

81
425

粉粒体輸送装置

日立製作所 狩野 武 著
工学博士



日刊工業新聞社

著 者 略 歴

狩 野 武^{たけし} 大正9年9月25日滋賀県に生まれる。
昭和16年 福井高等工業学校機械科卒業後、大阪大学工学
部研究生、彦根工業専門学校助教授、大阪大学工学部助手
を経て、昭和33年（株）日立製作所に入社し、噴霧に関す
る研究、空気による粉粒体の輸送についての研究に従事、
現在 同社川崎工場気体機部主任技師、工学博士。

粉粒体輸送装置

NDC 571

昭和44年6月30日 初版発行

定価 1900 円

© 著 者 狩 野 武

発 行 者 白 井 十 四 雄

発 行 所 日 刊 工 業 新 聞 社

東京都千代田区九段北一丁目8番10号

(郵便番号 102)

電 話 東 京 (263) 2 3 1 1 (大代表)

振 替 口 座 東 京 1 8 6 0 7 6



印 刷 所 新 日 本 印 刷 株 式 会 社

製 本 所 松 本 製 本 所

落丁・乱丁本はお取替いたします。

序 言

最近いろいろな製造工業において、粉粒体状の原料や製品を扱うことが多くなった。すなわち粉末や粒体状の原料を用い、これを製造工程中で運搬、粉碎、精鍊、加熱、反応、乾燥、冷却、調質、混合、分級あるいは造粒したり、粉粒体状の製品を包装、貯蔵あるいは輸送することが多い。

これらの製造工程で粉粒体を輸送する方法には一般にベルトコンベヤ、チェーンコンベヤ、バケットエレベータなどによるいわゆる機械的輸送と、空気による方法、すなわち空気輸送とがある。また鉱山などの特殊な方面では、水で石炭や鉱石を輸送する水力輸送も行なわれている。

これらの輸送装置の計画にあたっては諸条件をあわせ考え、合理的に所期の輸送目的を達成するように、まず最も適切な方式を選定することが必要である。

すなわち取扱う粉粒体の性状と、それぞれの場合の条件に対応して最もふさわしい輸送の方式を選定し、つづいてその方式が的確に目的を果すように容量と機器の構造を決め、設備全体が企業としての成績をあげるように慎重に計画を進めなければならない。

粉粒体の輸送装置の計画には、粉粒体の物理化学、機械工学、建築工学、土木工学、電気工学、衛生工学、労務管理、法規など多岐にわたっての専門知識と、それらを総合した計画技術が必要である。これらそれぞれの方面については多くの研究結果や専門技術書が紹介刊行されているが、実務にたずさわる技術者あるいは工場計画者が、それぞれの専門書をひもどいて、個々の知識を合せ集めて取りまとめるのは、實際上労力的にも時間的にも不可能に近いことである。

本書はこのような観点から、粉粒体を輸送する装置を計画する上に必要な基礎事項と、それらを総合した設計上の要点について概説し、各位のご参考に供することにする。

なお、この方面には日本国内出版のものだけでもつぎのような名著があり、著者も日々座右に置いて利用させていただいている。本書をまとめるにあたってもしいろいろ参考にさせていただき、図面、表の一部を利用した。それらはできるだけ出所を注記して、原著者に対する謝意とし、読者の参考の便を計ったが、中には失念したものもある。ここに深く

感謝とおわびを申し上げる次第である。

また、ご懇切なご指導を賜った恩師植松教授をはじめ諸先生方、会社の各位に衷心より感謝をささげる。

昭和 44 年 6 月

狩 野 武

〔参 考 書〕

- (1) 日本機械学会編：機械工学便覧（改訂第 5 版）（昭. 42）
- (2) 化学工学協会編：化学工学便覧（改訂 3 版）（昭. 43）丸善
- (3) 日本建築学会編：建築学便覧（第 3 版）（昭. 42）丸善
- (4) 植松ほか編：流体・固体輸送工学ハンドブック（昭. 42）朝倉書店
- (5) 上滝・西岡：粉粒体の空気輸送（昭. 36）日刊工業新聞社
- (6) 粉粒体供給装置委員会編：粉粒体の貯槽と供給装置（昭. 38）日刊工業新聞社
- (7) 井伊谷鋼一編著：集塵装置（昭. 38）日刊工業新聞社
- (8) 井伊谷鋼一編集：粉体工学ハンドブック（昭. 40）朝倉書店
- (9) 久保他共編：粉体理論と応用（昭. 37）丸善
- (10) 村山・大崎編集：基礎工学ハンドブック（昭. 39）朝倉書店
- (11) 粉体工学研究会編：粉体粒度測定法（昭. 40）養賢堂
- (12) 日本機械学会誌
- (13) 日本機械学会論文集
- (14) 粉体工学研究会誌
- (15) 化学工学
その他

