

# 粉体工学便覧

粉体工学会 編



中国颗粒学会

粉体工学便覧

NDC 571

昭和 61 年 2 月 28 日 初版 1 刷発行

(定価はケースに示してあります)

© 編 者 粉 体 工 学 会  
発 行 者 大 久 保 健 児  
発 行 所 日 頁 工 業 新 聞 社  
東京都千代田区九段北 1-8-10  
(郵便番号 102)  
電話 東京 (263) 2311 (大代表)  
振 替 口 座 東 京 9-186076

印刷・製本所 新日本印刷株式会社

落丁・乱丁本はお取替いたします。

ISBN 4-526-01994-1 C 3058

## 『粉体工学便覧』出版に当って

昭和 40 年に井伊谷教授の編集により『粉体工学ハンドブック』が出版され、当時ようやく芽生えた粉体工学の知見を集めたこの便覧は、その後の粉体技術の発展の跳躍台としてかなり重要な役割を果たしたように思う。

それ以来すでに 20 年を経過し、その間粉体工学の進歩、発展は著しく、今や粉体工学はその第三世代に突入しているといえる。すなわち、その揺籃期から一応粉体工学としての体系の整い始めた昭和 30 年代前半までを第一世代、粉体工業の飛躍的発達とその基礎としての粉体工学の発展があったその後の 20 年間を第二世代とするならば、1980 年代よりは精密工業としての粉体工業、先端技術としての粉体工業が芽生え、花を咲かせようとしている。そうしてその根幹になる粉体工学の真価が将に問われようとしている時代であるといつてよい。

このような時期に当り、粉体工学会では、工学、技術の集大成として、先に出されたハンドブックからの 20 年の穴を埋めるべく、新しい便覧の編集が数年前より企画され、井伊谷教授の思いきった発想により、新しい感覚を持った編集委員が選任され、その編集委員会のもとで、当代の最も代表的かつ斬新な知識・経験をお持ちの専門家に執筆をお願いすることにより、また日刊工業新聞社のお力添えにより、今回このようなユニークな便覧ができて上がったことは喜びに堪えないところである。

もちろん便覧としての使命は重く、現在における工学、技術水準の集大成されたものでなければならぬが、一面粉体工学のように進歩の激しい分野では未だ多くの未解決の問題や不完全な部分を包含していることは当然である。これらの問題解決、前進のためにも本便覧のこの時期におけるの発刊は、さらに粉体工学の大きい発展のための一里塚として、その意義は大きい。

元来、便覧は手許に置かれて、手垢で真っ黒になるほど使いこまれて、はじめてその価値が現われてくるものである。そのような愛される便覧であることを願い、また井伊谷教授を初めとする編集委員会のご苦勞を感謝してご挨拶としたい。

昭和 61 年 1 月

粉体工学会会長 奥田 聰



中国粉体学会

## 序 文

昭和 40 年に出版した『粉体工学ハンドブック』の序言で、「1970 年代にはハンドブックの中身が最近の技術進歩の状況からみて、すっかり書き替えられるであろう」と述べたが、すでに 1986 年になってしまった。粉体工学研究会も粉体工学会と名称を変更し、学会誌も月刊になって、さらに 5 年前の創立 25 周年記念には『粉体工学用語辞典』を出版した。しかし、その後懸案の便覧が残されたままになっていた。

そこで昭和 57 年から本便覧の計画をたてて編集準備にとりかかった。各分野の先生方と技術者の方々に編集委員になっていただき、急ピッチで作業をすすめた。業務多忙の中をその趣旨にご理解をいただき、ご執筆願った方々に厚くお礼申し上げたい。特に幹事役として、全編を通しての統一調整に多大の労力を費やしていただいた広島大学の増田弘昭君には感謝する次第である。一方、勤務地が遠方であったり、業務多忙のためなかなかお集まりいただけず、かつ原稿の手配等に時間のさけない諸先生方には編集顧問となっていただき、大所高所からご意見をいただいた次第である。

