



# 粒子の衝突板による分離

1979年 3月

宇 敷 建 一



# 粒子の衝突板による分離

1979年 3月

宇 敷 建 一



## 目 次

序論	1
Literature Cited	4
第1編 リボンによる粒子捕集	
第1章 緒論	15
1. 1. リボンによる粒子捕集の既往の研究の展望	17
1. 1. 1. 理論的研究の概要	17
1. 1. 2. 実験的研究の概要	19
1. 2. 本編の内容	20
Nomenclature	24
Literature Cited	24
第2章 リボンによる粒子の慣性捕集	31
緒言	31
2. 1. リボンまわりの流れ	31
2. 1. 1. 気流の計算式	31
2. 1. 2. 計算流線の妥当性について	32
2. 2. 理論および計算方法	33
2. 2. 1. 粒子の運動方程式	33
2. 2. 2. 衝突効率の計算	35
2. 3. 実験装置と方法	36
2. 4. 結果と考察	38

2. 4. 1. リボンを気流に垂直に挿入した場合の衝突効率	3 8
2. 4. 2. 気流に対してリボンが垂直でない場合の衝突効率	4 0
2. 4. 3. 局所衝突効率	4 4
結言	4 6
補遺 2-1 パラフィンミストによる流れの可視化	4 6
補遺 2-2 リボン前方の流れについてのMayらによる測定結果と軌跡計算に使用した速度場モデルとの比較	4 8
補遺 2-3 $\sqrt{2\psi}$ , $\Phi$ および $Re_{po}$	4 8
補遺 2-4 Eqs. (2-9)~(2-13) の衝突効率推定精度および $Re_{po}$ をパラメーターとした衝突効率曲線	5 0
補遺 2-5 スライドガラスによる水滴衝突効率 (有次元表示衝突効率曲線の例)	5 1
補遺 2-6 リボン, 円板, 円筒および球の衝突効率の比較	5 2
Nomenclature	5 2
Literature Cited	5 3
第3章 リボンまたは球による粒子の重力さえぎり捕集	5 5
緒言	5 5
3. 1. 理論	5 5
3. 2. 結果と考察	5 8
結言	6 1
Nomenclature	6 1
Literature Cited	6 2
第4章 リボンによる粒子の慣性重力捕集	6 4
緒言	6 4

4. 1. 粒子の運動方程式	6 5
4. 2. 計算結果と検討	6 5
4. 2. 1. 上昇流	6 8
4. 2. 2. 下降流	7 2
4. 2. 3. 水平流	7 3
4. 2. 4. 効率推定の簡便法	7 4
4. 3. 実験的検討	7 4
4. 3. 1. 実験装置と方法	7 4
4. 3. 2. 結果と考察	7 5
結言	7 6
補遺 4-1 リボン以外の捕集体による粒子の慣性重力捕集 に関する既往の研究の概要	7 7
補遺 4-2 重力（沈降）パラメーターGで表示した上昇流捕集効率	7 8
補遺 4-3 市販スライドガラスを用いた上昇水滴のサンプリング	7 9
Nomenclature	8 1
Literature Cited	8 2
第5章 結論	8 3
第2編 羽根列（ルーバー）による粒子捕集と分級	
第1章 緒論	8 7
1. 1. 液滴分離機の従来の研究の概要	8 7
1. 1. 1. 充填層	8 7
1. 1. 2. サイクロン	9 4
1. 1. 3. スクラバー	9 5

1. 1. 4. 電気集塵機	96
1. 1. 5. 慣性分離機	96
1. 2. ルーバー分離機による固体粒子の捕集と分級に 関する従来の研究の概要	104
1. 3. 本編の内容	108
Literature Cited	111
第2章 ルーバー液滴分離機の性能	120
緒言	120
2. 1. 捕集性能の実験	121
2. 1. 1. 実験装置と方法	121
2. 1. 2. 結果と考察	124
2. 2. 捕集機構の解析	130
2. 2. 1. 流れの可視化	130
2. 2. 2. 流れの計算	130
2. 2. 3. 捕集効率の計算	132
結言	135
補遺2-1 Naphthol Green Bゼラチン膜被覆スライドガラス による水滴径分布測定	135
2. 1. 1. ゼラチン膜上のこん跡径と水滴径の相関測定	135
2. 1. 2. シャッター付サンプラーとリボンの粒子捕集性能の比較	138
補遺2-2 液滴測定について	140
補遺2-3 ルーバー形式による固体粒子捕集性能測定	141
Nomenclature	143
Literature Cited	144

第3章 ルーバー羽根列への粒子の捕集性能実験	147
緒言	147
3.1. 実験装置と方法	147
3.1.1. 衝突効率の測定	147
3.1.2. 分離機内での粒子捕集量の分布	148
3.2. 結果と考察	149
3.2.1. 粒子の種類, 粒子径, および風速の影響	149
3.2.2. ルーバー面傾斜角 $\alpha$ の影響	150
3.2.3. 羽根間隙Bの影響	152
3.2.4. 羽根長さ $L_b$ の影響	153
3.2.5. 分離機内の粒子捕集量の分布	153
結言	154
Nomenclature	154
Literature Cited	155
第4章 上端供給ルーバー分級機の性能	156
緒言	156
4.1. 分級機構	156
4.1.1. 粒子運動方程式	156
4.1.2. 実験装置と方法	157
4.1.3. 結果	158
4.1.4. 分級径の計算	158
4.2. 分級実験	160
4.2.1. 実験装置と方法	160
4.2.2. 結果と考察	162
結言	170

Nomenclature .....	1 7 1
Literature Cited .....	1 7 2
第 5 章 結論.....	1 7 3
總括.....	1 7 5
謝辭.....	1 7 6

## 序 論

分離とは混合物を物理的あるいは化学的性質の異なる2つ以上の成分に分ける操作であり、工業プロセスには例えば集塵、分級、蒸発、蒸留、抽出、吸着など多くの分離操作がある。これらを大別すると、蒸発、蒸留などの相変化を用いる分離と、集塵、分級など相変化を利用しない機械的分離に分かれる。機械的分離には同相系（ウラン濃縮、同位元素分離など）および異相系があるが、粒子の分離は異相系機械的分離の一分野である。分離の対象となる混合物には固体、液体および気体の各種組み合わせがあるが、これらのうち気体を連続相とする混相流中から液体または固体の分散質（粒子）を取り出す機械的分離操作には、対象とする流体全部から粒子を分離することを目的とする集塵（液滴分離を含む）と、流体の一部だけから粒子を分離して粒子の濃度や粒子径その他の性質を調べることを目的とするサンプリングがある。なお、集塵やサンプリングは積極的な分離であるが、これに対して、飛行機の翼や自動車の窓への雨滴や霜の付着の問題など分離の起こらない方が望ましい場合もある。また粒子群の機械的分離操作は分級と呼ばれ、粒子形状による分級、磁性による分級、粒度分級（粒子径による分級）、その他色、密度、放射性、静電特性による分級がある。

さて集塵、サンプリングおよび粒度分級にはそれぞれ多くの手法が知られているが、本論文では衝突板を利用する方法を取り上げ検討した。次に集塵、サンプリングおよび粒度分級の各分野での衝突板による分離の実用上の価値について説明する。

集塵装置には、サイクロン集塵機、バグフィルター、電気集塵装置、洗浄集塵装置、エアフィルターなど各種のものがあるが、慣性力利用のルーバー集塵機（衝突板方式）は通常 $10\mu\text{m}$ 以上の粗粒子を対象としており、据付面積が小さく、低圧損で耐久性があるので粉塵用前置集塵機としても広く使われている。しかし液滴分離機としての使用はさらに重要である。

これは実際の液滴分離では装置内で化学反応や温度変化による溶解度低下などのため固形成分が生成したり、あるいは液滴以外にカーボンブラックや石膏などの固体粒子も混在する場合が多くスケールが生成しやすいため構造の簡単さが要求される

ことと、圧力損失が低いこと、処理能力が大きいことなどのためと思われる。

つぎにサンプリング法には第1編第1章で述べるように、多種多様の方法が使用されているが、リボン（帯状平板）サンプラーへ粒子を衝突させ捕集する方式は液滴径分布測定分野では最も多用されており、また粉塵のサンプリングにもしばしば使用される。これは、リボンサンプラーによる測定が簡便なこと、凝集状態の粉塵の粒子径分布測定ができること、液滴測定の場合には蒸発や凝縮による滴径変化が起こるため、系外へガスの一部を取り出して測定するサンプリング法は精度が悪くまた、写真法その他系に変化を与えずに測定する方法では液滴の速度その他を同時に測定しなければ液滴流量がわからないなど他にあまり良い方法が無いことが原因であろう。

一方粒度分級には、フルイ以外にはエアセパレーター<sup>74)</sup>、スーパークラシファイヤ（Sharples, Co, Ltd）、ミクロンセパレーター、マイクロプレックス<sup>57)</sup>、ジグザグ遠心分級機<sup>35,40)</sup>などの風力強制回転遠心形式ならびに風篩、ジグザグ分級機<sup>5)</sup>、ルーバー式分級機<sup>70,71,72)</sup>、ファントングレン分級機、固定壁遠心分級機<sup>69)</sup>やクラシクロン<sup>75,76)</sup>などの回転部を有せず、含塵気流の方向変化や回転運動を利用する慣性分級機が実用されている。

またこれらのほかに、粒子径測定用の分級機として特殊な遠心分級機<sup>86)</sup>やカスケードインパクター、バーチャルインパクター<sup>107)</sup>などの種々のものが知られている。

これらのうちルーバー分級機（衝突板方式）は、発塵が無く可動部分も無いため騒音も少ないなど作業環境の衛生上優れた性質を有するほか、据付面積や圧力損失が小さく、さらに羽根枚数や風量の調節により一台の分級機で広範囲に分級径を変えられること、また摩耗性の粒子にも使えるなどの特徴がある。

以上のような見地から、本論文では先ず第1編で、リボンによる粒子捕集と題してリボン状の障害物による気流中の粒子サンプリング時における粒子慣性捕集機構と捕集効率を検討し、第2編では羽根列（ルーバー）による同じく粒子慣性捕集と分級について検討した。通常衝突板による分離では慣性衝突が最も基本となる分離機構であり、そこへ重力、さえぎり、乱流拡散などの影響が加わるものと考えられる。次に衝突板による分離の研究の位置付けのため慣性分離に関する既往の研究を

簡単に概観しよう。

慣性分離機構の解析はAlbrecht<sup>1)</sup> およびSell<sup>59)</sup>の研究に始まり(1931), その粒子軌跡を計算することによる分離機構の解析法は基本的には今も受け継がれている。気流中に障害物を置く方式の集塵機, ミストセパレーターあるいはサンプラーを構成する最も単純で代表的な基本形状は円筒, 球, リボン, 円板などである。一般にこれら基本形状による粒子慣性捕集の報告は比較的少ないが, これらの中では円筒捕集体に関する研究<sup>例えば1, 26, 28, 29, 38, 39, 42, 46, 47, 48, 49, 59, 62, 77, 78, 100, 103, 104, 105)</sup>が最も多い。

円筒捕集体の研究の殆んどは繊維層フィルターに関連して行なわれ, 円筒まわりの流れレイノルズ数の影響<sup>例えば21, 28, 38, 42, 62, 104)</sup>や粒子レイノルズ数の影響<sup>39, 48)</sup>, 重力<sup>49, 105)</sup>やさえぎり<sup>例えば42, 103, 105)</sup>の影響, 気流の圧縮性の影響<sup>23)</sup>などが検討されている。また繊維層フィルター<sup>例えば4, 15, 20, 29, 43, 50, 61, 63, 78, 103)</sup>やワイヤーメッシュミストセパレーター<sup>例えば3, 6, 9, 17, 31, 66, 67, 68, 85)</sup>などの円筒を組み合わせた捕集体の解析には通常単一円筒の慣性捕集効率が利用されるが, 円筒間の相互干渉の影響についてもいくつかの報告がある。<sup>例えば15, 18, 84)</sup>

円筒について多いのが球捕集体の研究である。<sup>例えば1, 36, 39, 46, 49, 53, 55, 58, 59, 81, 82)</sup>球捕集体の研究はベンチュリースクラバ<sup>95)</sup>などの洗浄集塵装置や雨滴による粒子捕集<sup>30, 51, 52, 64)</sup>その他の<sup>10, 11, 33)</sup>研究に関連しており, 球まわりの流れレイノルズ数<sup>62, 81)</sup>や粒子レイノルズ数<sup>39)</sup>の影響, 重力<sup>49)</sup>の影響などが求められている。

しかし, 円板<sup>46, 49, 54, 62)</sup>など円筒や球以外の捕集体を取り扱った報告は意外に少ない。

Fuchs<sup>23)</sup>が十数年前にその著書「The mechanics of aerosols」p.159の「§ 34 単純な形状の捕集体による気流中のエアロゾル粒子の慣性および静電気捕集」で「種々の形状の捕集体へのエアロゾル粒子の慣性捕集が實際上非常に重要であるにもかかわらず, このことに関する実験的研究の報告はわずかである。捕集効率の計算に関する報告はさらに少ない。」と述べたが, この言葉は円筒や球以外の捕集体には今なお当てはまる。リボンの研究<sup>7, 16, 23, 28, 38, 39, 41, 46, 47, 54, 62, 77, 83, 92)</sup>もかなり報告数の少ない分野の1つである。リボンの既往の研究については第1編第1章で詳述するが, その研究の殆んどはストークスの粒子抵抗係数を使用した場合の慣性のみによる捕集を対象としたものであり, 重力やさえぎりの影響, リボン回りの流れレ

レイノルズ数の影響などは未検討のまま残されており、また粒子抵抗係数のストークス域からのずれの影響を扱っている報文は2, 3あるが、いずれも速度場の仮定に問題があり、妥当な結果は得られていない。

また、ルーバーミストセパレーター<sup>3, 8, 12, 13, 22, 25, 44, 80, 87, 94, 106)</sup>、屈曲流路ミストセパレーター<sup>2, 14, 32, 37, 56, 65, 91, 88, 89, 90)</sup>、ルーバー集塵機<sup>24, 34, 45, 60, 79, 91, )</sup>などリボンを組み合わせた構造の捕集体の研究については第2編第1章で詳述するが、衝突板間の相互干渉が著しく、流れが複雑なため理論解析はあまり行われていない。実験としては、特に液滴の部分捕集効率の測定は液滴径分布や濃度の測定が困難なため若干の報告があるのみである。

以上含塵気流中に障害物を挿入する粒子の慣性衝突分離を簡単に展望した。粒子の衝突板による分離の研究は粒子サンプリング、液滴分離、集塵などの基礎として實際上重要であるが、その報告数は少なく、かつ種々の点で不充分であり、充分な理論解析および信頼できる実験データの集積を必要とする分野である。

なお、粒子の慣性分離法には上述の含塵気流中に障害物を挿入する方式のほか、含塵気流をノズルなどで加速して障害物に衝突させる方式があり、インパクターと呼ばれている。インパクターは、第1編第1章で述べるように液滴分離などにも使用されるが、多段に積み重ね前述のカスケードインパクターとして粒子径分布測定に広く用いられている。カスケードインパクターによる慣性分離に関しては、流れレイノルズ数や粒子レイノルズ数の影響、重力の影響、カニングム補正係数の影響、間隔比やノズル形状その他設計条件による影響がすでに広範囲に検討されている。  
例えば19, 73, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102)

#### Literature Cited

- 1) Albrecht, F: Physik. Zeitsch r., 32, 48 (1931)
- 2) Batel, W.; Der Waschentstauber-Entwicklungsstand und Tendenzen Teil II) : Staub, 34, 52 (1974)
- 3) Bell, C.G. and W. Strauss; Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow scrubber: J. Air Pollut. Control Assoc., 23, 967 (1973)

- 4) Billings, C.E., C. Kurker and L. Silverman; Simultaneous removal of acid gases, mists, and fumes with mineral wool filters: *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 8, 185 (1958)
- 5) Boettcher, R.A.; Air classification for reclamation of solid wastes: Proceedings of the second mineral waste utilization symposium, held in Chicago, Illinois on March 18-19 (1970)
- 6) Brady, J.D. and D.W. Cooper; A wet collector of fine particles: *Chem. Eng. Progr.*, 73, 45 (1977-8)
- 7) Brun, E. et M. Vasseur; Captation mécanique de corpuscules en suspension dans l'air: *La Recherche Aérorautique* 1, 15 (1948)
- 8) Burger, R.; Cooling tower drift elimination: *Chem. Eng. Progr.*, 71, 73 (1975)
- 9) Bürkholtz, A.; Tropfenabscheidung an Drahtfiltern: *Chemie-Ing.-Techn.*, 42, 1314 (1970)
- 10) Bürkholtz, A.; Charakterisierung von Trägheitsabscheidern durch praktische Kennzahlen: *Verfahrenstechnik*, 10, 29 (1976)
- 11) Bürkholtz, A.; Die Abscheidung von Nebeltröpfchen an Füllkörperschüttungen: *Chemie-Ing.-Techn.*, 48, 795 (1976)
- 12) Calvert, S., I.L. Jashnani and S. Yung; Entrainment separators for scrubbers: *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 24, 971 (1974)
- 13) Calbert, S.; Guidelines for selecting mist eliminators : *Chem. Eng.*, 27, 109 (1978)
- 14) Chan, J. and M. Golay; Comparative performance evaluation of current design evaporative cooling tower drift eliminators : *Atmos. Envir.* 11, 775 (1977)
- 15) Choughary, K.R. and J.W. Gentry; A model for particle

- collection with potential: Can. J. Chem. Eng.,  
55, 403 (1977)
- 16) Cot, C. et G. Arnaud; Captation des aerosols par  
impaction sur less collecteurs plans: Promoclin E, 5,  
295 (1974)
  - 17) Coykendall, J.W. and E.F. Spencer; New high-efficiency  
mist collector: J. Air Pollut. Control Assoc. 18,  
315 (1968)
  - 18) Dorman R.G.; "Aerosol Science" p.217 ( Academic press)  
(1966)
  - 19) Dzubay, T.G., L.E. Hines and R.K. Stevens: Particle  
bounce errors in cascade impactors: Atmos. Envir.,  
9, 229 (1975)
  - 20) Emi, H., K. Okuyama and N. Yoshioka; Prediction of  
collection efficiency of aerosols by high porosity  
fibrous filter: J. Chem. Eng. Japan, 6, 349 (1973)
  - 21) Fan, K.C., B.T. Wamsley, M. Furman, W. Mooney and  
J.W. Gentry; The effect of Reynolds number on the collection  
efficiency of model grid filters: A.I.Ch.E. Symposium  
series, 74, [175], 2 (1978)
  - 22) Foster, P.M.; Comparative performance evaluation of current  
design evaporative cooling tower drift eliminators;  
Atmos. Envir., 12, 1809 (1978)
  - 23) Fuchs, N.A.: "The mechanics of aerosols" p.159-180,  
Translated to English by R.E. Daisley and M. Fuchs,  
edited by C.N. Davies
  - 24) Gee, D.E. and B.N. Cole; A study of the performance of  
inertia air filters: Proc. Instn. Mech. Engrs., 184,  
166 (1969-70)
  - 25) Germerdonk, R. und H. Günter; Wirksamkeit von Tropfenabschei-  
dern im Senkrechten Gasstrom: Chemie -Ing.-Techn., 41,  
649 (1969)

- 26) Gregory, P.H.; Deposition of air borne lycopodium spores on cylinders: *Ann. Appl. Biol.*, 38, 375 (1951)
- 27) Gregory, P.H. and O.J. Stedman; Deposition of airborne lycopodium spores on plane surfaces: *Ann. Applied Biology*, 40, 651 (1953)
- 28) Griffin, F.O. and A. Meisen; Impaction of spherical particles on cylinders at moderate Reynolds numbers: *Chem. Eng. Science*, 28, 2155 (1973)
- 29) Harrop, J.A. and J.I.T. Stenhouse; The theoretical prediction of impaction efficiencies in fibrous filters: *Chem. Eng. Sci.*, 24, 1475 (1969)
- 30) Hocking, L.M.; The theoretical collision efficiency of small drops: "Aerodynamic capture of particles", Edited by E.G. Richardson, p154, Pergamon press, Oxford (1960)
- 31) Hornby, J. and R.F. Taylor; Entrainment removal from climbing film evaporators: *Brit. Chem. Eng.* 13, 361 (1968)
- 32) Houghton, H.G. and W.H. Radford; Measurements on eliminators and the development of a new type for use at high gas velocities: *Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs.*, 35, 427 (1939)
- 33) Jackson, S. and S. Calvert; Entrained particle collection in packed beds: *A.I.Ch. E. Journal*, 12, 1075 (1966)
- 34) Jones G.J., F.R. Mobbs and B.N. Cole; Development of a theoretical model for an inertia filter: *Proceedings of Pneumotransport 1*, Paper B1, BHRA (1971-9)
- 35) Kaiser, F.; Der Zickzack-sichter-ein Windsichter nach neuem Prinzip: *Chemie-Ing-Techn.*, 35, 273 (1963)
- 36) Knetting, P. and J.M. Beekmans; Inertial capture of aerosol particles by swarms of accelerating spheres: *Aerosol Sci.*, 5, 225 (1974)

- 37) Kranc, S.C. and N.C. Small; Entrained particle motion along a wavy wall: Mech. Res. Comm., 3, 103 (1976)
- 38) Landahl, H.D. and R. G. Herrmann; Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders, and slides, and the efficiency of impaction of the droplets: J. Colloid Sci. 4, 103 (1948)
- 39) Langmuir, I.; Mathematical investigation of water droplet trajectories (Report No. RL-224, 1944-1945) : "The collected works of IRVING LANGMUIR", Editors: C.G. Suits and H.E. Wang, Volume 10, p.348, Pergamon Press, Oxford
- 40) Lauer, O.; Neuer Fliehkraft-Labowindsichter mit weitem Trennbereich: Chemie-Ing.-Techn., 41, 491 (1969)
- 41) Lewis, W. and R.J. Brun; Impingement of water droplets on a rectangular half body  
in a two dimensional incompressible flow field:  
N.A.C.A. Technical Note 3658 (PB 119873) (1955)
- 42) Löffler, F. und W. Muhr; Die Abscheidung von Feststoffteilchen und Tropfen an Kreiszyllindern in folge von Trägheits Kräften: Chemie-Ing.-Techn., 44, 510 (1972)
- 43) Marr, R. und F. Moser; Die Auslegung von stehenden Gas-Flüssig-Abscheidern: Verfahrens-technik, 9, 379 (1975)
- 44) Martin, A. and F.R. Barber; Some water droplet measurements inside cooling towers: Atmo. Envir., 8, 325 (1974)
- 45) Matlew, D.L.; The distribution of impacted particles of various sizes on the blades of a turbine cascade : "Aerodynamic capture of particles", Edited by E.G. Richardson, Pergamon Press p.104 (1960)
- 46) May, K.R. and R. Clifford; The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs: Ann. Occup. Hyg., 10, 83 (1967)

- 47) Morsi, S.A. and A.J. Alexander; An investigation of particle trajectories in two phase flow systems: J. Fluid Mech., 55, 193 (1972)
- 48) Morsi, S.A.; Impingement separators-An experimental and theoretical investigation: Filtration & Separation, 465(1975)
- 49) Morton, V.M. and P.M. Foster; The design of droplet sampling devices for measurements in cooling towers: Atmos. Envir., 8, 361 (1974)
- 50) Nichols, J.H. and J.A. Brink; Use of filter mist eliminators in chlorine plants: Electrochemical technology, 2, 233 (1964)
- 51) Oakes, B.; Laboratory experiments relating to the wash-out of particles by rain:"Aerodynamic capture of particles", Edited by E. G. Richardson, p.179, Pergamon Press, Oxford
- 52) Picknett, R.G.; Collection efficiencies for water drops in air : "Aerodynamic capture of particles", Edited by E.G. Richardson, p.154, Pergamon press, Oxford (1960)
- 53) Pilat, M.J. and A. Prem; Calculated particle collection efficiencies of single droplets - Including inertial impaction brownian diffusion, diffusio-phoresis and thermophoresis: Atmos. Envir., 10, 13 (1976)
- 54) Ranz, W.F. and J.B. Wong; Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors: Ind. Eng. Chem., 44, 1371 (1952-6)
- 55) Rajagopalan, R. and C. Tien; Experimental analysis of particle deposition on single collectors: Can. J. Chem. Eng., 55, 256 (1977)
- 56) Regehr, U.; Mechanische Reinigung heterogener Gassysteme mit einem neuartigen Tropfenabscheider: Chemie-Ing.-Techn., 39, 1107 (1967)

- 57) Rumpf, H. and F. Kaiser; Weiterentwicklung, des Spiralsichters (Wirbelsichters): Chemie-Ing.-Techn., 24, 129 (1952)
- 58) Schuch, G. and F. Löffler; Über die Abscheidewahrscheinlichkeit von Feststoffpartikeln an Tropfen in einer Gasströmung durch Trägheits Effekte: Verfahrenstechnik, 12, 302 (1978)
- 59) Sell, W.; Staubausscheidung an einfachen Körpern und in Luft filtern: VDI Forschungsheft, No.347 (1931)
- 60) Smith, J.L. and M.J. Goglia; The mechanism of separation in the louver-type dust separator; REPAIR, 5, 51 (1955)
- 61) Soole, B.W. and H.C.W. Meyer; Characteristics of some rotary impaction filters for the removal of 10-40  $\mu$  droplets: Aerosol Sci., 1, 147 (1970)
- 62) Starr, J.R.; Inertial impaction of particulates upon bodies of simple geometry: Ann. Occup. Hyg., 10, 349 (1967)
- 63) Stenhouse, J.I.T. and J.A. Harrop; The theoretical prediction of inertial impaction efficiencies in fibrous filters: Chem. Eng. Sci., 25, 1113 (1970)
- 64) Walton, W.H. and A. Woolcock; The suppression of airborne dust by water spray: "Aero dynamic capture of particles", Edited by E.G. Richardson, p.129, Pergamon Press, Oxford (1960)
- 65) Watyel, G.V.P.; Untersuchung von Tropfenbahnen in umgelenkten Strömungen und ihre Anwendung auf die Tropfenabscheidung in Trocknern: VDI Forschungsheft, No.541 (1970)
- 66) York, O.H.; Performance of wire mesh demisters: Chem. Eng. Progr., 50, 421 (1954)
- 67) York, O.H. and E.W. Poppele; Wire mesh mist eliminat-

- ors: Chem. Eng. Progr., 59, 45 (1963)
- 68) York, O.H. and E.W. Poppele; Two stage mist eliminators for sulfuric acid plants: Chem. Eng. Progr., 66, 67 (1970)
- 69) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 八木進; 日本機械学会誌, 59, 215 (1956)
- 70) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分離器の分級特性: 粉砕No.3 (1959-7) p.18 (細川粉体工学研究所)
- 71) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分級器の分級精度: 粉体工学研究会研究資料 No.27 (1960-6)
- 72) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 田中善之助; サイクロンおよびルーバーによる分級試験の一例: 粉体工学研究会誌, 1, 114 (1964)
- 73) 井伊谷鋼一, 湯普一, 牧野和孝, 中野一彦; カスケード・インパクトによる粒度測定上の問題点—円形ノズル間隔比3の場合—: 化学工学, 33, 689 (1969)
- 74) 池田研吾, 佐々木惇, 藤原邦久, 向井富士; 三菱形エアセパレータの開発研究: 三菱重工技報, 8, 517 (1971)
- 75) 上田康, 榎田昭; 全円周流入型乾式粒度選別器について: 名古屋工業技術試験所報告, 5, 485 (1956)
- 76) 上田康, 榎田昭; クラシクロンの研究: 名古屋工業技術試験所報告, 9, 1 (1960)
- 77) 植松時雄, 狩野武, 滝沢和弘, 松浦方美; 物体による霧粒の捕捉: 繊維機械学会誌, 8, 122 (1955)
- 78) 江見準, 中田潔, 吉岡直哉; 重力の影響を考慮した場合の繊維充填層によるエアロ

- ゾルの滲過効率：化学工学，36,557 (1972)
- 79) 岡田定五，坪井信義，佐々木昭夫；慣性分離形集じん器（ハイルーバーフィルタ）の開発：日立評論，52, 881 (1970)
- 80) 化学装置設計部，流熱部，化学部，化学機器部；海水冷水塔と周辺環境との調和：石川島播磨技報，15,140 (1975)
- 81) 金岡千嘉男；エアロゾル粒子の挙動と捕集に関する研究：博士学位論文（京都大学）（1973－2）
- 82) 金岡千嘉男，吉岡直哉，井伊谷鋼一，江見準：単一球によるエアロゾル粒子の慣性捕集効率，化学工学，36, 104 (1972)
- 83) 狩野武，藤井史朗，藤井謙治；固気混相流中に置かれた平板による粒子の捕集に関する研究：粉体工学研究会誌，12, 71 (1975)
- 84) 木村典夫，井伊谷鋼一；繊維充填層フィルターの集塵性能に及ぼす繊維断面形状の影響：化学工学，33, 1008 (1969)
- 85) 後藤昭博，外山茂樹，牧野和孝，井伊谷鋼一；上昇流メッシュミストエリミネーターの再飛散現象と圧力損失：化学工学論文集，4, 111 (1978)
- 86) 田中善之助；粉体の乾式粒度分級に関する研究；博士学位論文（京都大学）(1971)
- 87) 武田穰，山崎雅弘，松本敏暉，千葉孝男，岡田孝夫，吉田降紀；海水冷却塔の設計：化学装置，p.15 (1975－5)
- 88) 新津靖，吉川暲，根岸学；エアワッシャにおけるエリミネーターの脱水性に関する研究（その1）：衛生工業協会誌，35,86 (1961)

- 89) 新津靖, 吉川暲, 根岸学; エアワッシャにおけるエリミネーターの脱水特性に関する研究(その2): 空気調和・衛生工学, 36, 297 (1962)
- 90) 新津靖, 吉川暲, 根岸学; エアワッシャにおけるエリミネーターの脱水特性に関する研究(その3): 空気調和・衛生工学, 36, 983 (1962)
- 91) 新津靖, 吉川暲; ルーバー型集じん器の性能に関する報告: 空気調和・衛生工学, 37, 159 (1963)
- 92) 新津靖, 稲垣金吾, 乾永房; 衝突形集じん器に関する研究——横形ルーバー集じん器の基礎的特性: 空気調和・衛生工学, 42, 1089 (1968)
- 93) 日置敏美, 伊藤一彦; ユーロホルムミストエリミネーター: 碍子レビューNo.37別冊, 日本碍子(1976—5)
- 94) 福田昭三, 荒牧幹雄, 織田昌雄; 海水湿式冷却塔の研究: 三菱重工技報, 8, 178 (1971)
- 95) 森島直正; ベンチュリ・スクラバに関する研究: 博士学位論文(大阪市立大学)(1967—10)
- 96) 山本英夫, 菅沼彰, 森芳郎; カスケードインパクターによる浮遊粉塵の粒度測定—凝集2次粒子の粒度分布—: 化学工学論文集, 1, 6 (1975)
- 97) 湯晋一, 井伊谷鋼一; 2次元カスケード・インパクターの分離機構: 化学工学, 33, 1265 (1965)
- 98) 湯晋一, 井伊谷鋼一; 円形ノズルカスケード・インパクターの分離機構(間隔比の影響): 化学工学, 34, 427 (1970)
- 99) 湯晋一; カスケードインパクターの研究; 博士学位論文(京都大学)(1971—2)

- 100) 湯普一, 井伊谷鋼一; 2次元ノズル壁への粒子の沈着, 化学工学, 35, 1259 (1971)
- 101) 湯普一, 三宅展正, 井伊谷鋼一; ノズル出口の粘性速度境界層がインパクターの衝突効率に及ぼす影響: 化学工学論文集, 1, 1 (1975)
- 102) 湯普一, 湯川隆夫, 井伊谷鋼一; 円形ノズルインパクターにおける重力の影響: 化学工学協会第3回秋期大会, 講演要旨集 p.305 (1969)
- 103) 吉岡直哉, 江見準, 松村秀樹, 安並正雄; 繊維充填層によるエアロゾルの通過: 化学工学, 33, 381 (1969)
- 104) 吉岡直哉, 江見準, 曾根博徳: 煙霧質粒子による単一円筒捕集効率の実験的検討: 化学工学, 31, 1011 (1967)
- 105) 吉岡直哉, 江見準, 金岡千嘉男, 安並正雄; 孤立円筒によるエアロゾルの捕集効率—重力および慣性支配領域: 化学工学, 36, 313 (1972)
- 106) 吉川暲, 加賀昭和; ルーバー形エリミネーターの脱水特性に関する研究: 空気調和・衛生工学, 47, 11 (1973)
- 107) 吉田英人; 粉塵の濃度測定に関する研究: 博士学位論文(京都大学) (1978—6)

# 第 1 編

リボンによる粒子捕集



## 第1章 緒 論

工業プロセス中には、蒸発、噴霧、吸収、気泡・ミスト分離など液滴を伴う操作が多く、その液滴径分布を知ることは重要であり、種々の測定法が検討されている。しかし液滴は固体粒子と異なり、不飽和空気中では容易に蒸発し、飽和空気中ではわずかな温度低下で凝縮が起こり、さらに捕集時または捕集後容易に合一や分裂が起こるなど取り扱いがむずかしいためいまだ決定的な測定法はなく、その都度使用条件に最も適合する計測方法を選択しなければならない。

さて液滴は径 $10\mu\text{m}$ 以下は特にミストと呼び主として凝縮や気相反応により生じ、それ以上は主として液の分裂により生じ $10\sim 1000\mu\text{m}$ の広範囲に分布することが多い。

液滴径分布測定法を大別すると、1) 全量測定法、2) サンプリングにより一部分を系外へ取り出して測定する方法、3) 写真およびその他の光学的手法により系に変化を与えずに測定する方法、4) 電極などを系中へ挿入し電気信号として取り出して測定する方法およびその他の方法の5つに分類できる。

このうち第1の全量測定法は、噴霧ノズルの性能試験など比較的小型の系に用いられ、これには液滴を固化した後固体粒子と同様の方法で液滴径分布を測定する方法<sup>16, 17, 35, 39, 44, 56, 58)</sup>と、液滴のまま測定する方法<sup>2, 6)</sup>がある。第3の写真<sup>15, 46, 60)</sup>およびその他の光学的方法<sup>1, 3, 22, 23, 29, 36, 37, 40, 45, 49, 50, 51, 62)</sup>は、系に変化を与えず測定できる利点はあるが、液滴径毎の流量を得るには、径のみならず同時に液滴速度を測定する必要があり、また管壁の液膜による光学的障害を除去する必要があるなどかなり手数を要する欠点がある。

第4の方法には高電位のワイヤ素子を含液滴気流中に挿入し、液滴が素子に衝突した時に生ずるパルス電流の波高幅から液滴径を求める方法<sup>53)</sup>や、熱線に液滴を衝突させその電気抵抗の変化<sup>26)</sup>あるいは温度補償回路に流れる電流<sup>55)</sup>から液滴径を測定する方法がある。これらの方法には液滴径分布の経時的あるいは場所的変化を測定できる長所はあるが、まだ実用化には多くの困難がある。その他熱拡散を利用した方法<sup>42)</sup>や熱電対を用いる方法<sup>30)</sup>もある。

しかし実際の工業プロセスで手軽に使用されているのは第2のサンプリングによる方法である。

この方法は、1) 処理を施したスライドガラスなどを系中に挿入し、液滴を衝突させた後系外へ取り出し顕微鏡などにより拡大し滴径分布を測定する方法、2) 衝突効率を高めるためノズルによってサンプルガスを加速後処理を施したスライドガラスに衝突させ顕微鏡などにより滴径分布を測定する方法（インパクト法）、および3) カスケードインパクトなどを用いて粒度分級を行ない、各段で捕集した液滴の重量などより滴径分布を測定する方法に分類される。

Ellis ら<sup>10)</sup> は蒸気-液滴系の測定に2) のインパクト法を採用している。インパクト法は微小液滴の測定が可能である反面、ノズルの入口面積に較べて出口面積はかなり小さく、狭いところへ多数の液滴が衝突するので高濃度での使用は困難であり、また比較的~~低濃度~~での使用でもシャッター装置が必要である。さらに、液滴径が大きい場合にはノズル壁面による捕集が無視できないなどの欠点がある。

Ranz ら<sup>33, 34)</sup>、Burkholtz<sup>7)</sup> およびBrink<sup>4)</sup> は3) の液滴用カスケードインパクトを用いて測定しているが、カスケードインパクト法では粒子径毎の液滴量が秤量によって容易に求まる利点がある反面、サンプリング導管が長いことや、後段のインパクトでの圧力が低いことのため蒸発や凝縮が起こり測定誤差になるなどの欠点がある。

粒度分級による液滴測定法にはカスケードインパクトの他焼結板を粗な方から順に並べそれらの分級径の違いを利用して測定する焼結板カスケード法<sup>6)</sup>、サンプルガスに対向して清浄ガス流を噴出し、この二つの流れが衝突する領域でサンプルガス中の液滴が分離され、清浄ガス流速に対応する分級径が決定されることを利用した測定法<sup>47, 53)</sup>、サイクロンによる分級を利用した測定法<sup>31)</sup> などがある。

これらに対して、1) のスライドガラスによる測定法は、直接気流中の液滴を捕集するので、ノズル壁による液滴捕集や、ノズルにより液滴を狭い範囲へ集中的に衝突させるなどの問題が無く、またサンプリング導管を必要としないため径変化が起こらず正しい液滴径が求まるなどの利点があり、さらにガス吸引などを必要とせず操作が簡便なため現在最もよく使用されている。一方インパクト方式に較べてサンプリング効率が悪いなどの問題もあるが、細い紙テープ製のリボンサンプラー

を使用するなどの方法<sup>9)</sup>によりサンプリング効率の増大も可能である。

さて、サンプリング法の基礎研究としてスライドガラスや紙テープの捕集面の処理法などの報告<sup>例えば9, 11, 12, 21, 24, 43, 54, 57, 59, 61)</sup>はいくつかあるが、スライドガラスなどリボン状の障害物による粒子の捕集効率に関する報告は序論で述べたように非常に少なくかつ不十分である。したがって十分な理論解析とその実験的検証を行なうことが必要である。

以上のように、スライドガラスなどのリボン状障害物による粒子捕集は液滴測定に広く使用されており、その衝突効率を知ることは重要であるが、このほかりボン捕集体の研究はリボンサンプラーに粘着剤を塗布する方式の粉塵サンプリング、慣性液滴分離機の性能予測、飛行機の翼への雲粒の衝突および含塵気流中の物体の摩擦などの基礎研究としても意義がある。

## 1. 1. リボンによる粒子捕集の既往の研究の展望

### 1. 1. 1. 理論的研究の概要

リボン捕集体の理論的研究はSell<sup>38)</sup> (1931) によって初めて行なわれ、リボンのまわりの流れを連続ポテンシャル流と仮定し、ストークス域の粒子流体抵抗を用いて、衝突効率を近似計算により求めている。以下、年代順に既往の研究を概観しよう。

Langmuir<sup>19)</sup> (1944~1945) は、流れを連続ポテンシャル流として粒子流体抵抗を広範囲に変化させた場合の、衝突効率ならびにリボン中心線上の局所捕集効率を計算している。

Sell およびLangmuir は連続ポテンシャル流を用いたが、Brun<sup>5)</sup> (1948) は、写像変換を2回行ないリボン背後に乱流ウエイクを生ずる実際の流れ場により近い不連続ポテンシャル流を計算してその結果を用いて衝突効率を求めているが、粒子流体抵抗はストークス域のみでまた衝突効率が0.02~0.78の範囲しか計算していない。なお計算結果はLangmuir の連続ポテンシャル流の結果より小さい。