目 次

序 言

1. 粉 粒 体 の 物 性

1.1 粒子径および粒子径分布	1
1.1.1 粒子径の定義	1
1.1.2 単一粒子径	2
1.1.3 平均粒子径	3
1.1.4 粒子の大きさと測定方法	4
1.1.5 実用的な粒子径算出方法	5
1.1.6 粒子分布の表示	10
1.1.7 ふ る い	11
1.2 密度と比重量	14
1.2.1 定 義	14
1.2.2 真密度の測定方法	15
1.2.3 かさ密度, かさ比重量	17
1.2.4 粉粒体の空間率	17
1.3 比表面積と形状係数, あらさ係数	19
1.4 粉粒体の水分	21
1.4.1 水分の含まれ方	21
1.4.2 水分量の表示	22
1.4.3 水分の測定方法	22
1.5 摩 擦 角	23
1.5.1 摩擦角の種類	23
1.5.2 安息角 ϕ_r	24
1.5.3 内部摩擦角 ϕ_i	27
1.5.4 壁面摩擦角 ϕ_w , すべり角 ϕ_s	28
1.6 付 着 性	30
1.6.1 付着性の原因	30
1.6.2 付着の基本的な力	31
1.6.3 付着力の測定方法	32
1.6.4 付着力の測定値例	33
1.6.5 H. Rumpf の管内壁における 微粉末の付着に関する研究	35
1.7 粉粒体粒子の破碎	38
1.7.1 破碎の仕方	38
1.7.2 破碎についての理論	40
1.8 粉じん爆発	44
1.8.1 粉じん爆発の機構と種類	44
1.8.2 粉じん爆発に関する諸性質	47
1.8.3 粉じん爆発の防止対策	52

2. 空 気 の 流 れ

2.1 空気の組成と物理的性質	55
2.1.1 空気の組成と諸数値	55
2.1.2 空気の比重量 γ_a , 比質量 ρ_a	56
2.1.3 標準空気	56
2.1.4 標準大気	56
2.1.5 空気の粘性係数 μ , 動粘性係数 ν	57
2.1.6 工学単位と絶対単位の関係	57
2.2 流量, 連続の理	58
2.2.1 流 量	58
2.2.2 連続の理	58
2.3 ベルヌーイ (Bernoulli) の定理	58
2.4 静圧と動圧	59
2.5 管内の圧力損失	59
2.5.1 円形断面の管	59
2.5.2 円形以外の断面を有する管	61
2.6 管路の圧力損失	62
2.6.1 管の出入口	62
2.6.2 管路の断面積が変わる場合	63
2.7 ベンドの圧力損失	64
2.8 ニルボの圧力損失	64
2.9 円管内の流れの速度分布	67
2.9.1 層流の場合	67
2.9.2 乱流の場合	67

3. 粉粒体輸送装置の種類と特徴

3.1 輸送装置の種類と比較	69
3.2 空気輸送装置の種類と一般的特徴	71
3.2.1 空気輸送装置の発展過程	71
3.2.2 空気輸送装置の種類	71
3.2.3 空気輸送装置の特徴	72
3.3 吸引式空気輸送装置	74
3.4 圧送式空気輸送装置	76
3.5 Gattys 空気輸送装置	78