粉体工学は、わが国で芽生えてからまだ 30 年程度にしかならないし、化学工学の機械的単位操作と同一視する人もあるけれども、流体工学に対比される独特の分野としてその地歩を固めつつあるといえよう。革新あるいは先端技術を支える基礎としてもその重要性を認められており、特にサブミクロン粒子領域の開発が焦眉の急といわれている昨今、微粒子工学 (Fine Particle Technology)、すなわち粉体工学 (Powder Technology) は地味ながら注目を集めている。われわれは 21 世紀に向かって、その体系を確立して行くことを目指しているが、その一里塚として本書が役立つことを期待する次第である。

内容は 7 編に分かれており、粉体を形成する 1 個粒子の物性と計測から始まり、集合体の粉粒体の特性と測定、またその諸現象と調製、そして単位操作とオンライン計測にわたり、最後に各種プロセスの実際となっている。全体で約 100 章余りとなる膨大な編成で、執筆者も多数にのぼり、全編の形式形態の統一もなかなか思うにまかせないところがあった。お気付きの点は遠慮なく編者宛お知らせいただきたい。将来重版、再版のうちにさらに推敲を重ねたい。

昭和 61 年 1 月

編集委員長 井伊谷鋼一

『粉体工学便覧』編集委員会（五十音順）

- 委員長 井伊谷鋼一（京都大学名誉教授）
- 委員 荒川 正文（京都工芸繊維大学工芸学部教授）  
大塚 昭信（名城大学学長）  
向阪 保雄（大阪府立大学工学部教授）  
杉田 稔（清水建設株式会社研究所）  
外山 茂樹（名古屋大学工学部教授）  
長尾 高明（東京大学工学部教授）  
森川 敬信（大阪大学工学部教授）  
若松 貴英（京都大学工学部教授）
- 幹事 増田 弘昭（広島大学工学部助教授）
- 編集顧問 青木 隆一（東京水産大学水産学部教授）  
井上外志雄（東京大学工学部教授）  
奥田 聰（同志社大学工学部教授）  
上滝 具貞（九州共立大学工学部教授）  
神保 元二（名古屋大学工学部教授）  
田中 達夫（北海道大学工学部教授）  
山口 賢治（北海道大学工学部教授）

## 執筆一覧（五十音順）

青木 隆一	東京水産大学	河村 光隆	化学技術研究所
足立 元明	大阪府立放射線中央研究所	北 修一	住友重機械工業（株）
荒川 正文	京都工芸繊維大学	木谷 進	日本原子力研究所
飯島 和美	味の素（株）	小石 真純	東京理科大学
井伊谷綱一	京都大学名誉教授	向阪 保雄	大阪府立大学
石川 雅夫	日本黒鉛工業（株）	後藤 圭司	豊橋技術科学大学
石川 安昭	日本鋼管（株）	小西 正治	三井石炭鉱業（株）
井出 哲夫	愛媛大学	近藤 聰	（株）白石中央研究所
出光 保夫	花王石鹼（株）	佐賀井 武	群馬大学
井上外志雄	東京大学	佐藤 宗武	大阪府立大学
今村 秀哉	福田金属造粉工業（株）	城島 俊夫	東洋エンジニアリング（株）
井本 三郎	（株）クラレ	神保 元二	名古屋大学
臼井 凱也	豊羽鉱山（株）	菅沼 彰	東京大学
臼井進之助	東北大学	杉田 稔	清水建設（株）
内田 正義	東洋エンジニアリング（株）	杉山 公一	（株）ノリタケカンパニーリミテド
梅木 健二	小野田セメント（株）	砂田 久一	名城大学
江見 準	金沢大学	関口 勲	中央大学
大塚 昭信	名城大学	高橋 幹二	京都大学
岡崎 守男	京都大学	高山 幸英	日本農産工業（株）
岡田昭次郎	日本グリーン研究所	田中善之助	岡山大学
奥田 聰	同志社大学	田中 達夫	北海道大学
奥田 進	京都工芸繊維大学名誉教授	種谷 真一	雪印乳業（株）
奥山喜久夫	大阪府立大学	近沢 正敏	東京都立大学
小原 俊一	日本鋼管（株）	津々見雄文	法政大学
賀集誠一郎	新技術開発事業団	辻 裕	大阪大学
加藤 昭夫	九州大学	鶴田 栄一	大東化成工業（株）
金沢 孝文	東京都立大学	寺田 孚	京都大学
金岡千嘉男	金沢大学	土井 修	味の素（株）
金川 昭	名古屋大学	桐柴 良三	富山工業高等専門学校
狩野 武	アマノ（株）	外山 茂樹	名古屋大学
川島 嘉明	岐阜薬科大学	豊倉 賢	早稲田大学