Ranz ら<sup>32)</sup> (1952) は、よどみ点流れを用いて流れ場を実際よりかなり単純化し、ストークスの粒子流体抵抗を用いた場合の衝突効率を解析的に求めている。

植松ら<sup>48)</sup> (1955) は連続ポテンシャル流とストークスの粒子流体抵抗を使用し、

近似解析解を得ているが、解析上の仮定に問題があり、Langmuir の数値解よりかなり大きい結果を得ている。

同じころLewis<sup>20)</sup> (1955) はBrun 同様実際のリボンまわりの流れにより近い速度場を用いることを試み、ウエイクを含めたリボンを矩形半無限体 (Rectangular half body) で近似した場合の衝突効率を計算している。計算ではLangmuir 同様粒子流体抵抗を広範囲に変化させており、局所捕集効率の分布も求めている。しかし、その試みに反して速度場はさほど実際に近づかずそのため、Langmuir の連続ポテンシャル流の場合とほぼ同じ結果を得ている。

以上の1931—1968年の研究は全てリボンを気流に垂直に置いた場合のみを扱っている。

Morsi ら<sup>27, 28)</sup> (1972) は連続ポテンシャル流を用い、リボンの気流に対する角度が15°と90°の2種類の場合の衝突効率を求めている。計算にはリボン幅が2.5cmの場合について粒子レイノルズ数のストークス域からのずれを考慮した有次元運動方程式を使用している。しかし計算結果の表示に一般性がなく、例えばリボン幅や風速が異なる場合に粒子レイノルズ数の影響を推定できないなどの欠点がある。また結果もあまり実際とあわない。

吉川ら<sup>63)</sup> (1973) は連続ポテンシャル流を仮定して特定の条件下でリボン中心線上の局所捕集効率を求めている。計算には、粒子レイノルズ数や重力を考慮しているが結果の表示に一般性がない。またあまりよい結果は得ていない。

Cot<sup>8)</sup> (1974) は、前述のBrun 同様写像変換による不連続ポテンシャル流を用い、ストークスの粒子流体抵抗を仮定し、30~90°でリボンの気流に対する角度を変化させた場合の捕集効率を計算している。しかし、捕集効率が0.1以下の領域は求めている。

また、写像変換によって求めた速度場モデルは後述のように実際とあまり合わない。さらに50%捕集効率は本論文中に示した筆者の理論および測定結果とほぼ一致するものの、捕集効率曲線の傾斜は筆者らの結果よりゆるやか過ぎており、しかも特に捕集効率の低い部分での一致は不良である。さらに傾斜角を小さくした場合の捕集効率は筆者らの結果よりかなり大きくなっており、あまり一致していない。なお、ストークス域以外での捕集効率は計算していない。また局所捕集効率の分布も求め

ていない。

狩野<sup>52)</sup> (1975) は、前述の植松らと同様の方法で30~90°の範囲にわたってリボンの角度を変化させた場合の捕集効率の近似解析解を求めているが、やはり解析上の仮定に問題があり、余りよい結果はえていない。

以上リボン捕集体の理論研究を概観したが、速度場のモデルが捕集効率にかなり影響するにもかかわらず、比較的妥当と思われる流れモデルを用いているのはBrunとCotらのみであり、またそれらの研究ではストークスの粒子流体抵抗を用いた場合しか計算していない。また粒子流体抵抗のストークス域からのずれを系統的に検討したのはLangmuir およびLewis らであるが、その速度場モデルの妥当性に問題がある。

さらに重力の影響を系統的に検討した報告も見当たらない。

#### 1. 1. 2. 実験的研究の概要.

Sell<sup>38)</sup> (1931) は粒子径 $51.4\mu\text{m}$ の石墨粉を用いて幅10cmのリボンを風速  $9.08\text{ m/sec}$  の気流中に垂直に挿入した場合に流路壁面に生ずる短く黒い条痕群を連ねて粒子軌跡を推定し捕集効率を求めた。しかし、1つの条件のみの結果しか報告していない。

Landahl ら<sup>18)</sup> (1948) は平均径 $4,13,28\mu\text{m}$ の1%または5% Phenyl  $\alpha$ -naphthylamine を含むn-butylphthalate の多分散噴霧液滴を試料とし、風速 $0.9\sim 7\text{ m/sec}$  の気流中に幅2.5cmのリボンを挿入して捕集効率を測定した。気流は水平流でリボンは垂直および水平の2つの場合を検討した。しかし、捕集効率が20%以下のかなり低い領域しか測定していない。

Gregory ら<sup>14)</sup> (1953) はリボンの角度を $0\sim 360^\circ$ の広範囲に変化させた場合に石松子が幅2.5cmのリボンに衝突するときの平均または局所捕集効率を測定している。気流は水平流で風速は $0.5\sim 9.5\text{ m/sec}$ の範囲に変化させている。測定結果はばらつきがあり、また本論文に示す筆者らの結果に比べてその値は低くあまりよくあわない。

植松ら<sup>48)</sup> (1955) は $10\sim 20\mu\text{m}$ の噴霧水滴を含む風速 $6\sim 8\text{ m/sec}$ の気流中へ垂直に、幅 $0.6\sim 2.4\text{cm}$ の吸取紙製リボンを挿入し、捕集効率を測定している。なお、

捕集効率の測定範囲は $0.3 < \eta < 0.9$ であった。しかし、水滴径をスピンドル油を受け止め液とする液浸法によって測定しており、噴霧滴径がかなり小さいので油中の滴径変化が無視できず、慣性パラメーターの値を過少に評価している怖れがある。効率測定結果は本論文に示す筆者らの結果より高い。

Mayら<sup>25)</sup>(1967)はdibutyl phthalateの $20, 30, 40\mu\text{m}$ の単分散液滴を含む風速 $2.2 \sim 6.2\text{m/sec}$ の上昇気流中に幅 $0.1 \sim 1.9\text{cm}$ のリボンを垂直に挿入した場合の衝突効率を測定しているがその結果は本論文に示す筆者の測定値とほぼ一致している。

Starr<sup>41)</sup>(1967)は、Lycoperdon 胞子 ( $D_p = 4.5\mu\text{m}$ ,  $\rho_p = 0.73\text{g/cm}^3$ ) およびPaper Mulberry 胞子 ( $D_p = 12.8\mu\text{m}$ ,  $\rho_p = 1.1\text{g/cm}^3$ )を含む、 $0.3 \sim 4\text{m/sec}$ の下降流中に幅 $0.05 \sim 0.22\text{cm}$ の再飛散防止のためにグリセリンゼリーを塗布した紙またはガラス製のリボンサンプラーを垂直に挿入した場合の捕集効率を求め流れレイノルズ数の影響を検討している。

しかし、低風速で測定しているので重力の影響で捕集効率を過大に評価している可能性がある。このためであろうか、その測定値は本論文に示す筆者の結果より高めの値となっている。

狩野ら<sup>52)</sup>(1975)は平均径 $28\mu\text{m}$ の多分散アルミナ粒子 ( $\rho_p = 4.05\text{g/cm}^3$ )を、風速 $5 \sim 10\text{m/sec}$ の水平気流中に分散し、再飛散防止のため水を含ませた幅 $1 \sim 5\text{cm}$ の吸取紙製リボンサンプラーを挿入して捕集効率を測定した。ここでリボンの角度は $30 \sim 90^\circ$ の範囲で変化させている。しかし粒子比重が大きいため重力による管路内の濃度分布の偏りや管底への沈降による誤差が無視できず、また吸取紙を湿らせた程度で十分再飛散を防止できるか疑問である。なお測定結果は、本論文に示す筆者の結果や前述の他の研究者の結果とかなり離れて高い値となっている。

## 1. 2. 本編の内容

前述のように液滴サンプリングその他種々の分野でリボンによる粒子捕集の研究は重要であるが、その報告は比較的少なく、理論面では速度場のモデル、粒子抵抗係数、重力の影響などに問題点が残されており、また測定値も研究者によって差異が見られるなどの問題がある。

さて、最も主要な用途と考えられる液滴サンプリングの実施条件を考えよう。工

業プロセスには冷却塔や吸収塔など種々の気液接触を伴う装置が用いられているが、その装置内でのガス速度は通常0.1～6 m /secと比較的小さく、また装置外へ流出したガスのダクト内での速度は通常3～20m /secと速い。市販の顕微鏡用スライドガラスの幅は2.5cmであり、このスライドガラスを種々の風速の気流中へ挿入した場合の、粒子流体抵抗のストークス域からのずれを表わすパラメーター $\Phi$ 、および重力の影響を表わすFrの値をTable 1. 1に示す。

後述の捕集効率計算結果からわかるように、Frの値が50以下で重力の影響は顕著となるが、これは風速が2.5m /sec以下という条件に相当する。逆に風速が2.5m /sec以上では、パラメーター $\Phi$ の値が45を超え粒子抵抗係数のストークス域からのずれの影響が顕著となる。すなわち、 $\Phi$ やFrの影響の検討は実用上重要と考えられる。

Table 1.1 Values of  $\phi$  and Fr as functions of approaching air velocity  $u_0$ . ( $2r = 2.6\text{cm}$ ,  $\rho = 1.2 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_p = 1\text{g/cm}^3$ ,  $\mu = 1.8 \times 10^{-4}\text{poise}$ )

$u_0$ (cm/sec)	$\phi$ (-)	Fr (-)
1	0.178	$8.2 \times 10^{-4}$
10	1.78	$8.2 \times 10^{-2}$
20	3.6	$3.3 \times 10^{-1}$
50	8.9	2
70	12.5	4
100	17.8	8.2
150	26.7	18.4
250	45	51
500	89	204
1000	178	816
5000	890	$2 \times 10^4$
10000	1780	$8.2 \times 10^4$

さてリボンによる粒子の捕集機構としては、前述の慣性力、重力のほか、さえぎり、静電気力、拡散などが考えられるが、静電気力は粒子またはリボンに荷電する場合を除いて、自然に荷電されたときの電気力が比較的粗粒子 ( $> 5 \mu\text{m}$ ) では慣性力や重力に較べて支配的となることは考えられないので、ここでは除外する。また通常リボン幅は少なくとも0.1cm以上とかなり大きく、したがってペクレ数の値はかなり大きくなり拡散による捕集は問題にならないと思われる。なお、円筒の場合のStairmandの推定式を用いた計算では、拡散捕集効率の値は高々  $2 \times 10^{-4}$  以下となった。

上記見地より、本論文では速度場モデルとして実際に近いと考えられる不連続ポテンシャル流を採用し、粒子抵抗係数および重力の影響を考慮した慣性捕集効率を理論および実験の両面から詳細に検討することを試みた。以下にその内容を簡単に紹介する。

本編は5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、リボン前方の気体流線として不連続ポテンシャル流を用い、粒子捕集面と気流方向のなす角度が変化した場合の平均および局所慣性捕集効率を数値的に求め、その妥当性を実験によって検証している。まず、リボンまわりの流れおよびリボン後方に生じる乱流ウェイクの形状を煙風洞を用いた可視化によって求め、計算気体流線の妥当性を検証し、次に多数の粒子軌跡を数値計算し、粒子の抵抗係数をストークス域からニュートン域まで種々に変化させた場合の理論捕集効率を求め、ストークス域からはずれる度合と捕集効率の低下の程度との相関を求めている。また、種々の粒子抵抗係数の場合について、傾斜角が部分捕集効率曲線におよぼす影響を検討している。さらに、従来の理論では十分説明できなかった局所捕集効率の分布を説明するとともに、その傾斜角による影響も求めている。一方単分散粒子である石松子を試料として、捕集効率測定実験を行ない、上記計算結果の妥当性を検証している。

第3章では、リボンまたは球による粒子の重力さえぎり理論捕集効率を検討している。リボンについては、まず不連続ポテンシャル流を与える流れ関数の式を導き、下降流および水平流での重力とさえぎりを同時に考慮した捕集効率の解析解を求め

ており、さらにそれらにおよぼす傾斜角の影響を検討している。球については、ポテンシャル流を仮定して下降流での重力とさえぎりを同時に考慮した捕集効率を求めている。これらの結果を用いて、3種類の障害物基本形状すなわちリボン、円筒および球のさえぎり捕集効率を比較し、次に下降流でリボン、円筒および球で重力とさえぎりを同時に考慮した捕集効率および局所重力捕集効率を比較し、さらに水平流でリボンおよび円筒で重力、さえぎり捕集効率および局所重力捕集効率を比較検討している。

第4章では、リボンによる粒子の慣性・重力捕集を計算と実験によって検討している。上昇、下降および水平流で計算した捕集効率曲線を第1章で求めた慣性捕集効率曲線と比較してそれらの特徴を示すとともに、重力の影響の程度を明らかにしている。さらに粒子の抵抗係数がストークス域からずれた場合の重力の影響の程度の変化についても検討している。次に、従来の2～3の簡便法による慣性重力捕集効率の推定結果の妥当性を検討している。さらに重力の影響の顕著に現れる条件下で、単分散粒子を用いて捕集効率測定実験を上昇、下降および水平の各場合について行ない、上記捕集効率計算結果の妥当性を検証している。

第5章は結論である。

なお、本編は次にあげる筆者の既発表報文、研究報告などを骨子としてまとめたものである。

筆者の既発表報文、研究報告などの目録（第1編関係）

- 1) 宇敷建一，井伊谷鋼一；粉体工学研究会誌，13，315（1976）：液滴径測定（第1章の1部に相当）
- 2) 宇敷建一，久保清和，井伊谷鋼一；化学工学論文集，3，172（1977）：リボンによる粒子の慣性分離——傾斜角およびストークス域からのずれの影響——（第2章に相当）

（英語訳）K.Ushiki,K.Kubo,K.Iinoya：International Chem.Eng.,18，501（1978）

: Inertial separation of particles by means of a ribbon. Effects of angle of inclination and deviation from Stokes law

- 3) 宇敷建一, 井伊谷鋼一; 化学工学論文集, 3, 635 (1977) : リボンまたは球による粒子の重力さえぎり理論捕集効率 (第3章に相当)
- 4) 宇敷建一, 久保清和, 平野茂樹, 井伊谷鋼一; 化学工学論文集, 4, 425 (1978) : リボンによる粒子の慣性重力捕集効率 (第4章に相当)

#### Nomenclature

Fr = Froude number ( $=u_0^2/gr$ )	[-]
g = acceleration of gravity	[cm/sec <sup>2</sup> ]
r = half width of ribbon	[cm]
$u_0$ = approaching air velocity	[cm/sec]
$\rho$ = air density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_p$ = particle density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\mu$ = air viscosity	[poise]
$\Phi$ = parameter ( $= 18 ru_0\rho^2/(\rho_p\mu)$ )	[-]

#### Literature Cited

- 1) Allen, J.B., R.F. Tanner, D.M. Meadows and L.M. Boggs; Velocity of particulate in laminar and turbulent gas flow by holographic techniques: PB Report (PB 206950) (1971-10)
- 2) Binark, H. and W.E. Ranz; Quick method for measuring drop size of hollow cone sprays: Ind. Eng. Chem., 51, 701 (1959)

- 3) Bol, J., J. Gebhart, W. Heinze, W.D. Petersen und G. Wurzbacher; Ein Streulicht-Teilchengrössenspektrometer für Submikroskopische Aerosole hoher Konzentration: Staub Reinh. Luft, 30, 475 (1970)
- 4) Brink, J.A.; Cascade impactor for adiabatic measurements: Ind. Eng. Chem., 50, 645 (1958)
- 5) Brun, E. et M. Vasseur; Captation mécanique de corpuscules en suspension dans l'air: La Recherche Aéronautique, 1, 15 (1948)
- 6) Bürkholtz, A; Messmethoden zur Tropfengrössenbestimmung : Chemie -Ing.-Techn.,45, 1 (1973)
- 7) Bürkholtz, A; Eichuntersuchungen an einem Kaskadenimpaktor: Staub Reinh. Luft, 33, 397 (1973)
- 8) Cot, C. et G. Arnaud; Captation des aerosols par impaction sur less collecteurs plans: Promoclim E, 5, 295 (1974)
- 9) Deysson, J.Y. and J. Karian; Approximate sizing of single fluid and pneumatic atomizers: Proceeding of the 1-st-international conference on liquid atomization and spray systems, 10-2, p242 (1978) Tokyo
- 10) Ellis, S.R.M. and M.J.F. Kelly; The collection and size measurement of droplet dispersions in the presence of condensable vapours: Proceedings of the symposium on the interaction between fluids and particles, London, 20, June (1962) p107
- 11) Farlow, N.H., and F.A. French; Calibration of liquid aerosol collectors by droplets containing uniform size particles: J. Colloid Sci. 11, 177 (1955)
- 12) Fraser, R.P. and P. Eisenklam; Liquid atomisation and the drop size of sprays: Trans. Instn. Chem. Engrs., 34, 294 (1956)

- 13) Geist, J.M., J.L. York and G.G. Brown; Electronic spray analyzer for electrically conducting particles : *Ind. Eng. Chem.*, 43, 1371 (1951)
- 14) Gregory, P.H. and O.J. Stedman; Deposition of airborne lycopodium spores on plane surfaces: *Ann. Applied Biology*, 40, 651 (1953)
- 15) Hair, A.R. and I.D. Doig; A photographic technique for the determination of the position and velocity of particles moving in tubes: *Chem. Eng. Journal*, 9, 175 (1975)
- 16) Hasson, D. and J. Mizrahi; The drop size of fan spray nozzles: measurements by the solidifying wax method compared with those obtained by other sizing techniques: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 39, 415 (1961)
- 17) Kurabayashi, T., T. Karasawa and K. Hayano: Liquid nitrogen freezing method for measuring spray droplet sizes; proceeding of the 1st-international conference on liquid atomization and spray systems, 12-1, p285, (1978) Tokyo
- 18) Landahl, H.D. and R.G. Herrmann; Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders, and slides, and the efficiency of impaction of the droplets: *J. Colloid Sci.* 4, 103 (1948)
- 19) Langmuir, I.; Mathematical investigation of water droplet trajectories (Report No. RL-224, 1944-1945); "The collected works of IRVING LANGMUIR", Editors: C.G. Suit and H.E. Way, Volume 10, p.348 Pergamon Press, Oxford
- 20) Lewis, W. and R.J. Brun; Impingement of water droplets on a rectangular half body in a two dimensional incompressible flow field: N.A.C.A. Technical Note 3658 (PB 119873) (1955)
- 21) Liddel, H.F. and N.W. Wootten; The detection and

- measurement of water droplets: Q.J.Roy. Met. Soc.,  
83, 263 (1957)
- 22) Lioy, P.J., Rimberg, D., and F.J. Haughey; A laser light scattering particle size spectrometer sensitive in the submicron diameter range: J. Aerosol Sci., 6, 183 (1975)
- 23) MacLoughlin, P.F. and J.J. Walsh; A holographic study of interacting liquid sprays: Proceeding of the 1st-international conference on liquid atomization and spray systems, 13-2, p.325 (1978), Tokyo
- 24) May, K.R.; The measurement of airborne droplets by the magnesium oxide method: Journal Sci. Inst., 27 128 (1950)
- 25) May, K.R. and R. Clifford; The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs: Ann. Occup. Hyg., 10, 83 (1967)
- 26) Medecky, H., and D.E. Magnas; Liquid aerosol detection and measurement: Preprint of A.P.C.A. (#75-24.1) (1975)
- 27) Morsi, S.A. and A.J. Alexander; An investigation of particle trajectories in two phase flow systems: J. Fluid Mech., 55, 193 (1972)
- 28) Morsi, S.A.; Impingement separators - An experimental and theoretical investigation: Filtration & Separation, 465 (1975)
- 29) Murakami, T. and M. Muneharu; Laser holographic study on atomization processes: Proceeding of the 1st-international conference on liquid atomization and spray systems, 13-1, p317 (1978), Tokyo
- 30) Paassen, C.A.A.; Thermal droplet size measurements using a thermocouple: Int. J. Mass Transfer, 17, 1527 (1974)

- 31) Patton, W.F. and J.A. Brink; New equipment and techniques for sampling chemical process gases: J. Air Pollut. Control Assoc. , 13, 162 (1963)
- 32) Ranz, W.E. and J.B. Wong; Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors: Ind. Eng. Chem., 44, 1371 (1952-6)
- 33) Ranz, W.E. and C. Hofelt: Determining drop size distribution of a nozzle spray; Ind. Eng. Chem., 49, 288 (1957)
- 34) Ranz, W.E. and E.J. Katz; Determining impaction efficiencies of mist collection equipment: J. Air Pollut. Control Assoc., 8, 329 (1959)
- 35) Rinkes, H. and F. Fahrmi: Verfahrenstechnik , 1, 346 (1967)
- 36) Schen, C.N. and E.W. Mihalek; Applications of a scattering spectrometer system for marine aerosol measurement: Trans. A.S.M.E, Journal Eng. Power p.533 (1977)
- 37) Seger, G. and F. Sinsel; Untersuchung einer Zerstäubungsvorrichtung mit Hilfe der Kurzzeit-Mikroholographie: Staub Reinh. Luft, 30, 471 (1970)
- 38) Sell, W.; Staubausscheidung an einfachen Körpern und in Luft filtern: VDI Forschungsheft, No.347 (1931)
- 39) Shiloh, K., S. Sideman and W. Resnick; Crystallization in a dispersed phase: Can. Journal Chem. Eng., 53, 157 (1975)
- 40) Sinclair, D.; A new photometer for aerosol particle size analysis: J. Air Pollut. Control Assoc. , 17, 105 (1967)
- 41) Starr, J.R.; Inertial impaction of particulates upon bodies of simple geometry: ann. Occup. Hyg., 10, 349 (1967)

- 42) Stöber, W. and U. Zessack; Zur Theorie einer konischen Aerosolzentrifuge: Staub Reinh. Luft, 24, 295 (1964)
- 43) Tate, R.W.; Immersion sampling of spray droplets: A.I.Ch.E. Journal, 7, 574 (1961)
- 44) Taylor, E.H. and D.B. Harmon; Measuring drop sizes in sprays: Ind. Eng. Chem., 46, 1455 (1954)
- 45) Tishkoff, J.M. and C.K. Law; Application of a class of distribution functions to drop-size data by logarithmic least-squares technique: Trans. ASME, Journal Eng. Power p684 (1977)
- 46) York, J.L. and H.E. Stubbs; Photographic analysis of sprays: Trans. A.S.M.E., 74, 1157 (1952)
- 47) 井伊谷鋼一, 牧野和孝, 外山茂樹, 後藤昭博: ミスト粒度分析器の開発: 化学工学, 37, 858 (1973)
- 48) 植松時雄, 狩野武, 滝沢和弘, 松浦方美; 物体による霧粒の捕捉: 繊維機械学会誌, 8, 122 (1955)
- 49) 金川昭; 煙霧体の粒径測定: 化学工学, 32, 1156 (1968)
- 50) 金川昭; 側方光散乱粒子カウンターの応答計算: 化学工学, 34, 521 (1970)
- 51) 金川昭; 光散乱法による浮遊粉じん測定上の問題点: 粉体工学研究会誌, 11, 141 (1974)
- 52) 狩野武, 藤井史朗, 藤井謙治; 固気混相流中に置かれた平板による粒子の捕集に関する研究: 粉体工学研究会誌, 12, 71 (1975)
- 53) 後藤昭博, 牧野和孝, 外山茂樹, 井伊谷鋼一; ミスト粒度分析器の開発とその性能: 粉体工学研究会誌, 11, 175 (1974)

- 54) 佐野悞, 太田洋および矢野洋三; 化学斑点法による煙霧体の粒度測定——硝酸塩水溶ミストの粒度: 愛知工業大学研究報告第13号B. p.361 (1978)
- 55) 下浦一邦, 金川昭, 筒井天尊; 熱線法による同伴飛沫の粒径測定: 化学工学, 35, 577 (1971)
- 56) 棚沢泰, 広安博之; 溶けたろうによる噴霧の粒度分布測定法: 機械学会論文集, 26, 224 (1960)
- 57) 棚沢泰, 武野真也; 燃料油粒などの直径測定用受止め液について: 機械学会論文集, 35, 1741 (1969)
- 58) 東畑平一郎, 関口勲; 噴霧造粒法の基礎試験について: 化学工学, 26, 818 (1962)
- 59) 抜山四郎, 棚沢泰; 空気による液体微粒化の実験 (第1報): 機械学会論文集, 4, 128 (1938)
- 60) 広安博之, 角田敏一; 蛍光による燃料噴霧粒の粒度分布測定法: 第3回液体の微粒化に関する講演会予講集, p.47 (1974)
- 61) 森島直正, 大引常弘, 小沢憲一; 粉塵と液滴の分離捕集: 粉体工学研究会誌, 3, 406 (1966)
- 62) 横地明, 金川昭; 側方光散乱粒子カウンターの改良——光学レンズ系幾何条件の改善——: 化学工学, 34, 521 (1970)
- 63) 吉川障, 加賀昭和; ルーバー形エリミネーターの脱水特性に関する研究: 空気調和・衛生工学, 47, 11 (1973)

## 第2章 リボンによる粒子の慣性捕集

### 緒 言

衝突式ミスト分離機および平板を用いる粒子サンプリングにおいては、粒子のリボンへの衝突効率が重要である。ここで衝突効率とは反発および再飛散が起こらない場合の慣性衝突による捕集効率のことである。その衝突効率に関しては種々の報告があるが<sup>2, 3, 5, 8, 9, 11, 14, 15)</sup>、第1章で概観したように前方の流れと粒子の抵抗係数の仮定に問題が残されている。またシャッター装置を用いてサンプリングを行なう場合などには局所衝突効率が必要になるが、その検討も少くまだ不十分である。

本章ではこれらの点に留意して、主気流に対する粒子捕集面の傾斜角度を種々変化させた場合の衝突効率および局所衝突効率分布の理論計算を行ない多くの有用な知見を得た。さらに単分散粒子である石松子を用いて広範な条件下で実験的検討を行ない、これらの計算結果が妥当であることを確かめたので報告する。

### 2. 1. リボンまわりの流れ

#### 2. 1. 1. 気流の計算式

粒子の運動は流線の形状に支配されるので、計算に使用する気流の基礎式が精度よく実際の流れを表わしているか否かは重要である。また粒子軌跡の数値計算を精度よく行ない、広範囲の条件下で衝突効率の計算を行なうには、各点での風速が容易に算出できることが望ましい。

このような見地から、本編では後述の如く流れが実際と良く一致し、また解析解によって各点での風速が求まるHess<sup>7)</sup>の不連続ポテンシャル流の式を気流の計算式として使用した。なおリボン状物体による粒子のサンプリングや慣性分離が行なわれる通常の条件では、流れのReynolds数は70~7000といわれており主気流（リボン前方の流れと後方の後流外部）はポテンシャル流とみなせる<sup>11)</sup>。Fig 2. 1 Aに座標軸の取り方および記号説明を示す。リボン中心軸を原点とし、リボン前縁に向かってx軸を取る。さらに同原点から粒子捕集面に垂直後方へy軸を取る。このとき無次元風速のx, y方向成分は次式で表わされる。

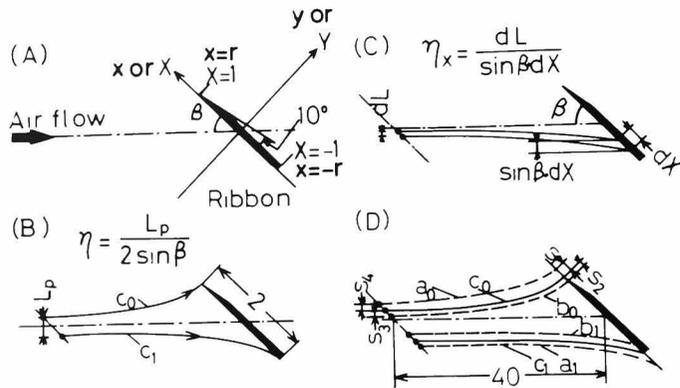


Fig. 2 · 1 Definitions of co-ordinates, inclination angle, impaction efficiency

$$U_x = \frac{\sin\beta}{2\pi} \ln \left\{ \frac{(1+X)^2 + Y^2}{(1-X)^2 + Y^2} \right\} - \cos\beta \quad (2-1)$$

$$U_y = \sin\beta \left[ \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{1-X}{Y} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{1+X}{Y} \right) \right\} + 1 \right] \quad (2-2)$$

## 2. 1. 2. 計算流線の妥当性について

H e s s の式はポテンシャル流での解析解であり、後流を含めたりボン形状が妥当であればその外部の流れは正しく求まる。しかし後流を含めたりボン形状については報告が無いので、本報では以下のごとく検討した。

衝突効率測定に使用するのと同じダクト内でパラフィンミストを用いてリボン後流の形状を測定した（補遺 2—1 参照）。測定は傾斜角  $10^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  , 風速  $0.5 \text{ m/sec} \leq \bar{u} \leq 9 \text{ m/sec}$  の範囲で行なった。Fig. 2 · 2 には Eqs. (2—1) , (2—2) から数値計算により求めた流線と測定結果の比較の一例を示すが、両者の一致は良好である。 $\beta$  が  $10^\circ$  と小さいときには、計算によって求めたウェイクの方がやや小さいが、工学的にはさほど大きい相違はない。すなわち Eqs. (2—1) , (2—2) は比較的広範囲の条件下で使用できるものと考えられる。なお May らが煙風洞を用いてリボン前方の流線を測定しており、それとの比較を補遺 2—2 に示す。

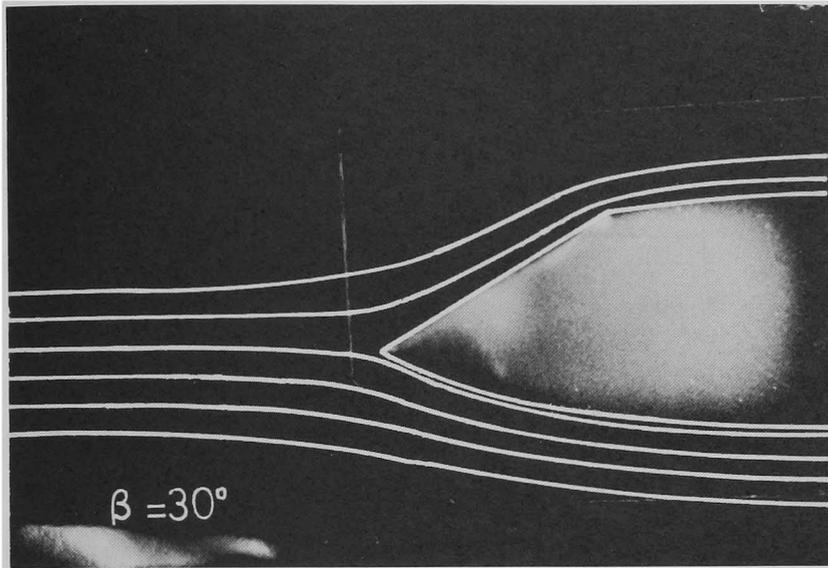


Fig. 2 2 Theoretical streamlines calculated from Hess' theory super-imposed on photographs of wake

## 2. 2. 理論および計算方法

### 2. 2. 1. 粒子の運動方程式 (Fig. 2・1 参照)

粒子の抵抗係数としては、原則として使用範囲が広くかつ精度の高いO dar の式 (Eq. (2-5))<sup>13)</sup> を用いたが、粒子レイノルズ数が非常に大きく同式の適用できない場合には田中らの式 (Eq. (2-6))<sup>16)</sup> を用いた。このとき運動方程式は通常の無次元化手法により次式で与えられる。

$$\frac{d^2X}{dT^2} = - \frac{C \cdot \text{Re}_{po} \cdot V_r}{24 \cdot (2\Psi)} \left( \frac{dX}{dT} - U_x \right) \quad (2-3)$$

$$\frac{d^2Y}{dT^2} = - \frac{C \cdot \text{Re}_{po} \cdot V_r}{24 \cdot (2\Psi)} \left( \frac{dY}{dT} - U_y \right) \quad (2-4)$$

ただし

$$C = \frac{24}{\text{Re}_{po} \cdot V_r} (1 + 0.125 \text{Re}_{po}^{0.72} V_r^{0.72}) \quad (\text{Re}_{po} \cdot V_r < 1000) \quad (2-5)$$

$$C = 10^{0.1180904 \{ \log(\text{Re}_{po} \cdot V_r) \}^2 - 0.9222214 \log(\text{Re}_{po} \cdot V_r) + 1.399194} \quad (1000 < \text{Re}_{po} \cdot V_r < 7 \times 10^4) \quad (2-6)$$

ここで

$$V_r = \sqrt{\left( \frac{dX}{dT} - U_x \right)^2 + \left( \frac{dY}{dT} - U_y \right)^2} \quad (2-7)$$

上記運動方程式から明らかなように、粒子の運動は  $2\Psi$ ,  $\text{Re}_{po}$ ,  $\beta$  および初期条件により決定される。しかし、これらのパラメーターのうち  $2\Psi$ ,  $\text{Re}_{po}$  は共に粒子径を含んでいる。一方液滴のスライドガラスによるサンプリング等では同一条件下で種々の粒子径に対する衝突効率が必要である。したがって出来るだけ粒子径に無関係なパラメーターによって計算結果を表示すべきである。それ故本報では、次式のごとき一種のストークスの粒子抵抗法則からのずれを表わすパラメーター  $\Phi$  を  $\text{Re}_{po}$  の代わりに使用する。(補遺 2-3 参照)

$$\Phi = \frac{\text{Re}_{po}^2}{2\Psi} = \frac{18 \rho^2 r u_o}{\rho_p \mu} \quad (2-8)$$

すなわち、衝突効率は  $2\Psi$ ,  $\Phi$ ,  $\beta$  の関数となり  $\Phi$  の値が大きい程ストークス域からはずれる。ストークス域で計算した衝突効率曲線からどの程度はずれるかを粒子径によらない  $\Phi$  の値で判定できることが、これら3つのパラメーターを用いて衝突効率を表示する手法の特長である。

一方、 $\text{Re}_{po}$  には  $\Phi$  に較べ物理的意味を直感的に理解しやすい利点があるので、捕集機構の検討には必要に応じて  $\text{Re}_{po}$  も使用することにする。

さて、ストークスの抵抗法則が使用できると仮定して求めた衝突効率曲線を用いて、非ストークス域での衝突効率に相当する慣性パラメーターを求め、その値を  $\Psi_a$  と定義する。

またEqs. (2-3), (2-4) における  $V_r$  の値は位置によって変化するが、粒子が発射してから衝突するまでである一定の代表値  $\bar{V}_r$  をとるとみなせば、 $\Psi_a$  は次式で与えられると考えられる。

$$\begin{aligned} \Psi_a &\equiv \Psi / (1+h) = \Psi / (1 + 0.125 \operatorname{Re}_{po}^{0.72} \bar{v}_r^{0.72}) \\ &= \Psi / \{ 1 + 0.125 \phi^{0.36} (2\Psi)^{0.36} \bar{v}_r^{0.72} \} \\ &\quad (\operatorname{Re}_{po} \cdot \bar{v}_r < 1000) \quad (2-9) \end{aligned}$$

## 2. 2. 2. 衝突効率の計算

リボンに単位時間当たり衝突する粒子量と、リボンを気流中に挿入しない場合に、仮想のリボン部分を通過する粒子量との比を衝突効率と定義する。本報では、リボン無限前方で粒子濃度が均一であると仮定して数値計算を行なった。このとき、Fig. 2・1 Bに示す衝突により粒子が除去される流れの幅 $L_p$ と、リボンの流れ方向の無次元投射幅 $2 \sin \beta$ から衝突効率 $\eta = L_p / (2 \sin \beta)$ が求まる。

またリボン上のある位置で微小長さ $dX$ 内で粒子が衝突除去される流れの幅を $dL_p$ とするなら、その位置における局所衝突効率は次式で定義される(Fig. 2・1 C参照)。

$$\eta_x \equiv \frac{1}{\sin \beta} \frac{dL_p}{dX}$$

Eqs. (2-1), (2-2)の流れを用い、Eqs. (2-3) ~ (2-7)の運動方程式からKutta-Mersonの逐次計算法<sup>10)</sup>によって数値的に粒子軌跡を求める。なお計算には京都大学大型計算機センターのFACOM230-75型電子計算機を利用した。Fig. 2・1 Dに示すように、計算における粒子の最初の出発点は、 $Y_0 = -40 \sin \beta$ ,  $X_0 = 40 \cos \beta - 1$ とし、 $Y_0$ は固定して $X_0$ のみ0.02のきざみ幅で増加し、リボン先端を通る粒子軌跡すなわち限界粒子軌跡 $c_0$ を挟む2本の粒子軌跡 $a_0 b_0$ を求め、内挿によって $c_0$ を求める。同様にして $c_1$ を求め衝突効率を計算する。なお $Y_0$ の値は試行錯誤により決定したものであり、これ以上出発点をリボンから遠ざけても衝突効率にはほとんど影響を与えない。

### 2. 3. 実験装置と方法

装置のフローシートをFig. 2・3 Aに示す。気流は大気からベルマウスを通り角ダクトへ流入する。ダクト内風速は3～9 m/secの範囲で変化させる。入口から約850mmの位置で石松子を、ミキサー型分散器から気流中へ向流として約0.05g/minの割合で分散供給する。粒子供給部より1 m 後方で測定を行なう。測定部を通過した気流中の石松子をサイクロンにより分離し、清浄空気流量をベンチュリー流量計により測定する。濃度分布測定は円筒濾紙利用のダストチューブ（口径10 $\phi$ ）を用いて、リボン中心線上で壁から10,30,50,70,90mmの各位置で行ない、この測定結果の図積分により仮想リボンを通過する粒子量と供給粒子量との比を求める。次に再飛

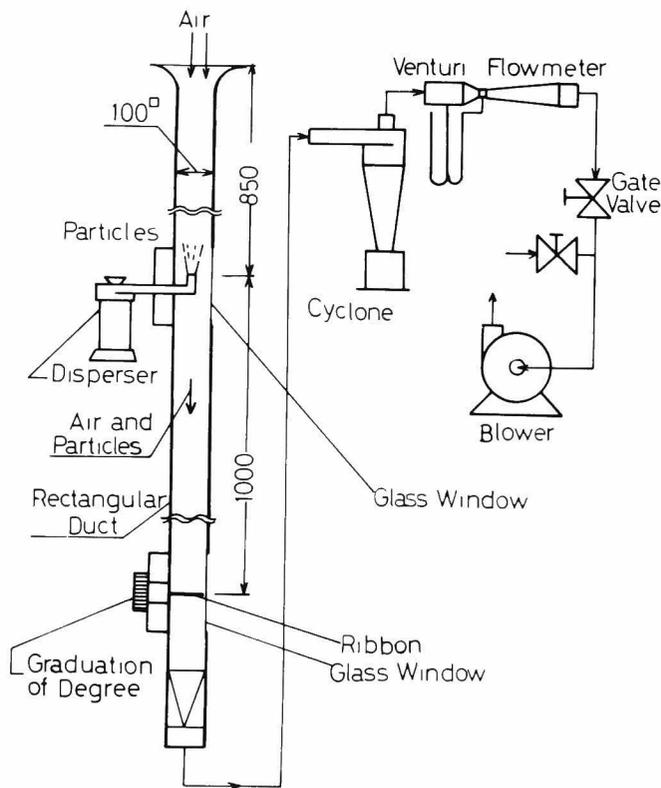
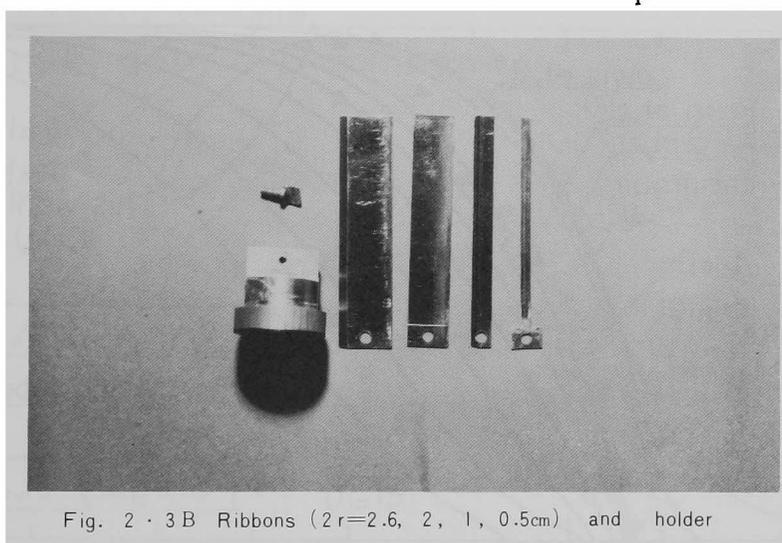