4. 空気輸送の理論と研究

4.1 概 説	81
---------	----

4.2 粒子の終速度と浮遊速度	82
4.2.1 定義と計算式	82
4.2.2 終速度の簡易計算法	86
4.3 まっすぐな短い輸送管中の圧力損失	87
4.3.1 圧力損失の表示式	87
4.3.2 次元解析	88
4.3.3 定常輸送中の圧力損失の理論式	89
4.3.4 理論式中の係数の決定	91
4.4 粒子の速度と輸送空気 velocity の比 ϕ	92
4.5 輸送に必要な最小の空気速度	95
4.6 流れが粉粒体を含むために加わる圧力損失の一般式	96
4.7 加速のための圧力損失	98
4.8 定常輸送区間の圧力損失が最小になる空気速度	98
4.9 まっすぐな長い輸送管中の圧力損失	101
4.10 輸送管中の粉粒体の流動状態	104
4.10.1 輸送空気速度と流動状態との関係	104
4.10.2 流動状態と輸送圧力との関係	106
4.11 輸送管中の空気 velocity の分布	108
4.12 輸送管中の粒子の分布と速度	110
4.12.1 水平直管中の粒子の分布	110
4.12.2 ベント中の粒子の分布	111
4.12.3 輸送中の粒子の速度	112
4.13 混合流れの比重量と圧力損失の関係	116
4.14 エネルギー論による圧力損失の解析	117
4.15 輸送管の閉そく限界	118
4.16 輸送管の閉そく層の吹き抜け	120
4.17 ベンドにおける圧力損失	122
4.18 連続エルボの圧力損失	125

5. 輸 送 装 置 の 計 画

5.1 調査事項	127
5.2 計画の順序	133
5.3 空気輸送装置の概算計画方法	134
5.4 輸送方式の経済比較	141

6. 空 気 源 機 械

6.1 種 類	145
6.2 選定上の要点	146
6.3 往復動式空気圧縮機	149
6.4 往復動式真空ポンプ	161
6.5 ねじ形圧縮機	162
6.6 ルーツブロワ	166
6.7 ターボブロワ	169
6.8 液封形回転真空ポンプ	174
6.9 エゼクタ	175

7. 粉 粒 体 供 給 器

7.1 供給器の意義	179
7.2 選定上の注意事項	179
7.3 供給器の種類	181
7.4 供給器の選定基準	187
7.5 吸引ノズル	187
7.6 ロータリフィーダ	193
7.7 キニヨンポンプ式供給器	202
7.8 ブロータンク式輸送装置	204
7.9 エゼクタ式供給機	211
7.10 供給機の方式選定	212

8. 輸送管および配管用機器

8.1 計画上の注意事項	213
8.2 輸送管の材料	216
8.3 空気管および排気管	221
8.4 フレキシブルパイプ	222

8.5 管継手	223
8.6 ベンド	228
8.7 輸送管の摩耗	230
8.8 耐摩耗材料の二、三の例	233
8.9 配管架台	238
8.10 ダンパ、切替え弁	240

9. 分離捕集器

9.1 分離捕集器の種類と特徴	251
9.2 静止空気中の粒子の沈降	254
9.3 静止空気中に水平方向に放出された粒子の運動	257
9.4 水平気流中の粒子の沈降	260
9.5 沈降槽	262
9.6 サイクロン式分離捕集器	262
9.6.1 概要	262
9.6.2 サイクロンの圧力損失	266
9.6.3 サイクロンの捕集効果	268
9.6.4 サイクロン各部分の寸法割合	273
9.7 バッグフィルタ	274
9.7.1 概要	274
9.7.2 バッグフィルタの圧力損失	276
9.7.3 バッグフィルタ用濾布の種類	
9.7.4 バッグフィルタの形式	282
9.8 衝突捕集の原理	285
9.9 洗浄式捕集器	289
9.10 ベンチュリスクラッパ	292

10. 機械的輸送装置

10.1 機械的輸送装置の種類と選定上の注意事項	295
10.2 スクリューコンベヤ	297
10.3 ベルトコンベヤ	302
10.4 ケースコンベヤ	312
10.5 バケットエレベータ	320

11. 貯 槽

11.1 貯槽の目的と種類	329
11.2 計画上の注意事項	331
11.3 貯槽の容積	336
11.4 経済的な直径と高さの比	337
11.5 貯槽に加わる荷重と許容応力	339
11.6 貯槽内の粉粒体の圧力	342
11.7 積雪による荷重 P_j (kg)	347
11.8 風圧による荷重 P_w (kg)	349
11.9 地震による荷重 P_e (kg)	351
11.10 貯槽本体の板の厚さ	353
11.11 脚, 架構の強度計算	356
11.12 基礎および土質	359
11.13 直接基礎	361
11.14 くい基礎	362
11.15 コンクリート工事	366
11.16 偏析現象	371
11.17 貯槽からの排出	373
11.18 架橋現象	375
11.19 粉粒体レベル検知器	382