長尾 高明	東京大学	増沢 力	日本たばこ産業(株)
永島 信次	(株)資生堂	増田 弘昭	広島大学
長瀬 洋一	広島大学	増田 良道	東北大学名誉教授
中谷 吉彦	松下電器産業(株)	松岡 元	名古屋工業大学
永広 彰夫	フラインセラミックス技術研究組合	松岡 道雄	松下電子部品(株)
中広 吉孝	京都大学	松島 勇生	(株)ノリタケカンパニーリミテド
中村 利家	島根大学	松田 幹雄	日本産業火薬会
中山 仁郎	日本ニューマチック工業(株)	光井 武夫	(株)資生堂
滑石 直幸	播磨耐火煉瓦(株)	水谷 惟恭	東京工業大学
南部 直樹	星薬科大学	三輪 茂雄	同志社大学
西川 友三	京都工芸繊維大学	宮南 啓	大阪府立大学
橋本 建次	橋本技術事務所	村田 博之	(株)神戸製鋼所
畑村洋太郎	東京大学	森川 敬信	大阪大学
馬場 靖夫	馬場設計事務所	茂呂 端生	公害資源研究所
林 均	昭和電工(株)	八嶋 三郎	東北大学
東谷 公	九州工業大学	安口 正之	日清エンジニアリング(株)
日高 重助	同志社大学	山口 賢治	北海道大学
平山 詳郎	(株)荏原製作所	山下 憲一	機械技術研究所
船越 嘉郎	京都粉体技術研究所	山本 年秀	日本黒鉛工業(株)
堀石 七生	戸田工業(株)	湯 晋一	九州工業大学
堀尾 正頼	東京農工大学	横山 藤平	細川粉体工学研究所
前川 秀幸	塩野義製薬(株)	吉見 吉昭	東京工業大学
		若松 貴英	京都大学

# I 粒子特性とその測定法



<編集委員> 荒川 正文, 向阪 保雄, 大塚 昭信

執筆者と執筆分担

三輪 茂雄 (1, 2, 3, 5)	山口 賢治 (6.1)
日高 重助 (1, 2, 3, 5)	神保 元二 (7)
荒川 正文 (4.1, 9)	橋本 建次 (8)
向阪 保雄 (4.2, 6.2)	

# 目 次

『粉体工学便覧』出版に当って  
序 文  
『粉体工学便覧』編集委員会  
執筆者一覧

## I 粒子特性とその測定法

1. 粒子径	1
1.1 粒子径の定義	1
1.1.1 3 軸 径	1
1.1.2 投 影 径	1
1.1.3 球相当径	3
1.2 粒子径の物理的意味	3
1.2.1 Feret 径, Martin 径, 投影面積円相当径	3
2. 粒子径分布	4
2.1 正規分布	4
2.2 対数正規分布	5
2.3 Rosin-Rammler 分布	7
2.4 Gaudin-Schuhmann 分布	11
3. 平均粒子径	11
3.1 平均粒子径の定義	12
3.2 主要な平均粒子径	12
4. 粒度測定法	15
4.1 粉体の粒度測定法	15
4.1.1 はじめに	15
4.1.2 顕微鏡法	17
4.1.3 エレクトロゾーン法	22
4.1.4 遮光法	23
4.1.5 グラインド計	23
4.1.6 電磁波干渉法	24
4.1.7 ふるい分け法	26
4.1.8 沈降法	27