Fig. 2・3 A Schematic diagram of experimental apparatus

散を防止するため表面に油（日本光学製「Immersion oil」を使用した。）を塗布したリボンを経流中に挿入し、供給粒子量とリボンにより衝突捕集された粒子量との比を求め、衝突効率を計算する。リボンはステンレス製（幅0.5~2.6cm, 0.8mm厚）で前縁は厚みの影響を除くためナイフエッジとなっている。(Fig. 2・3 B 参照)。なおリボン上での再飛散による誤差を防止するため、1回の石松子捕集量を5 mg以下としたが、捕集量が少なく測定誤差が±10%程度あるので精度を高めるために同一条件で数回測定しその平均値をリボンへ捕集した粒子量とした。その結果衝突効率の推定値の再現性が高いことを確認した。気流に対する傾斜角はリボンと同軸にとりつけた角度目盛板によって調節し、目盛はガラス窓からリボンを写真撮影することにより検定した。石松子の空気中での終末沈降速度は研究者により若干相違しているが<sup>1, 4, 5)</sup>、その平均値は1.76cm/sec (24 $\mu$ m 相当,  $\rho_p = 1.05g/cm^3$ ) であ



るから慣性パラメーターの計算には1.76cm/secを使用した。なお顕微鏡による粒子径分布の測定では、幾何平均径33 $\mu$ m, 幾何標準偏差1.09 (207個測定) でありほぼ単分散とみなせる。沈降径が顕微鏡径より小さいのは石松子の形状がいくぶん偏平な三角錐状のためと考えられる。

一方局所衝突効率の測定は、厚さ0.8mm幅26mmのスライドガラス表面に、流動性の小さいシリコングリースを薄くぬり、顕微鏡により衝突粒子を計数し、重量に換算する。ここで換算係数は $9.4 \times 10^7 \text{ No./g}^4$ を使用した。

## 2. 4. 結果と考察

### 2. 4. 1. リボンを気流に垂直に挿入した場合の衝突効率

Fig. 2・4にEqs. (2-1)～(2-7)を用いた計算値および石松子を用いた測定値を示すが両者の一致は良好である。

さらに従来の測定結果との一致もよい。しかし従来の理論計算では後流の形状を充分説明できない流れを使用しているため、従来の計算結果は測定値とかなり異なっていたと推定できる。(Fig. 2.5参照)。風速またはリボン幅が大きいときや、粒子密度が小さい場合には、 $\Phi$ の値が増大しストークスの抵抗法則が適用できない。 $\Phi$ が大きくなるとEq. (2-9)で定義される $h$ の値が大きくなり、 $\Psi_a$ が減少する

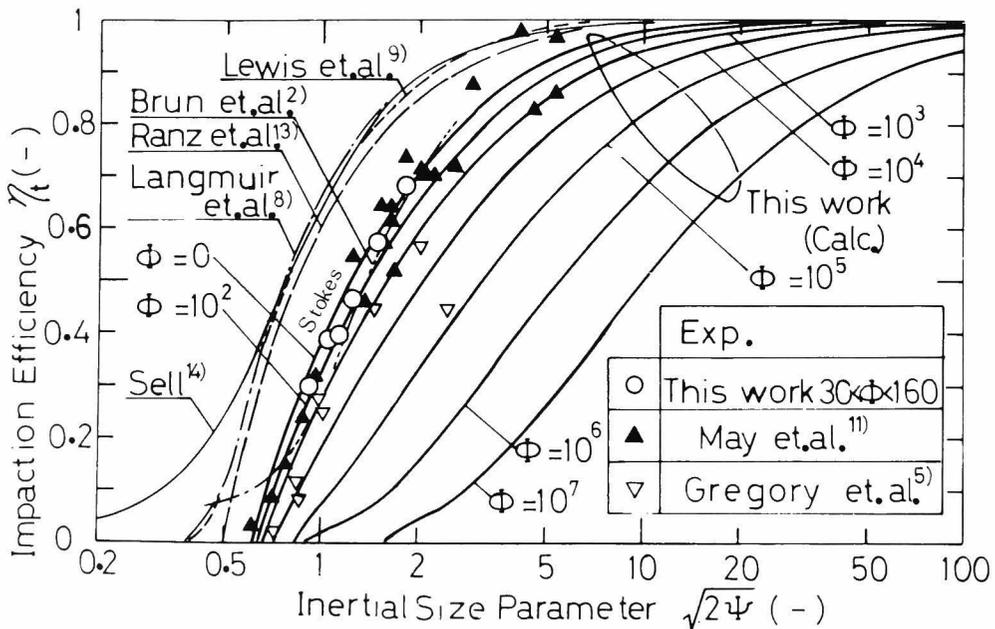


Fig. 2 4 Relation between impaction efficiency and  $\sqrt{2}\Psi$  at various values of  $\Phi$ .  
(with a ribbon perpendicular to the flow)

ため衝突効率は小さくなる。衝突効率の数値解より逆算して求めた $h$ の数値近似式をEqs. (2-10), (2-11)に示す。衝突効率が高くEq. (2-10)の使用できる

場合には、 $h$ の値は慣性パラメータの値にあまり影響されず、 $Re_{po}$ の0.76乗に比例して増大しているので、Eq. (2-9)中の $\bar{v}_r$ はほぼ一定であると考えられる。一方衝突効率が低く、Eq. (2-11)の適用できる場合には、限界軌跡を描く粒子がリボン前方よどみ点付近の低風速部を通過するため、 $\bar{v}_r$ の値は慣性パラメータによって大きく左右され、その結果Eq. (2-11)中の慣性パラメータの項の指数は大きい。

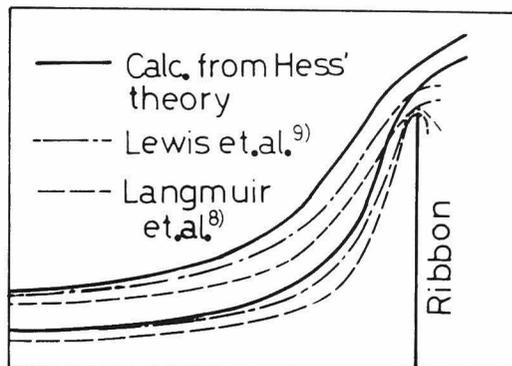


Fig. 2-5 Comparative diagram of stream lines past a ribbon

$$\sqrt{2\Psi} > 0.0183 Re_{po}^{0.58+0.921};$$

$$h = 0.0365 Re_{po}^{0.76} (\sqrt{2\Psi})^{-0.097} \quad (2-10)$$

$$\sqrt{2\Psi} \leq 0.0183 Re_{po}^{0.58+0.921};$$

$$h = (1.34 Re_{po}^{0.12} - 1.51) (\sqrt{2\Psi})^{1.8}$$

$$(10 < \Phi < 10^4) \quad (2-11)$$

なおいずれの場合も $h$ の値はEq. (2-9)で $\bar{v}_r$ を1とした場合よりもかなり小さい。またストークスの抵抗法則の成り立つ場合の衝突効率の数値近似式は次の様になり、Eqs. (2-9) ~ (2-13)を用いる事によって任意の $\Phi$ 、 $\sqrt{2\Psi}$ における衝突効率の数値が求まる。

なお、これらの数値近似式による衝突効率の計算結果と $Re_{po}$ をパラメータとした厳密な数値計算による理論衝突効率の比較を補遺2-4に示す。また有次元表示を用いた場合の衝突効率曲線の例を補遺2-5に示す。さらに、リボン、円板、円筒および球の衝突効率の比較を補遺2-6に示す。

$$\sqrt{2\Psi} > 1.6 ;$$

$$\eta = 1 - \exp\left\{-0.9595 \left(\ln \frac{\sqrt{2\Psi}}{0.623}\right)^{1.36}\right\} \quad (2-12)$$

$$\sqrt{2\Psi} \leq 1.6 ;$$

$$\eta = 1 - \exp\left\{-0.9421 \left(\ln \frac{\sqrt{2\Psi}}{0.623}\right)^{0.899}\right\} \quad (2-13)$$

Fig. 2・6に衝突効率一定となる慣性パラメーターの $\Phi$ の変化に伴う相対値の変化を示す。50%衝突慣性パラメーターではLangmuirら<sup>8)</sup>の計算値と大体一致しており、Lewisら<sup>9)</sup>の計算値より小さい。また同図より90%衝突慣性パラメーターに及ぼす $\Phi$ の影響は50%の場合に比べてかなり顕著であり、衝突効率が高い程 $\Phi$ の影響が大きくなることわかる。

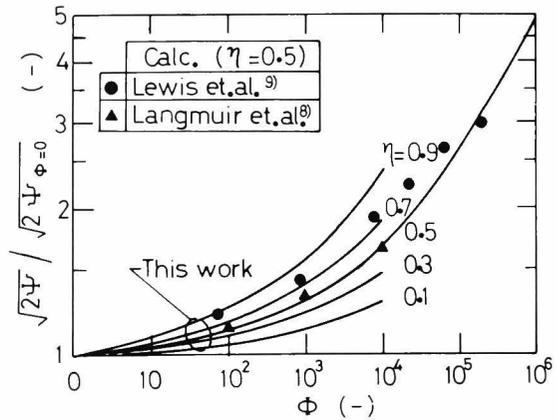


Fig. 2・6

Correction factor to be applied to characteristic size parameter to account for non-stokes-law behavior of particle motion

#### 2. 4. 2. 気流に対してリボンが垂直でない場合の衝突効率

Fig. 2・7 Aに傾斜角 $\beta$ を変化させた場合の衝突効率の計算値および測定値を示す。両者の一致は良好であり、全体として $\beta$ の値が小さい程衝突効率は高い。 $\beta$ が小さくなると、リボン幅は同一であっても気流をさえぎる投影幅が小さくなり粒子はリボンへ衝突しやすくなる様に思われるが、リボン表面での気流の方向転換が総体として小さくなるためこの影響は打ち消され、全体として $\beta$ の衝突効率におよぼす影響は小さい。しかし $\beta$ が小さい場合にはよどみ点の少し前方に気流が鋭く方向転換する部分があるため、慣性パラメーターのかなり小さい粒子でもある程度リボンへ衝突する。一方Fig. 2・7 BにCotら<sup>3)</sup>の計算結果と筆者らの測定値の比較を

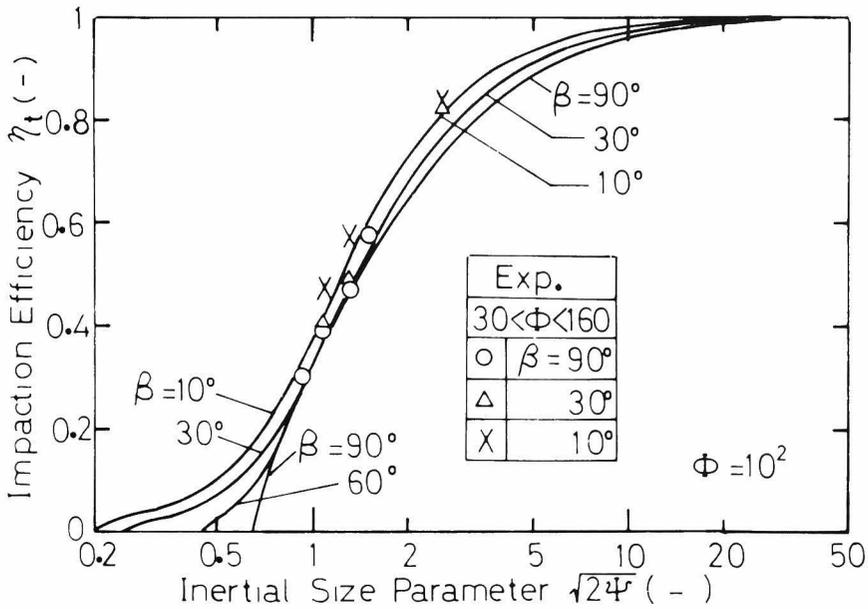


Fig. 2 7A Relation between impaction efficiency and  $\sqrt{2\Psi}$  with a ribbon inclined to the flow

示すが、計算結果が測定値より大きく、また傾斜角の影響も計算の方が大きすぎる結果となっており、Cot らの計算結果は妥当でない。なお、Cot らは流線の計算結果を示していないので、その流れモデルの妥当性は検討できないが、上記の結果よりリボン傾斜角の小さい場合には実際と合わなくなるであろう。

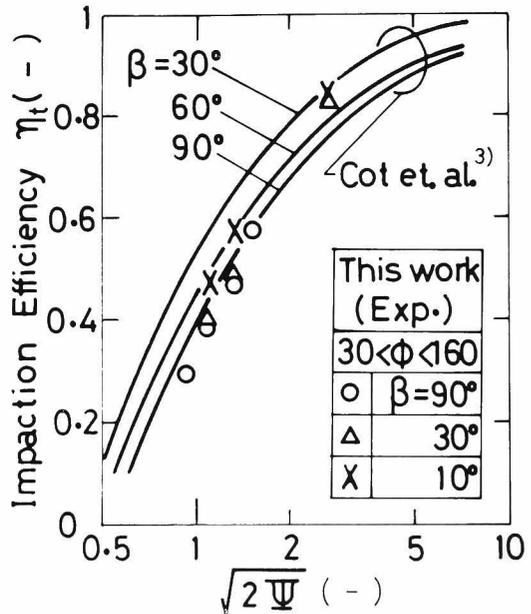
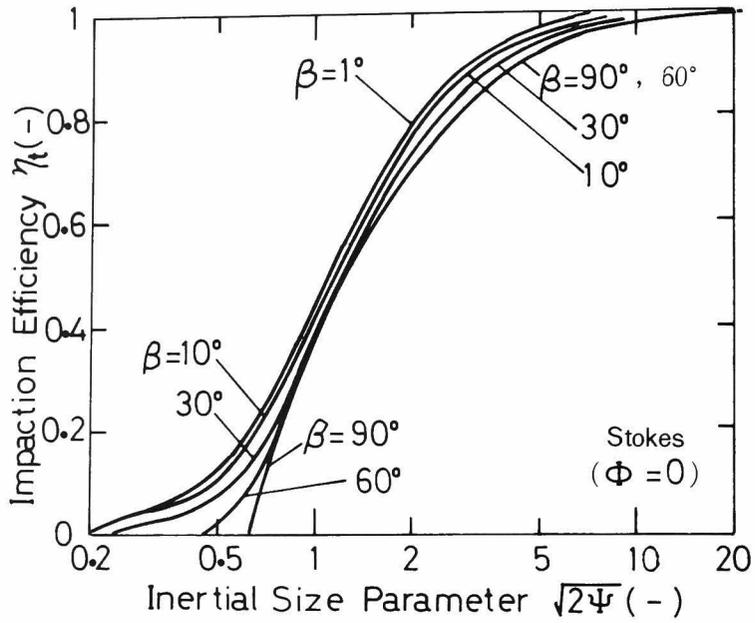
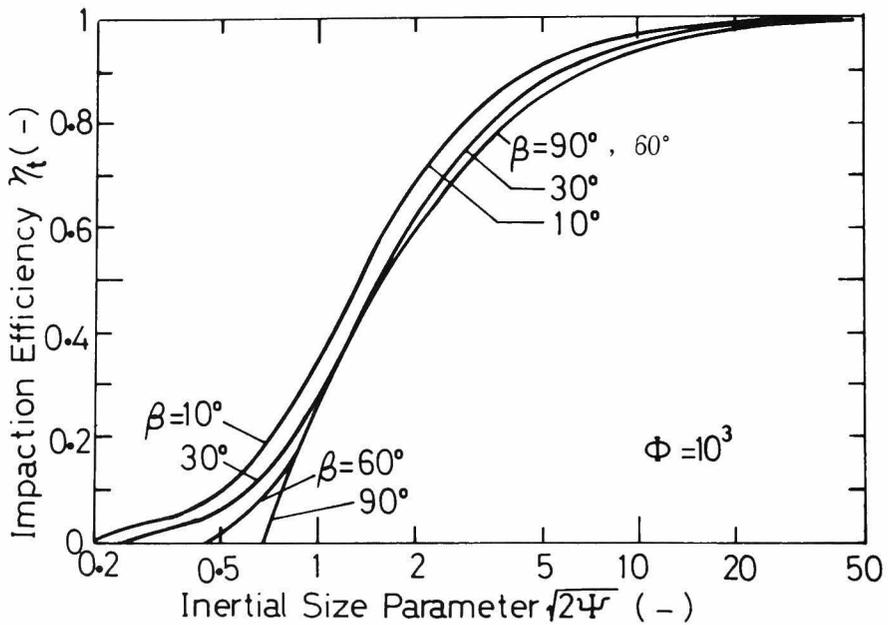


Fig. 2 7B Theoretical impaction efficiencies by Cot et. al.<sup>3)</sup> compared with the experimental results in this work

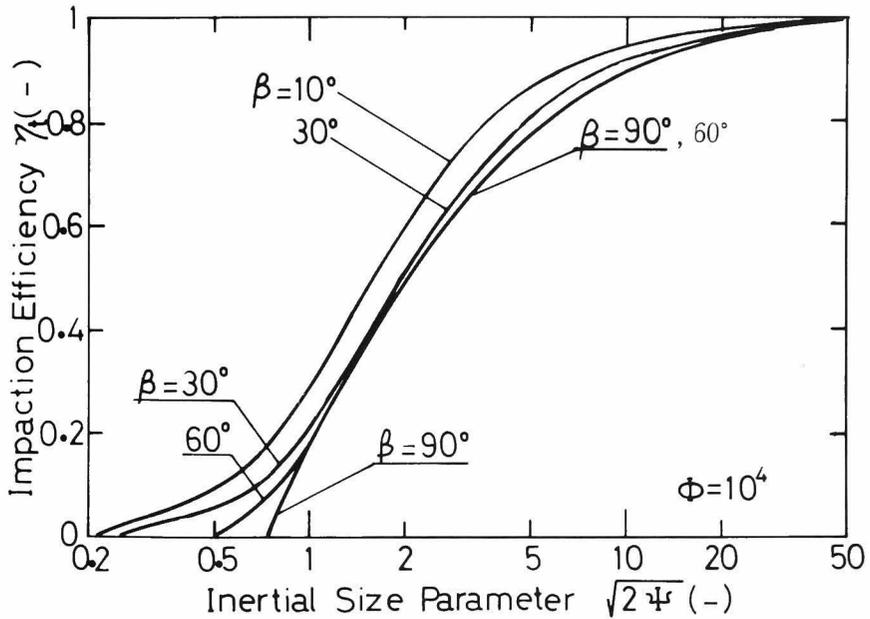


(A)  $\Phi = 0$



(B)  $\Phi = 10^3$

Fig. 2 · 8 Relation between impaction efficiency and  $\sqrt{2\Psi}$  with a ribbon inclined to the flow



(C)  $\Phi = 10^4$

Fig. 2.8 Relation between impaction efficiency and  $\sqrt{2\Psi}$  with a ribbon inclined to the flow

Fig. 2.8に $\Phi$ の値を変化させた場合の衝突効率曲線におよぼす $\beta$ の影響を示す。 $\Phi$ の値が大きくなると、傾斜角の影響が顕著となっている。

Fig. 2.9に50%衝突慣性パラメーターの相対値の $\Phi$ の値による変化を示すが、リボンの気流に対する角度が小さい場合には、 $\beta = 90^\circ$ の場合に比較してその影響の小さいことがわかる。

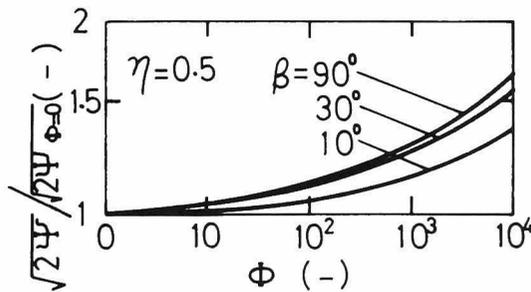
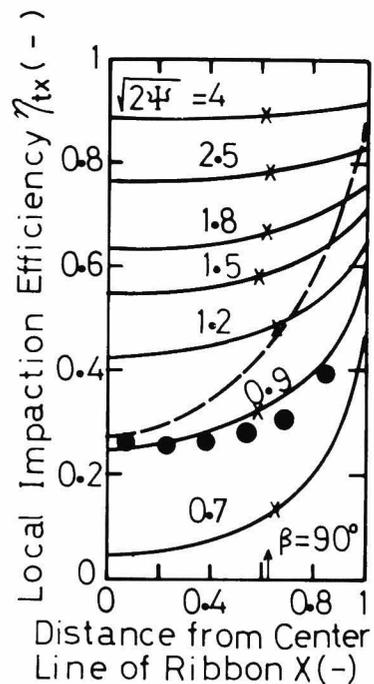


Fig. 2.9 Relative effect of  $\Phi$  on 50%-impaction inertial size parameter when a ribbon is inclined to the flow

### 2. 4. 3. 局所衝突効率

Fig. 2・10Aに $\beta = 90^\circ$ の場合の種々の慣性パラメーターにおける局所衝突効率の分布を示す。計算値と実験値との一致は良好であり、リボン中心軸で最も低く両端で最も高い分布をしている。図中の×印は局所衝突効率が平均の衝突効率と一致する位置を示しているが、リボン中心軸から無次元距離が約0.62離れた位置で、これらが一致していることがわかる。Lewisら<sup>9)</sup>の計算結果を図中の破線で示すが、本報で得た分布形とかなり異なっている。またLangmuirら<sup>8)</sup>は、リボン中心軸の局所衝突効率を求めているが、例えば平均衝突効率が50%のとき中心軸の局所衝突効率は29%であり、本報の結果に比較してかなり差が大きい。これらは、Fig. 2・5に示す実際とかなり異なる流れモデルが使用されたためであると考えられ、流れモデルが局所衝突効率の分布形にも大きく影響することがわかる。Fig. 2・10B, Cに傾斜角 $\beta$ を変化させた場合の局所衝突効率の分布を示す。 $\beta$ が小さいときには $\beta = 90^\circ$ の場合に比較してリボン前縁で局所衝突効率がかなり高く、後縁で低い分布をしている。しかしリボン中心軸付近の局所衝突効率はあまり $\beta$ の値によらずほぼ一定である。



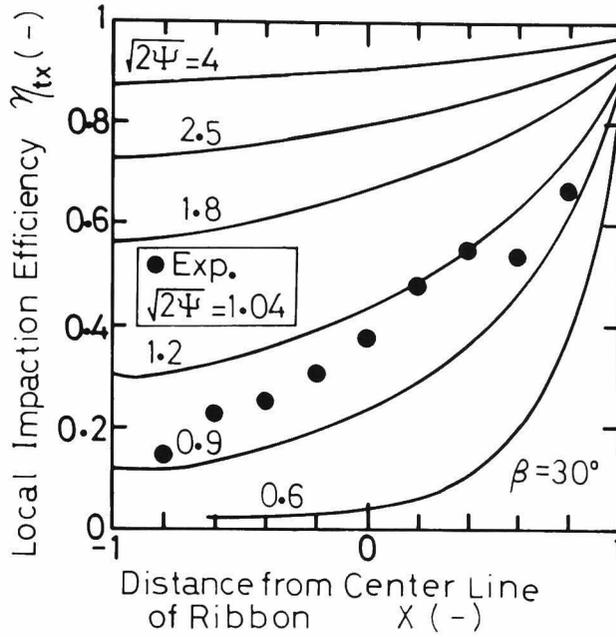
(A)  $\beta = 90^\circ$ , ..... Lewis et. al. (Calc<sup>9)</sup>,  $\sqrt{2\bar{\psi}} = 0.7$ ,

———— Theoretical results (This work),

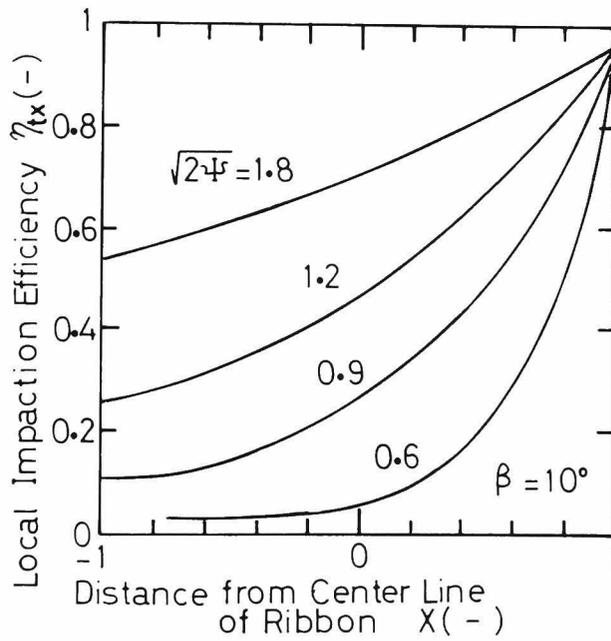
● Experimental results (This work,  $\sqrt{2\bar{\psi}} = 0.9$ )

The points denoted by the symbol x represent the positions where the local impaction efficiency is equal to the total efficiency.

Fig. 2 10 Distribution curves of local impaction efficiency



(B)  $\beta = 30^\circ$



(C)  $\beta = 10^\circ$

Fig. 2 10 Distribution curves of local impaction efficiency (at  $\Phi = 0$ )

## 結 言

リボン前方の気体流線として不連続ポテンシャル流を用い、粒子捕集面と気流方向のなす角度が変化した場合の平均および局所衝突効率を数値計算によって求めた。計算では粒子の抵抗係数はストークス域からニュートン域まで広範囲に変化させた。さらに実験を行ない理論の妥当性を検証した。

つぎに得られた結果を述べる。

1) リボン後方に生じるウエイクの形状をパラフィンミストを用いて実測した。気体流線の計算値はこの測定結果とよく一致したので流れモデルは妥当であると考えられる。

2) 見掛上の慣性パラメーターを定義し、粒子の流体抵抗がストークス域からはずれる度合と衝突効率の低下との相関を求めた。

3) 傾斜角が小さくなると衝突効率は増大するが、ストークス域からはずれるにつれてその影響は顕著となる。

また衝突効率の0%となる慣性パラメーターは角度により大きく変化するが、50%となる慣性パラメーターは余り変わらない。

4) 従来理論では十分説明できなかった局所衝突効率の分布が、不連続ポテンシャル流を用いることによって十分説明できた。同分布は、リボンが気流方向に垂直に挿入された場合には平坦であり、リボン角度が小さい場合には前縁でかなり高く後縁で低い分布を示す。なお中心軸付近の局所衝突効率の値はあまり角度の影響を受けない。

5) 理論計算値が測定値と一致することにより、理論モデルの妥当性を示した。

### 補遺 2-1 パラフィンミストによる流れの可視化

本章でリボン後流(ウエイク)の可視化の際ならびに第2編第2章でルーバー分離機内の流線および羽根間隙中に生じるウエイクの可視化を行なう際、パラフィンミストを用いたので、その発生方法を以下に述べる。

Fig. A 2-1 に試作したパラフィンミスト発生装置の概略を示す。まず①のガラス繊維製濾紙を芯としてニクロム線を巻いた電熱ヒーター上へ②のビューレットから③の流動パラフィンを滴下して蒸発させる。滴下速度はガラスコックによって調節する。なお④はビューレットの破損を防ぐために設けた保護管である。また、③

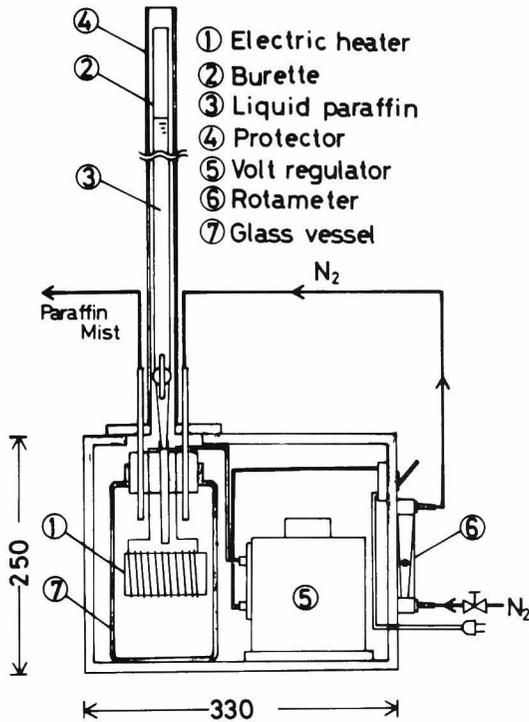


Fig. A 2-1 Paraffin mist generator

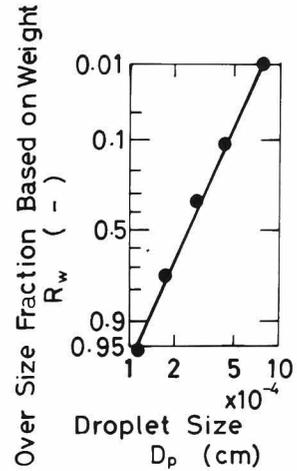


Fig. A 2-2 Size distribution of liquid paraffin mist

のスライダックによって電圧 (20~30 V) を変え発生熱量を制御して流動パラフィン蒸気の発生量を変えることが可能である。一方ボンベから⑥のローターメーター流量計を通じて窒素を⑦のガラス容器中へ吹き込む (0.5ℓ /min) と流動パラフィン蒸気は凝縮してミストとなり窒素と共に流出する。

発生したパラフィンミストの粒子径分布をカスケードインパクターによって測定した結果をFig. A 2-2に示すが、1~5  $\mu\text{m}$  に分布している。

リボン後流の測定では気流中へ幅2.6cmのリボンを挿入し、その背面中心軸上へ径3mmの注射針から上記のようにして発生したパラフィンミストを供給し、後流中に滞留したミストをガラス窓から写真撮影する。

補遺 2-2 リボン前方流れについてのMay らによる測定結果と軌跡計算に使用した速度場モデルとの比較

本文では煙風洞によってリボン背後に生じるウエイクの形状を測定し、間接的に理論計算の妥当性を検証したが、ここではリボン前方の流れについてのMay ら<sup>10)</sup>による測定結果と軌跡計算に使用した速度場モデルならびに写像変換を用いた不連続ポテンシャル流線の比較を行なう。

Fig. A 2-3 の上部にリボン近傍の計算流線を示すが、実線は軌跡計算に使用した(Hess の理論から求めた)不連続ポテンシャル流線であって、下部のMay らが煙風洞を用いて測定した流線 ( $Re=3000$ ) とかなりの精度で一致している。

一方破線はBrun ら<sup>2)</sup>が写像変換を用いて計算した流線であるが、May らの実測との一致は不良である。

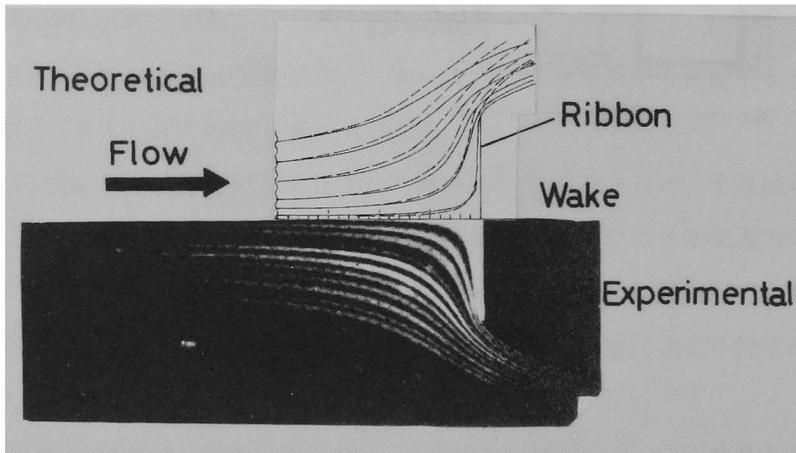


Fig. A2-3 Photographs of stream lines ( $Re=3000$ ) measured by May et al<sup>11)</sup>, compared with theoretical stream lines (—calculated by Hess' theory, ---- calculated by Brun et al<sup>2)</sup>)

補遺 2-3  $\sqrt{2\Psi}$ ,  $\Phi$  および  $Re_{po}$

1)  $\sqrt{2\Psi}$  について: リボン, 円筒および球などによる粒子の捕集理論では, 従来からそれらの半幅または半径を代表寸法として粒子の運動方程式を無次元化する場合が多い。このようにすると, リボンの外縁や円筒および球の表面の座標が1になるなど便利である。したがって本論文でもリボンの半幅を基準として運動方程式を

無次元化した。しかし運動方程式を構成する無次元数のうち慣性パラメーターについては昔から全幅を基準としている場合が多いので、本編においても全幅基準の慣性パラメーターを採用している。その定義式を次に示す。

$$\Psi \equiv \rho_p D_p^2 u_0 / (36 \mu r) = \rho_p D_p^2 u_0 / 18 \mu B \quad (a)$$

しかし、他の無次元数は全て半幅を代表寸法としているので、半幅基準慣性パラメーターとして $2\Psi$ を用いた。また衝突効率曲線を表示する場合 $\sqrt{2\Psi}$ を無次元粒子径として使用した。

従来から慣性パラメーターには半径あるいは半幅基準と直径あるいは全幅基準の2種類があるが、さらに粒子径についても直径と半径の両方が用いられており、他の研究者の結果を利用する場合にはその相違に注意を要する。

2)  $\Phi$  および  $Re_{p0}$  について：周知のように粒子抵抗係数のストークス域からのずれを表わす直接のパラメーターは次に定義式を示す粒子レイノルズ数  $Re_p$  である。

$$Re_p = \frac{D_p \cdot \rho \cdot v_r}{\mu} \quad (b)$$

ここで  $v_r$  は粒子の気流に対する相対速度である。いま、粒子を含む気流が速度  $u$  で曲率半径  $r_0$  の円弧を描いて流れるものとする、遠心力による半径方向の終末粒子沈降速度は、 $\rho_p D_p^2 u^2 / (18 \mu r_0)$  である。これが  $v_r$  に等しいと考えると、Eq.