12. 空気輸送装置の実例

12.1 吸引式空気輸送装置	385
12.1.1 港湾荷揚げ装置	385
12.1.2 ビール工場輸送装置	388
12.1.3 集中式集じん装置	389
12.1.4 火力発電所の灰処理装置	390
12.1.5 高温粉粒体輸送装置	393
12.1.6 気流乾燥装置	394
12.2 圧送式空気輸送装置	395
12.2.1 ロータリフィーダ低圧送式	395
12.2.2 ロータリフィーダ高圧送式	398
12.2.3 プロータソク式	399
12.2.4 エアスライド	403
索引	407

粒子径 $d_p(\mu)$	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴
一般分類	煙		フューム		雲霧		じんあい	
測定法	電子顕微鏡 超遠心分離		光学顕微鏡		風ふるい		ふるい分け	
分離 捕集法	電気集じん		サイクロン(遠心分離)		集じん室		ふるい分け	
ふるい目 (米) メッシュ			バックフィルク		洗浄法		325 200 100 60 32 20 10 4	
対応する 波長	X線		紫外線		可視光線		赤外線	
沈降速度 計算式 (標準 大気中)	Brown運動		Cunningham の補正		Stokesの式		Allenの式	
実 例	タバコの霧 塩化アンモニウム フライアッシュ 粉ミルク 酸化亜鉛 カーボンブラック		セメント 鋳工業ガス 各種金属製煉煙灰 静置空気中の不純分		食物粉末		砂 米粉 塩ビ粉末 大豆 ペレット	
			油煙 SO ₂ ミスト				雨滴	

粉粒体粒子が球形で均一な大きさであれば粒子径はその直径をとればよい。しかし大きさや形がまちまちであれば、なんらかの方法で決めた代表的な長さを平均直径としてとらなければならない。

したがって粒子径には1個の粒子の代表長さとしての単一粒子径と、いろいろな大きさからなる粒子群の代表長さとしての平均粒子径とがある。

粉粒体には流体や固体には見られないいろいろな物性がある、装置の計画にあたってはそれらの物性を十分に把握して、総合的な観点にたって計画を進める必要がある。それらの粉粒体の物性の中で、粒子径は最も基本的な性状である。

粒子径の測定方法、計算方法などの詳細はそれぞれの専門書に示してあるので、本書では実用的な見地からその実際的な技法の概要を述べることにする*）。

1.1.2 単 一 粒 子 径

一般に粉粒体粒子は非幾何学的な形状をしていて、平面上に置いたときは安定した姿で静止して、図1.1のように三方向の寸法が長径（投影像をその面内の2平行線ではさんだ

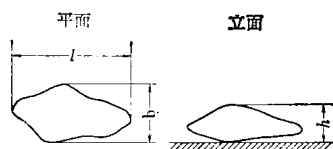


図 1.1 単一粒子の寸法

ときの最大距離) l 、短径（長径に直角方向の最大距離） b 、厚さ h であるとする。

この場合の単一粒子径のいろいろな表示方法は表1.2のとおりである。

これらの表示方法のうち、実際上は長軸径、二軸平均径、円相当径、定方向径などがよく用いられるが、微粒子では重力沈降法による測定値から理論的に算出されるストークス径もよく用いられる。

定方向径は図1.2(a)のように任意の方向の2平行線で粒子の投影像をはさんだときの

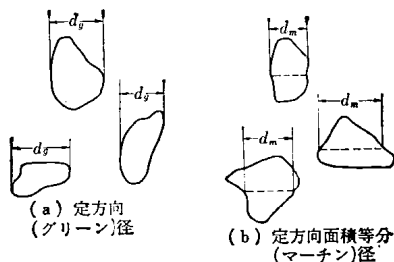


図 1.2 単一粒子径の測り方

*）たとえば、参考書 (6), (8), (11)

表 1.2 単一粒子径の表示方法

名 称	別 名	計 算 式
長 軸 径	長 径	l
短 軸 径	短 径	b
二 軸 平 均 径		$(l+b)/2$
三 軸 平 均 径	算 術 平 均 径	$(l+b+h)/3$
調 和 平 均 径		$3\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}\right)^{-1}$
表 面 積 平 均 径		$(2lb+2bh+2hl)^{1/2}/6$
立 体 積 平 均 径		$3lbh(lb+bh+hl)^{-1}$
外接矩形相当径	ブライニゲル径	$(lb)^{1/2}$
正方形相当径	グッドマン径	$f^{1/2}$
円 相 当 径	ヘイウッド径	$(4f/\pi)^{1/2}$
直方体相当径	幾 何 平 均 径	$(lbh)^{1/3}$
円筒体相当径	浅 野 径	$(fh)^{1/3}$
立方体相当径	アンドレアゼン径	$v^{1/3}$
球 相 当 径		$(6v/\pi)^{1/3}$
定 方 向 径	グ リ ー ン 径	d_g
定方向面積等分径	マ ー チ ン 径	d_m
ス ト ー ク ス 径		$\sqrt{\frac{18\mu u_t}{\gamma_s - \gamma}}$