4.1.9	遠心沈降法	35
4.1.10	簸別法	36
4.1.11	慣性力法	37
4.1.12	単粒子膜法	38
4.2	エアロゾル	39
4.2.1	光散乱現象を利用する方法	39
4.2.2	粒子の慣性力を利用する方法	41
4.2.3	重力および遠心沈降速度を利用する方法	43
4.2.4	電気移動度を利用する方法	45
4.2.5	粒子の拡散現象を利用する方法	47
4.2.6	その他の方法	49
4.2.7	粒子濃度の測定	50
4.2.8	粒度測定器の校正	50
4.2.9	粒度測定法の適用範囲	50
5.	粒子密度	51
5.1	密度の定義	51
5.2	粒子密度の測定	52
5.2.1	液浸法	52
5.2.2	気体容積法	54
6.	粒子形状	57
6.1	幾何学的形状	57
6.1.1	粒子形状の幾何的表示	57
6.1.2	粒子形状, 性状を表す語	58
6.1.3	単一粒子の形状表示のためのおもな諸元	59
6.1.4	均斉度 (プロポーション)	60
6.1.5	充足度	60
6.1.6	平面および立体幾何的諸量を用いた形状指数	61
6.1.7	立体幾何的の形状係数	61
6.1.8	輪郭曲線についての形状指数	62
6.1.9	その他の形状指数, 形状指標	63
6.2	動力学的形状	64
6.2.1	抵抗力形状係数	64
6.2.2	動力学的形状係数	66
7.	1個粒子の付着力	67
7.1	付着力の要因	67
7.2	1個粒子の付着力測定法	70
7.2.1	付着力測定の原理	70

7.2.2	各種の測定法	70
7.2.3	1個粒子の付着力に影響する諸因子	71
8.	粒子のかたさ	73
8.1	定性的かたさ測定法	73
8.2	定量的かたさ測定法	74
8.2.1	スーパークアタサ	74
8.2.2	マイクロビッカースかたさ	75
8.2.3	測定用試料の作り方	75
8.2.4	微小かたさ計と測定上の注意事項	76
8.3	各材料のかたさ	76
9.	粒子の表面物性	79
9.1	粒子表面のマクロな構造	80
9.2	ミクロな表面特性	81
9.2.1	固体の表面エネルギー	81
9.2.2	粒子表面の構造	82
9.2.3	表面の化学構造	83

## II 粉粒体特性とその測定法

1.	粉体力学	89
1.1	粉体力学の概況	89
1.2	粉体力学の基礎方程式	90
1.2.1	応力のつり合い式とモーメントのつり合い式	90
1.2.2	連続の式と幾何学的関係式	91
1.2.3	構成方程式 (応力ひずみ関係式)	91
1.3	有限要素法による解法	93
1.4	すべり線 (特性曲線) による応力の解析	94
1.5	塑性学の利用	97
1.6	粒子間に粘着力が働く場合	99
1.7	除荷および再荷圧の場合	100
2.	充填特性	101
2.1	等球の充填	101
2.1.1	等球のランダム分散系の空間構造	102
2.1.2	等球のランダム充填体の空間構造	103
2.1.3	等球の規則充填構造	104
2.2	多成分系の充填	105
2.2.1	最密充填された等大球形粒子間隙への規則充填	105