(b) は次式となる。

$$Re_p = \frac{\rho \cdot \rho_p \cdot D_p^3 \cdot u^2}{18 \mu^2 r_0} \quad (c)$$

ところで捕集体まわりの流線の曲率および流速はその捕集体に対する位置によって異なるが、それぞれ代表寸法および代表風速に比例するので次式が成り立つと考えられる。

$$Re_p \propto \frac{\rho \cdot \rho_p \cdot D_p^3 \cdot u_o^2}{18 \mu^2 r} \equiv Re_{p1} \quad (d)$$

この右辺を  $Re_{p1}$  と定義すると、 $Re_{p1}$  が粒子抵抗係数のストークス域からのずれを表わす物理的な意味のあるパラメーターとなりうる。しかし  $Re_{p1}$  は定義式の中に粒子径を含む点でパラメーターとしては不都合である。

さて、すでにパラメーターとして採用しており、無次元粒子径としての意味を持つ  $\sqrt{2\Psi}$  を用いて Eq. (d) 中の粒子径の項を消去すると次式を得る。

$$Re_p \propto \sqrt{\Phi} \cdot (\sqrt{2\Psi})^3 = Re_{p1} \quad (e)$$

ただし、

$$\Phi \equiv 18 \cdot \left( \frac{ru_0 \rho}{\mu} \right) \cdot (\rho / \rho_p)$$

である。

したがって本論文では  $\Phi$  を粒子抵抗係数のストークス域からのずれを表わすパラメーターとして採用した。なお、流れレイノルズ数が大きいと  $\Phi$  の値は大きくなる。また粒子の比重が小さい程  $\Phi$  の値は大きい。

一方次に定義式を示す  $Re_{p0}$  を粒子抵抗係数のストークス域からのずれを表わす代表パラメーターとしている報告がある。

$$Re_{p0} \equiv D_p u_0 \rho / \mu \quad (f)$$

$Re_{p0}$  は  $\Phi$  と同じく  $Re_{p1}$  の一部を表わす無次元数であるが、定義式の中に粒子径を含んでいるため計算衝突効率曲線の表示などに用いる場合は都合がわるい。

このため、本論文では  $Re_{p0}$  をパラメーターとして表示した衝突効率計算結果は参考とするにとどめた。

補遺 2-4 Eqs. (2-9) ~ (2-13) の衝突効率推定精度および  $Re_{p0}$  をパラメーターとした衝突効率曲線

本論文では、本文中および補遺 2-3 で述べたように、粒子抵抗係数のストークス域からのずれを表わすパラメーターとして  $\Phi$  を採用したが、従来から  $Re_{p0}$  を採用している研究者もあるので  $Re_{p0}$  をパラメーターとした場合の厳密な数値計算による理論衝突効率を Fig. A 2-4 に実線で示し参考とする。また本文中 Eq. (2-9) ~ (2-13) の数値近似式によって得た近似衝突効率を  $Re_{p0} = 10, 10^2, 10^3, 10^4$  の各場合について同図中の破線で示すが、理論衝突効率との一致は比較的良好であ

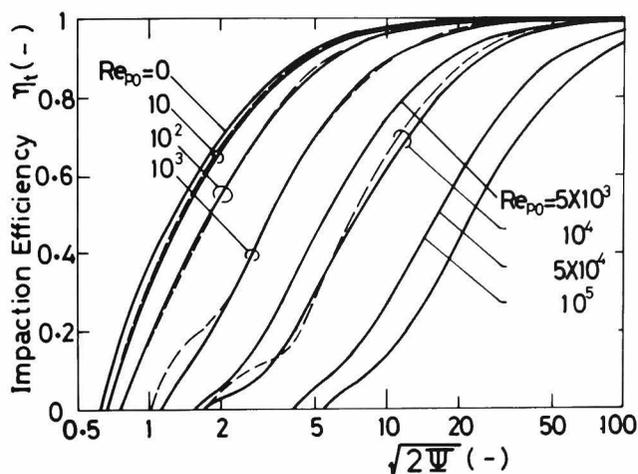


Fig. A 2-4 Relation between impaction efficiency and  $\sqrt{2\Psi}$  at various values of  $Re_{p0}$   
 (— theory, - - - approximate numerical solution)

り、多少の誤差が許される場合には定量的な使用も可能と思われる。このような近似式は、リボンサンプラーによって捕集した粒子の径分布から、気流中の粒子の径分布を数値計算によって推定する場合に必要となる。

補遺 2-5 スライドガラスによる水滴衝突効率 (有次元表示衝突効率曲線の例)

本文中では計算結果を全て無次元表記したが、市販顕微鏡用スライドガラスで水滴をサンプリングする場合について、風速をパラメーターとして粒子径と衝突効率の相関を有次元表示した結果を Fig. A 2-5 に示し参考とする。

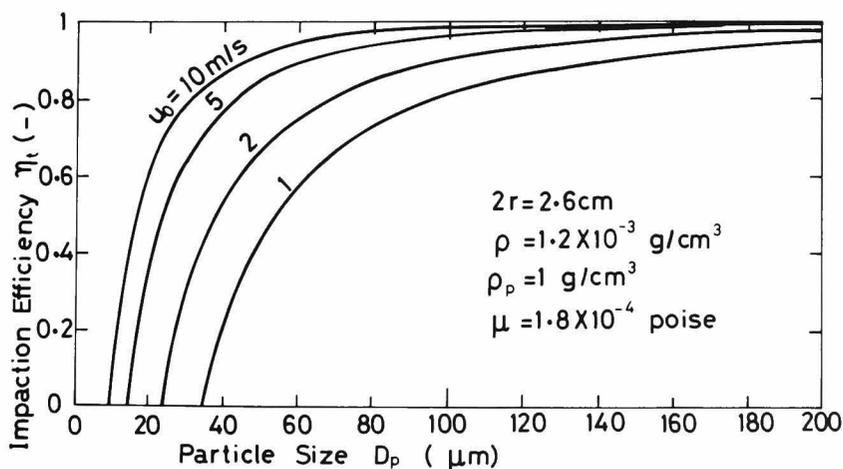


Fig. A 2-5 Relation between impaction efficiency and particle size of water droplets at various air velocities

補遺2-6 リボン、円板、円筒および球の衝突効率の比較

Fig. A 2-6 に、リボン、円板、円筒および球の衝突効率の比較を示す。円板については、厳密な理論衝突効率の報告が見当たらないのでMayら<sup>11)</sup>の実験値を用いたが、他は全て理論値である。図から衝突効率の値は円板が最も高く、球、円筒、リボンの順に低くなっていることがわかる。

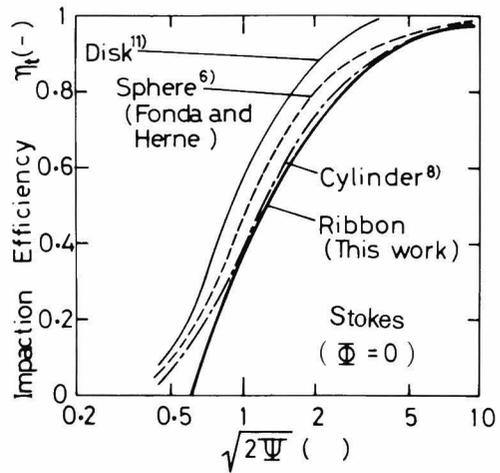


Fig. A 2-6 Relation between impactation efficiency and  $\sqrt{2\Psi}$  for different collectors

Nomenclature

C	= drag coefficient	[ - ]
$D_p$	= particle size	[cm] or [ $\mu\text{m}$ ]
h	= $C \cdot \text{Re}_{p0} \cdot \bar{V}_r / 24 - 1$	[ - ]
r	= half width of ribbon	[cm]
$\text{Re}_{p0}$	= free streamline Reynolds number ( $= D_p \rho u_0 / \mu$ )	[ - ]
t	= time	[sec]
T	= dimensionless time ( $= tu_0 / r$ )	[ - ]
$u_i$	= i-component of air velocity	[cm/sec]
$u_0$	= approaching air velocity	[cm/sec]
$U_i$	= i-component of dimensionless air velocity ( $= u_i / u_0$ )	[ - ]
$V_r$	= dimensionless relative particle - air velocity (Eq.(2-7))	[ - ]
X	= $x/r$	[ - ]
Y	= $y/r$	[ - ]

$\beta$	= inclination angle of ribbon to the flow (Angle between direction of air flow and the surface of ribbon)	[deg]
$\eta_t$	= impaction efficiency	[ - ]
$\eta_x$	= local impaction efficiency	[ - ]
$\rho$	= air density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	= particle density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\mu$	= air viscosity	[poise]
$\phi$	= inertial parameter which accounts for particle motion which does not follow Stokes' law ( = $Re_{p0}^2 / (2\Psi)$ )	[ - ]
$\Psi$	= inertial parameter ( = $D_p^2 \rho_p u_0 / (36\mu r)$ )	[ - ]

Subscript i = x or y component

#### Literature cited

- 1 ) Belyaev, S.P. and Levin, L.M.: Aerosol Science 3, 127 (1973)
- 2 ) Brun, L.D. and Vasseur, M.; Captation mecanique de corpuscules en suspension dans l'air: La Recherche Aero-nautique, 15, 1 (1948)
- 3 ) Cot C. and Arnaud G.; Captation des aerosols par impaction sur les collecterurs plans: Promoclim E, 5, 295 (1974)
- 4 ) Gregory, P.H.; Deposition of airborne lycopodium spores on cylinders: Ann. Appl. Biol., 38, 357 (1951)
- 5 ) Gregory, P.H. and Stedman, Q.J.; Deposition of airborne lycopodium spores on plane surfaces: Ann. Appl. Biol., 40, 651 (1953)
- 6 ) Herne, H.; In Aerodynamic Capture of Particle (Edited by Richardson, E.G.) pp.26-34, Pergamon Press, Oxford
- 7 ) Hess, J.L.; Analytic solution for potential flow over a class of semi-infinite two-dimensional bodies having circular-arc noses: J. Fluid Mech., 60, 225 (1973)
- 8 ) Langmuir, I. and Blodgett, K.B.: U.S. Army Air Forces Tech. Rep. No.548 (1946)

- 9 ) Lewis, W. and Brun. R.J.; Impingement of water droplets on a rectangular half body in a two dimensional incompressible flow field: N.A.C.A. Tech. Note 3658 (1955) (PB 119873)
- 10) Lukehart, P.M.; Algorithm 218, Kutta Merson: Communication of the ACM Dec 6, 737 (1963)
- 11) May, K.R. and Clifford, R.; The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs: Ann. Occup. Hyg., 10, 83 (1967)
- 12) Mortón, V.M. and Foster P.M.; The design of droplet sampling devices for measurments in cooling towers: Atmos. Env., 8, 361 (1974)
- 13) Odar, F.: U.S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 190 (1966)
- 14) Ranz, W.E. and Wong., J.B.; Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors : Ind. Eng. Chem., 44, 1371 (1952)
- 15) Sell, W.; Staub Ausscheidung an einfachen Körpern und in Luftfiltern: Forschungsheft 347 (1931)  
VDI-VERLAG
- 16) Tanaka, Z., Iinoya, K.; New approximate equation of drag coefficient for spherical particles: J. Chem. Eng., Japan 3, 261 (1970)
- 17) 栗須正登, 田中清裕; Flow Visualization とその応用 (第1報: 水流の可視化)  
: 長崎大学工学部研究報告, 第5号, p.9 (1974-12)

### 第3章 リボンまたは球による粒子の重力さえぎり捕集効率

#### 緒言

気流中の液滴粒径分布測定などには、スライドガラスなどのリボン状物体による粒子捕集が多用されており、その捕集効率を知る必要がある<sup>9)</sup>。筆者らは前章でリボンによる粒子の慣性捕集について検討を行なったが、本章では重力とさえぎりの影響について基礎的知見を得るためリボンの重力、さえぎり捕集効率を解析的に求めた。

また円筒<sup>1, 2, 5, 8, 11)</sup>や球<sup>3, 4, 5, 6, 7)</sup>の重力、さえぎり捕集効率についてはいくつかの報告があるが、ポテンシャル流での球の重力さえぎり捕集効率の解析解が見当たらないので求め、リボンと円筒や球の重力、さえぎり捕集効率を比較した結果について述べる。

#### 3.1 理論

座標軸はFig. 3・1 Aに示すようにリボン中心線上に原点をとり、前縁に向かってx軸をとる。なお気流および重力の方向をx, y平面は含むものとする。

a) 下降流の場合：下降流では、重力は気流方向に働く。重力は気流速度の小さい場合にその影響が顕著となるので、粒子の流体抵抗としてストークスの式を用い慣性項を無視すると、粒子の無次元運動方程式は次のようになる。

$$\frac{dX}{dT} \equiv - \frac{\partial \psi}{\partial Y} = - \frac{\partial \psi}{\partial Y} - G \cos \beta \quad (3-1)$$

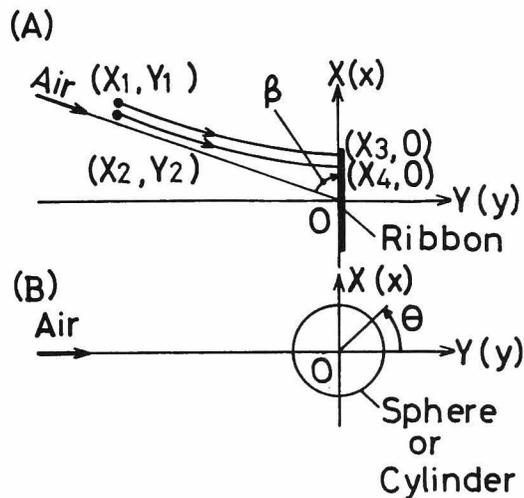


Fig. 3・1 Definitions of co-ordinates and inclination angle  
(A) Ribbon, (B) Sphere

$$\frac{dY}{dT} \equiv \frac{\partial \phi}{\partial X} = \frac{\partial \psi}{\partial X} + G \sin \beta \quad (3-2)$$

ここで $\phi$ は上式で定義される粒子の流れ関数<sup>11)</sup>である。

このとき次の式が成り立つ

$$\phi = \psi + G(X \sin \beta + Y \cos \beta) \quad (3-3)$$

リボンまわりの流れとして前報<sup>8)</sup>同様Hessの不連続ポテンシャル流を用いると、無次元気流速度のxおよびy方向成分は次式となる。

$$U_x = - \frac{\partial \psi}{\partial Y} = \frac{\sin \beta}{2 \pi} \ln \left\{ \frac{(1+X)^2 + Y^2}{(1-X)^2 + Y^2} \right\} - \cos \beta \quad (3-4)$$

$$U_y = \frac{\partial \psi}{\partial X} = \sin \beta \left[ \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{1-X}{Y} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{1+X}{Y} \right) \right\} + 1 \right] \quad (3-5)$$

リボン上での流れ関数の値を0と定め、Eqs. (3-4), (3-5)の連立偏微分方程式を解くことにより求めた気体の流れ関数を次に示す。

$$\begin{aligned} \psi = \sin \beta \left[ \frac{1}{2\pi} \ln \left\{ \frac{Y^2 + (1-X)^2}{Y^2 + (1+X)^2} \right\} + \frac{1}{\pi} (X-1) \tan^{-1} \left( \frac{1-X}{Y} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{\pi} (1+X) \tan^{-1} \left( \frac{1+X}{Y} \right) + X \right] + Y \cos \beta \quad (3-6) \end{aligned}$$

いま重力が支配的な場合について考えてみよう。すなわち、リボンの任意の2点の無次元座標を $(X_3, 0)$ および $(X_4, 0)$ とし、これらの点に衝突する粒子が、それぞれリボン無限前方の点 $(X_1, Y_1)$ および $(X_2, Y_2)$ を通るものとする。このときリボン無限前方( $Y = -\infty$ )では、Eq. (3-6)の角括弧内第1~3項は0となり、気体の流れ関数は次式となる。

$$\psi_i = X_i \sin \beta + Y_i \cos \beta \quad (i = 1, 2) \quad (3-7)$$

Eqs. (3-3), (3-7) より  $\varphi_1, \varphi_2$  はそれぞれ次式となる。

$$\varphi_i = \psi_i (1+G) \quad (i = 1, 2) \quad (3-8)$$

一方リボン上での気体の流れ関数の境界条件 ( $\psi = 0$ ) を考慮すれば, Eq. (3-3) から次式が求まる。

$$\varphi_i = X_{i+2} \cdot G \sin\beta \quad (i = 1, 2) \quad (3-9)$$

いま, 局所捕集効率  $\eta_x$  をリボン上の微小区間 ( $dX$ ) での捕集に有効な無限前方における流れ垂直断面積と, その微小区間の無限前方流れ垂直断面への投影面積の比と定義すると, Eqs. (3-8), (3-9) より  $\eta_{gx}$  は次式となる。

$$\eta_{gx} = \frac{\psi_1 - \psi_2}{(X_3 - X_4) \cdot \sin\beta} = \frac{G}{1+G} \quad (3-10)$$

従って,  $\eta_{gx}$  の分布はリボン上で均一で, 迎え角  $\beta$  に依存しない。

次に重力とさえぎりによる捕集効率を求めよう。なおここで捕集効率とは, 無限前方の気流に垂直な面上での捕集に有効な粒子通過面積を障害物のその面上への投影面積で除した値とする。さえぎりを考慮した場合に限界軌跡粒子がリボンに捕集される点の X 座標は  $(1+R)$  および  $(-1-R)$  なので  $\varphi$  の値は, Eqs. (3-3), (3-6) から次式となる。

$$\varphi_1 = R \cdot \sin\beta + G (1+R) \sin\beta \quad (3-11)$$

$$\varphi_2 = -R \cdot \sin\beta - G (1+R) \sin\beta \quad (3-12)$$

このとき Eqs. (3-8), (3-11), (3-12) より次式を得る。

$$\eta_{gi} = (\psi_1 - \psi_2) / (2 \sin\beta) = G / (1+G) + R \quad (3-13)$$

b) 水平流の場合 : 水平流では粒子の流れ関数は次式となる。

$$\varphi = \psi + G (Y \sin\beta - X \cos\beta) \quad (0^\circ < \beta < 180^\circ) \quad (3-14)$$

ただし、この場合重力の方向は気流に対し垂直下方とする。リボン無限前方で粒子の進行方向が気流のそれと異なることに注意して、下降流の場合と同様の方法により捕集効率が求まる。すなわち、

$$\eta_{gi} = \left( \frac{\tan\beta - G}{\tan\beta} \right) R - \frac{G}{\tan\beta} \quad (3-15)$$

### 3. 2 結果と考察

円筒による重力さえぎり捕集効率は江見らが求めている<sup>11)</sup>。なお、Table 3・1～3・3中には、諸効率間の関係を明記にするとともに、捕集効率の定義を本報のものとするため、引用文献の一部は変形したものを掲載した。球による重力さ

Table 3.1 Interceptional collection efficiencies

	Ribbon	Cylinder <sup>11)</sup>	Sphere
$\eta_i$	R	$R + \frac{R}{1+R}$	$(1+R)^2 - \frac{1}{1+R}$

Table 3.2 Collection efficiencies for downward flow

	$\eta_{gi}$	$\eta_{gx}$ (local)
Ribbon	$\frac{G}{1+G} + R$	$\frac{G}{1+G}$
Cylinder <sup>11)</sup>	$\frac{G}{1+G} + \left( R + \frac{R}{1+R} \right) - \left( \frac{R}{1+R} \right) \left( \frac{G}{1+G} \right)$	$\frac{G}{1+G}$
Sphere	$\frac{G}{2+G} + \left\{ (1+R)^2 - \frac{1}{1+R} \right\} - \left( \frac{R}{1+R} \right) \left( \frac{G}{2+G} \right)$	$\frac{2G \sin\theta}{2+G} \quad 90^\circ < \theta < 270^\circ$

Table 3.3 Collection efficiencies for horizontal flow

$\eta_{gi}$	$\eta_g$	$\eta_{gx}$
Ribbon $(\frac{\tan \beta - G}{\tan \beta}) R - \frac{G}{\tan \beta}$	$-\frac{G}{\tan \beta}$	$-\frac{G}{\tan \beta}$
Cylinder <sup>11)</sup> $\frac{\sqrt{(1+R)^4 G^2 + \{(1+R)^2 - 1\}^2}}{1+R}$	G	G tan $\theta$ $0^\circ < \theta < 180^\circ$

えぎり捕集効率はポテンシャル流を仮定して求めた。求め方は、三次元であることを除いてはリボンの場合とほぼ同じなので省略する。さえぎり捕集効率をTable 3・1およびFig. 3・2に示すが、球のときが最も高く、円筒、リボンの順となり、さえぎりパラメーターの値が小さい場合には、リボンでは球のときの1/3程度、円筒のときの1/2程度となることがわかる。

次に下降流の場合の結果をTable 3・2およびFig. 3・3に示すが、重力捕集効率の値はリボンと円筒で等しく、球のときにはこれらより小さい。さらにリボンのときは重力捕集効率とさえぎり捕集効率の加算により重力さえぎり捕集効率を求めるが、円筒や球のときには加算により求めた値よりも重力さえぎり捕集効率は小さいことがわかる。ただし、円筒や球のときでも、重力（沈降）パラメーターおよびさえぎりパラメーターの値が1に較べて十分小さければ近似的に加算性は成り立つ。重力による局所捕集効率はリボンおよび円筒では均一であるが、球のときは捕集面の中心で0であり、外側程その値は大きい。

水平流での結果のまとめをTable 3・3およびFig. 3・4に示す。リボンを気流に垂直 ( $\beta = 90^\circ$ ) に挿入した場合の重力捕集効率は0である。一方気流に平行 ( $\beta = 180^\circ$ ) にリボンを挿入した場合には重力捕集効率の値は無限大となる。これは投影幅を基準にして捕集効率を定義しているためで、リボン幅を基準にした場合には重力捕集効率は次式となる。

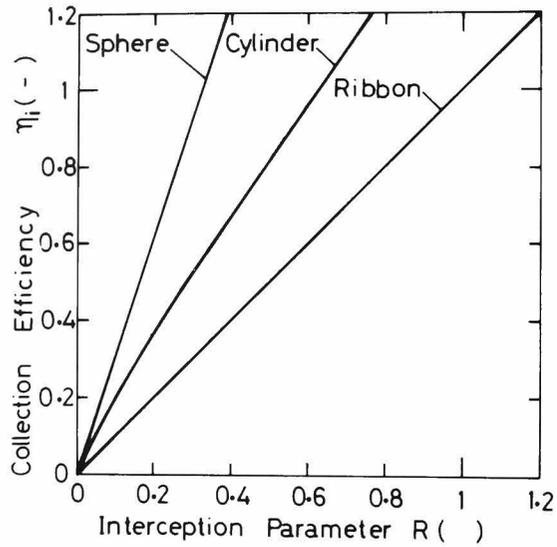


Fig. 3 · 2 Relation between interception parameter and collection efficiency of ribbon, cylinder and sphere

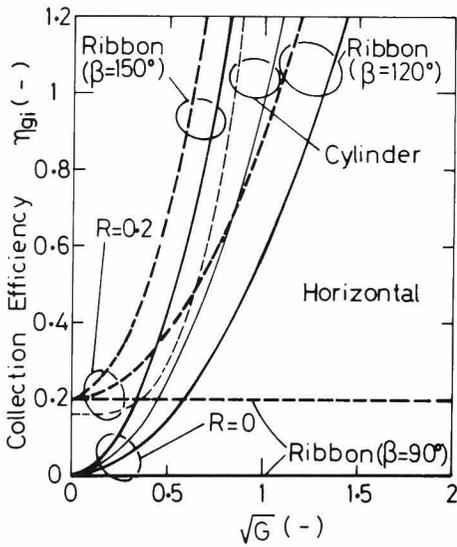


Fig. 3 · 4 Relation between  $\sqrt{G}$  and collection efficiency of ribbon, cylinder and sphere (Horizontal flow,  $R = 0$  and  $0.2$ )

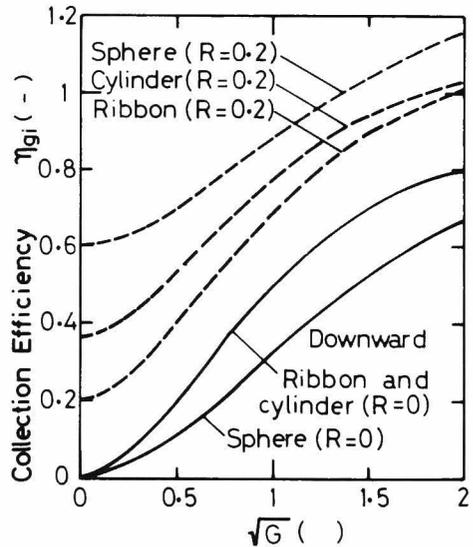


Fig. 3 · 3 Relation between  $\sqrt{G}$  and collection efficiency of ribbon, cylinder and sphere (Downward flow,  $R = 0$  and  $0.2$ )

$$\eta_g^r = G \cos \beta \tag{3-16}$$

すなわち、気流に平行にリボンを挿入すると $\eta'_g = G$ となり、円筒のときと値が等しくなる。

## 結 言

リボンと球の重力さえぎり理論捕集効率を求めた。垂直下降流では、リボンの重力捕集効率は迎え角によらず一定で、円筒の場合と等しく、球の場合より大きい。局所重力捕集効率はリボン上で均一である。リボンのさえぎり捕集効率は円筒や球より小さく、また重力捕集効率を加算することにより重力さえぎり捕集効率が求まる。一方水平流では、リボンの重力捕集効率は迎え角の影響を受け、また重力捕集効率とさえぎり捕集効率の間に加算性はみられない。

## Nomenclature

$D_p$	= particle size	[cm]
$g$	= acceleration of gravity	[cm/sec <sup>2</sup> ]
$G$	= gravitational settling parameter ( $=\rho_p D_p^2 g / 18\mu u_0$ )	[ - ]
$r$	= half width of ribbon	[cm]
$R$	= interception parameter ( $=D_p/(2r)$ )	[ - ]
$u_0$	= approaching air velocity	[cm/sec]
$u_x, u_y$	= x,y component of air velocity	[cm/sec]
$U_x, U_y$	= x,y component of dimensionless air velocity ( $=u_x/u_0, u_y/u_0$ )	[ - ]
$x, y$	= co-ordinates	[cm]
$X, Y$	= Dimensionless co-ordinates ( $=x/r, y/r$ )	[ - ]
$\beta$	= inclination angle of ribbon to flow direction ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ )	[deg]
$\eta$	= collection efficiency based on projected width of a ribbon	[ - ]
$\eta'$	= collection efficiency based on ribbon width	[ - ]
$\eta_{gx}$	= local collection efficiency due to gravitational settling	[ - ]

$\rho_p$	= particle density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\mu$	= air viscosity	[poise]
$\phi$	= dimensionless stream function of particle	[ - ]
$\psi$	= dimensionless stream function of gas	[ - ]

#### Subscripts

g	= gravitational
i	= interceptional
gi	= gravitational and interceptional
1,2	= point of coordinate (X <sub>1</sub> , Y <sub>1</sub> ) or (X <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> )

#### Literature cited

- 1 ) Davies, C.N.: Air Filtration, p.22 (1973), Academic Press, London New York
- 2 ) Morton, V.M. and P.M. Foster,; The design of droplet sampling devices for measurements in cooling towers: Atmospheric Environment, 8, 361 (1974)
- 3 ) Payatakes A.C., C. Tien and R.M. Turian; Trajectory calculation of particle deposition in deep bed filtration : A.I.Ch.E.J., 20, 889 (1974)
- 4 ) Prieve, D.C. and E. Ruckenstein,; Effect of London forces upon the rate of deposition of brownian particles: A.I.Ch.E.J., 20, 1178 (1974)
- 5 ) Ranz, W.E. and Wong, J.B.; Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors: Ind. Eng. Chem., 44, 371 (1952)
- 6 ) Spielman, L.A. and Fitzpatrick, J.A.; Theory for particle collection under London and gravity forces : J. Colloid. In. Sci., 42, 607 (1973)
- 7 ) Yao, K.M., Habibian, M.T. and O'Melia, C.R.: Environmental Science & Technology, 5, 1107 (1971)

- 8 ) Zimmon, A.D.: Adhesion of Dust and Powder, p232  
(1969), Tr. from Russian, tr. ed.; Morton Corn.  
New York, Plenum Pr.
- 9) 宇敷建一, 井伊谷鋼一; 液滴径測定: 粉体工学研究会誌, 13, 315 (1976)
- 10) 宇敷建一, 久保清和, 井伊谷鋼一; リボンによる粒子の慣性分離—傾斜角およびストークス域からのずれの影響—: 化学工学論文集, 3, 172 (1977)
- 11) 吉岡直哉, 江見準, 金岡千嘉男, 安並正雄; 孤立円筒によるエアロゾルの捕集効率—重力および慣性支配領域—: 化学工学, 36, 313 (1972)

## 第4章 リボンによる粒子の慣性重力捕集

### 緒言

直径  $3\mu\text{m}$  以上の液滴のサンプリングには染料入りのゼラチンや油で表面を覆ったスライドガラスが広く用いられており、その粒子捕集効率を知ることは重要である<sup>4)</sup>。液滴を伴う系を大別すると、ダクトなどの高流速の場合と多くの気液接触装置に見られる  $0.5\sim 6\text{ m/sec}$  の低流速の場合とになる。前者では慣性が主要な捕集機構であり、その捕集効率は第2章の結果から推定できる。しかし、後者では重力の影響が顕著であり、簡単には捕集効率を推定できない。

そこで本章では低流速の系でのサンプリングにおける基礎的知見を得るため、上、下、水平気流中に垂直に置いたリボンによる粒子の慣性・重力捕集効率を数値計算によって求めるとともに、重力の影響が顕著に表われる条件下で行なった実験結果を述べる。また通常のサンプリング条件では粒子流体抵抗のストークス域からのずれが、捕集効率におよぼす影響を無視できないので、本章ではストークス域以外での重力の影響についても併せて検討を行なった。

なお、リボン以外の捕集体による粒子の慣性重力捕集に関する既往の研究の概要を補遺4-1に示し参考とするが、リボンによる粒子の慣性重力捕集に関する報告は見当たらない。

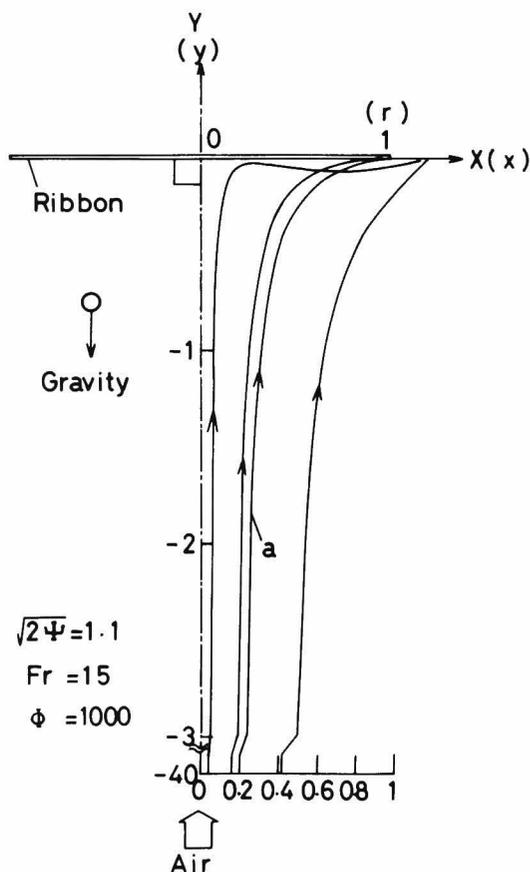


Fig. 4.1 Definitions of co-ordinates and examples of calculated particle trajectories (Upward flow)

#### 4. 1. 粒子の運動方程式

Fig. 4・1 に座標軸の取り方を示す。リボン中心を原点とし、気流の進行方向を y 軸とする。また y 軸に垂直にリボン表面に沿って x 軸を取り、重力は x, y 平面内に働くものとする。さらに第 2 章同様流れモデルとしては Hess の不連続ポテンシャル流を、粒子流体抵抗には Odar の式を用いる。このとき、粒子の無次元運動方程式は次式となる。

$$\frac{d^2X}{dT^2} = -\frac{1}{2\Psi} (1+0.125 \text{Re}_p^{0.72}) \left( \frac{dX}{dT} - U_x \right) + F_1 \quad (4-1)$$

$$\frac{d^2Y}{dT^2} = -\frac{1}{2\Psi} (1+0.125 \text{Re}_p^{0.72}) \left( \frac{dY}{dT} - U_y \right) + F_2 \quad (4-2)$$

ただし

$$\text{Re}_p = (2\Psi \cdot \Phi)^{0.5} \cdot V_r$$

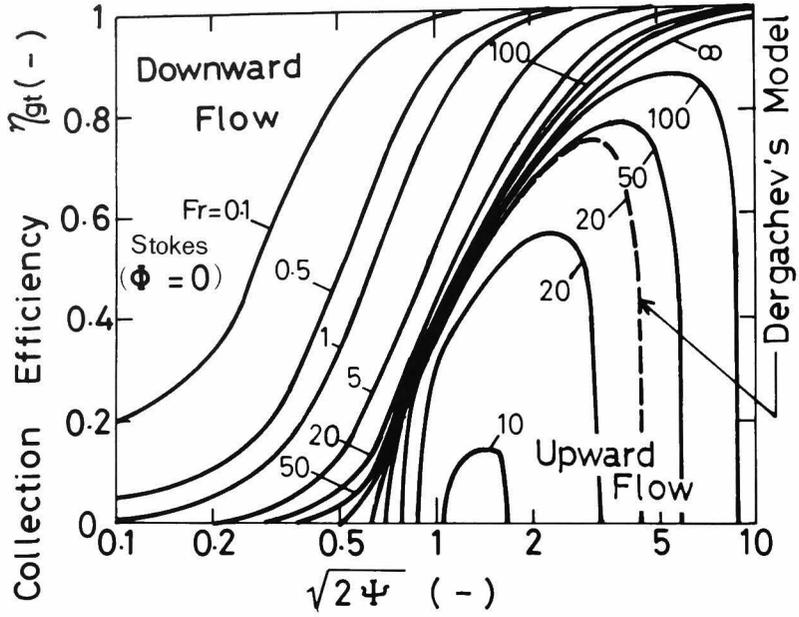
ここで重力項  $F_1, F_2$  を Table 4・1 に示すが、流れ方向によって異なる。なお、リボンの十分前方に存在する粒子は気流に対して重力終末沈降速度を有するものとし、粒子軌跡および捕集効率の計算法などは第 2 章に準じた。

Table 4.1 Gravity terms in Eqs.(4-1)and(4-2)

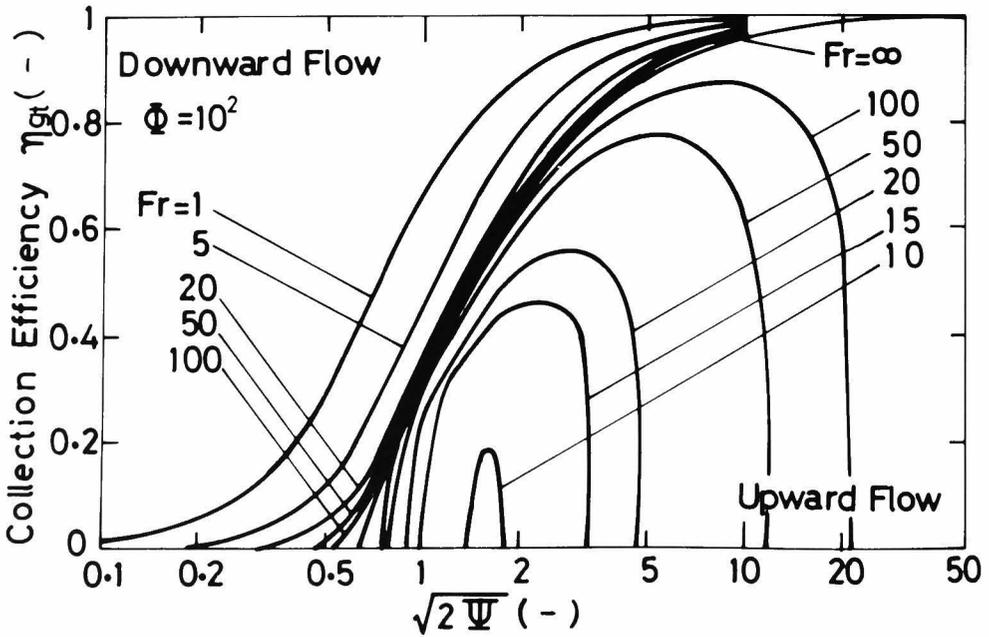
Flow	$F_1$	$F_2$
Upward	0	-1/Fr
Downward	0	1/Fr
Horizontal	-1/Fr	0

#### 4. 2. 計算結果と検討

パラメーター  $\Phi \leq 10^4$ , フルード数  $\text{Fr} \geq 0.1$  の範囲で数値的に捕集効率  $\eta$  を求めた。上下流での結果の例を Fig. 4・2 A~D, 水平流での結果の例を Fig. 4・3 A~D

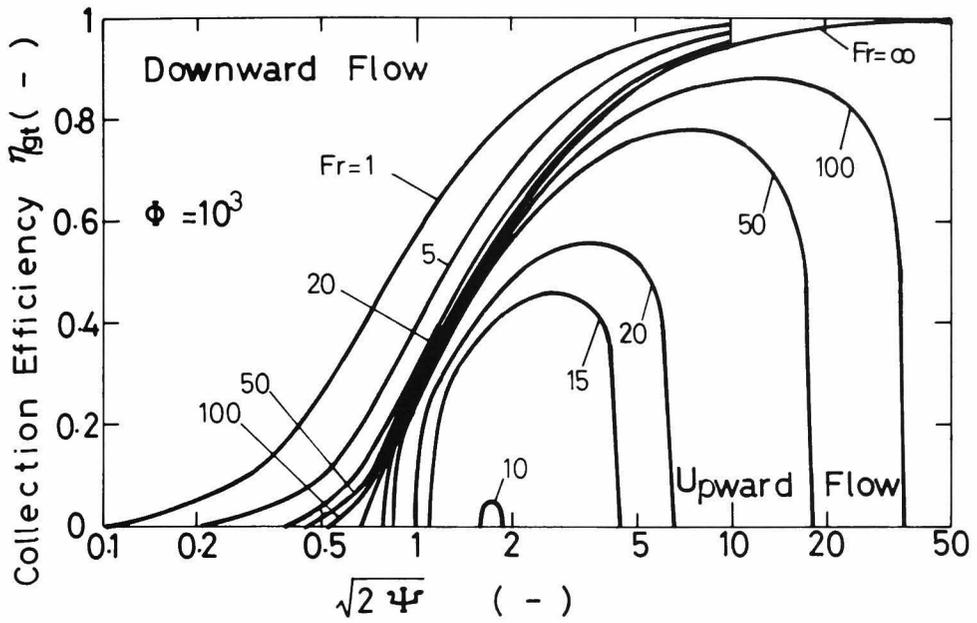


(A)  $\Phi = 0$

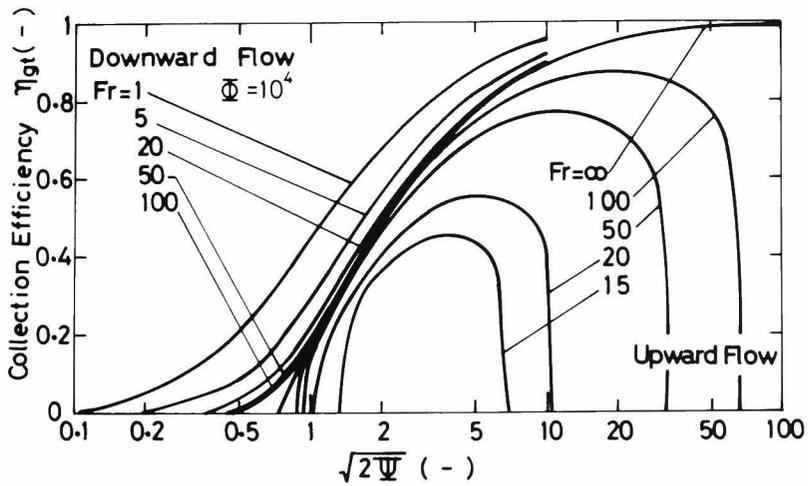


(B)  $\Phi = 10^2$

Fig. 4 · 2 Calculated collection efficiencies (Upward and downward flow)



(C)  $\Phi = 10^3$



(D)  $\Phi = 10^4$

Fig. 4 · 2 Calculated collection efficiencies (Upward and downward flow)

に示す。ここで、重力の影響を表わすパラメーターとして広く使用されている重力（沈降）パラメーターGの代わりにフルード数Frを用いたが、その理由を以下に述べる。

Gは重力の絶対的な影響を表わすパラメーターとして有用であるが、たとえGの値が大きくても同時に慣性パラメーター $\Psi$ の値が大きければ必ずしも重力支配ではなく、慣性・重力支配あるいは慣性支配となる場合もある。すなわち、慣性と重力のいずれが支配的であるかを示すパラメーターとしてはGは適当でない。そこで本報ではGのかわりに重力の慣性力に対する相対的大きさを表わす $Fr (\equiv 2\Psi/G)$ をパラメーターとして採用した。ここでFrの値が小さいほど重力が支配的であり、逆にFrの値が大きいくほど慣性が支配的となる。

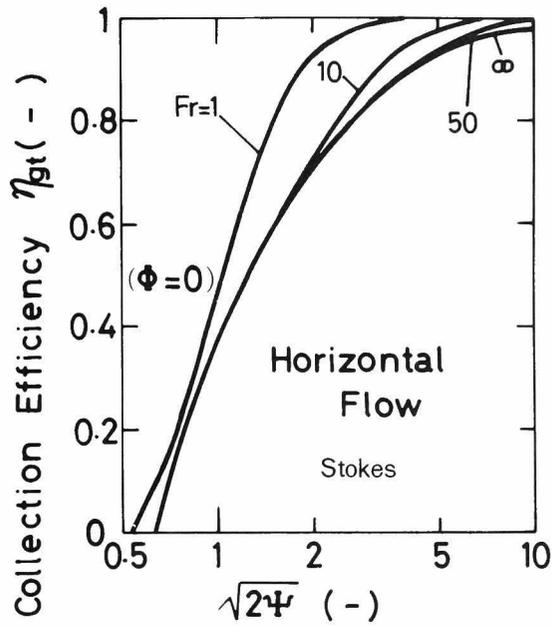
さらに、FrはGと異なりその定義式中に粒子径 $D_p$ を含まず、Figs.4・2, 4・3は部分捕集効率曲線に相当してサンプリングに利用するときにより便利であるなど、Frをパラメーターとすることには実際上の利点もある。

参考のためGを横軸とした場合の計算結果の例を補遺4-2に示す。また有次元表示した計算結果を補遺4-3に示す。

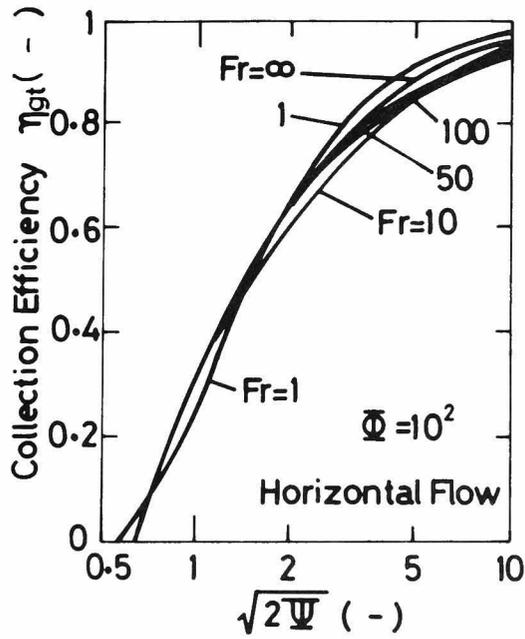
さて実用のサンプリング条件では、重力とストークス域からのずれが同時に問題となる場合が多く、Fig. 4・4 A~Dに重力を無視した場合および上、下、水平流での $\Phi$ が $\eta$ におよぼす影響を示す。