(注) f : 投影面積, v : 粒子の体積, μ : 流体の粘性係数, u_t : 粒子の終速度, γ_s : 粒子の真比重, γ : 流体の比重

2 平行線間の距離, 定方向面積等分径は (b) のように一定方向の線が投影像の面積を 2 等分するときに切る長さである。

1.1.3 平均粒子径

いろいろな大きさの粒子からなっている粉粒体の平均粒子径を求めるには, まず単一の粒子の適当な粒径を求めて平均すればよい。平均の仕方には表 1.3 に示した方法がある。

同一試料の粉粒体を表 1.3 に示すいろいろな計算方法で平均粒子径を求めてみると, 一般に図 1.3 に示すように $d_3 < d_2 < d_1 < d_7 < d_8 < d_4 < d_5 < d_6$ の順になり, 非常に異なった値を示す。

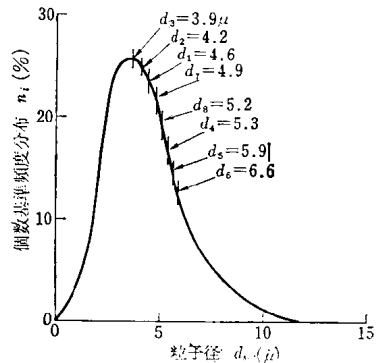


図 1.3 いろいろな平均粒子径の比較例, アランダム #4000 (全粒子個数 2000 個) (井伊谷, 木材)

表 1・3 平均粒子径の計算方法

名 称	計 算 式	物 理 的 意 義
算 術 平 均 径	$d_1 = \sum nd / \sum n$	各単一粒径の算術平均値
幾 何 平 均 径	$d_2 = (d_1' d_2' \cdots d_n')^{1/n}$	n 個の粒径の積の n 乗根
調 和 平 均 径	$d_3 = \sum n / \sum (n/d)$	各粒径の調和平均値
面積長さ平均径	$d_4 = \sum nd^2 / \sum nd$	表面積の合計を直径の合計で除したものの
体面積平均径	$d_5 = \sum nd^3 / \sum nd^2$	全粒子の体積を全表面積で除したものの
重量平均径	$d_6 = \sum nd^4 / \sum nd^3$	全重量を全個数と等しい数の粒子とした粒径
平均表面積径	$d_7 = [\sum nd^2 / \sum n]^{1/2}$	全表面積を全個数で除し平方根をとったものの
平均体積径	$d_8 = [\sum nd^3 / \sum n]^{1/3}$	全体積を全個数で除し立方根をとったものの
比表面積径	$d = 6/\gamma_s \cdot S$	比表面積 S から計算される粒径
メジアン径	d_{med}	粒径分布の累積値が 50% を示す粒径
モード径	d_{mod}	粒径分布における最大頻度を示す粒径

表 1・4 粉粒体の物理・化学的現象と適切とする平均粒子径の計算方法の関係

記 号	名 称	物 理 ・ 化 学 的 現 象
d_1	算 術 平 均 径	蒸発, 各種大きさの比較
d_4	面積長さ平均径	吸 着
d_5	体面積平均径	物質移動, 反応, 粒子充てん層の流体抵抗, 充てん材の強度
d_6	重量平均径	空気輸送, 重量効率, 燃焼, 平衡
d_7	面積平均径	吸 収
d_8	平均体積径	光の散乱, スプレーの質量分布の比較
d	比表面積径	蒸発, 分子拡散
d_{med}	メジアン径	分離, 分級装置の性能表示

実際上は装置の内容, すなわち粉粒体に対してどのような物理・化学的処理が行なわれるかに応じて, 粒径の最も適当な計算方法を選定するべきである。表 1・4 におもな物理・化学的現象と, それぞれの場合に最も適切な平均粒子径の計算方法との関係を示す。