2.2.2	2成分系のランダムな充填	106
2.2.3	多成分系のランダムな充填	107
2.3	かさ密度(など)の測定	108
2.3.1	粉体のかさに関する用語	108
2.3.2	かさ密度などの測定法の実際	109
3.	摩擦特性	114
3.1	粉粒体の摩擦角	114
3.2	粉粒体の剪断試験	116
3.2.1	一面剪断試験	116
3.2.2	三軸圧縮試験	118
3.2.3	平面ひずみ試験および3主応力制御試験	119
3.3	粉粒体の破壊規準	120
4.	付着・凝集	122
4.1	粒子間に働く相互作用(付着,凝集性)の定義	122
4.2	相互作用力(付着,凝集力)の発生機構	123
4.2.1	粒子間の付着力	123
4.2.2	粉体層の付着力	125
4.2.3	粉体層の摩擦特性	125
4.3	粉体の付着力の測定法	126
4.3.1	引張破断法	126
4.3.2	圧裂破断法	128
4.3.3	その他の方法	129
4.4	特殊雰囲気中における付着力の測定	129
4.4.1	高湿度下ならびに湿潤粉体の付着力	131
4.4.2	液中における粉体の付着力	131
4.5	粉体の付着力の測定法の将来と展望	132
4.6	粉体の飛散性	132
5.	粒子成形体の強度	133
5.1	焼結体の強度	133
5.1.1	焼結体の強さと化学結合	133
5.1.2	焼結体の理論強度と現実の強度	134
5.1.3	焼結体の破壊源	134
5.1.4	粒内強度と粒界強度	135
5.1.5	焼結体の強度と結晶粒径	135
5.1.6	粉末成形体の強度	137
5.2	造粒体の強度	137
5.2.1	強度試験法	137

5.2.2	圧縮・引張強度	137
5.2.3	衝撃・摩耗強度	140
6.	流動性	142
6.1	流動性の定義と表現	142
6.1.1	流動性の定義	142
6.1.2	流動性の表現	142
6.2	流動性の測定法	142
6.2.1	重力流動	143
6.2.2	強制流動	145
6.2.3	剪断特性と流動性	148
6.2.4	流動化流動	150
6.2.5	総合評価	150
6.3	流動性の改善	153
6.3.1	外力の付加	153
6.3.2	流動性改善剤の添加	153
7.	透過特性	154
7.1	粒子充填層の圧力損失	154
7.1.1	流路モデルによる圧力損失の計算	155
7.1.2	抗力モデルによる圧力損失の計算	158
7.2	繊維充填層の圧力損失	159
8.	吸着特性	160
8.1	概 論	160
8.2	吸着の測定	161
8.2.1	測定法の種類	161
8.2.2	試料の調製	161
8.3	吸着等温線の理論	162
8.3.1	等温線の型	162
8.3.2	吸着等温式	162
8.4	吸着速度	165
8.5	吸着質の吸着状態	166
8.6	吸着による粉体表面の評価	167
8.6.1	表面の化学的特性	167
8.6.2	表面の幾何学的特性	168
9.	比表面積	169
9.1	比表面積	169
9.1.1	比表面積の定義および粒子径との関係	169
9.1.2	吸着法	170

9.1.3	浸漬熱法	178
9.1.4	透過法	179
9.2	細孔分布の測定	182
10.	水分	184
10.1	結合水と付着水	184
10.2	水分の分析, 測定法	186
11.	湿潤粒子層	189
11.1	湿潤粒子層の含液の状態	189
11.1.1	湿浸粒子層内の含液率分布	189
11.1.2	含液率の表示法, 飽和度	192
11.1.3	平衡状態の平均飽和度	192
11.2	湿潤粒子層の毛管上昇高さ	193
11.2.1	均一球粒子の規則充填層の場合	193
11.2.2	均一球粒子の不規則充填層の場合	194
11.2.3	一般の粒子層の場合	194
11.2.4	毛管上昇(平均飽和域)高さの測定法	196
11.2.5	粒子層の毛管上昇のヒステリシス	197
11.3	残留平衡飽和度	199
11.3.1	均一球粒子層の場合	199
11.3.2	一般粒子層の場合	200
11.4	遠心力場での湿潤粒子層	201
11.4.1	飽和域の消滅	201
11.4.2	高遠心力場での残留平衡飽和度	201
12.	スラリー粘度	203
12.1	概 説	203
12.2	スラリーの流動特性	203
12.2.1	流動特性に影響を与えるパラメータ	203
12.2.2	基本的な流動特性	203
12.2.3	時間依存性	204
12.2.4	粘度式	204
12.3	測定法	206
12.3.1	測定装置	206
12.3.2	細管式粘度計による測定	207
12.3.3	回転式粘度計による測定	207
13.	伝熱特性	208
13.1	単一粒子に関する伝熱機構	208
13.2	粒子層の伝熱	210