#### 4. 2. 1. 上昇流 (Fig. 4・2 A~D参照)

計算結果から以下のことがわかる。捕集効率曲線は極大値を有し、また捕集効率の値が0となるいわゆる限界慣性パラメーターが2つ存在してその間でのみ粒子が捕集される。一般にFrが小さくなるにつれてその極大値は減少し、粒子の捕集される慣性パラメーターの範囲も狭くなる。また両限界慣性パラメーター付近では捕集効率はかなり急激に変化している。さらに、粒子流体抵抗がストークス域からずれ、 $\Phi$ の値が大きい ( $\Phi = 10^3$ ) と捕集可能な慣性パラメーターの範囲は概して広い。なお、たとえば $\Phi = 0$ の場合の上昇可能な粒子径範囲に対する捕集可能な粒子径範囲の割合は、フルード数が10, 15, 20, 50, 100でそれぞれ0.16, 0.44, 0.54, 0.73, 0.82である (補遺4-2参照)。これらの計算結果から、Frは捕集可能な粒子径範囲に大きく影響しており、特にFrが20程度より小さくなるとその範囲は上昇可能な粒子径範

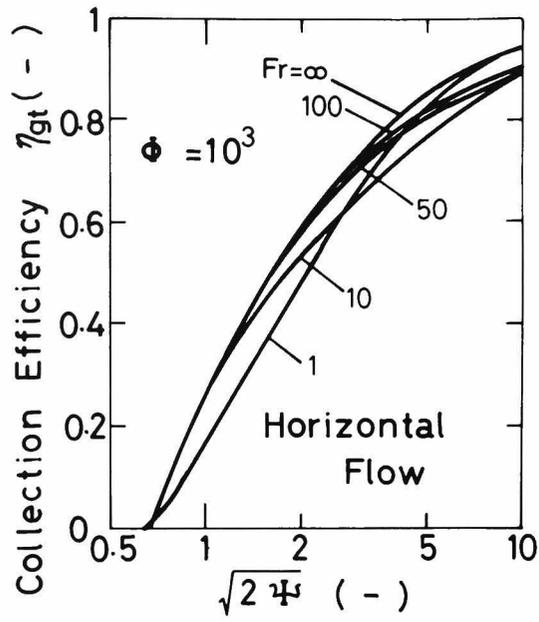


(A)  $\Phi=0$

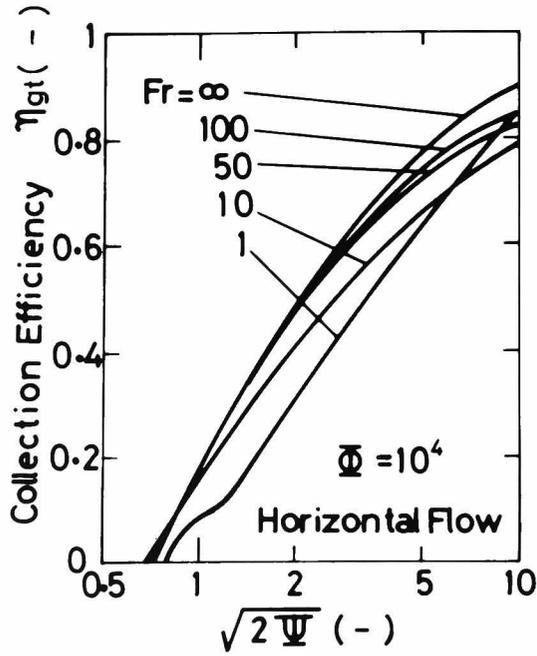


(B)  $\Phi=10^2$

Fig. 4 · 3 Calculated collection efficiencies (Horizontal flow)



(C)  $\Phi = 10^3$



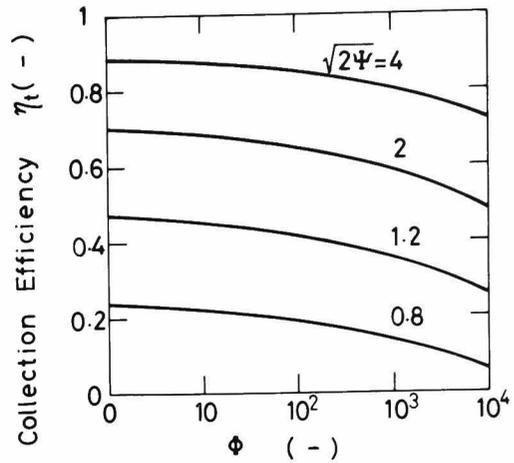
(D)  $\Phi = 10^4$

Fig. 4 · 3 Calculated collection efficiencies (Horizontal flow)

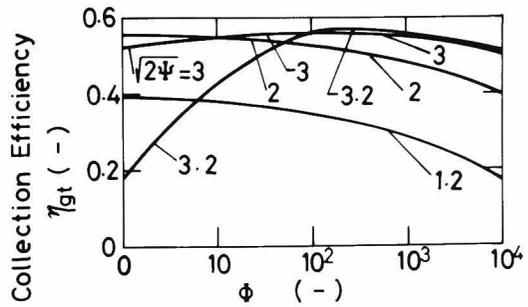
圏の半分以下に狭まってしまうことがわかる。このような条件はサンプリングには好ましくなく、なるべく  $Fr \geq 20$  になるような幅  $2r \leq u_0^2/10g$  のリボンサンプラーを用いるべきであろう。

次に  $\Phi$  の  $\eta$  におよぼす影響を検討する。Fig. 4・4 B は  $Fr$  が 20 の場合であるが、 $\sqrt{2\Psi}$  の値が 1.2, 2 と小さいときには捕集効率は  $\Phi$  の増大につれ単調に減少する。しかし、 $\sqrt{2\Psi}$  の値が 3, 3.2 と大きいときには、捕集効率は極大値を有する。これは第 2 章で述べたように  $\Phi$  の増大により修正慣性パラメーターは減少するが、上昇流では Fig. 4・2 の如く  $\sqrt{2\Psi}$  の値が大きいところで  $\sqrt{2\Psi}$  の値の減少とともに捕集効率が增大している領域が存在するからである。

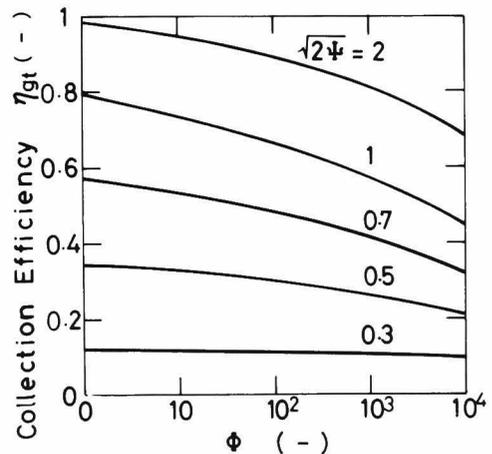
次に上昇流での粒子捕集機構を考えよう。重力は粒子の上昇を防げる方向に働いており、このためたとえばストークス域 ( $\Phi \approx 0$ ) ではリボン無限前方での粒子速度を気流速度で除した比は  $(1 - 2\Psi/Fr)$  である。この粒子速度基準の慣性パラメーターは  $\Psi (1 - 2\Psi/Fr)$  となり、後述のように



(A) Inertia only



(B) Upward flow ( $Fr=20$ )



(C) Downward flow ( $Fr=1$ )

Fig. 4・4 Effect of  $\Phi$  value to the collection efficiencies

Dergachev<sup>3)</sup>もこの修正慣性パラメーターによって捕集効率が定まるとしているが、この修正慣性パラメーターは $\Psi$ に対して極大値を有するので、前述のように捕集効率 $\eta$ に極大値が存在し、また限界慣性パラメーターも2つ存在すると考えられる。

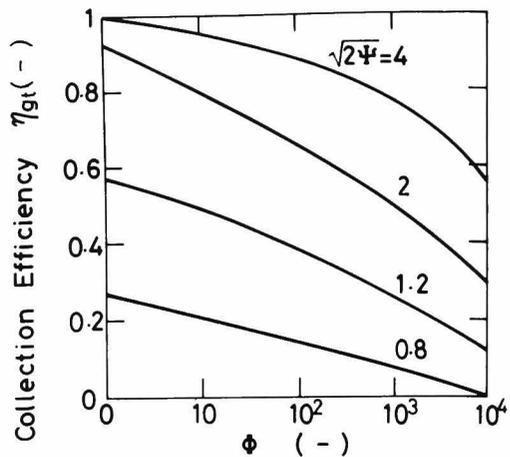
次に、粒子軌跡の計算中に一般に知られない現象がみられたので説明する。Fig. 4・1中に上昇流での限界慣性パラメーター付近における粒子軌跡の計算例を示す。

すなわち、限界粒子軌跡aの外側から流入した粒子はリボンに捕集されず、限界粒子軌跡のすぐ内側から流入した粒子はリボンの両端付近で捕集される。しかし、さらに内側から出発した粒子は原点付近の低風速部へ流入し、そこでは粒子の流体抵抗や慣性力に比べて相対的に重力の作用が大きいため粒子はリボンへ捕集されず、逆に粒子流体抵抗の鉛直方向成分と重力が釣り合うところまで下降しつつリボン表面とほぼ平行に系外へ流出する。この逆転は、Fig. 4・2の捕集効率曲線上では、両限界慣性パラメーター付近の $\eta$ が30~40%以下の領域で見られる。この場合の $\eta$ を求めるには、2種類の限界粒子軌跡の存在に注意しなければならない。一方捕集効率の高い領域では、逆転現象は生じない。

次に円筒およびリボンの場合の比較をFig. 4・5に示すが、円筒の効率<sup>2)</sup>はFrが20以上では、最大捕集効率はリボンよりやや低く、また捕集可能な粒子径範囲も狭い。一方円板の近似効率<sup>2)</sup>ではFrの影響が特に小さく、Frが小さい10程度の場合でも最大効率は80%以上もある。また捕集可能な粒子径範囲は、リボンや円筒の場合よりかなり広い。なお、他の代表的な捕集体である球の場合はさえぎり効果の大きいとき<sup>1)</sup>のみで慣性重力支配領域での報告はない。

#### 4. 2. 2. 下降流 (Fig. 4・2 A~D 参照)

下降流では重力が気流方向に作用するので、Frの減少とともに $\eta$ は増大する。ま



(D) Horizontal flow (Fr=1)

Fig. 4・4 Effect of  $\Phi$  value to the collection efficiencies

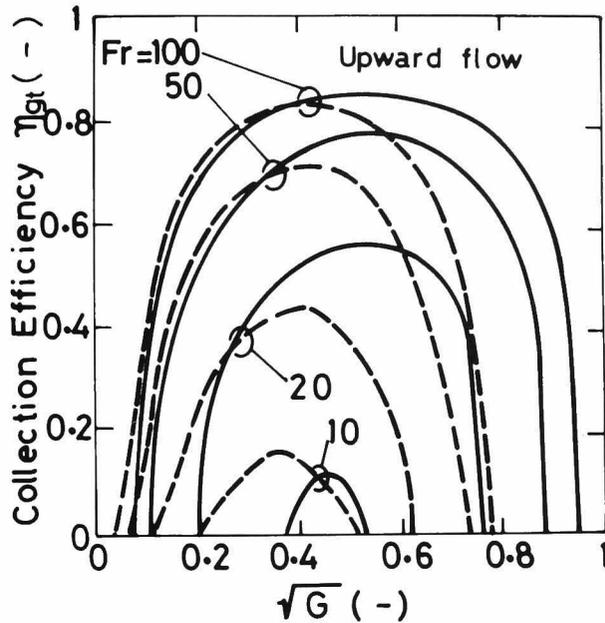


Fig. 4 · 5 Calculated collection efficiencies,  
 — by ribbon (This work), - - - - - by cylinder <sup>2)</sup>

た限界慣性パラメーターの値は急減し、捕集効率曲線は尾を引く形となるが、これはリボン中心線付近の流速が小さいのでY軸の近傍から落下した粒子がわずかの重力でリボンへ捕集されるためと推定できる。

次に $\Phi$ の影響について考えよう。Fig. 4 · 4 Cに $\Phi$ の $\eta$ におよぼす影響を示すが、Fig. 4 · 4 Aの重力無視の場合と同様に $\Phi$ の増大とともに単調に減少している。しかし、 $\eta$ の高いところではその影響は顕著であり、逆に $\eta$ の低いところでは $\Phi$ の影響はわずかとなっている。このため、Fig. 4 · 2 Bの $\Phi$ の値の大きい場合の $\eta$ におよぼすFrの影響はFig. 4 · 2 Aの $\Phi = 0$ の場合より小さくなり、慣性パラメーターの値の大きいところではさらに小さくなる。

#### 4. 2. 3. 水平流 (Fig. 4 · 3 A ~ D 参照)

水平流では $\Phi = 0$ の場合にはFrの減少につれ $\eta$ は増大しており、 $\sqrt{2}\Phi$ の大きいところでFrの捕集効率曲線におよぼす影響はやや顕著となるが、全体として上下流の場合程著しくはない。しかし、Fig. 4 · 4 Dに示すように $\Phi$ の増大による $\eta$ の低下は下降流の場合よりさらに著しく、その結果Fig. 4 · 3 Bに示す $\Phi = 10^3$ の場合は

Fr の $\eta$  におよぼす影響の逆転が一部で見られる。

#### 4. 2. 4. 効率推定の簡便法について

種々の捕集機構が併存する場合における捕集効率の概略値の便宜的な推定法として、各機構による捕集効率の加算を用いる方法が知られている。この方法による慣性重力捕集効率  $\eta_{gt}$  推定の有効性を広範囲な条件下で検討した。Fig. 4・6 は下降流の場合の、重力による捕集効率の増加 ( $\eta_{gt} - \eta_t$ ) と重力捕集効率 [ $\eta_g = G / (1 + G)$ ]<sup>5)</sup> の比較である。パラメーター  $\sqrt{2\psi}$  の値が 0.623 以下では慣性捕集効率  $\eta_t$  の値は 0 である<sup>4)</sup>。同図より慣性と重力の相互作用はかなり著しく、重力による捕集効率の増加を  $\eta_g$  の加算により推定できないことがわかる。また  $\eta_t$  が 0 の領域 ( $\sqrt{2\psi} < 0.623$ ) でも、捕集効率推定に慣性を考慮しなければ大きい誤差が生じ、 $\sqrt{2\psi} > 0.2$  の領域では慣性の影響を無視できないことがわかる。以上のほか上昇流、水平流の場合についても加算法の検討を行なったが、有効でないことがわかった。

他の便宜的な推定法として、Dergachev<sup>3)</sup> は気流速度の代わりに重力を考慮した無限前方での粒子速度を用いた慣性パラメーターを採用し、 $\eta_t$  から上下流での  $\eta_{gt}$  を予測する方法を提案している。この推定法による結果と数値計算結果との比較をそれぞれ Fig. 4・2 A および Fig. 4・6 に示すが、同図から簡便推定法による結果は重力の影響をかなり過小に評価することがわかり、前述の加算法同様あまり有効でないと考えられる。これは、この推定法も厳密な理論的根拠に基づかない便宜的な手法だからであろう。しかし、定性的な傾向は良く表わされている。

### 4. 3. 実験的検討

#### 4. 3. 1. 実験装置と方法

捕集効率測定に使用した装置および方法は、第 2 章で用いたのと同様なので詳細は省略する。捕集板は不揮発油を塗布した幅 26mm、厚さ 0.9mm のスライドガラスで、気流に垂直に挿入した。粒子は幾何平均径  $78\mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 1.15、真密度  $2.41\text{g}/\text{cm}^3$  および幾何平均径  $185\mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 1.04、真密度  $2.49\text{g}/\text{cm}^3$  の単分散ガラスビーズを用いた。なお試料はブライト標識工業 K. K. 製ソーダービーズを篩分けしたものであって、顕微鏡観察では中空粒子は認められなかった。実験は

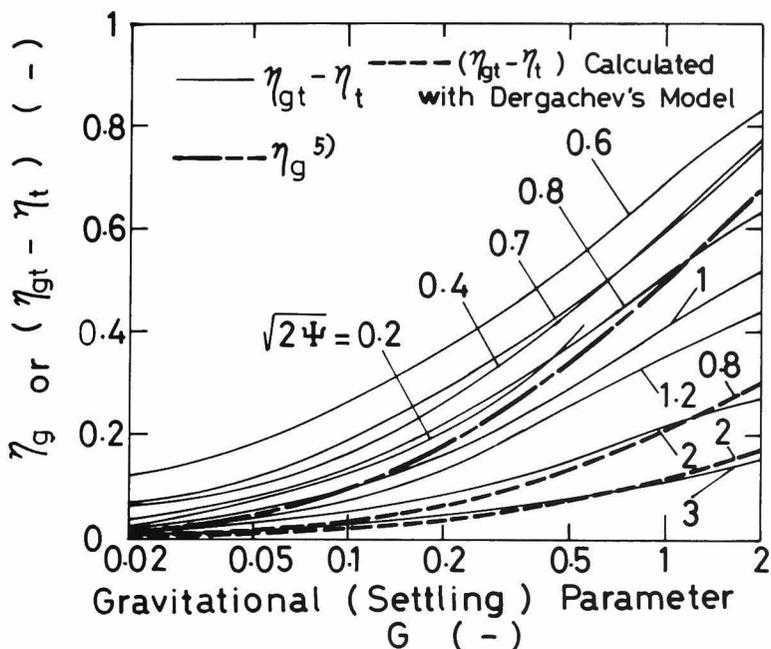


Fig. 4.6 Comparison of the increase of total collection efficiencies by gravity and the gravitational efficiencies

上, 下, 水平流の各場合について行ない, 風速は0.5~6 m/secの慣性重力支配領域で変化させた。

上昇流では捕集粒子量を求めるのに, 拡大写真による計算法を採用した。捕集粒子数は50個/cm<sup>3</sup>程度である。なお, 測定値の信頼度を高めるため同一条件で10~20回のサンプリングを行ない, 全測定粒子数が2000~5000個となる様にした。一方下降流および水平流では秤量により粒子捕集量を求めた。この際再飛散防止のため1回当たりの粒子捕集量を10mg程度とし, 信頼度を高めるため5回ずつ同一条件でサンプリングを繰返し測定値を平均した。

一方口径10mm<sup>φ</sup>のプローブを用い, 仮想リボン中心線上の5点<sup>4)</sup>で等速吸引サンプリングを行なうことにより, リボンを挿入しない場合に仮想の捕集面を通過する粒子量を求め, 前者との比から捕集効率を求めた。

#### 4. 3. 2. 結果と考察

捕集効率の測定値と計算値をFig. 4.7に示すが, 両者はほぼ一致している。上昇流の低風速部での計算と実験の多少の不一致の原因としては, Mortonら<sup>2)</sup>の指

摘している接近風速の時間変動の影響が考えられる。すなわち接近風速の変動が正規分布にしたがうものとし、その標準偏差を0.1としたときの計算例を一点鎖線で図中に示すが、実験捕集効率と同様、気流速度の小さい側へ尾を引く傾向を示している。また試料はほぼ単分散であるが多少の分布を持ち、平均粒子径における捕集効率の値が0であっても、これより慣性の大きい粒子が試料中には含まれており、それらの粒子の捕集効率が0でないことも実験捕集効率の尾を引く原因であろう。

以上のほか、さえぎりによる捕集<sup>5)</sup>、粒子初速度および捕集面上の境界層の影響を理論的に検討したが、これらの影響はほとんど無視できることを確かめた。

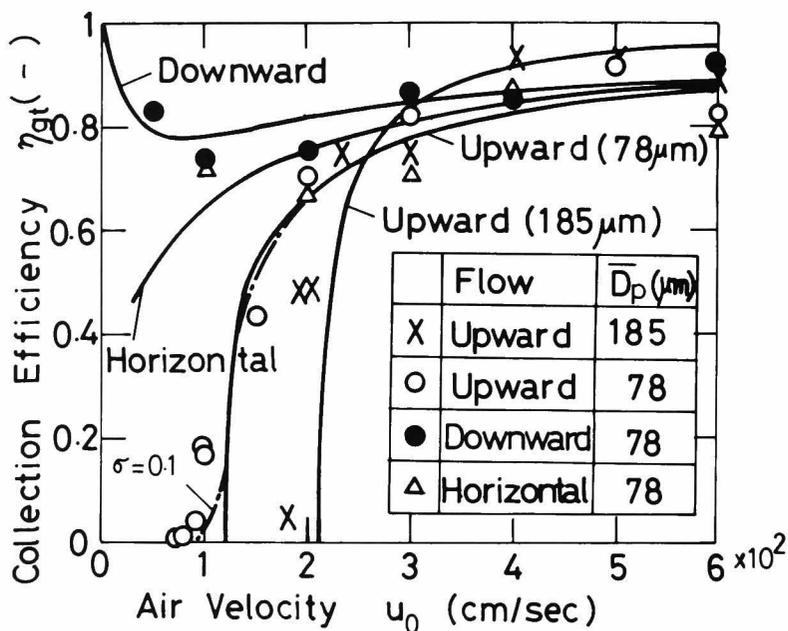


Fig. 4 · 7 Comparison of the calculated collection efficiencies with the experimental efficiencies ( $\sigma$ : standard deviation of approaching air velocity divided by the mean velocity)

### 結 言

リボンによる粒子の慣性重力捕集を理論計算と実験により検討し、次の知見を得た。

- 1) 数値計算によって求めた捕集効率の概要は次のとおりである。

I) 上昇流では、円板や円筒の場合と同様効率は極大値を有し、上、下の限界慣性パラメーター付近で下降流や水平流の場合より急激に減少する。粒子流体抵抗がストークス域からずれると、捕集可能な慣性パラメーター範囲は概して広がる。

II) 下降流での慣性パラメーターに対する効率の変化は単調で、フルード数の減少とともに効率は増大し、また捕集可能な慣性パラメーター範囲の下限は急激に減少する。しかし、ストークス域からのずれが大きくなると、フルード数の減少による効率の増大は少なくなる。

III) 水平流でもフルード数の減少とともに効率は増大するが、ストークス域からのずれが大きい場合には、一部でこの傾向の逆転が見られる。

2) 従来の2, 3の簡便法による慣性重力捕集効率の推定は誤差が大きい。

3) 重力の影響の顕著に表われる条件下での捕集効率の推定計算も実測値とよく一致することがわかった。

#### 補遺4-1 リボン以外の捕集体による粒子の慣性重力捕集に関する既往の研究の概要

慣性重力捕集効率の推定は円筒の場合について古くから試みられているが、重力捕集効率を慣性捕集効率に加算する方法が主として使用されており、厳密な数値計算による推定は吉岡ら<sup>8)</sup>、江見ら<sup>7)</sup>およびMortonら<sup>2)</sup>が行なっているのみである。また円板、球およびエアロフォイルの慣性重力捕集効率はMortonら<sup>2)</sup>が計算している。

吉岡ら<sup>8)</sup>および江見ら<sup>7)</sup>は繊維充填層によるエアロゾルの捕集効率推定を目的として、速度場を粘性流 ( $Re \leq 1$ ) と仮定し単一円筒の下降流における慣性重力さえぎり捕集効率を計算している。

しかし、この結果を液滴サンプリングの目的に利用しようとするには次の点で不十分と思われる。すなわち、気液接触装置 (例えば冷却塔や吸収塔など) では上昇流および水平流形式が主であるため、吉岡ら<sup>8)</sup>および江見ら<sup>7)</sup>の下降流の結果をつかってそれらの捕集効率を推定できないこと、サンプリングでは流れレイノルズ数  $Re$  の値が1を超える場合が多いこと、さらに粒子抵抗係数のストークス域からのず

れを考慮していないことである。また、リボンの捕集効率については検討していない。

Morton ら<sup>2)</sup>は上昇流における円筒、円板、球およびエアロフォイルの慣性重力捕集効率を計算しているが、運動方程式中の粒子抵抗係数の無次元化が不十分である。また捕集体形状によって捕集効率の重力による低下の度合や捕集可能な粒子径範囲が顕著に異なる結果を得ているが、液滴サンプリングで最も重要なリボンの捕集効率は計算していない。

以上既往のリボン以外の捕集体による粒子の慣性重力捕集の理論的検討結果を液滴サンプリングの見地から概観したが、計算結果の実験的検証はわずかに吉岡ら<sup>8)</sup>および江見ら<sup>7)</sup>が下降流における円筒について捕集効率50%以下の範囲に対して行なっているのみである。液滴サンプリングでは高い捕集効率の領域が重要であるがその領域での実験的検証は行なわれていない。

#### 補遺4-2 重力(沈降)パラメーターGで表示した上昇流捕集効率

本文中では慣性パラメーターを横軸とした捕集効率曲線で計算結果を表示したが、重力(沈降)パラメーターの平方根 $\sqrt{G}$ を横軸とした場合の上昇流での捕集効率曲線をFig. A 4-1~A 4-3に示し参考とする。粒子抵抗係数がStokes域

( $Re_{po} = \Phi = 0$ )の場合(Fig. A 4-1)

を考えよう。このとき気流と共に上昇可能な最大粒子の $\sqrt{G}$ の値は1である。また $\sqrt{G}$ は粒子径を上昇可能な最大粒子径で除した無次元粒子径に相当しており、同図から上昇可能な粒子のうちサンプリング可能な無次元粒子径の範囲が推定できる。サンプリング可能な無次元粒子径範囲はフルード数Frの値によって異なり、その値が大きくなると慣性が支配的な場合には広く、値が小さく重力が支配的になるにつれて狭くなる。

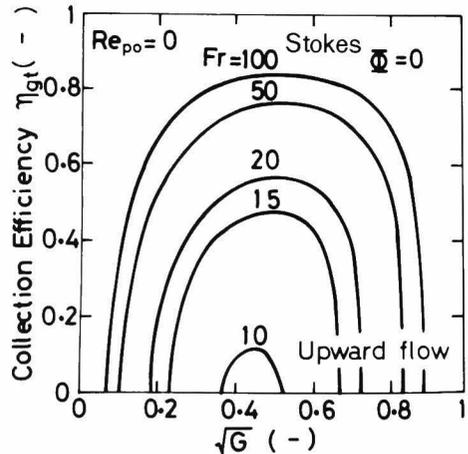


Fig. A 4-1 Relation between collection efficiency and  $\sqrt{G}$  at various values of Fr, in upward flow. ( $Re_{po} = \Phi = 0$ )

Fr の値は風速およびリボンサンプラーの幅によって定まるが、同図から広範な無次元粒子径にわたって粒子サンプリングを行なうにはリボンサンプラーの幅をいくらにすればよいか推定可能となる。Re<sub>po</sub> の値が大きくなって粒子抵抗係数がストークス域を超える場合は、Fig. A 4-2 および A 4-3 からわかるようにサンプリング可能な $\sqrt{G}$ の範囲は概して広がっている。

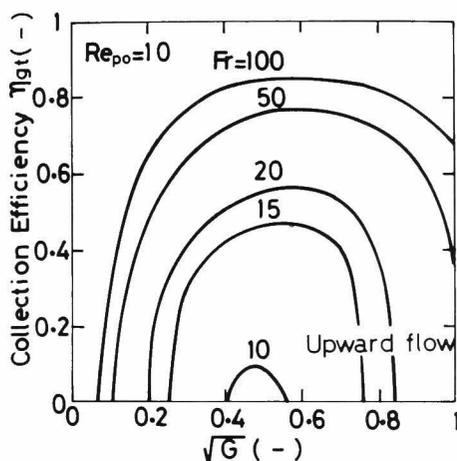


Fig. A 4-2 Relation between collection efficiency and  $\sqrt{G}$  at various values of Fr, in upward flow (Re<sub>po</sub>=10)

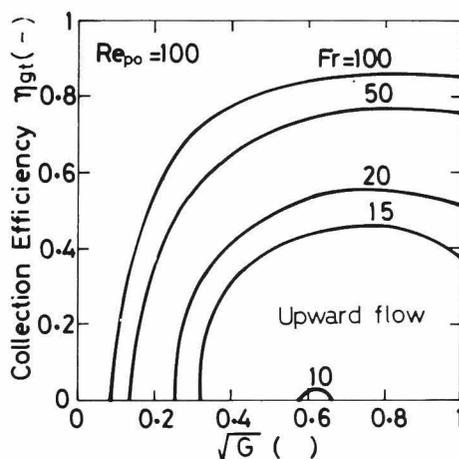


Fig. A 4-3 Relation between collection efficiency and  $\sqrt{G}$  at various values of Fr, in upward flow (Re<sub>po</sub> =100)

#### 補遺 4-3 市販スライドガラスを用いた上昇水滴のサンプリング

市販スライドガラス（幅2.6cm）を用いて上昇水滴をサンプリングする場合の部分捕集効率曲線をFig. A 4-4 に示し参考とする。同図では、風速が一定の場合水滴径の増大にしたがって捕集効率は増大するが、ある水滴径で捕集効率は最大となり、さらに水滴径が増大すると逆に捕集効率は低下している。また実用上重要な20~100 μm の水滴径に対する部分を拡大した捕集効率曲線をFig. A 4-5 に示すが、風速が1 m/sec 以下ではほとんど液滴を捕集できないことがわかる。

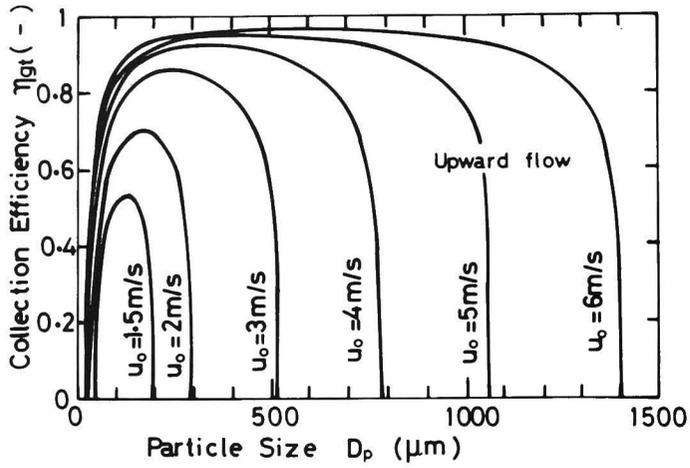


Fig. A 4—4 Relation between collection efficiency and size of water droplets at various air velocities  
 ( $2r = 2.6 \text{ cm}$ ,  $\rho = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ ,  $\mu = 1.82 \times 10^{-4} \text{ poise}$ )

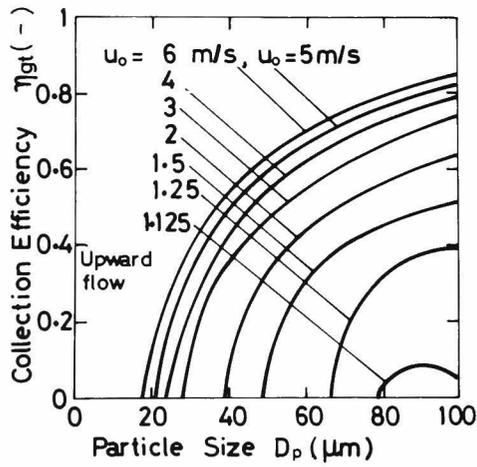


Fig. A 4—5 Relation between collection efficiency and size of water droplets at various air velocities  
 ( $2r = 2.6 \text{ cm}$ ,  $\rho = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ ,  $\mu = 1.82 \times 10^{-4} \text{ poise}$ )

## Nomenclature

$D_p$	: particle size	[cm], [ $\mu$ m]
$Fr$	: Froude number [= $u_0^2/g \cdot r$ ]	[ - ]
$g$	: acceleration of gravity	[cm/sec <sup>2</sup> ]
$G$	: gravitational (settling) parameter [= $\rho_p D_p^2 g / (18\mu u_0)$ ]	[ - ]
$r$	: half width of ribbon	[cm]
$Re_p$	: particle Reynolds number	[ - ]
$t$	: time	[sec]
$T$	: dimensionless time [= $tu_0 / r$ ]	[ - ]
$u_0$	: approaching air velocity	[cm/sec]
$u_x, u_y$	: x, y components of air velocity	[cm/sec]
$U_x, U_y$	: x, y components of dimensionless air velocity [= $u_x/u_0, u_y/u_0$ ]	[ - ]
$V_r$	: dimensionless relative particle velocity [= $\sqrt{(dX/dT - U_x)^2 + (dY/dT - U_y)^2}$ ]	[ - ]
$x, y$	: co-ordinates	[cm]
$X, Y$	: dimensionless coordinates [= $x/r, y/r$ ]	[ - ]
$\eta$	: collection efficiency	[ - ]
$\rho$	: air density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	: particle density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: standard deviation of approaching air velocity divided by the mean velocity	[ - ]
$\mu$	: air viscosity	[poise]
$\Phi$	: parameter [= $18 r u_0 \rho^2 / (\rho_p \mu)$ ]	[ - ]
$\Psi$	: inertial parameter [= $D_p^2 \rho_p u_0 / (36\mu r)$ ]	[ - ]

### Subscripts

$g$	: gravitational
$t$	: inertial (target)

#### Literature Cited

- 1) Hocking L.M.: Q.J. Roy. Met. Soc., 85, 44 (1959)
- 2) Morton, V.M. and Foster P.M.; The design of droplet sampling devices for measurements in cooling towers : Atmos. Environ., 8, 361 (1974)
- 3) Zimon, A.D.: "Adhesion of Dust and Powder", p.232 (1969), translated by Morton C., New York, Plenum Press (In English)
- 4) 宇敷建一, 井伊谷鋼一; 液滴径測定: 粉体工学研究会誌, 13, 315 (1976)
- 5) 宇敷建一, 久保清和, 井伊谷鋼一; リボンによる粒子の慣性分離—傾斜角およびストークス域からのずれの影響—: 化学工学論文集, 3, 172 (1977)
- 6) 宇敷建一, 井伊谷鋼一; リボンまたは球による粒子の重力さえぎり理論捕集効率: 化学工学論文集, 3, 634 (1977)
- 7) 江見準, 中田潔, 吉岡直哉; 重力の影響を考慮した場合の繊維充填層によるエアロゾルの濾過効率: 化学工学, 36, 557 (1972)
- 8) 吉岡直哉, 江見準, 金岡千嘉男, 安並正雄; 孤立円筒によるエアロゾルの捕集効率—重力および慣性支配領域—: 化学工学, 36, 313 (1972)

## 第5章 結 論

本編はスライドガラス法の液滴測定精度向上を主目的として、リボンによる粒子の捕集を種々の見地から理論的および実験的に検討した結果の報告である。

全体は5章であるが、2章から4章までに実際の研究内容が含まれている。まず第2章においてはダクト内など比較的高風速（5 m /sec 以上程度）の系に相当する慣性支配領域でのリボンによる粒子捕集を検討した。リボン前方の速度場モデルが捕集効率の計算精度を大きく左右しており、ここでは実測の流れとかなり精度よく一致するHessの不連続ポテンシャル流の解析解を速度場モデルとして採用し、粒子捕集面と気流方向のなす角度が変化した場合の平均および局所捕集効率を数値計算によって求めた。計算では、高風速の場合に影響が大きいと考えられる粒子抵抗係数のストークス域からのずれを表わすパラメーター $\Phi$ を広範囲に変化させた。その結果、傾斜角が小さい程捕集効率は高く、 $\Phi$ の値の増大につれてその影響は顕著となるが、傾斜角の影響はさほど大きくないことが明らかとなった。一方パラメーター $\Phi$ の値が大きい程捕集効率は低い、種々の $\Phi$ の値に対する捕集効率を線図にまとめ、サンプリングの場合の推定計算に役立つようにした。さらに、捕集効率を実測することによって上記計算値が妥当であることを示すとともに、従来の理論捕集効率の実測との不一致の原因が妥当な速度場モデルを用いなかった点にあることを示した。また従来の理論では十分説明できなかった局所捕集効率の分布も、Hessの不連続ポテンシャル流を速度場モデルとして採用した理論計算によって十分説明できた。同分布は、リボンが気流方向に垂直な場合には平坦であり、リボン傾斜角が小さい場合には前縁で高く後縁で低い。しかしリボンの中心線付近の局所捕集効率の値はあまり角度の影響を受けない。なお、局所捕集効率も計算値は実測値と良好に一致しており、妥当と考えられる。

第3章は代表的な3種類の捕集体（リボン、円筒、球）についての重力さえぎり捕集効率を理論的にまとめたものであって、かなり低風速（0.1m /sec 以下）の系を対象としている。垂直下降流では、リボンの重力捕集効率は傾斜角によらず一定で、円筒の場合と等しく、球の場合より大きい。また局所重力捕集効率はリボン上

で均一である。リボンのさえぎり捕集効率は円筒や球より小さく、また重力捕集効率を加算することによって重力さえぎり捕集効率が求まる。一方水平流では、リボンの重力捕集効率は傾斜角の影響を受け、また重力捕集効率とさえぎり捕集効率の間に加算性はみられない。

第4章は多くの気液接触装置内にみられる中間の風速(0.1~5 m/sec程度)の系に相当する慣性重力支配領域でのリボンによる粒子捕集の検討であって実用上重要である。上昇流下降流および水平流に対して数値計算によって求めた捕集効率の概要は次のとおりである。

上昇流では、円筒などの場合と同様効率は極大値を有し、粒子抵抗係数がストークス域からずれると捕集可能な粒子径範囲は概して広がる。フルード数の値が20以下の、低風速で重力の影響のかなり大きい条件では、上昇可能な粒子径範囲に対する捕集可能な粒子径範囲は半分以下となり、捕集効率の極大値も50%以下となってサンプリングにはあまり好ましくない。フルード数の値が20以上の条件ではリボンは円筒に比べて同一風速での捕集可能な粒子径範囲は広く、かつ捕集効率の極大値も高くサンプリングに適している。

下降流では慣性パラメーターに対する効率の変化は単調で、フルード数が減少し、風速が小さく重力が支配的となるにつれて効率は増大し、捕集可能な粒子径範囲の下限は急激に減少する。しかしストークス域からのずれが大きい場合には、重力による捕集効率の増大は少なくなる。

水平流では上昇流や下降流の場合と異なり、慣性に比べて重力の捕集効率への影響は小さい。さらに従来<sup>2, 3</sup>の簡便法による慣性重力捕集効率の推定は誤差が大きいこと、および上記計算値の正しいことを、実測値と比較することによって確かめた。

表面処理をしたリボンサンプラーを粒子を含む気流中に挿入し、顕微鏡写真やその他の拡大写真などを用いて、サンプラーに捕集した単位時間、単位面積当りの粒子量を粒子径毎に求め、それらを本編で求めたサンプリング効率(リボンによる粒子捕集効率で、粒子径によって値が異なる)で割れば、真の粒子量を粒子径毎に求めることができる。全粒子量中に占めるある粒子径の粒子量の相対的な割合を求めれば粒子径分布が求まるが、サンプラーに捕集されない微小粒子の量が無視できな

い場合には他の方法（例えば汙過法）によって全粒子量を推定する必要があるので注意しなければならない。

なお、このときサンプラーの捕集面上での平均の粒子量（単位時間，単位面積，粒子径毎）を用いる必要がある。サンプラー上の一点のみの粒子量（単位時間，単位面積当り，粒子径毎）から真の粒子量を求めることができれば便利であるが，それには局所サンプリング効率を用いる必要がある。気流に垂直にサンプラーを挿入した場合には慣性パラメーターの値によらず両端から全幅の約20%の位置で局所サンプリング効率が平均のそれに等しくなるので，この位置の粒子量から全体の粒子量が推定でき，粒子径分布の測定に便利である。

一般にサンプリング効率が低くなければ，それだけ真の粒子量の推定誤差が大きくなり，また効率の値が10%以下では本編で取り上げなかった乱流拡散などが無視できなくなると考えられるので，なるべくサンプリング効率の高い条件を用いるべきである。工業的にはサンプリング効率が20%以下の条件の使用は避けるべきであろう。サンプリング効率を増大させるためにはサンプラーの幅を小さくすること，流路を狭めて気流を加速することなどの方法がある。