1・1・4 粒子の大きさと測定方法

工業規模で取扱う粉粒体にはいろいろなものがあるが, それらの粒子の大きさや形状, 物理的性質はそれぞれ異なっている。

これらの粒子の大きさを測定する方法にもいろいろの方法があって, それぞれの場合の条件と必要とする測定値の精度に応じていろいろな方法がとられている。それらの方法の詳細についてはそれぞれの専門書に述べられているので省略するが, いろいろな粒子の大きさに対してとられている方法を示すと表 1・5 のとおりである。

表 1.5 粒子の大きさと測定方法の適用範囲

方 法	測定範囲 (μ)	方 法	測定範囲 (μ)
ふるい分け法	>40	吸着法 (気相)	10~0.001
顕微鏡法 (光学)	500~0.5	〃 (液相)	10~0.001
〃 (電子)	10~0.001	湿潤熱法	10~0.001
細孔通過法	500~0.5	透過法	100~0.5
沈降法 (液相)	500~0.5	反応速度法	50~0.1
風ふるい法 (気相)	100~1	散乱法 (光線)	10~0.001
遠心力法	5~0.01	〃 (X線)	0.05~0.001
拡散法	0.5~0.001		

1.1.5 実用的な粒子径算出方法

粉粒体粒子径の測定にあたっては、まず取扱う粒子の大きさと現象の種類に応じて、測定の難易、所要時間、必要とする精度などをあわせ考え、表 1.5 から適切な方法を選定することが望ましい。これらの方法には測定に時間と熟練あるいは高価な器具を必要とするものが多いので、必要以上に労力と経費を使うことは避けるべきである。

粉粒体を扱う装置を計画する場合、粒子のおおよその大きさを知れば十分で、また測定方法あるいは計算方法を決めておけば、それらの方法の差による粒子径の値の相違は装置の計画方法の側で修正すればよいことが多い。

このために実用的には簡易な方法で粒子径を求め業務の迅速化を計ることが多く、またこのほうが一般的に測定誤差が小さく、復元性も大きい。

次におもな方法について説明する。

a. 大きい粒子の場合

粒子が1粒ずつ拾い集められる程度に大きいもの、たとえば大豆、小麦、米、ペレットなどに対して用いる方法である。

試料から任意にひろい集めた n 個（実際上は 200 粒以上、多いほど好ましい）の粒子の総重量 W_{sn} を上ざら天びんによって測定し、粒子の真比重量を γ_s とすると、平均粒子径 d_s は

$$W_{sn} = n \cdot \frac{\pi}{6} d_s^3 \gamma_s$$

から

$$d_s = \sqrt[3]{6 W_{sn} / (\pi \gamma_s n)} \quad (1.1)$$

で与えられる。すなわち、それぞれの粒子を等しい体積の球としたときの平均直径である。

b. 微細な粒子の場合

粒子が細かく 1 粒ずつ拾い集められない粉体、たとえばセメント、アルミナ、白土、合成樹脂粉末などに対して調和平均径を求める方法である。

一定量の粉体のうち、

直径 d_1 の粒子が全体量の X_1

" d_2 " " X_2

.....

直径 d_m " X_m

とすると、全体の粒子の平均粒子径 d_s は

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (X_i/d_i)} \quad (1.2)$$

で与えられる。

あるいは簡単に算術平均粒子径として

$$d_s = \sum_{i=1}^m X_i d_i \quad (1.3)$$

から計算しても大差はない。この場合、全体の粒子の粒度分布を知る必要があり、次の方法によって求める。

1) ふるい分けによる方法

一定量の粉体（実際上は約 50 g 以上）を、目の大きさがそれぞれ $d_1', d_2', \dots, d_{m+1}'$ の $m+1$ 個のふるいで分級した場合、

d_1' 目を通過して d_2' 目で止まる粒子の平均粒子径 d_1 , 割合 X_1 ,

d_2' " d_3' " " d_2 , " X_2 ,

.....

d_m' 目を通過して d_{m+1}' 目で止まる粒子の平均粒子径 d_m , 割合 X_m ,

であったとすると

$$d_1 = \sqrt{d_1' d_2'}, \quad d_2 = \sqrt{d_2' d_3'}, \quad \dots, d_m = \sqrt{d_m' d_{m+1}'} \quad (1.4)$$

で与えられる。

(1.4) 式で計算した $d_1, d_2, \dots, d_m$ の値と、ふるい分けによって得た各粒子群の重量割合 $X_1, X_2, \dots, X_m$ から (1.2) あるいは (1.3) 式によって平均粒子径 d_s を計算して求めるこ