子では分子間力の影響が大きいことを報告しているが³⁾、本研究で約 80% の除去率を与える除去力が 5 μm 粒子と 10 μm 粒子とが同じである理由についても同様に考えた。

著者らの研究のように洗浄の立場から、遠心力洗浄と層流洗浄とを対比する目的ではなく、金属粒子やガラス粒子の金属表面に対する付着力を測定するために行われたものであるが、粒子除去に関して、垂直方向より水平方向の力の方が有利であることは、Rumpf⁶⁾、Polke⁷⁾、John, Montgomery⁸⁾ らも認めており、さらに、John, Montgomery⁸⁾、Derjaguin, Zimon⁹⁾ らはロータ角度を広範囲に変えて遠心力洗浄を行い、粒子除去に対する除去力の方向性を指摘している。なお、著者らの用いたロータ角度を変化させるための基質ホルダーは上記の研究者たちとは全く異なる独自のものである。

Table-3 Removal percentage by F_h only ($F_e = F_h$).

Particle diameter(μm) θ° (θ')	15		10		5	
	Removal force (10^{-9} N)	Removal (%)	Removal force (10^{-9} N)	Removal (%)	Removal force (10^{-9} N)	Removal (%)
180	25	80	12	91	1.5	76
	10	76	6	89	0.7	64
	3	61	1.5	84	0.2	52
0	25	93				
	10	88				
	3	80				

これらの結果から、粒子-基質間の付着力を上回る除去力が増えられたときに、粒子が除去されるの考え方は、除去力の方向性を考慮に入れる必要のあることが明らかであり、付着している粒子の50%を除去するための除去力を直ちに粒子-基質間の付着力とする Visser¹⁰⁾らの考えは検討を要するものと考えられる。

結 論

ガラス基質に付着した粒子径 5, 10, 15 μm のポリスチレンラテックス粒子を、角度型ロータを装着した超高速遠心機を用い、ロータ角度 θ を $0 \sim 60^\circ$ として、水平分力 F_h と垂直分力 F_e の比を $1:0$ から $1:1.73$ と変えて洗浄した。さらに粒子付着面を遠心力 F_e の方向及び遠心力が圧着する方向に向けることにより、遠心力と粒子付着面の角度 θ' を $0 \sim 60^\circ$, $180 \sim 240^\circ$ として、除去力の方向を幅広く変えて洗浄し、次の結論を得た。

1) 一定の F_h に対する F_e の寄与が小さいほど、除去率が大きくなり、 $F_e=0$, すなわち、 $F_e=F_h$ の場合に最大となった。また、一定の F_e に対する F_h の寄与が大きいほど、除去率が大きくなった。これらの結果は、前報⁹⁾において、ガラス粒子-ガラス基質の系で認められたものと同じであった。

2) 粒子付着面を、遠心力が圧着する方向に向けた場合は、 F_e は粒子除去に対して負の影響を及ぼし、遠心力方向に向けた場合とは、異なる傾向がみられた。

すなわち、一定の F_e が与えられた場合、洗浄時間が長くなると除去率が低下した。また、 θ' (θ) を大きくして F_e の寄与が大きくなった場合の除去率の低下が、粒子付着面を遠心力に圧着する方向に向けた場合の方が、遠心力方向に向けた時より大きかった。この時、除

去力の値が小さいと、 $F_e > F_h$ となる点で除去率が上昇した。さらに、 $F_e = F_h$ の場合には F_e の寄与がないにもかかわらず、前者の除去率の方が約 20% 低かった。

3) $\theta' = 180^\circ$ の場合、約 80% の除去率を与える除去力 ($F_e = F_h$) は、5 μm 粒子: 1.5×10^{-9} N, 10 μm 粒子: 1.5×10^{-9} N, 15 μm 粒子: 25×10^{-9} N であった¹¹⁾。

本研究に対し、昭和 62・63 年度文部省科学研究費補助金（一般研究 C）の助成を受けた¹¹⁾。

〔平成 2 年 (1990 年) 3 月 26 日受理〕

文 献

- 1) 岩崎芳枝, 小林明子, 原田弥生, 矢部章彦, 油化学, **29**, 495 (1980)
- 2) 岩崎芳枝, 原田弥生, 小林明子, 矢部章彦, 油化学, **30**, 232 (1981)
- 3) Y. Iwasaki, Y. Hikage, A. Yabe, *Text. Res. J.*, **56**, 556 (1986)
- 4) 岩崎芳枝, 日影弥生, 矢部章彦, 油化学, **36**, 254 (1987)
- 5) 岩崎芳枝, 矢部章彦, 油化学, **39**, 654 (1990)
- 6) H. Rumpf, *Pharm. Ind.*, **34**, 270 (1972)
- 7) R. Polke, in *Proc. Conf. Phys. Adhesion*, R. Polke, P. Hohn, Eds., Karsruhe, (1969) p. 89; *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 1970, 3241
- 8) D.F. St. John, D.J. Montgomery, *J. Appl. Phys.*, **42**, 663 (1971)
- 9) B.V. Derjaguin, A.D. Zimon, *Colloid J. USSR*, **23**, 454 (1961)
- 10) J. Visser, "Surface and Colloid Science", Vol. 8, (1976) (Chapter 1), p.11
- 11) 矢部章彦, 昭和 62・63 年度文部省科学研究費補助金（一般研究 C）研究成果報告書 (1989)