以上が本編で得られた結論であってリボンによる粒子捕集機構および捕集効率は一応解明できたと考えられる。これらの成果が今後粒子サンプリングなどに大いに利用されることを期待する。



## 第 2 編

羽根列(ルーバー)による粒子捕集と分級



# 第1章 緒 論

## 1. 1. 液滴分離機の従来の研究の概要

工業プロセスには液滴を発生する工程が数多く見られるが、もし液滴が装置から流出すれば、後続プロセスの機器を腐食したり触媒の寿命を縮めたり、あるいは製品の純度や歩留りを下げたりする。また大気中へ液滴が流出すれば作業環境を悪化させたり、公害の原因となる。したがって、液滴分離工程は重要であり、本編でとり上げたルーバー式のほか、ミストコットレル、繊維層、ワイヤメッシュ、セラミックフィルター、充填層、管群 (Tube bank)、段塔、ベンチュリースクラバー、留水式スクラバー、インパクター、サイクロンおよび重力沈降室など種々の分離機が対象とする液滴の性質や使用目的に応じて設置されている。

液滴捕集機構には、重力沈降、遠心力、慣性衝突、さえぎり、拡散付着、静電気沈着、熱沈着、音波凝集などがあるが、1種類の分離機で2つ以上の捕集機構を利用する場合が多いので、ここでは機構によらず分離機の形式によって分類しその主要な研究を概観する。

### 1. 1. 1. 充填層

まず充填層による分離について述べよう。これは繊維層やワイヤメッシュおよび管群などの円柱状の要素からなるものならびにガラスビーズ、砂、ラシヒリング、バルルサドルなどの塊状の要素からなるものがある。

#### (a) 繊維充填層フィルター

繊維層フィルターとは、多数の繊維を充填し層としたものであり、ミストを汙過によって分離する。その設置法の例として塩素化反応器上部に設置する場合をFig. 1・1に示すが、反応器内を上昇してきた炭化水素の塩素化合物からなるミストは繊維層内で捕集され合体成長し、気流の抵抗力によって層を通り抜け、フィルターエレメントの内面を重力によって流下し再び反応器内へ滴下する。

以下に繊維層ミストフィルターの研究を見よう。

乾いた繊維層フィルターは固体粒子集塵用としてかなり古くから使用されており、また洗浄液を噴霧する方式の繊維層フィルター (Wet cell washer) も調湿や集

塵・可溶性酸ミスト分離の分野で古くから使われている。<sup>27)</sup>「Wet cell washer」の素材は直径 $100\mu\text{m}$ 以上の粗なガラス繊維であつて、 $2\sim 3\mu\text{m}$ 以下の微粒子の捕集には効果が無い<sup>6)</sup>。

First<sup>27)</sup>(1951)は風速、繊維径、繊維層の厚さ、充填の密度と構造および噴霧量を変化させた場合の水滴負荷時の圧力損失を測定している。風速、層厚み、充填密度とともに圧力損失が増大し、繊維径の増大とともに圧力損失が減少すること、および繊維の配列をジャックストロー (Fig. 1・2 参照)にした場合が水滴負荷による圧力損失増加が最も小さく、ランダム充填では水滴負荷時の圧力損失は乾燥繊維層の約2倍になることを認めている。

Fairs<sup>26)</sup>(1958)は、 $5\sim 10\mu\text{m}$ の細い繊維を用い、その材質や表面処理法を変化させた場合の液滴捕集効率と圧力損失を測定している。繊維層の厚さは約5cmで充填密度は $110\sim 160\text{kg}/\text{m}^3$ とし、加熱によってマット状に成形

し偏流を防止している。供試液滴は硫酸液滴で、風速は $5\sim 10\text{cm}/\text{sec}$ 、そのときの圧力損失は $160\sim 250\text{mm H}_2\text{O}$ 程度である。また捕集効率には繊維径や充填密度以外に繊維表面の性質がかなり影響する。すなわち、未処理のガラス繊維などの液になじみやすい材質のものは繊維表面が液膜で被われ径が大きくなって捕集効率が低下する。しかし、テリレン繊維やシリコン処理をしたガラス繊維など疎液性の繊維では捕集液は繊維に外接する球形となつて、捕集効率は高くなる。

Billingら<sup>4)</sup>(1958)は直径 $4\mu\text{m}$ の鉍物繊維を用いて、硫酸 ( $0.7\mu\text{m}$  および  $2\mu\text{m}$ )、三酸化イオウ ( $0.5\mu\text{m}$ )、硝酸 ( $2\mu\text{m}$ ) および 燐酸 ( $1.5\mu\text{m}$ ) 液滴の

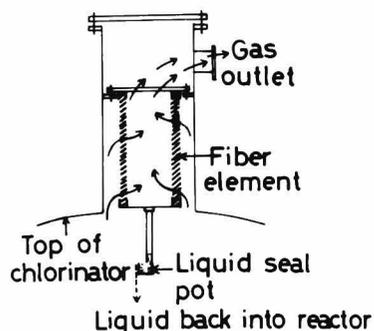


Fig. 1・1 Fiber mist separator<sup>9)</sup>

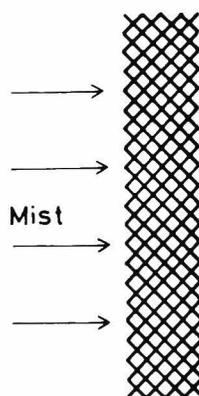


Fig. 1・2 Jackstraw packing<sup>27)</sup>

捕集効率を測定しており、慣性パラメーターとの相関を求めている。

Brink<sup>6)</sup> (1959) は液滴負荷時の圧力損失におよぼす流れ方向の影響を測定して分離機の最適な構造を定めている。それは鉛直2重円筒状に金鋼を設置し、その間隙に繊維を充填した構造のエレメントを多数用い、外側から内側へ液滴を含む気流を汙過する形式である。液滴は繊維に衝突し、合体成長して粗大液滴となり、流体抵抗 (Drag force) によって気流とともに繊維層を通り抜け繊維層内面から重力によって滴下する。すなわち繊維層は微細液滴を成長肥大させる役割をする。

Brink はまた捕集効率も測定しており、 $0.3\sim 3\ \mu\text{m}$  の液滴を定常的に最大99.95% 捕集可能としている。しかし繊維の最適な径、表面処理法および充填方法、特性については述べていない。

さらにBrink とそのグループは一連の研究<sup>7, 8, 9, 10, 43, 54)</sup> を行ない、酸、油、水、溶剤その他種々の液滴について捕集効率や圧力損失、捕集液の取り出し方法などの試験結果を多数報告している。なお捕集機構は拡散、さえぎり、慣性の3つを考慮しており、それら3つの機構による捕集効率が全液滴径にわたって最低95~99+%以上になるよう設計している。

吉田<sup>89)</sup> (1961) によれば、繊維が全く液でぬれていない運転開始時は捕集効率はかなり悪く、しばらく運転を続け液が繊維層にホールドアップされると捕集効率は急上昇する。

Mohrmann<sup>52)</sup> (1970) は、ガラス繊維およびアスベストの汙紙状フィルター (厚さ $0.5\sim 1.2\text{mm}$ ) を用い、 $0.35, 0.5, 0.8$  および  $1.1\ \mu\text{m}$  の単分散の流動パラフィンまたはDOPの液滴ならびに多分散液滴の捕集性能の経時変化を測定し、2つの数式モデルを用いてその結果を説明している。捕集効率は時間とともに減少するが、ある程度時間が経つとほぼ一定になるとしている。

Barton ら<sup>1)</sup> (1970) はガラス繊維汙紙で硫酸ミストを測定するときの誤差を防止する方法を検討している。

日置ら<sup>84)</sup> (1972) によれば、乾燥時の高性能繊維層フィルターの汙過抵抗比 (圧力損失を線流速で除した比) は  $5\sim 10\ \text{mmH}_2\text{O}\cdot\text{sec}/\text{cm}$  であるが、ミスト負荷時では捕集液による空隙率の減少のため、その値は時間とともに増大し、定常状態では約3倍の20~30となる。また捕集効率は、層内での捕集液の存在による偏流のた

め低下する。

倉賀野ら<sup>76)</sup> (1974) は種々のミスト捕集実施例を報告しているが繊維径は通常10~20 $\mu\text{m}$ で、層厚みは3~6 cm程度のものが実用されていると述べている。

Sadovskii ら<sup>58)</sup> (1974) は、1.5 $\mu\text{m}$ の極細ガラス繊維層(厚さ1 cm)を用い、1~3 m/secの高風速で0.17 $\mu\text{m}$ のオイルミストの分離性能を測定しており捕集効率は96~99%、圧力損失は100~250mmHgの結果を得ているが、ミスト濃度が10g/m<sup>3</sup>以下の低い場合には再飛散によって発生するミスト量が相対的に無視できなくなり捕集効率は低下する。さらにオイルミスト以外の水滴や食塩水滴などの捕集性能も測定している。

川下<sup>75)</sup> (1975) は圧縮空気中の水滴、油滴のフィルターの選定について述べている。

Duros ら<sup>23)</sup> (1978) によれば、拡散捕集による繊維層は、サブミクロンを含め全粒子径範囲の液滴捕集が可能で、風速5~25cm/sec、圧力損失200~380mmH<sub>2</sub>Oで用いられる。これに対して慣性捕集による繊維層は1 $\mu\text{m}$ 以上のミスト分離に有効で、風速2.5~3 m/sec、圧力損失150~250mmH<sub>2</sub>Oで用いられる。

以上繊維層を用いた分離の研究を概観したが、次に述べるワイヤメッシュやラシヒリングなどの場合と特に異なる点は、拡散捕集を重視した仕様が多くのことで、液滴径が小さく風速が低い程捕集効率の高いことである。またこの分野の研究は、実験や実測が主で理論解析やモデル論は少ない。

#### (b) ワイヤメッシュフィルター

次にワイヤメッシュなどの比較的太い針金や繊維の編み物充填層について述べる。ワイヤメッシュミスト分離機の設置法の例をFig. 1・3に示す。ワイヤメッシュを用い5 $\mu\text{m}$ 以上の比較的粗な液滴を捕集しようとするときは、約0.15g/cm<sup>3</sup>の充填密度(空隙率97~99%)で層厚さ10~15cmのものが通常使用されており、0.3~5 m/secの風

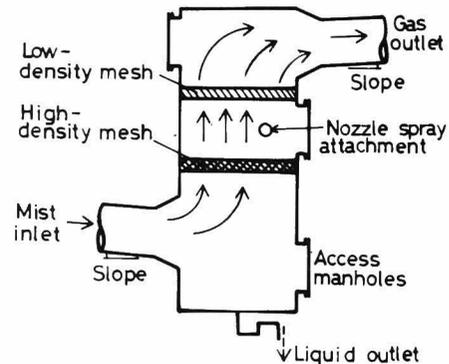


Fig. 1・3 Wire mesh mist separator<sup>48)</sup>

速で運転する。繊維材質は直径100~400 $\mu m$ のステンレスなどの金属あるいはポリプロピレンなどの樹脂で、気流方向は上昇または、水平である。前述の繊維層では主として拡散によって粒子を捕集したが、ワイヤメッシュでは100 $\mu m$ 以上の比較的粗な繊維を用いて慣性によって粒子を捕集するので風速を大きくすれば捕集効率は増大する。しかし風速がある程度以上大きくなると捕集液が再飛散して効率が低下し使用不能となる。

一方1~5 $\mu m$ 程度の比較的微細な液滴を分離するには、2種類のワイヤメッシュを直列に配置する方法がよく用いられる<sup>2, 34, 64, 67)</sup>、上流側には比較的繊維径が細く、充填密度の高いワイヤメッシュが設置される。このワイヤメッシュは微小液滴を繊維へ衝突させるため通常高風速で運転するがこのとき捕集液は層背面から再飛散する。すなわち、上流側のワイヤメッシュは微細液滴を凝集させ粗大な再飛散液滴にかえる。下流側のワイヤメッシュには前述の普通の仕様のもを用い、再飛散限界以下の風速で運転して前段で凝集成長した液滴を捕集する。

また逆に上流側を粗なワイヤメッシュ、下流側に密なワイヤメッシュを配置し、前段で粗大液滴を捕集して負荷を減らし、後段で微細な液滴を捕集する方式も使用されている<sup>例えば67)</sup>。ワイヤメッシュは前述の繊維層に比べて処理風量が大きく、低コストであるがサブミクロンの極微細液滴の除去には有効でない。なおワイヤメッシュおよび重力を用いた気液分離機的设计法はMarrら<sup>45, 46)</sup>(1975, 1976)が検討している。

以上ワイヤメッシュの使用方法について述べたが、次にその研究の概略を述べる。ワイヤメッシュの液滴捕集性能としては、1) 捕集効率、2) 再飛散および3) 圧力損失が重要である。

1) の捕集効率に関してはCarpenterら<sup>20)</sup>(1955)、Yorkら<sup>66)</sup>(1963)(実験のみ)、Bradieら<sup>67)</sup>(1969)、Germerdonkら<sup>33)</sup>(1969)(実験のみ)、Bürkholz<sup>12)</sup>(1970)、Bürkholzら<sup>13)</sup>(1972)およびBell<sup>3)</sup>(1973)(実験のみ)の研究がある。

その理論解析はいずれも単一円筒捕集効率からワイヤメッシュの捕集効率を計算するものであるが、一例としてBradieらの方法を次に示す。すなわちワイヤメッシュとしての捕集効率を $\eta_m$ 、単一円筒捕集効率を $\eta_s$ 、ワイヤメッシュの層厚さを $\ell$ 、繊維径を $d$ 、空隙率を $\varepsilon$ とすると、次式から

$$\eta_m = 1 - \exp\left\{ -\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\pi} \left( \frac{4(1-\varepsilon)}{d} \right) \cdot \rho \cdot \eta_S \right\}$$

ワイヤメッシュの捕集効率が求まる。

2) の再飛散については, York<sup>65)</sup> (1954), Yorkら<sup>66)</sup> (1963) および後藤ら<sup>77)</sup> (1978) の研究がある。

YorkらはSouders—Brownの式をワイヤメッシュに適用し, 実験定数を含む再飛散開始点の計算式を求めている。また, 後藤ら<sup>77)</sup>も, 1種類の液の実験データがあれば, 他の任意の液についてもその再飛散開始点が求まる実験式を報告している。後藤らの提出した式は液の密度だけでなく, 粘度や表面張力も考慮している点でYorkらの式より進歩していると思われる。

3) の圧力損失はYorkら<sup>65)</sup> (1963)が検討しており, ワイヤメッシュの圧力損失を乾燥時の圧力損失と液滴負荷時の増加圧力損失に分け, それぞれの測定値を線図にまとめている。

後藤ら<sup>77)</sup> (1978)は, ワイヤメッシュの圧力損失をメッシュの中を自由に流動するローディング液によるもの, 繊維付着液によるものから構成されるものと考え, 一部実験式を含む推算式を報告している。なお, この推算値は実測とよく一致している。

新津ら<sup>83)</sup> (1968)は, 厳密にはワイヤメッシュとは異なるが, 2段ウレタンフォームの液滴捕集性能を測定し, その性能を図表化している。運転条件は4~8 m/secの高風速であって, 一段目のウレタンフォームは微小液滴の凝集成長を目的としており, その層で捕集された液の一部は気流と共に層を通り抜け背面から粗大液滴となって再飛散する。再飛散液滴のかなりの部分は重力沈降によって除去され, 残りは後段のウレタンフォーム層で捕集される。

以上通常形式のワイヤメッシュについて説明したが, Bürkholtzら<sup>13)</sup> (1972)は, サブミクロンの液滴の慣性捕集を目的として, 20~50 $\mu$ mの細い合成樹脂繊維をワイヤメッシュ中に針金と一緒に編み込み捕集効率を高めた場合の性能を測定している。その効果は顕著であるが, 逆に耐久性は少し悪くなると言っている。

Germerdonkら<sup>33)</sup> (1969)は断面がくの字型の衝突板から成る羽根列の屈曲した間隙の上半分にワイヤメッシュを充填した場合の上昇液滴捕集効率を測定している

が、ワイヤメッシュ単独の場合に比べて再飛散による捕集効率の低下が生じにくく高い効率を得ている。

Soole ら<sup>61)</sup> (1970) は直径0.9~13mmの多数の針金を直径約1mの円筒内に半径方向に取り付け、約500r.p.m.の速度で回転し、その中を10~40 $\mu$ mの液滴を含む気流約5 m<sup>3</sup>/secを通過させた場合の液滴捕集性能を測定している。

### (C) 管群, 棒群

次に断面が円形の管列または涙滴形の棒の列を積み重ねた充填層について述べる。断面が涙滴形の棒群は「Karbate line」分離機と呼ばれ古くから実用されており、その性能については2, 3の報告<sup>22, 35, 56)</sup>に水平流での部分捕集効率曲線の例、再飛散開始風速および圧力損失の推定式が示されている。50%捕集水滴径は約5 $\mu$ m, 100%のそれは約10 $\mu$ mであるが、再飛散開始風速は約9 m/secとワイヤメッシュの約3倍でかなり大きい。なお、そのときの圧力損失は約25mmH<sub>2</sub>Oである。

円形棒群についてはCalvert ら<sup>17)</sup> (1977) が検討しており、充填が密な場合にはスリットインパクターの捕集効率から、また充填が粗な場合には孤立円筒の捕集効率から棒群の捕集効率を計算する方法を提案している。

Calvert ら<sup>17)</sup> (1974) によれば、上昇流での再飛散開始風速はワイヤメッシュより低いが、液負荷の小さい場合 ( $2 \times 10^{-5}$  liq-m<sup>3</sup>/air-m<sup>3</sup>以下) では逆にワイヤメッシュより高くなる。

### (d) その他の充填層

以上円柱状要素からなる充填層の研究の概略を述べたが、次に塊状の要素からなる充填層を用いた分離について述べる。

実用されている充填物には、ラシヒリング、ベルルサドル、砂、石炭、コークス、砂利、その他種々のものがある。充填物の径は数百ミクロンから数センチメートルである。

Jackson ら<sup>36)</sup> (1966) とCalvert<sup>67)</sup> (1968) は一部実験値を含む捕集効率推定式を提案しており、その推定結果は実測値と概略一致している。

またBürkholz<sup>15)</sup> (1976) はラシヒリング、鞍、ガラス球、コークスなどの充填層につき種々の条件で測定によって捕集効率曲線を求めている。

捕集効率については以上のほか、Massey<sup>48)</sup> (1959), Germerdonk<sup>33)</sup> (1969),

Bell<sup>3)</sup> (1973) およびMeierら<sup>51)</sup> (1977) の報告がある。また液滴ではないがKnettigら<sup>41)</sup> (1974) のメチレンブルー・ウラニン固体粒子を用いた測定結果も参考となろう。

再飛散開始風速はGermerdonkら<sup>33)</sup> やBellら<sup>3)</sup> によればワイヤメッシュよりわずかに低く、条件によって異なるが、Germerdonkらの実験(鞍)では1.5m/sec、Bellらの実験(アルミ削り屑層)では3.6m/secである。再飛散に関しては以上の他Calvertら<sup>17)</sup> (1974) の報告がある。

充填層は気液接触装置として工業プロセスにおいて広く使用されており、圧力損失についてはよく知られているが、液滴捕集時の圧力損失については、Germerdonkら<sup>33)</sup>、Bürkholtzら<sup>15)</sup>、Bellら<sup>3)</sup>、およびCalvert<sup>18)</sup> の報告がある。

以上のほか流動層を利用する方法に関して報告がいくつかあるが、McCarthyら<sup>50)</sup> (1976) がその捕集機構を解析しており、拡散、さえぎり、および慣性によってサブミクロンの液滴捕集も可能である。流動粒子径は100~200 $\mu$ mであり、風速は1~5cm/secとかなり小さい。

#### 1. 1. 2. サイクロン

次にサイクロンについて述べる。サイクロンは固体粒子の捕集に広く使用されているが、液滴捕集にもしばしば用いられる。特に、ベンチュリースクラバーからの液滴捕集に使用する場合が多い。これは分離径が約5 $\mu$ mと比較的大きく、また圧力損失も100mmH<sub>2</sub>O程度でワイヤメッシュなどに比べてかなり高いが、構造が簡単で不溶性固体粒子の存在する場合にも使用でき、入口風速も最大20m/secの高風速で操作でき処理能力が大きいなどの特徴によるものであろう。

サイクロンによって微小液滴を捕集する場合には、マルチサイクロン<sup>56)</sup> としたり、粗大水滴を気流中に噴霧してスクラッパ効果を利用する方法<sup>56)</sup> が用いられている。

液滴がサイクロンの壁へ捕集されるまでの機構は固体粒子の場合とほぼ同じと考えられる。したがって液滴捕集理論モデルとしては例えばLeith<sup>42)</sup> (1972) の固体粒子捕集理論モデルをそのまま利用できよう。

また液滴の部分捕集効率の測定はBürkholtzら<sup>13)</sup> (1972)、Jashnani<sup>38)</sup> (1975) およびBürkholtz<sup>16)</sup> (1978) が行なっている。Jashnani<sup>38)</sup> は測定値をLeithら<sup>42)</sup> の理論値と比較しているがその一致は良好である。

一方、Jashnani ら<sup>37)</sup> (1974) の計算によれば再飛散開始入口風速は22~24m /sec であり、液滴が細かい程再飛散開始風速は大きい。なお、捕集液の一部は壁面を伝って上昇しサイクロン出口管内壁に沿って流出再飛散する場合があります、出口管外周に円錐状のスカートを取り付けるなどの方法によって再飛散を防止する設計が用いられる。またPeacock<sup>55)</sup> (1974) は軸流サイクロンの水滴捕集性能を報告している。

### 1. 1. 3. スクラバー

次にスクラバーについて述べるが、これは液滴を捕集媒体として気流中の粒子を捕集する装置であって、主として粉塵捕集に使用されているが、液滴捕集に用いる場合もある。

スクラバーには多くの種類があって大別すると留水を利用するもの、液滴を利用するもの、気泡を利用するものがある。

液滴捕集機構は粉塵の場合と同じで、慣性衝突、ブラウン拡散、拡散泳動、熱泳動が支配的と思われる。

構造簡単で比較的高性能なベンチュリースクラバーによる液滴捕集についてはBrink ら<sup>5)</sup> (1951), Jones<sup>39)</sup> (1949), Ekman ら<sup>24)</sup> (1951) およびBürkholtz ら<sup>13)</sup> (1972) の研究がある。ベンチュリースクラバーはのど部での風速が40~100m /sec と大きく、処理能力が大きい反面、圧力損失は1 m H<sub>2</sub>O 程度とかなり大きく、また主として慣性力を利用しているため0.5 $\mu$ m 以下の液滴の捕集効率は拡散を利用する繊維層や電気集塵機などに較べて低い。また水の消費量も大きいので液滴捕集にはあまり用いられていない。

留水式スクラバーの性能は、Bürkholtz<sup>13)</sup> (1972), Lunde ら<sup>44)</sup> (1957), 磯田 ら<sup>72)</sup> (1974) が測定しており捕集効率はベンチュリースクラバーよりやや低いが圧力損失も60~150mmH<sub>2</sub>O程度と低い。

多孔板塔スクラバーは、多孔板や網上の液中を液滴を含む気流を通過させ、気泡内面で、液滴を捕集するもので、水科ら<sup>87)</sup> (1961), 福本<sup>30)</sup> (1975) およびCalvert<sup>18)</sup> (1974) などの研究がある。捕集効率はベンチュリースクラバーよりかなり低く、10 $\mu$ m 以下の液滴はあまり捕集されない。

しかし、0.5 $\mu$ m 以下の極微小液滴に対してはブラウン拡散や拡散泳動の捕集機構が有力となって逆にベンチュリースクラバーより捕集効率が高くなる<sup>18)</sup>。なお、泡

鐘段による分離はSchlea<sup>59)</sup> (1961) が検討している。

#### 1. 1. 4. 電気集塵機

電気集塵機<sup>(例えば13, 56)</sup> は粗大液滴はもちろん、微小液滴も高効率低圧損で捕集でき、不溶性固体粒子が存在する場合にも使用でき、高温でも運転可能であるなど優れた特徴を有するが、設備コストがかなり高いので余り使われていない。

#### 1. 1. 5. 慣性分離機

次に慣性分離機について述べる。気流を方向転換して流路壁または衝突板に液滴を捕集する慣性分離法を大別すると、1) 流路に1つまたは少数の障害物を置く方法(例えばFig. 1・4)と、2) 多数の衝突板を並べ、流路を狭い多数の流路に分割する方法、に分かれる。

1) の分離機には、ストロング分離機 (Strong Carlisle and Hammond Co.)、E型水平流分離機 (Wright—Austin Co.)、PL分離機 (Ingersoll Rand Co.) などがあり<sup>56)</sup>、粗大液滴の分離に使用する。

2) には種々の形状の衝突板列が用いられている。上昇流での設置法の例をFig. 1・5 (A) に示すが、分離機で衝突捕集した液滴は捕集板上で凝集成長後流下し、捕集板下端から滴下する。また目詰り防止のため間けつ的に洗浄水を噴霧することがある。

(B) は平板羽根列を2段積み重ねた場合の例であって、図中に市販品の寸法例を示している。(C) は折れ板分離機の例であって、折数は1~6のものが用いられる。また市販品の寸法例を同図中に示す。水平流での設置法の例をFig. 1・6 (A) に示すが、捕集板へ衝突した液滴は凝集成長後重力流下し系外へ取り出される。気流中に固体粒子を多量に含む場合には(B)に示すように洗浄液を間けつまたは連続的に噴霧する。(C) はコルゲート(波形)形式エレメントの例であるが大きいトラップは捕集液を流下させ再飛散を防止するだけでなく、整流と圧力損失の回復を目的としている。

Houghton ら<sup>35)</sup> (1939) は最初の気流方向転換角 $\beta$  が $30^\circ$ 、折数5の水平流折板式

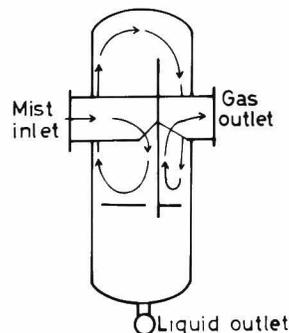


Fig. 1・4  
PL separator (Ingersoll  
Rand Co. Ltd)<sup>56)</sup>

分離機を用い風速を  $4 \text{ m/sec} \sim 12 \text{ m/sec}$  の範囲で変化させ、 $2 \sim 800 \mu\text{m}$  に分布する塩化カルシウム溶液の多分散液滴を捕集し、その捕集効率および圧力損失を測定している。しかし、部分捕集効率は求めておらず、測定した総合捕集効率も再飛散時のものである。再飛散開始風速は約  $4 \text{ m/sec}$  でワイヤメッシュ ( $7.5 \text{ m/sec}$ )、や断面が涙滴形の棒群 ( $16 \text{ m/sec}$  以上) に比べて小さい結果を得ている。しかも圧

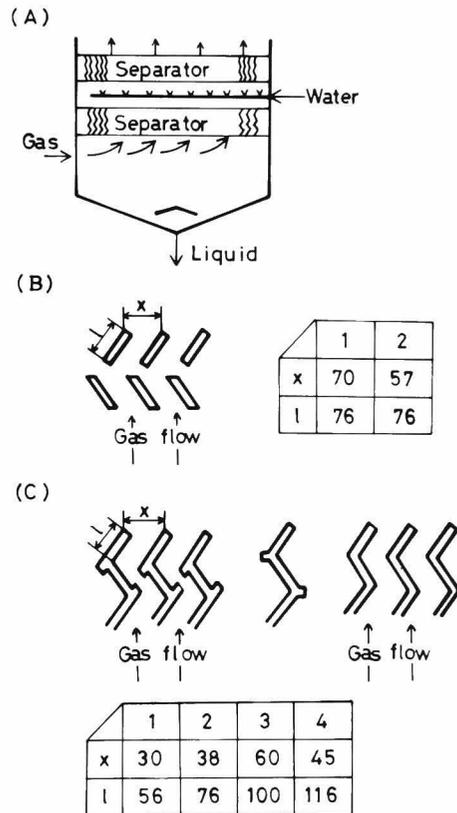


Fig 1 · 5 Upward flow type mist separator (新神戸電機K.K.)

力損失もたとえば風速が  $5 \text{ m/sec}$  のとき  $15 \text{ mmH}_2\text{O}$  でワイヤメッシュや棒群の約 2 倍程度と高い結果を得ている。

Fairs<sup>25)</sup> (1944) は多孔板形およびスリット形カスケードインパクター (Calder-fox スクラバー) の液滴捕集性能を検討しており、スリット形の方が捕集効率が高くしかも再飛散開始風速の大きい結果を得ている。

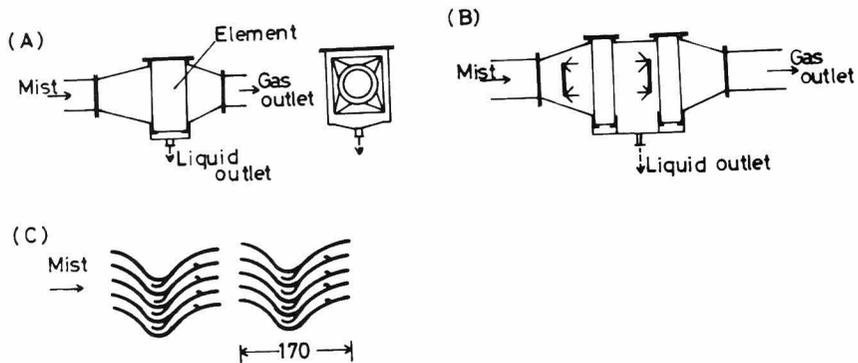


Fig. 1-6 Horizontal flow type mist separator (日本碍子K.K., Euroform, Co. Ltd)

Chilton<sup>22)</sup> (1952) は上昇流中に平板羽根列を2段積み重ねた場合の $100\sim 500\mu m$ に分布する多分散水滴の捕集効率および圧力損失を種々の装置および運転条件下で測定し、性能比較を行なっている。しかし、部分捕集効率は測定しておらず、捕集機構の理論解析も行っていない。

新津ら<sup>79, 80, 81)</sup> (1961, 1962) は水平流折板水滴分離機の性能を検討しており、折板間隙中の速度場を乱れの無い流路に平行な一様流と仮定し、また粒子流体抵抗としてストークスの式を採用し、その他種々の仮定を置いて捕集効率の解析解を求めている。しかし、実際の分離機内流れでは流路中に大きい乱流渦を生じ真の流路はかなり狭められ、またそこでの流れは平均流速よりかなり速いので新津らの方法では捕集効率をかなり低く見積もっていると思われる。さらに乱流混合の影響も無視しており、本法は装置条件および運転条件の影響の定性的説明にしか使用できず、定量的には無理がある。

Regehr<sup>57)</sup> (1967) は、流路が円弧状の $90^\circ$ 方向転換部と直進部からなるジグザグ流分離機の性能を検討している。混合のため全ての方向転換部入口で水滴濃度分布は均一であり、流路内の風速は場所によらず一定と仮定し、 $10\mu m$ の水滴について各方向転換毎に捕集効率を計算している。さらに流れの可視化を行ない、直進部長さを流路幅で除した値を4以上とすれば方向転換部の流れに剥離が生じないことを見出している。 $10\mu m$ から $160\mu m$ に分布する多分散水滴の総合捕集効率を測定しており、風速が $5\text{ m/sec}$ で99.9%の捕集効率を得ている。しかし、部分捕集効率は測

定していない。また圧力損失は風速の罫でうまく表わせないとしている。

Germerdonk ら<sup>33)</sup> (1969) は上昇流で平板羽根列、折板分離機およびその他の各種慣性分離機ならびにワイヤメッシュおよびラシヒリング充填層の多分散水滴捕集性能を測定し、その比較を行っている。なお測定時の水滴濃度は約  $1 \text{ kg/m}^3$  であって、風速  $1 \sim 2 \text{ m/sec}$  の範囲に再飛散開始点があるとしている。さらに再飛散開始前後の捕集液の挙動を写真で示している。再飛散開始風速は折数3の折板分離機が最大で、ワイヤメッシュ、ラシヒリング充填層の順に小さくなる。再飛散開始前の捕集効率<sup>率</sup>はワイヤメッシュが最も高いが圧力損失も高い。折数3の折板分離機の捕集効率もかなり高く (99.5%) しかも圧力損失はワイヤメッシュの約  $1/2$  である。さらにGermerdonk は高風速での性能改善のため、衝突板の上端に樋をつけたり下端に切り込みを入れ分離機壁面へ捕集液が流れ去るようにした場合、あるいは折板分離機とワイヤメッシュを組み合わせた場合の性能を検討し、それぞれ効果のあることを示している。

Watzel<sup>62)</sup> (1970) は前述のRegehr と同様の水平ジグザグ流分離機の性能を検討している。粒子軌跡計算では、流路内速度分布を考慮しても理論部分捕集<sup>率</sup>曲線はあまり変わらないとしている。捕集液の衝突板からの除去が重要であるが、捕集液は衝突板表面で薄い液膜を形成して気流方向に動き捕集溝へ集まり鉛直下方へ流出するようになっている。この捕集溝は全長を連続溶接する必要があって、点溶接では捕集液がすきまを通り抜け再飛散して捕集効率は低下する。捕集溝は方向転換毎に設置する必要があって、これを怠ると連続した厚い液膜ができて、ある角度で衝突した液滴が気流中へはね返り捕集効率が低下するとしている。

福田ら<sup>86)</sup> (1971) は前述のChilton らが実験によって求めた最適形状の上昇流2段平板羽根列を標準とし、これを3段とした場合と性能を比較している。3段とすることによって分離機を通過する水滴量が約45%減少し、圧力損失は約40%増加している。またコルゲート型 (波型) は標準の2段平板羽根列に比べて通過水滴量は63%減少し、かつ圧力損失も28%減少するとしている。なお部分捕集効率は測定していない。

Bürkholtz ら<sup>13)</sup> (1972) は5種類の水平ジグザグ流分離機による硫酸ミスト部分捕集効率を測定し、速度場を2次元バンド中を流れる平行一様流と仮定して求めた

計算値と比較しているが、よい一致は得られていない。測定値を慣性パラメーターを用いて整理した結果は1本の曲線とはならず、風速が高いほど捕集効率は高くなっているが、Bürkholzらはこのことを説明していない。これは慣性以外に乱流拡散捕集などが影響しているためではなかろうか。また彼らは分離機内流れを可視化し、圧力損失も測定している。

吉川ら<sup>88)</sup>(1973)は、上昇流1段平板羽根列の水滴捕集性能におよぼす、羽根ピッチ、羽根傾斜角の影響を検討している。まず、羽根間隙中の流れを煙風筒中で可視化して流路中に生ずる乱流ウエイクの外形線を測定し、円弧と、羽根に平行な直線で近似して流れを求め粒子軌跡を計算することによって数値的に理論捕集効率を得ている。しかし、気流中に斜めに平板を置いた場合には第1編第2章で述べたように平板前縁付近の粒子捕集が重要であり、そこでは淀み点流れとなるが、吉川はそれを無視した流れを仮定している点で問題をのこしている。さらにその部分捕集効率の半理論の妥当性を検討するため20~500 $\mu$  mに分布する多分散水滴の総合捕集効率および水滴径分布を測定し、その半理論部分捕集効率から計算した総合捕集効率と概略一致する結果を得ている。なお、水滴径分布測定では油を塗ったスライドガラスの前方でシャッター式サンプラーを使用し、連続ポテンシャル流を仮定してリボン中心線上の理論局所捕集効率を数値計算によって求めその値を用いて水滴径分布を推定しているが、シャッター前方の空気淀み部を無視してリボンとみなすことおよびリボンまわりの流れの仮定に問題があろう。さらに吉川らは捕集板の親液性が捕集効率におよぼす影響を検討しており、親液性のよい材料の方がわずかによいと結論している。さらに前述のGermerdonkら<sup>33)</sup>と同じく羽根下端に山形の切れ目をいれることが再飛散開始風速の増大に効果があるとしている。

Bellら<sup>3)</sup>(1973)は上昇流で折板分離機、ワイヤメッシュ、アルミの削りくず充填層(Packed aluminum turning demister)の水滴捕集効率および圧力損失におよぼす風速の影響を測定している。捕集効率は当然ながら風速が増せば大きくなるが、ワイヤメッシュおよび充填層では4 m/sec以上では再飛散のための捕集効率の低下が見られる。これに対して折板では5 m/secとなっても再飛散は生じなくて捕集効率が上昇を続ける。なお再飛散開始前は、同一風速ならワイヤメッシュの捕集効率が最も高く、充填層、折れ板の順であり、圧力損失もワイヤメッシュが最大で充填

層、折れ板の順となる。

Calvert ら<sup>17)</sup> (1974) および Jashnani ら<sup>37)</sup> (1974) は水平流3段平板羽根列、充填層、ワイヤメッシュ、丸棒群およびサイクロンの液滴捕集性能を40~2000 $\mu$ m に分布する多分散水滴を試料として測定している。乱流による粒子の完全混合を仮定し分離機を2次元バンドとみなして平板羽根列の理論捕集効率を求めている。しかし、流路内に生ずる乱流ウエイクによって生じる真の流路幅の狭まりとその結果として起こる実流速の増大を考慮していないなどの点で検討が不充分である。水滴濃度が高いほど低風速で再飛散が開始し、平板羽根列の再飛散開始風速はワイヤメッシュよりやや大きく丸棒群より可成り大きい。Jashnani ら<sup>37)</sup> は理論再飛散開始風速を計算しているが、実験再飛散開始風速はその半分以下である。これは、羽根表面の実流速が羽根間隙平均風速よりかなり大きいためではなからうか。圧力損失は、充填層が最大で平板羽根列さらに丸棒群またはワイヤメッシュの順に小さくなっている。

Gardner ら<sup>31)</sup> (1974) は自然通風冷却塔用衝突板水滴分離機の変遷について述べている。

Martin ら<sup>47)</sup> (1974) は実用のクーリングタワー（直径102m $\phi$ ，上昇流）中で2種類の平板羽根列による水滴の部分捕集効率を測定している。

Foster ら<sup>28)</sup> (1974) は木製2段平板羽根列およびアスベストセメント製のコルゲート型分離機の上昇流での捕集機構を検討している。すなわち、流れを可視化して淀み点流れおよび流路内に生じる乱流ウエイクの形状を求め、その外部をポテンシャル流と仮定して数値計算により流れを計算し、粒子軌跡を求めている。しかし、計算機による制約のため羽根（長さ14.6cm）列下端からわずか6cmの位置より流れや粒子軌跡の計算を開始しており、計算結果には疑問がある。さらにFoster らは高速カメラで液滴の挙動を撮影しており、捕集効率は単純な粒子軌跡の計算のみでは説明できず、乱流混合や捕集面での液滴の反発を考慮しなければならないと結論している。しかし、高速度カメラ写真から求めた平板羽根列の捕集効率曲線は極大値を有する形であり、前述のMartin らの結果と異なっている。これは、写真撮影した粒子個数が僅少なための誤差かもしれない。

Burger<sup>11)</sup> (1975) は、上昇流中で3段平板羽根列と、6段Cellular形（小室）分離

機との性能比較を行っており、圧力損失が同じならCellular形の多分散水滴流総合捕集効率が約30%高いことを報告している。しかし、Cellular形の方が代表寸法が小さく段数も多いなど比較に問題があると思われる。