13.2.1	多孔体での伝熱	210
13.2.2	充填層伝熱の有効熱伝導度	212
13.2.3	粒子流体間の伝熱係数	214
13.2.4	振動層における伝熱	215
13.2.5	攪拌層における伝熱	217
13.2.6	回転層における伝熱	217
13.3	浮遊粒子の伝熱	218
13.3.1	流動層での伝熱	218
13.3.2	噴流層での伝熱	222
13.3.3	空気輸送における伝熱	222
14.	電気特性	224
14.1	比抵抗	224
14.2	誘電率	227
14.3	比電荷(帯電量)	229
15.	磁気特性	231
15.1	磁性と磁力	231
15.2	微粒子の強磁性	232
15.3	単一物質の磁性	235
15.3.1	強磁性物質の磁性	235
15.3.2	弱磁性物質の磁性	239
15.4	片刃粒子の磁性と吸引限界	240
16.	振動特性	243
16.1	概 論	243
16.2	粉粒体の動的応力-ひずみ関係	244
16.2.1	測定法	244
16.2.2	粉粒体の動的応力-ひずみ関係の非線形性	245
16.2.3	微小ひずみでの粉粒体の剪断弾性係数	246
16.3	粉粒体の水平振動	246
16.3.1	水平振動による乾燥粉粒体の密度変化	246
16.3.2	水平振動による疎充填飽和粉粒体の液状化	248
16.4	粉粒体の鉛直振動	250
16.4.1	鉛直振動による容器内粉粒体の空隙率変化	250
17.	音響特性	252
17.1	概 論	252
17.2	粉体系からの音の発生	253
17.2.1	粒子衝突音	253
17.2.2	粉体層の摩擦音	255



17.3	音場における粒子の共振運動	258
17.4	粒子群による音波の減衰	261
17.4.1	分散粒子群による音波の減衰	261
17.4.2	粉体層中の音波の減衰	262

### III 粉体諸現象

1.	拡 散	277
1.1	ブラウン拡散	277
1.1.1	ブラウン拡散の基礎式	277
1.1.2	粒子濃度の変化	278
1.1.3	重力沈降の影響	280
1.1.4	その他の因子の影響	282
1.2	乱流拡散	282
1.2.1	概 論	282
1.2.2	乱流拡散方程式	283
1.2.3	乱流拡散係数	284
2.	光学的現象	287
2.1	概 論	287
2.2	光散乱現象	288
2.2.1	粒子による光散乱理論	288
2.2.2	粒子の屈折率	289
2.2.3	散乱光強度	291
2.2.4	光の減衰	293
2.3	光の回折現象	296
2.4	光照射圧力	296
2.5	光 泳 動	296
2.5.1	粒子内熱発生分布	297
2.5.2	$K_n \ll 1$ の場合	299
2.5.3	$K_n \gg 1$ の場合	300
3.	静電現象	301
3.1	粒子の帯電	302
3.1.1	接触帯電	302
3.1.2	衝突帯電	303
3.1.3	破碎帯電その他	304
3.2	帯電粒子の運動	305
3.3	電気泳動	307