石川島播磨重工K.K.<sup>74)</sup>(1975)ではルーバー形式、コルゲート形式およびEcodyne社で開発されたHi-V形式、円孤形式、境界層制御形式、フィルム形式などおよびそれらの組合せによる30~300 $\mu$ mに分布する多分散海水滴の捕集性能を比較測定し、3段ルーバーとフィルム形式の組合せが優れているとしている。なおフィルム形式は狭い流路に小さい突起を多数設けた構造であって、乱流拡散沈着によって液滴を捕集する。

日置<sup>85)</sup>(1976)は水平流コルゲート形式、水平流折板式、上昇流3セグメント形式分離機の水滴捕集性能を測定している。水平流コルゲート形の100%捕集限界水滴径は平行一様流2次元ベンドモデルによる計算値と一致し、折板式分離機では計算値の1.5倍であることをみとめている。さらに、コルゲート形式について、実用上重要なスケール付着に対する衝突板ピッチ、洗浄サイクルおよび洗浄水量の効果を実験によって検討している。以上のほか、コルゲート形式および3セグメント形式の種々のプラントにおける液滴捕集実施例を紹介している。

Yaoら<sup>63)</sup>(1975)は、断面がくの字形の1段肉厚翼列による冷却塔での水滴捕集を理論的に検討している。すなわち、翼列中の速度場を連続ポテンシャル流とみなし、粒子軌跡を数値計算して理論捕集効率を求めている。また羽根表面の境界層を考慮した計算によって全圧力損失を計算している。さらに再飛散開始風速も考察している。

しかし、粒子の乱流混合による捕集効率の低下などは考慮しておらず、また液滴径が数百ミクロンの粗大なものを検討しているにもかかわらず液滴の捕集面での反発などを考慮していないなど検討の余地が残されている。

Chanら<sup>21)</sup>(1977)は上昇流中でコルゲート形式(Sinus-shaped分離機)、3セグメント形式およびジグザグ形式分離機の水滴捕集性能を研究している。理論計算では、分離機内流れを層流とみなし、捕集板表面で流れ速度を零とした場合および流れがスリップするとした場合について粒子軌跡を数値計算し、理論捕集効率を求めている。一方実験では5~200 $\mu$ mの多分散水滴を用い、レーザー光散乱を利用

して分離機入口，出口の水滴径分布を測定し実験捕集効率を求めている。コルゲート形式および3セグメント形式では捕集面で流速を零とした場合の計算結果が測定値と比較的一致している。しかし，ジグザグ形式では分離機の幾何形状が複雑なことなどのため計算はうまくいっていない。捕集効率はジグザグ流で最も高く，3セグメント形式，コルゲート形式の順であり，圧力損失は逆の順序となっている。

武田ら<sup>78)</sup> (1978) は積層交差点波形分離機を開発し，海水滴の総合捕集効率を測定しており，通過率は $5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$ である。

Foster<sup>29)</sup> (1978) は分離機内の実際の液滴の挙動が重要なことを強調しており，風速2 m/secの上昇流中で2段平板羽根列内へ，振動針から直径約300  $\mu m$  の水滴を連続的に流入させ，その挙動を写真撮影によって調べている。すなわち，水滴が捕集面で反発する場合や重力のため水滴が捕集面から再び遠ざかる場合の写真からこれらを考慮する必要のあることをのべている。

以上各種の液滴分離機の性能に関する研究を簡単に概観したが，これらの他Bürkholz<sup>14)</sup> (1976) は繊維層，ワイヤメッシュ，充填層，サイクロン，ベンチュリースクラバ，衝突板式など種々の分離機の性能を測定しており，慣性パラメーター，レイノルズ数および圧力損失係数を用いて新しい無次元分離パラメーターを定義し，これによって測定結果をまとめることを提案している。しかしその理論的な根拠は示されていない。

また，Batel<sup>2)</sup> (1974) およびCalvert<sup>19)</sup> (1978) は液滴分離機の選定方針を述べている。

以上述べたように数ミクロン以下の微小液滴の除去には繊維層フィルターが広く使用されており，電気集塵機は高価であるが，不溶性物質を含む場合や捕集液の粘度が高い場合に使用されている。一方数ミクロン以上では不溶性物質を含まない液滴捕集にはワイヤメッシュが広く使用されている。しかし，工業プロセスでは液滴のほかカーボンブラックや石膏その他固体粒子を気流中に含む場合も多く，捕集しようとする液滴の径がさほど小さく無い場合には別に固体粒子分離機を設置せずに棒群や衝突板分離機を用い両者を同時に除去するのが普通である。

また，自然通風式冷却塔など圧力損失が制限され，捕集液滴径が大きい場合にも棒群や衝突板分離機が多用されている。

このように、衝突板分離機の用途は広く、その研究は重要と思われる。衝突板分離機の捕集液滴径は比較的大きく、また繊維充填層などに比べて障害物の寸法が大きいため、一見その性能や分離機構の解明は容易に思われる。しかし、分離機が解析困難な幾何形状をしており、さらに気流の方向転換が大きくしかもレイノルズ数が大きいと羽根間隙中に大きい乱流渦を生じポテンシャル流の仮定は成り立たないので簡単に流れが計算できず、粒子軌跡を精密に計算し理論捕集効率を求めるのは計算機の計算領域や計算時間の制約などのため困難が伴う。しかも、乱流による粒子の混合や液滴の捕集面での跳ねかえりなどの捕集効率への影響を考慮に入れるべきであるが、それらの現象に未解明な点があるなど厳密な理論解析は容易でない。

一方実験的に捕集効率を推定するには入口および出口の粒子径毎の液滴流量を知る必要がある。液滴の慣性力が大きいとサンプリングによって系外の測定機へうまく導くのは困難なことや、熱線その他に液滴を衝突させ電気信号を系外へ取り出して測定する方法の実用には未解決の問題が多いことなどの理由で、表面処理をしたプラスチックテープ、ガラス板および濾紙などに液滴を衝突捕集し顕微鏡写真で計数する方法が広く使用されている。しかしこの方法による測定はかなりの労力を要するため、通常衝突板による液滴捕集を取り扱った報告書中に部分捕集効率のデータがあってもその数は少なく、多分散液滴の総合捕集効率によって相対的な性能を検討している場合が多い。

#### 1. 2. ルーバー分離機による固体粒子の捕集と分級に関する従来の研究の概要

固体粒子の衝突板による捕集や分級では、気流に対して斜めに羽根列を配置して気流の方向転換角を大きくしたものをを用いる。

Smithら<sup>60)</sup>(1955)は2次元の分離機中の粒子軌跡を可視化し、通常平板羽根列では気流の淀み点より後方で羽根に衝突した粒子は反発後気流に同伴され羽根間隙を通り抜けることを見出し、Fig. 1・7 (B)に示す羽根形状をその改良形として考案している。さらに3次元(円錐形)分離機を用いて捕集効率におよぼすブローダウン空気流量比、入口粉塵濃度、流入風速の影響を測定している。また、原料、粗粉、細粉の粒子径分布を測定し、粒子径の捕集効率への影響を検討している。ブローダウンは、ルーバー各段の流れを等しくするのに必要としており、ブローダウンによって捕集効率の増大する結果を得ている。その性能は $10\mu m$ 程度の微粒子の

捕集にも使用でき、 $40\mu m$ 以上の粒子捕集にはさらに性能を発揮する。理論計算では一段のみを考え羽根間隙の流れを入口気流に垂直な一様流と仮定し、またニュートンの粒子流体抵抗を用い、粒子軌跡の解析解を求めているが、これらの計算は第1次近次で、実験結果の定性的説明に使用しているだけである。

井伊谷ら<sup>68)</sup>(1959)は、粒子の抵抗係数として、ニュートンの式より実際に近いストークスの式を採用し、同様の方法で粒子軌跡の解析解を求めている。またSmithらと同じく、Fig. 1・7(B)の2種類の羽根形状の3次元ルーバー分離機の性能を実験的に検討している。すなわち、圧力損失は風量の2乗に比例し、20mm H<sub>2</sub>O程度で小さい。羽根間隙の縮流速度頭が圧力損失とみなせる。粉塵濃度の捕集効率におよぼす影響は小さく粉塵の種類の影響は粒子径と真比重の積で表わせるとしている。また羽根形状の影響は大したことはないとしている。

また井伊谷ら<sup>69)</sup>(1960)は、分級機として用いた場合の性能を検討するため、部分捕集効率曲線、ニュートンの分級効率を測定している。Fig. 1・7(A)の羽根構造では50%粒子径はブローダウン流量によらずほぼ一定であるが、(B)の羽根構造では、ブローダウン流量が増大すれば50%捕集粒子径は減少する傾向にある。両羽根形式ともブローダウン流量の増大とともに分級は鋭くなる。入口風速が増大すれば分級精度は低下するとしている。

Matlew<sup>49)</sup>(1960)は、タービン羽根への固体粒子の衝突機構を解明するため、 $2\sim 8\mu m$ のパラフィンろうの液滴を2次元の気流に垂直に配置した肉厚羽根列へ37 m/secの気流速度で衝突させ、羽根表面での粒子捕集量の分布を測定している。さらにポテンシャル流を仮定し、数値計算によって速度場を求め、ストークスの抵抗係数を用いて粒子軌跡を計算し、粒子捕集量の分布の理論値を求め、実験捕集量の分布を説明している。また、直径0.7, 4,  $16\mu m$ の粒子の理論集塵率の値を計算しており、結果は0%, 16%, 98.7%である。

新津ら<sup>82)</sup>(1963)は2次元横型平板羽根ルーバー集塵機(水平流用)の砂粒捕集性能におよぼす設計条件の影響を実験的に検討している。供試砂粒は数種類あって、その径は数百ミクロンと大きい。集塵率に最も大きく影響する因子は羽根の傾きである。羽根列の入口気流に対する傾斜角 $\alpha$ は $30^\circ\sim 60^\circ$ の範囲では集塵性能にあまり影響しない。羽根ピッチはあまり小さくともする必要は無く、羽根に重なり目があれば

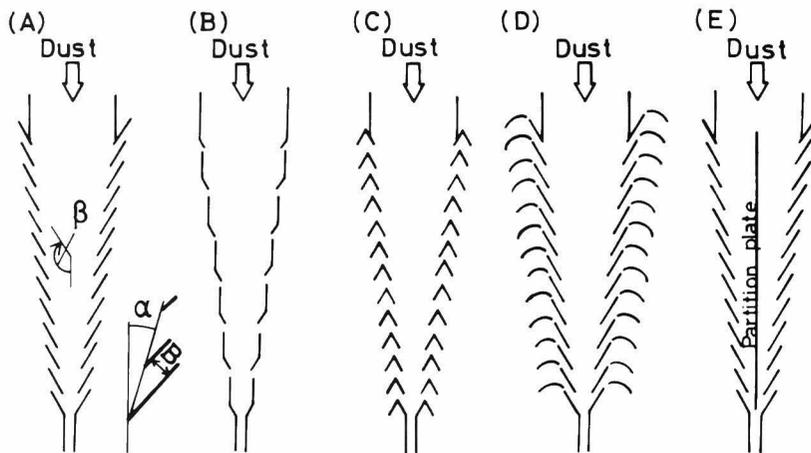


Fig. 1.7 Typical louver type dust collectors

十分であるという結論を得ている。

井伊谷ら<sup>71)</sup> (1964) は珪砂を試料とし、ルーバー分級機の実用試験を行ない、平衡粒子径、ニュートンの分級効率および細粉収率を試料供給速度、風速および混合比を種々変えて測定している。混合比は1以上と大きくしても使用可能であり、風速は小さい方がニュートンの分級効率は高い。試料粉体の供給速度が大きい程効率が低下するとはいえないとしている。

Mushelknautz<sup>53)</sup> (1967) は、3次元ルーバー集塵機による珪砂などの集塵率を測定している。その結果は、慣性パラメーターを用いた無次元化によって一本の曲線に整理されており、50%捕集慣性パラメーターの値は約3である。水槽実験で可視化した流れを近似する速度場モデルを用い粒子軌跡を計算している。なお、計算は1つの羽根間隙付近だけであり、粒子は気流と同じ速度かつ均一濃度でその段へ流入すると仮定している。さらに羽根前縁から淀み点の間で羽根と衝突した粒子は全て捕集されると仮定しているが実際にはその極一部しか集塵口へ達しないなどの問題があり、計算結果も測定値と一致していない。

新津ら<sup>83)</sup> (1968) は水槽実験による可視化で流れを求め、その測定値を用い粒子軌跡を数値的に求めている。さらに単分散粒子を用いた性能実験を行ない、最適な設計条件は羽根列傾斜角 $\alpha$ が $30^\circ \sim 50^\circ$ 、気流の方向転換角が $(160^\circ - \text{羽根列傾斜角})$ としている。さらに処理風量の6~10%程度のブローダウンを行なえば、効果的に

集塵率の向上が可能であり、またブローダウン率が低くともブローダウン流路幅をあまり狭くしない方が良いとしている。

Geeら<sup>32)</sup> (1970) は角 (corner) のまわりを流れるポテンシャル流の解を用いて速度場を計算している。流れ場は各段全て同じと仮定し、粒子の羽根との反発を考慮して分離機内全域で粒子軌跡を計算し、理論部分捕集効率曲線を求めている。しかし、速度場の仮定に問題があり、また粒子の乱流混合などの影響も考慮していない。さらに2次元ルーバー集塵機を用いて4種類の粉塵について総合捕集効率および圧力損失を測定している。供試羽根の形状は平板Fig. 1・7 (A) と山形 (C) の2種類であり、中間隔壁 (E) , ブローダウン流量, および粉塵負荷の影響を検討している。羽根形状の捕集効率におよぼす影響はほとんど無いが、圧力損失は山形羽根の方が低い。中間隔壁は捕集効率の増大に効果があり、これは集塵口近くで粒子と隔壁との衝突のため粒子軌跡が変化するためと、羽根と反発した粒子が反対側の羽根列の間隙を通過することを防げるためであるとしている。ブローダウン流量の影響は顕著であり、その増大につれ捕集効率は大きくなる。粉塵濃度を $80\text{mg}/\text{m}^3 \sim 1\text{g}/\text{m}^3$ の間で変化させても捕集効率には殆んど影響しないとしている。

岡田ら<sup>73)</sup> (1970) は、フライアッシュおよび雪を供試粉塵とし2次元ルーバー集塵機におよぼす設計条件の影響を実験的に検討している。すなわち羽根列傾斜角が $4^\circ$ で集塵率が最大値となり、気流の方向転換角は新津ら<sup>83)</sup>と同じく ( $160^\circ$  — 羽根列傾斜角) が最適となる。羽根ピッチは $20\text{mm}$ 以上ではその減少とともに集塵率は増大するが、ピッチを $20\text{mm}$ より小さくしても捕集効率はあまり増大しない。羽根相互間に重なりはなくても十分な集塵率が得られる。中間隔壁 (Fig. 1・7 (E)) および整流羽根を付加した場合 (同図 (D)) 集塵率の向上が見られるが、両者を同時に付加した効果はない。また最適条件での部分捕集効率曲線を測定しており、フライアッシュの50%捕集粒子径は約 $5\mu\text{m}$ と比較的小さいが、100%捕集粒子径は約 $40\mu\text{m}$ と大きい。

Jones<sup>40)</sup> (1971) らは、中間隔壁付2次元ルーバー内の全領域の流れをポテンシャル流と仮定し、緩和法によって求めた速度場内で粒子軌跡を計算している。粒子は入口から集塵口へ到る間に1度または数度羽根や中間隔壁に衝突するが、その際粒子は球形として取扱い、反発係数は実際に近い値を与えている。しかし、粒子軌跡

の計算には相当時間を要しておいて、例えば $5\mu m$ の粒子軌跡1本を入口から集塵口まで計算するのに数分かかり、このため捕集効率の理論推定には成功していない。

以上ルーバー集塵機の既往の主要な研究を概観したが、その実験的検討では、一応羽根列傾斜角や羽根ピッチ、羽根長さ、気流の方向転換角および羽根形状の差異や中間隔壁の有無などの装置条件の捕集効率や圧力損失への影響の程度が調べられている。

これに対して理論解析は分離機内の速度場を求め、粒子が入口から集塵口へ至る間に羽根との反発をくりかえすことを考慮してその軌跡計算を行ない集塵率を推定する試みがなされているが、分離機の幾何形状の複雑さおよび粒子経路の長さが障害となっている。すなわち、ポテンシャル流の仮定を用いても粒子軌跡の計算所要時間が長いため多数の粒子軌跡を高精度で求めることができず一つの条件の理論部分捕集効率を推定できるまでに至っていない。またルーバー集塵機の部分捕集効率には、粒子径、粒子密度、粒子と羽根との反発係数などの粒子物性、風速などの運転条件および装置条件など多種類の因子が影響するが、それらを変化させて部分捕集効率を計算するのはさらに困難である。しかも、実際には分離機内での乱流による粒子混合や羽根間隙中に生ずる乱流うずなどの影響も無視できないと考えられるのでその理論部分捕集効率があたえ計算できたとしても必ずしも妥当な値とは限らないなどいくつかの問題がある。

したがって、現状ではルーバー集塵機のような解析困難な幾何形状の分離機の性能推定では、実験を中心として検討した方が理論計算を進めるよりも多くの成果が得られるものと考えられる。

### 1. 3. 本編の内容

前述のように固体粒子の慣性捕集には、含塵気流の方向を大きく( $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ )変化させるよう、入口気流に対して斜めに羽根列を配置した形式が構造簡単で優れた性能を有するため広く用いられており、その研究報告もいくつかある。この形式はまた液滴分離にも使用されているが、その性能に関する報告は殆んど見当たらない。

固体粒子は付着力が小さく、分離機内へ流入した粒子のうち慣性の大きい粒子が1度または数度羽根と反発して集塵口へ達する機構であり、慣性が小さくて羽根と衝突しない粒子は羽根間隙を通り抜ける。しかし、羽根と衝突反発した粒子が全て

捕集されるわけではなく、一部だけが集塵口へいたり、残りはその段あるいは次段以下の羽根間隙を通り抜け再飛散する。これに対して液滴は気流方向転換によって羽根表面に衝突して付着し、他の捕集液滴と合一して表面を流下し、羽根下端から数mmの粗大液滴となって次段へ滴下する。さらに滴下した液滴は粗大であるため直ちにその次の段へ滴下し、これを繰返した後集塵口へ至る。それゆえ通常の条件では羽根に1度衝突した液滴は全て捕集される。このように固体粒子と液滴とでは捕集機構がかなり異なり、液滴捕集効率とは従来から知られている固体粒子の集塵率に比べてかなり高いものと推定される。

しかし、ルーバー形式による液滴分離機の研究は本章第1節からわかるように羽根列を気流方向に垂直に配置した場合の性能に関するものがほとんどであって、気流を鋭く方向転換するよう斜めに配列した場合の性能に関する報告はほとんど見当たらない。そこで本編第2章と3章では、斜配列ルーバー液滴分離機の性能を検討し、固体粒子の場合と比較した。

次にルーバー形式の分級機としての性能についても検討した。ルーバー分級機はさほど分級性能は高くないが、低圧損で処理能力が大きくしかも羽根枚数や風速を変えらることによって容易に分級径を変えうるなどの特長があり、気流中に分散した固体粒子を分級する場合の性能についてはすでに井伊谷ら<sup>68,69,70)</sup>(1959~60)による2, 3の報告がある。しかし、この方式では粒子径が同じであっても流入位置によって異なる軌跡をたどり一部の粒子は粗粉出口へいたり、残りは羽根間隙を通り抜け細粉の一部となる。このため気中分散供給方式では分級精度が悪いと考えられる。本編第4章では入口側壁端から固体粒子を供給することによって分級精度の向上を図った場合の性能を検討した。

以下に本編の内容を簡単に紹介する。本編は5章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では斜め配列ルーバー液滴分離機の性能について述べる。従来の液滴分離の研究では、特定の液滴—気流系における多分散液滴の総合捕集効率によってその性能を表示している場合が多いが、ここではなるべく部分捕集効率によって液滴捕集性能を表示し、測定結果に一般性を持たせるようにつとめた。まず、前述のように固体粒子の集塵率に比べて液滴の捕集効率が高いことを確かめるとともに、それ

がどの程度の差異かを調べている。また平板および山形の2種類の羽根形式で部分捕集効率および圧力損失に差異があるか、それがどの程度の差異でどちらの形状が優れているかを調べている。さらにこれら2種類の羽根形状について、ブローダウン流量を10%とした場合の部分捕集効率を測定し、その影響の程度を調べている。

一方分離機内の流れを可視化し、羽根間隙中に生ずる乱流渦の形状を求めその内部を剛体と見なしてポテンシャル流の仮定のもとで数値計算によってルーバー分離機内全部の速度場を計算している。さらにその計算流線が実測と一致することを確認している。この速度場中で慣性および重力を考慮した粒子軌跡の計算を行なって衝突効率を数値的に求め、さらに乱流による粒子の混合の影響を補正している。その結果を用い測定部分捕集効率曲線の妥当性を確かめている。

第3章では、ルーバー液滴分離機の設計条件を明らかにするため、2次元ルーバー羽根列における粒子の衝突効率および圧力損失におよぼす羽根列傾斜角、羽根間隙および羽根長さの影響を実験的に検討している。衝突効率の測定では蒸発や凝縮の怖れのない固体粒子の単分散試料を用いることによって精度を向上させるとともに測定労力を軽減して測定条件を広く変化させ、次の結果を得ている。

ルーバー面と入口気流方向のなす角の影響は大きく、4度付近で衝突効率が最大となり、圧力損失も小さく最適である。また50%衝突粒子径は羽根間隙の平方根に反比例し、羽根が長い程衝突効率は高いが、ある程度以上長くなるとその効果は少ない。さらに粒子は羽根間隙の入口付近で主に衝突捕集される。なお、液滴捕集効率は風速がさほど大きくなければ再飛散は起こらず衝突効率と一致する。

第4章では、粉体試料を斜め配列ルーバー羽根列最上端に供給する場合の分級性能について述べる。すなわち、1) 従来の均一分散供給方式よりも上端供給方式がどの程度分級効率が高いか、2) 風量を変えることによって分級径を変え得るか、使用可能な分級径範囲はいくらか、3) どの程度の処理能力があるか、4) 羽根列の寸法や構造がどのように分級径や分級効率に影響するか、5) 分級機構はどのようなか。以上の5項目について実験を中心に検討している。

第5章は結論である。

なお、本編は次にあげる筆者の既発表論文を骨子としてまとめたものである。

筆者の既発表論文目録（第2編関係）

- 1) 宇敷建一, 加藤秀夫, 高橋成夫, 井伊谷鋼一: 化学工学論文集, 5, 348 (1979) : ルーバー液滴分離機の性能 (第2章相当)
- 2) 宇敷建一, 沢田宏之, 井伊谷鋼一: 化学工学論文集, 5, 424 (1979) : ルーバー羽根列への粒子の捕集性能実験 (第3章相当)
- 3) 宇敷建一, 田中善之助, 井伊谷鋼一: 化学工学, 38, 151 (1974) : 上端供給ルーバ一分級機の性能 (第4章相当)

#### Literature Cited

- 1) Barton, S.C. and H.G. McAdie; Preparation of glass fiber filters for sulfuric acid aerosol collection: Environ. Sci. Tech., 4, 769 (1970)
- 2) Batel, W.; Der Waschentstauber-Entwicklungsstand und Tendenzen Teil II: Staub Reinh. Luft, 34, 52 (1974)
- 3) Bell, C.G. and W. Strauss; Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow scrubber: J. Air Pollut. Control Assoc., 23, 967 (1973)
- 4) Billings C.E., C. Kurker and L. Silverman: Simultaneous removal of acid gases, mists, and fumes with mineral wool filters: Journal Air Pollut. Control Assoc., 8, 185 (1958)
- 5) Brink, J.A. and C.E. Contant; Experiments on an industrial venturi scrubber: Ind. Eng. Chem., 43, 1358 (1951)
- 6) Brink, J.A.; Monsanto solves air pollution problems with---New Fiber Mist Eliminator: Chem. Engr., 66, 183 (1959-11)
- 7) Brink, J.A.; Air pollution control with fiber mist eliminators: Canadian J. Chem. Eng., 41, 134 (1963)

- 8) Brink, J.A., W.F. Burggrabe and J.A. Rauscher; Fiber mist eliminators for higher velocities: Chem. Eng. Progress, 60, 68 (1964)
  
- 9) Brink, J.A. W.F. Burggrabe and L.E. Greenwell; Mist removal from compressed gases: Chem. Eng. Progress., 62, 60 (1966)
  
- 10) Brink, J.A., W.F. Burggrabe and L.E. Greenwell; Mist eliminators for sulfuric acid plants: Chem. Eng. Progress, 64, 82 (1968)
  
- 11) Burger, R.; Cooling tower drift elimination: Chem. Eng. Progr., 71, 73 (1975)
  
- 12) Bürkholtz, A.; Tropfenabscheidung an Drahtfiltern: Chemie Ing. Techn., 42, 1314 (1970)
  
- 13) Bürkholtz, A. und E. Muschelknautz; Tropfenabscheider — Übersicht zum Stande des Wissens: Chemie Ing. Techn., 44, 503 (1972)
  
- 14) Bürkholtz, A.; Charakterisierung von Trägheits - abscheidern durch praktische Kennzahlen: Verfahrenstechnik, 10, 29 (1976)
  
- 15) Bürkholtz, A.; Die Abscheidung von Nebeltröpfchen an Füllkörperschüttungen: Chemie Ing. Techn., 48, 795 (1976)
  
- 16) Bürkholtz, A.; Zyklone als Abscheider für Nebeltröpfchen : Staub Reinh. Luft, 38, 211 (1978)
  
- 17) Calvert, S., I.L. Jashnani and S. Yung; Entrainment separators for scrubbers: J.A.P.C.A., 24, 971 (1974)
  
- 18) Calvert, S; Engineering design of fine particle scrubbers: J.A.P.C.A., 24, 929 (1974)
  
- 19) Calvert, S.; Guidelines for selecting mist eliminators: Chem. Eng., 27, 109 (1978)

- 20) Carpenter, C.L. and D.F. Othmer; Investigation of wire mesh as an entrainment separator: A.I.Ch.E. Journal, 1, 549 (1955)
- 21) Chan, J., and M. Golay; Comparative performance evaluation of current design evaporative cooling tower drift eliminators: Atmospheric Environment, 11, 775 (1977)
- 22) Chilton, H.; Elimination of carryover from packed towers with special reference to natural draught water cooling towers: Trans. Instn. Chem. Engrs., 30, 235 (1952)
- 23) Duros, D.R. and E.D. Kennedy; Acid mist control: Chem. Eng. Progr., 70 (1978-9)
- 24) Ekman, F.O. and H.F. Johnstone ; Collection of aerosols in a venturi scrubber: Ind. Eng. Chem., 43, 1358 (1951)
- 25) Fairs, G.L.; Calder box scrubbers and the factors influencing their performance: Trans. Instn. Chem. Engrs., 22, 110 (1944)
- 26) Fairs, G.L.; High efficiency fibre filters for the treatment of fine mists: Trans. Instn. Chem. Engrs., 36, 476 (1958)
- 27) First, M.W., R. Moschella, L. Silverman and E. Berly; Performance of wet cell washers for aerosols: Ind. Eng. Chem., 43, 1363 (1951)
- 28) Foster, P.M., M.I. Williams and R.J. Winter; Droplet behaviour and collection by counterflow cooling tower eliminator: Atmos. Environ., 8, 349 (1974)
- 29) Foster, P.M.; Comparative performance evaluation of current design evaporative cooling tower drift eliminators; Atmos. Environ., 12, 1809 (1978)
- 30) Fukumoto T.; Entrainment separation characteristics of

sieve plate columns: 博士学位論文(京都大学)(1975)

- 31) Gardner, B.R. and H.J. Lowe; The research and development background to the environmental problems of natural draught cooling towers: *Atmospheric Environ.*, 8, 313 (1974)
- 32) Gee, D.E. and B.N. Cole; A study of the performance of inertia air filters: *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 184, 166 (1969-70)
- 33) Germerdonk und H. Günter; Wirksamkeit von Tropfenabscheidern im Senkrechten Gasstrom: *Chemie Ing. Techn.*, 41, 649 (1969)
- 34) Hornby J. and R.F. Taylor; Entrainment removal from climbing film evaporators: *British Chem. Eng.*, 13, 361 (1968)
- 35) Houghton, H.G. and W.H. Radford; Measurements on eliminators and the development of a new type for use at high gas velocities: *Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs.*, 35, 427 (1939)
- 36) Jackson, S. and S. Calvert; Entrained particle collection in packed beds: *A.I.Ch.E. Journal*, 12, 1075 (1966)
- 37) Jashnani, I.L. and S. Calvert; Wet scrubber entrainment separators: Preprints for 67th Annual Meeting of Air Pollut. Control Assoc., Denver, Colorado., #74-230, June 9-13 (1974)
- 38) Jashnani, I.L.; Collection efficiency of entrainment separators: Preprints for 68th Annual Meeting of Air Pollut. Control Assoc., Boston, Massachusetts, #75-302, June 15-20 (1975)
- 39) Jones, W.P.; Development of the venturi scrubber: *Ind. Eng. Chem.*, 41, 2424 (1949)
- 40) Jones, G.J., F.R. Mobbs and B.N. Cole; Development of

a theoretical model for an inertia filter: Proceedings of first international conference on the pneumatic transport of solids in pipes, paper B1 (1971-9)

- 41) Knetig, P. and J.M. Beeckmans; Capture of monodispersed aerosol particles in a fixed and in a fluidized bed: Canadian J. Chem. Eng., 52, 703 (1974)
- 42) Leith, D. and W. Licht; The collection efficiency of cyclone type particle collectors: A.I.Ch.E. Symposium series, 68, [126], 196 (1972)
- 43) Linton, F.L. and J.A. Brink; Safer preheat air for ammonia plants: Chem. Eng. Progr., 63, 83 (1967)
- 44) Lunde, K.E. and C.E. Lapple; Dust and mist collection - - A critique on the state of the art: Journal Air Pollut. Control Assoc., 7, 289 (1957)
- 45) Marr, R. und F. Moser; Die Auslegung von stehenden Gas-Flüssig--Abscheidern-schwerkraft-und Gestrick abscheider: Verfahrenstechnik, 9, 379 (1975)
- 46) Marr, R., F. Moser und G. Husung; Schwerkraft-und Strick abscheider Berechnung liegender Gas-Flüssig-Abscheider: Verfahrenstechnik, 10, 34 (1976)
- 47) Martin, A. and F.R. Barber; Some water droplet measurements inside cooling towers: Atmos. Envir. 8, 325 (1974)
- 48) Massey, O.D.; How well do filters; Trap stray stack mist?: Chem. Eng., 13, 143 (1959)
- 49) Matlew, D.L.; The distribution of impacted particles of various sizes on the blades of a turbine cascade: "Aerodynamic capture of particles", Edited by E.G. Richardson, Pergamon Press p.104 (1960)
- 50) McCarthy, D., A.J. Yankel, R. Patterson and M.L. Jackson; Multistage fluidized bed collection of aerosols: Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., 15, 266 (1976)

- 51) Meier, W., W.D. Stoecker and B. Weinstein; Performance of a new, high efficiency packing: Chem. Eng. Progr., 71 (1977-11)
- 52) Mohrmann, H.; Beladung von Faserfiltern mit Aerosolen aus flüssigen Partikeln: Staub Reinh. Luft, 30, 317 (1970)
- 53) Mushelknautz, E.; Untersuchungen an Fliohkraftabscheidern; Chemie Ing. Techn., 39, 306 (1967)
- 54) Nichols, J.H. and J.A. Brink; Use of fiber mist eliminators in chlorine plant; Electrochemical technology, 2, 233 (1964)
- 55) Peacock, R.E.; Vortex tubes for separating water particles from airflows: Filtration & Separation, 291 (1974-5-6)
- 56) Perry, J.H.; "Chemical Engineers' Handbook": 5th-edition McGraw-Hill, New York, 1963
- 57) Regehr, U.; Mechanische Reinigung heterogener Gassysteme mit einem neuartigen Tropfenabscheider Chemie Ing. Techn., 39, 1107 (1967)
- 58) Sadvskii, B.F., V.V. Gavrilov, F. Ya. Frolov, A.P. Bazarov and I.V. Petryanov; Small-clearance self-cleaning FTR filters for mist collection: International Chem. Eng., 14, 140 (1974)
- 59) Schlea, C.S. and J.P. Walsh; De-entrainment in evaporators: Ind. Eng. Chem., 53, 695 (1961)
- 60) Smith, J.L. and M.J. Goglia; The mechanism of separation in the louver-type dust separator; REPAIR, 5, 51 (1955)
- 61) Soole, B.W. and H.C.W. Meyer; Characteristics of some rotary impaction filters for the removal of 10-40  $\mu\text{m}$  droplets: Aerosol Sci., 1, 147 (1970)
- 62) Watzel, G.V.P.; Untersuchung von Tropfenbahnen in

umgelenkten Strömungen und ihre Anwendung auf die  
Tropfenabscheidung in Trocknern: VDI Forschungsheft,  
No.541 (1970)

- 63) Yao, S.C. and V.E. Schrock; Aerodynamic design of  
cooling tower drift eliminators: Am Soc. Mech. Engrs.,  
Paper No.75-WA/PWr-5 (1975)
- 64) York, O.H. and E.W. Poppele; Two-stage mist eliminators  
for sulfuric acid plants: Chem. Eng. Progr., 66,  
67 (1970)
- 65) York, O.H.; Performance of wire-mesh demisters: Chem.  
Eng. Progr., 50, 421 (1954)
- 66) York, O.H. and E.W. Poppele; Wire mesh mist eliminators:  
Chem. Eng. Progr., 53, 45 (1963)
- 67) Yung, S.C., S. Calvert and H.F. Barbarika; Venturi  
scurubber performance model: EPA - 600/2-77-172  
(1977) p.161-196
- 68) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 中村幸夫; ルーバー式慣性集塵器の模形実験結果: 粉体工  
学研究会研究資料No.18 (1959-5)
- 69) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分級器の分級精度: 粉体工学研究会研究資料,  
No.27 (1960-6)
- 70) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分離器の分級特性: 粉碎No.3 (1959-7) p.18  
(細川粉体工学研究所)
- 71) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 田中善之助; サイクロンおよびルーバーによる分級試験の  
一例: 粉体工学研究会誌, 1, 114 (1964)
- 72) 磯田徹, 東忠宏; 塗装ミストの処理技術に関する研究: 粉体工学研究会, 昭和49年  
度春季例会講演要旨集p.48 (1974)

- 73) 岡田定五, 坪井信義, 佐々木昭夫; 慣性分離形集じん器 (ハイルーバーフィルタ) の開発: 日立評論, 52, 881 (1970)
- 74) 化学装置設計部, 流熱部他; 海水冷却塔と周辺環境との調和: 石川島播磨技報, 15, 140 (1975)
- 75) 川下武志; 粉体塗装における圧縮空気中の水・油分分離の理論と実際: 塗装技術, 104 (1975-10)
- 76) 倉賀野守正, 飯島基; 繊維層フィルターとその応用: 化学装置, p.29 (1974-3)
- 77) 後藤昭博, 外山茂樹, 牧野和孝, 井伊谷鋼一; 上昇流メッシュミストエリミネータの再飛散現象と圧力損失: 化学工学論文集, 4, 111 (1978)
- 78) 武田穰, 山崎雅弘, 松本敏暉, 千葉孝男, 岡田孝夫, 吉田隆紀; 海水冷却塔の設計: 化学装置, p.15 (1978-5)
- 79) 新津靖, 吉川暉, 根岸学; エアワッシャにおけるエリミネーターの脱水特性に関する研究 (その1): 衛生工業協会誌, 35, 86 (1961)
- 80) 新津靖, 吉川暉, 根岸学; エアワッシャにおけるエリミネーターの脱水特性に関する研究 (その2): 空気調和・衛生工学, 36, 297 (1962)
- 81) 新津靖, 吉川暉, 根岸学; エアワッシャにおけるエリミネーターの脱水特性に関する研究 (その3): 空気調和・衛生工学, 36, 983 (1962)
- 82) 新津靖, 吉川暉; ルーバー型集じん器の性能に関する報告: 空気調和・衛生工学, 37, 159 (1963)
- 83) 新津靖, 吉川暉, 野邑奉弘; エリミネーターの脱水特性に関する研究: 空気調和・衛生工学, 42, 1211 (1968)

- 84) 日置敬, 倉賀野守正; ミストセパレーション技術: 化学装置, 36 (1972-8)
- 85) 日置敏美, 伊藤一彦; ユーロホルムミストエリミネーター: 碍子レビュー No.37 別冊, 日本碍子 (1976-5)
- 86) 福田昭三, 荒牧幹雄, 織田昌雄; 海水湿式冷却塔の研究: 三菱重工技報, 8, 178 (1971)
- 87) 水科篤郎, 高松武一郎, 三石信雄, 伊地知莊介, 川合弘; 多孔板飛沫分離塔に関する研究—液状放射性廃棄物の蒸発処理: 日本原子力学会誌, 3, 679 (1961)
- 88) 吉川暲, 加賀昭和; ルーバー形エリミネーターの脱水特性に関する研究: 空気調和・衛生工学, 47, 11 (1973)
- 89) 吉田哲夫; ベンチュリスクラバーと 2, 3 の湿式集じん器: 硫酸, 14, 203 (1961)

## 第2章 ルーバー液滴分離機の性能

### 緒言

工業プロセスにおいて気流中からのミストの分離は重要であるが、数 $\mu m$ 以上の液滴に対しては慣性方式が構造簡単で圧力損失が小さく目詰りのおそれがないため広く使用されている。

本章では気流に対して斜めに羽根列を配置し、気流を大きく方向転換(90°~180°)させて慣性力によって捕集するルーバー液滴分離機の性能を測定するとともに、その捕集機構の解明を試みた。本形式の粉塵捕集と分級性能については若干の報告<sup>3, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 22)</sup>があるが、液滴捕集性能に関する報告は見当たらない。

そこで最も代表的な平板羽根と、断面が山形である羽根の2種類の分離機について

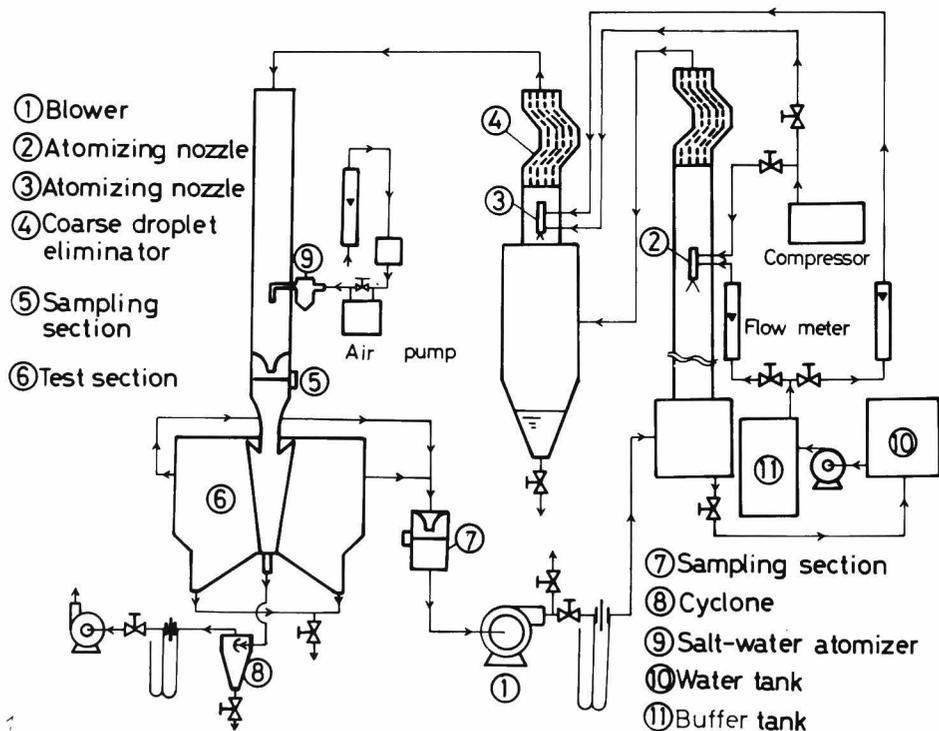


Fig. 2 · 1 Schematic diagram of experimental apparatus

て、ブローダウン空気流量のない場合と約10%とした場合に対して、水滴と食塩水滴の部分捕集効率および圧力損失を測定し、1) 従来の粉塵の集塵率<sup>18)</sup>との比較、2) 羽根形状の性能におよぼす影響、3) ブローダウン流量の性能におよぼす影響の3項目を中心に検討した。

次に分離機内の流れ、ならびに捕集効率に大きく影響すると思われる羽根間隙中の乱流ウェイクの外部をポテンシャル流と仮定して数値的に流れを求めた。さらにこの流れを用いた粒子軌跡の計算を行ない、液滴捕集機構の解明を試みた。この計算結果を前記実験値と比較することによって有用な知見を得たので報告する。

## 2. 1. 捕集性能の実験

### 2. 1. 1. 実験装置と方法

Fig. 2・1は装置のフローシートを示し、高湿度の気流を循環して供試液滴の蒸発による粒子径の変化を防止した。まずブロワ①を出た空気を増湿するため2流体ノズル②から水滴を噴霧し、次にこの増湿した気流中に別の2流体ノズル③（K・K. いけうち製「Sonicore 音波ノズル035H型」を使用した。）から供試水滴を噴霧した。噴霧条件は空気圧が0.5～5 kg/cm<sup>2</sup>、水流量が3.5～30ml/minの範囲とし、測定条件に応じて変化させ、噴霧水滴のうち粗大なものは粒子径分布の測定の妨げとなるので、前置分離機④により除去した。前置分離機を出た気流は入口側サンプリング部⑤、試験用分離機⑥、出口側サンプリング部⑦を経てブロワ①へ吸引し、試験用分離機中で衝突捕集した水滴は小型サイクロン⑧へ集めた。風速が大きい場合には衝突捕集した水滴の一部は再飛散するが、その径はかなり大きく、慣性による壁への衝突や重力沈降のためそのほとんどはハウジングの

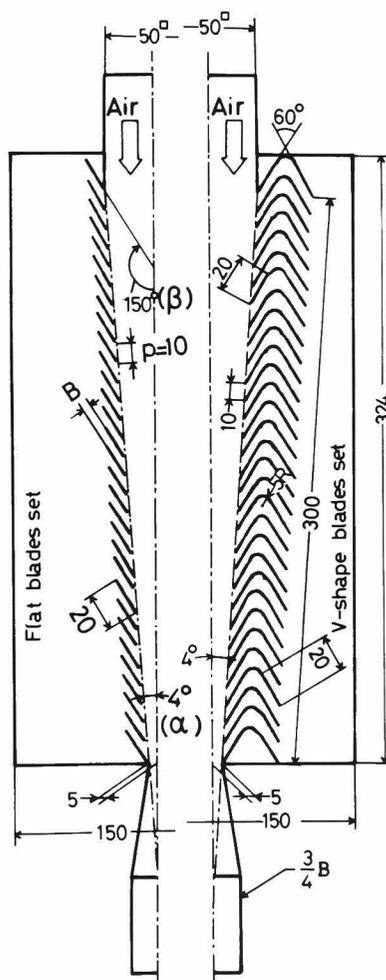


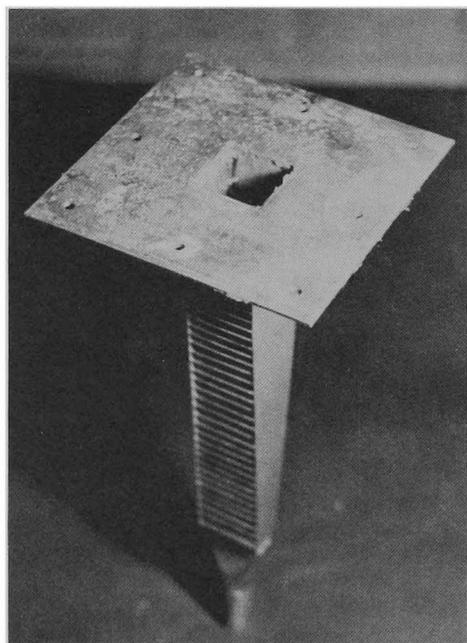
Fig. 2 2A Mist separators

下部のドレン抜きへ集まる。

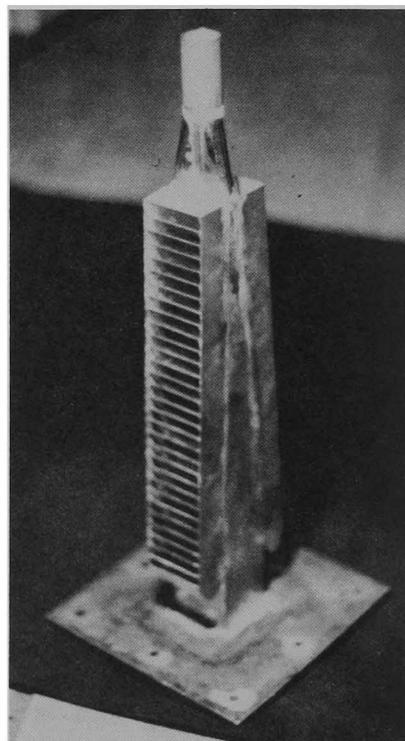
分離機の概要をFig. 2・2 A, Bに示すが、羽根列はステンレス製で、平板羽根と山型羽根の2種類あり、その両形式とも2次元の構造とした。両者の羽根ピッチは1 cm, 羽根列と鉛直中心線（入口気流方向）のなす角度は $4^\circ$ , 気流方向転換角 $\beta$ は $150^\circ$ , 分離機の入口幅は5 cm, ブローダウン気流の出口幅は1 cmとした。

サンプリング部には風速に応じて開口部寸法30mm×30mm, 40mm×40mmまたは50mm×50mmのノズルを取付けて気流を加速し、そこへNaphthol Green B（染料）を含むゼラチン膜で捕集面を覆った幅10mmのガラス製リボンサンプラー（Fig. 2・3参照）を挿入して水滴を捕集した。このとき、サンプラーの捕集面を下流側に向けて挿入し、すばやく $180^\circ$ 回転して上流側に向けサンプリングを開始し、サンプリング終了後再びすばやく $180^\circ$ 回転した後系外へ取り出した。ここで、サンプリング時間は入口側で2～5秒, 出口側で10～60秒とした。

次に水滴のサンプラーへの衝突により生じた痕跡の顕微鏡写真から、粒子径毎の



**Flat blades set**



**V-shape blades set**

Fig. 2・2 B Photographs of mist separators

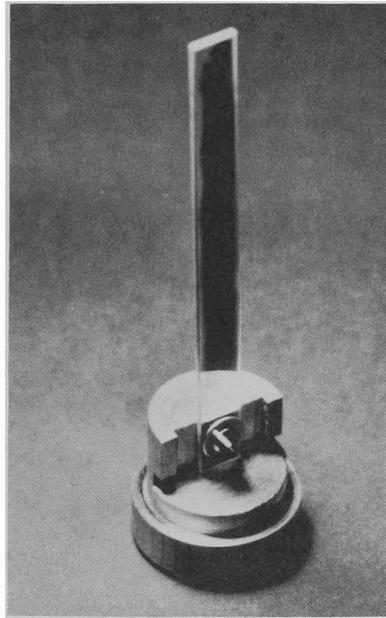


Fig. 2・3 Photograph of ribbon sampler

単位時間単位面積当りにサンプラーへ捕集した水滴の個数を数えた（補遺2-1参照）。なお、出口側でサンプリングをする時には、当然ながら入口側の加速ノズルを取り外した。また部分捕集効率 $\eta$ は次式から求めた（補遺2-2参照）。

$$\eta = 1 - \frac{\text{(出口側で単位時間単位面積にサンプリングした粒子径毎の液滴数)} / \text{(入口側で単位時間単位面積にサンプリングした粒子径毎の液滴数)}}{\frac{\text{(出口側サンプリング効率)}}{\text{(入口側サンプリング効率)}}}$$

上式で、ブローダウン流量の無い場合には入口出口のサンプリング条件が等しくて、サンプリング効率の値が一致し消去されるが、10%ブローダウン流量の場合には前報<sup>16,17)</sup>の結果から理論サンプリング効率を求めその影響を補正した。

また、分離機入口、出口とも湿度を乾湿球で測定したが、相対湿度はほぼ100%であった。しかし入口気流中にはかなりの水滴が含まれており、その乾球への衝突を完全に防止することは困難で、測定精度はあまり良くなく、実際には入口気流は多少不飽和であると思われる。このため、水滴径が小さくかつ風速の小さい場合には、分離機内での蒸発による水滴径変化が無視できず、入口に全く存在しない微小水滴が出口に存在することがあり、このような条件での捕集効率を推定するために次の2つの測定法を採用した。

まず第1の方法として、入口および出口の水滴が比較的単分散（幾何標準偏差約1.2）であることに着目し、それぞれの水滴総数の比から捕集効率を求めた。また出口側の水滴径は入口側のそれより若干蒸発のため小さくなるが、代表径としては出入口における個数基準長さ平均径の算術平均値を用いた。しかしこの方法で部分捕集効率曲線を推定するには、水滴径や風速を種々変化させる必要がありかなり労力を要するので余り用いなかった。

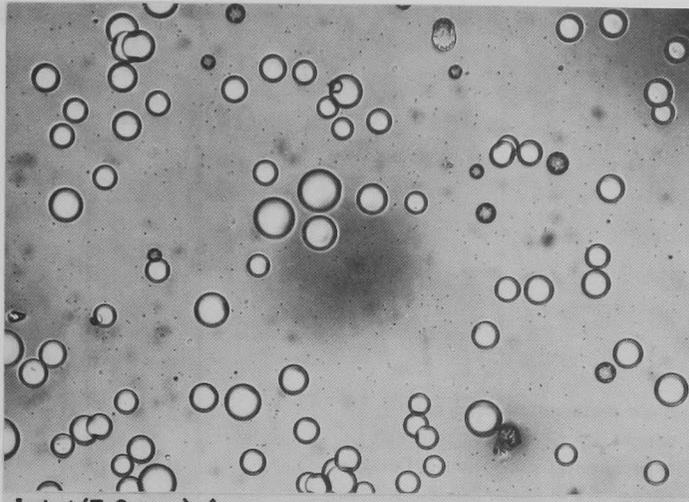
第2の方法として、純水より蒸気圧の低い食塩水を試料液滴として噴霧した(Fig. 2・1の⑨)。なお、噴霧には市販の医療用ガラス製噴霧器を用いた。このとき、気流の増湿のためFig. 2・1の②のノズルから純水滴を噴霧したが、測定部への純水滴の流入を防ぐため、③のノズルは使用しなかった。それゆえ、⑨の位置での湿度は85%とやや低いが、水滴がほとんど存在しないので乾球への水滴の付着が無く測定精度は高い。そこで食塩水の濃度は19.5wt%とし、その蒸気圧を純水の85%にして前記湿度と一致させた。この場合は多分散粒子なので、部分捕集効率曲線を一回の実験によって求めることが可能で手間がはぶける。

## 2. 1. 2. 結果と考察

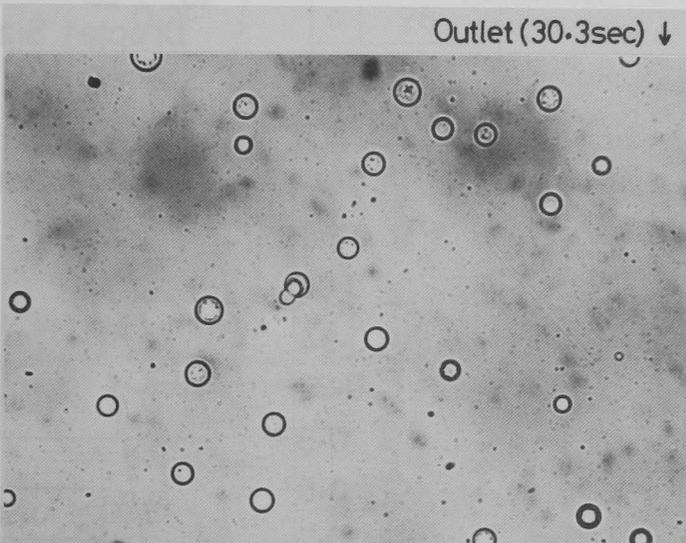
a) サンプリング結果： Fig. 2・4 に第2の測定方法を使用した場合の分離機の入口および出口におけるこん跡写真の例を示す。またFig. 2・5にこの場合の入口、出口の単位面積単位時間当りにサンプラーへ衝突した液滴数と液滴径との関係を示す。図から、供試液滴は10~40 $\mu m$ の間に分布しており、特に20 $\mu m$ 程度の液滴が多いことがわかる。部分捕集効率を図中の黒丸で示すが、低風速にもかかわらず捕集効率はかなり高いことがわかる。

Fig. 2・6に部分捕集効率曲線におよぼす入口風速の影響を示すが、風速の大きい程捕集効率が高いことがわかる。これを慣性パラメーターに対して示すとFig. 2・7となる。これらの図中の横棒付の記号は第1の測定方法を使用した場合の結果であり、その横棒の左端は分離機入口測定部での平均液滴径、右端は分離機出口のそれに対応しており、分離機中での平均液滴径はその中間の値となる。

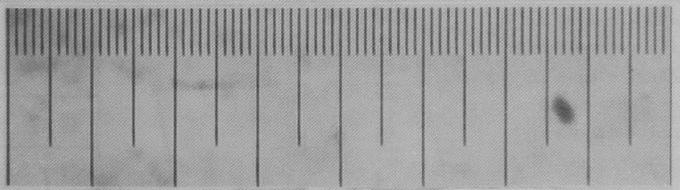
b) 固体粒子集塵率との比較： Fig. 2・8に本報の液滴捕集効率測定結果と、岡田らによる固体粒子集塵率の測定値<sup>18)</sup>との比較を示すが、液滴捕集効率は固体粒子の集塵率よりかなり高いことがわかる。また液滴の捕集効率がほぼ100%



Inlet (5.2 sec) ↑



Outlet (30.3 sec) ↓



100 μm (Stain size)

Fig. 2 · 4 Examples of micrographs of droplet stains on ribbon sampler

Fig. 2 · 5 Size distribution of droplets caught by ribbon sampler and experimental collection efficiency curve (V-shape blade, without blow down,  $u_0 = 200$  cm/sec, salt-water droplet)

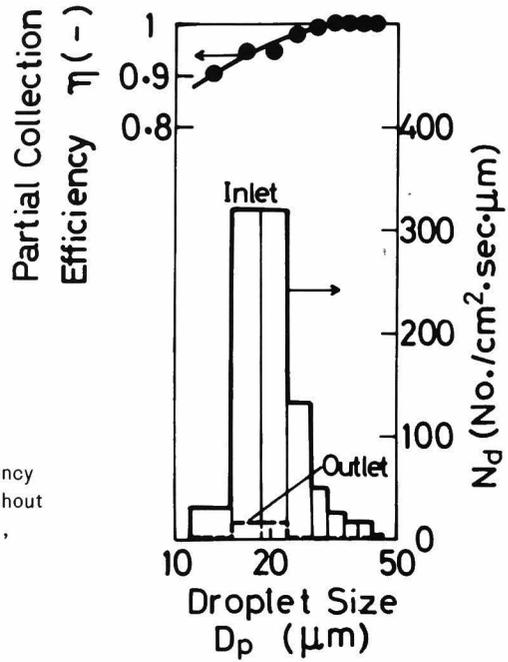
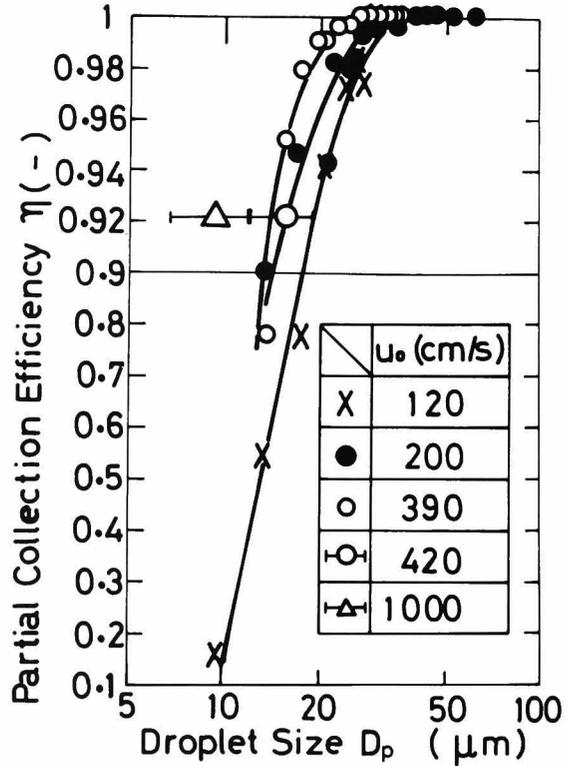


Fig. 2 · 6 Effects of inlet air velocity on experimental collection efficiency curve (V-shape blade, without blow down)



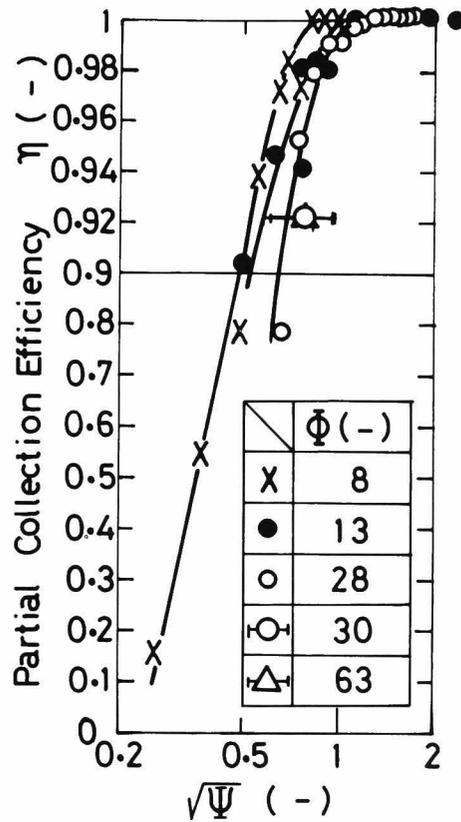


Fig. 2 · 7 Experimental partial collection efficiency curves ( $\eta$  vs.  $\sqrt{\Psi}$ , V-shape blade)

になる最小の慣性パラメーターの平方根 $\sqrt{\Psi}$ の値は固体粒子の場合の約1/3で、かなり小さいこともわかる。これらの結果から、液滴と固体粒子で羽根への最初の衝突以後の挙動がかなり異なると推定できよう。すなわち、固体粒子の場合には羽根と何度も衝突を繰り返し、装置下部の集塵口へ達して捕集されるが、一度衝突した粒子であっても付着力が小さいので、集塵口へいたるまでに再飛散して羽根間隙を通り抜けてしまう粒子が多数存在する。これに対して、液滴の場合には衝突付着後液膜となって羽根表面を流下し、羽根下端から直径数mm程度の粗大液滴となって下

段へ滴下するため通常の条件では一度羽根に衝突した液滴は全て捕集される。そのために液滴捕集効率は衝突効率と一致し、従来から知られている固体粒子の集塵率よりかなり高いのであろう。

しかし、他の研究者の用いた分離機は本章の水滴捕集に用いたものと装置条件などに差異があるので、厳密な比較を行なうために液滴捕集に使用した分離機を用いて固体粒子捕集を行ない性能比較した結果を補遺2-3に示す。

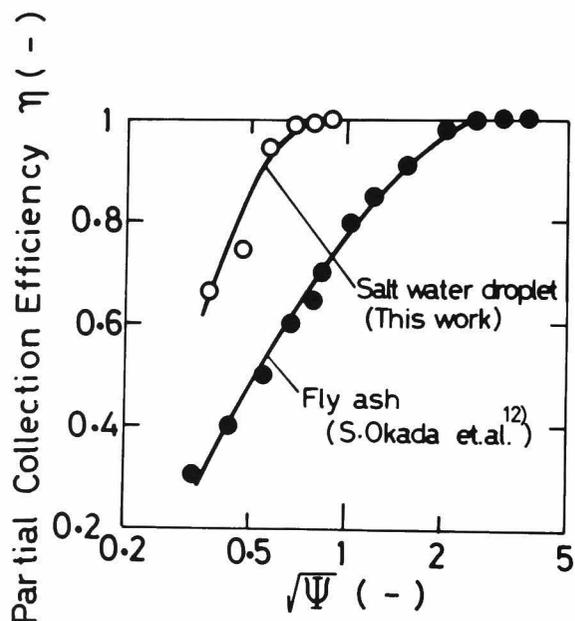


Fig. 2 · 8 Comparison of experimental partial collection efficiencies for droplets and solid particles (flat blade, with 10% blow down)

c) 羽根形状とブローダウン流量の影響：まずブローダウンの無い場合、Fig. 2 · 9に部分捕集効率におよぼす羽根形状の影響の程度を示すが、山形羽根は気流の方向転換が2度あるためか、平板よりかなり捕集効率は高い。たとえば、平板で捕集効率50%に相当する $\sqrt{\Psi}$ のとき山形羽根を使用すれば捕集効率は約90%である。また實際上100%捕集の $\sqrt{\Psi}$ の値も平板形式の約1/2になっている。

一方Fig. 2 · 10に示すように圧力損失におよぼす羽根形状の影響はほとんどなく、

むしろ山形羽根の圧力損失がわずかに低い。この傾向はD. E. Geeら<sup>3)</sup>の結果とも一致している。また圧力損失は入口風速の2乗に比例して増大し、たとえば入口風速が15m/sec(羽根間隙平均風速4.9m/sec)のとき圧力損失は平板形式で27mmH<sub>2</sub>Oである。この測定値は、岡田ら<sup>18)</sup>の結果やD. E. Geeら<sup>3)</sup>の結果とほぼ一致している。

次にブローダウンを9.8%とした場合の部分捕集効率曲線をFig. 2

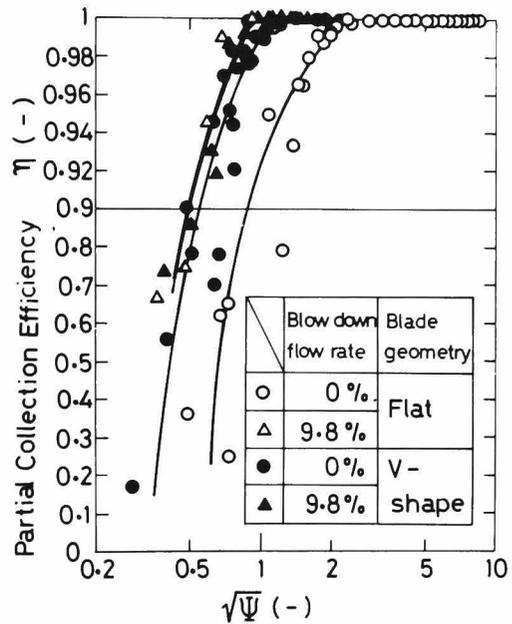


Fig. 2 · 9 Effects of blade shape and 10% blow down flow on partial collection efficiencies

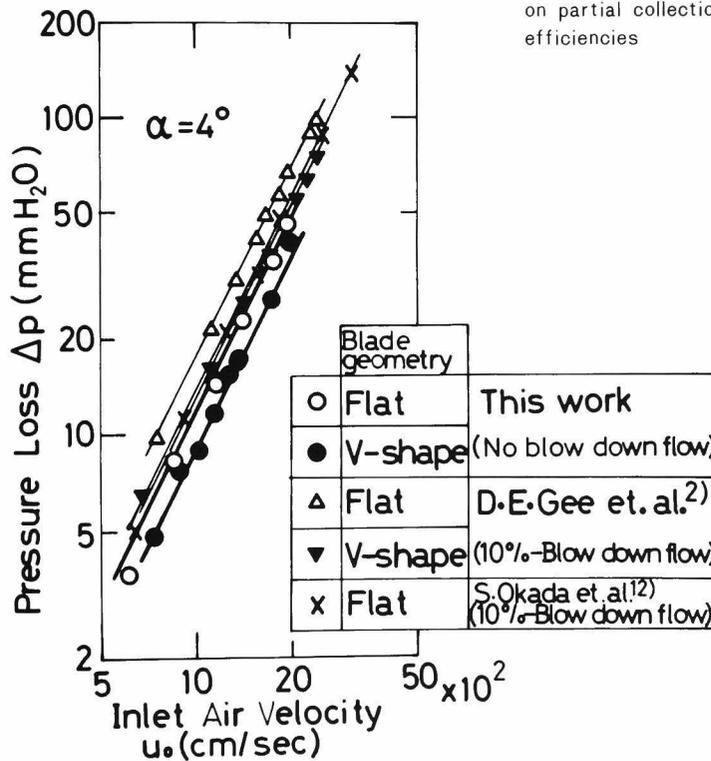


Fig. 2 10 Effect of blade shape on experimental pressure loss

・9に示す。同図から、ブローダウンのある場合には羽根形状の捕集効率におよぼす影響はわずかなことがわかる。したがって、実用的にはブローダウンの無い場合には、山形羽根が、10%程度のブローダウンでは構造簡単な平板形式が適している。

## 2. 2. 捕集機構の解析

### 2. 2. 1. 流れの可視化

液滴の捕集機構の検討には、分離機内の気流分布を知る必要がある。本報では、流れを可視化するため本編4章と同一の透明アクリル製分離機を使用し、気流中にパラフィンミストをトレーサーとして流入させた<sup>16)</sup>。なお、Fig. 2・11に概略を示した噴煙ノズルを流れ場に垂直にかつカメラに向けて取り付け、吹出し速度の影響が無いようにした。可視化によってウエイク形状を求め、その外縁を流線の境界条件として、その外部の流れを数値計算により求めた。なお、測定流線写真から直接流速などを求める方法は誤差が大きいので<sup>2)</sup>、本報では流線写真は計算流線の検証にだけ使用した。

### 2. 2. 2. 流れの計算

羽根間隙のウエイクを剛体とみなし、その外部ではポテンシャル流と仮定し、気流速度と流線を計算した。すなわち流路を約400個の3節点三角形一次要素に分割し、各要素内で流れ関数は座標値に対し1次式で近似できるものとして有限要素法を用いてその値を求めた。次に境界上の点およびこれら三角形要素の重心を頂点とする新しい約900個の三角形要素に全流路を再分割し、その要素内で気流速度は座標の1次関数と近似して要素内の任意の位置における流速を求めた。これは、当初から二次要素を用いる方法では、計算機の記憶領域の制限のため要素数を多くとれず、複雑な形状の流路を精度よく近似できないからである。

境界条件は、分離機入口で気流は一様であり、羽根表面での流れ方向は羽根に平行で最も近い節点と同じ流速を有するものとした。またウエイク境界上での新三角

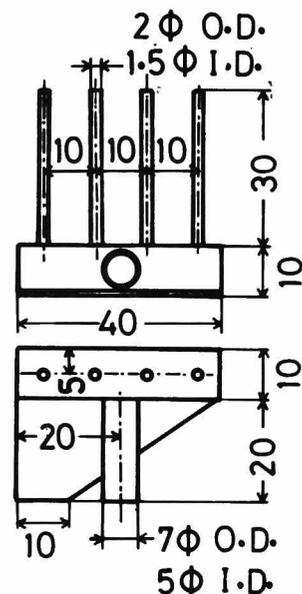


Fig. 2・11 Diagram of tracer smoke nozzle

形要素頂点の流れ方向は、そこでのウエイクの形状によって上流側または下流側の境界に平行な方向とし、速度はその点に最も近い節点の流速を用いた。

以上のようにして求めた気流速度を用いて、入口から逐次計算した流線計算結果の例をFig. 2・12に示す。本報では、計算精度向上のため気流の方向変化の大きい羽根間隙入口部に多数の三角形を配した反面、羽根間隙中に配した要素数は少なく、その結果羽根間隙内で流れ方向に多少誤差があり、流れが中央へ集まっている。しかし、その流れ速度の絶対値は羽根間隙中でのウエイクを除いた流路幅に対する平均風速とほぼ一致しており妥当と思われる。また計算流線と流線写真の比較をFig. 2・13に示すが、両者はほぼ一致しており、流れモデルは妥当と考えられる。なお、

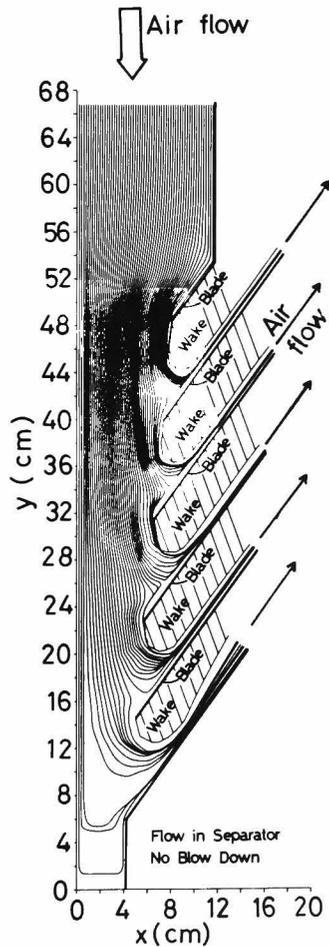


Fig. 2・12 An example of calculated streamlines

粒子のほとんどが羽根間隙入口の羽根重なるの無い位置で捕集されることを本編第3章の実験で確認しており、上記モデルによる粒子軌跡計算結果でも同じく羽根間隙入口でほとんどの粒子が捕集されるので、羽根間隙中の流れはさほど重要で無いと思われる。

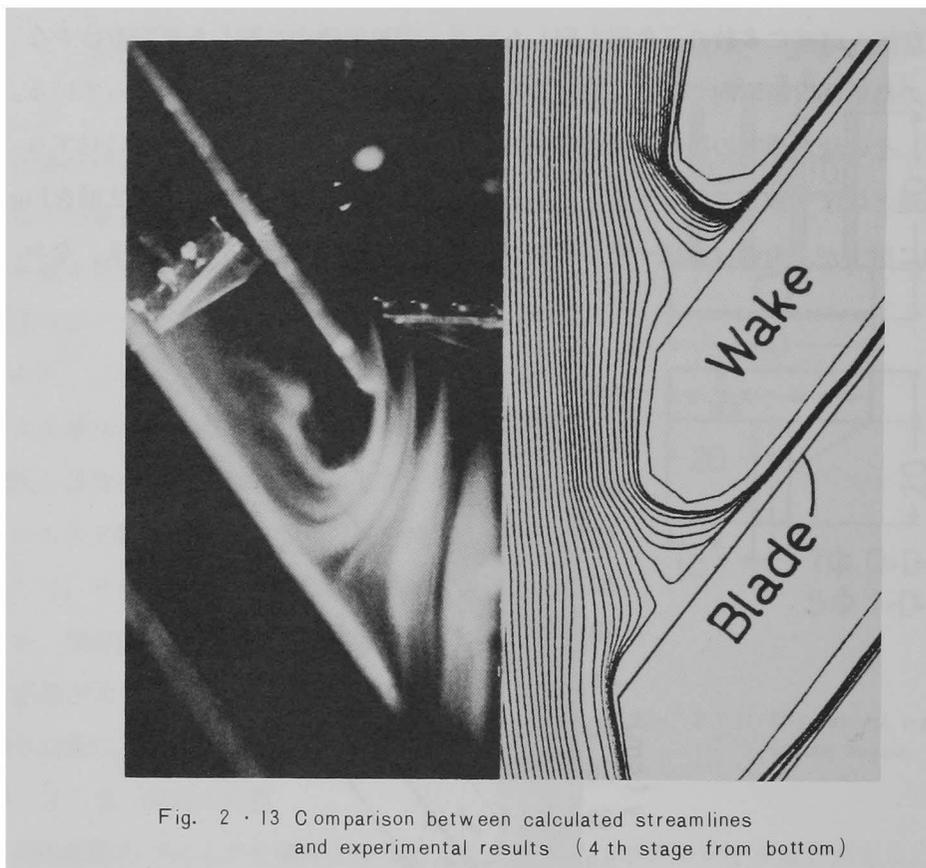


Fig. 2 · 13 Comparison between calculated streamlines and experimental results (4th stage from bottom)

### 2. 2. 3. 捕集効率の計算

Fig. 2 · 12で分離機断面左下隅を原点とし、水平方向にx軸、鉛直上方にy軸を取る。このとき粒子の無次元運動方程式は次式となる。\*)

$$\frac{d^2X}{dT^2} = - \frac{1}{\Psi} (1 + 0.125\Psi^{0.36} \cdot \Phi^{0.36} \cdot V_r^{0.72}) \left( \frac{dX}{dT} - U_x \right) \quad (2-1)$$

$$\frac{d^2Y}{dT^2} = - \frac{1}{\Psi} (1 + 0.125\Psi^{0.36} \cdot \Phi^{0.36} \cdot V_r^{0.72}) \left( \frac{dY}{dT} - U_y \right) - \frac{1}{F_r}$$

$$(\sqrt{\Psi} \cdot \sqrt{\Phi} \cdot V_r < 1000) \quad (2-2)$$

ここで $\Phi$ は粒子流体抵抗のストークス域からのずれを表わすパラメーター、Frは重力の影響を表わすフルード数である。なお、流体抵抗としては第1編同様Ordarの式を採用した。前節で求めた気流速度を用い、これらの運動方程式を逐次数値計算することによって粒子軌跡を求めた。このようにして各条件毎に100本の軌跡計算

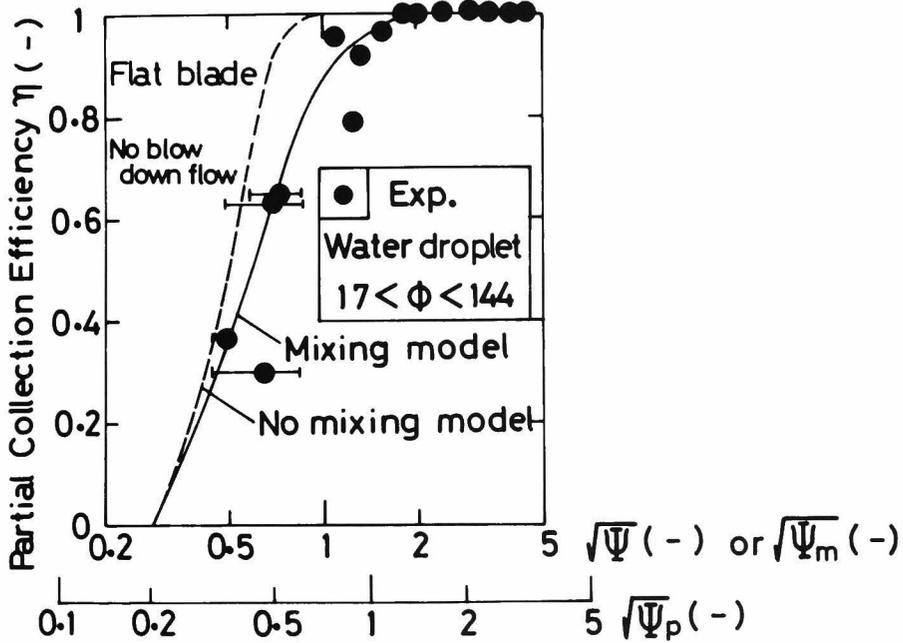


Fig. 2 · 14 Comparison between calculated collection efficiencies and experimental results (without blow-down flow)

※) 前述のようにリボンによる粒子捕集を検討するときにはリボン半幅  $r$  を基準にして無次元化したが、ルーバー羽根列による捕集の検討では羽根間隙  $B$  を基準として無次元化した。

このため、Eqs. (2-1) および (2-2) に示す粒子の無次元運動方程式は第1編のリボンの場合のそれと外見上多少の相違はあるが、本質的には同一のものである。なお、ストークス域からのずれを表わすパラメーター $\Phi$ の定義式 (Nomenclature 参照) 中でリボンの場合には代表寸法が半幅  $r$  であるが、ルーバーの場合には羽根間隙  $B$  に変わる。しかし比例係数18はそのままである。

を行ない、そのうちの何本が羽根列に衝突するかを求め捕集効率を推定した。Fig. 2・14に計算結果を破線で示してあるが、50%捕集粒子径は測定値と比較的近いものの、部分捕集効率曲線の形状は測定値とかなり異なっている。すなわち、計算効率は $\sqrt{\psi}$ に対して急激に変化しているが、これに対して実験効率の変化は緩やかであり、捕集効率が100%に達する $\sqrt{\psi}$ の値は計算値の約2倍とかなり大きい。これは粒子の乱流混合のためと思われるので、次にその影響を検討した。

2次元バンド中を液滴を含む気流が平行一様に流れる場合の理論捕集効率は次式<sup>8)</sup>で与えられている。

$$\eta = \psi \cdot \beta \quad (2-3)$$

これに対して、S. Jacksonら<sup>4)</sup>は、2次元バンドの半径方向の混合が完全な場合に次式を理論によって求めている。

$$\eta = 1 - \exp(-\psi_m \cdot \beta) \quad (2-4)$$

Eqs. (2-3), (2-4) から、等しい捕集効率を与える $\psi$ と $\psi_m$ の関係は次式となる。

$$\psi_m = \left\{ \frac{-\ln(1-\eta)}{\eta} \right\} \cdot \psi \quad (2-5)$$

ルーバーの捕集機構は基本的に2次元バンドのそれと類似しているので、この考え方を本報の場合にも適用できると仮定し、Eq. (2-5)によって修正 $\psi_m$ を求めて混合を考慮した捕集効率曲線を描くとFig. 2・14の実線となり、実験値と良好に一致している。すなわち、粒子の乱流混合を考慮した慣性捕集機構によりルーバー液滴分離機の部分捕集効率を一応説明できる。

なお、粒子軌跡の計算により重力とパラメーター $\Phi$ の影響を検討したところ、実験条件の範囲では孤立リボンの場合<sup>17)</sup>と異なり重力の捕集効率への影響はほとんど無かったが、 $\Phi$ の値は大きい程捕集効率が低いことがわかった。たとえば、 $\sqrt{\psi}=0.54$ ,  $Fr=33$ のとき、 $\Phi$ が0で捕集効率 $\eta$ は85%、 $\Phi=30$ で $\eta$ は78%、 $\Phi=300$ で $\eta$ は60%であった。このことから、Fig. 2・7の実験値が $\sqrt{\psi}$ に対して一本の直線にまともならず、 $\Phi$ の値の増大とともに低下することが一応説明できる。

## 結 言

2次元の平板または山形断面の羽根列を、気流中に斜めに配列した場合の液滴捕集性能とその分離機構を検討し次の知見を得た。

1) 液滴捕集効率は固体粒子の集塵率よりかなり高い。たとえば羽根間隙基準の慣性パラメーターの値が1のとき、固体粒子の部分集塵率は0.8といわれているが、水滴ではほぼ1であった。

2) ブローダウンの無い場合には、山形羽根は平板羽根に比べて部分捕集効率はかなり高く、たとえば前者で0.4のとき後者では約2倍となった。しかも、圧力損失は山形羽根の方が小さく、平板のほぼ75%であった。

3) 約10%のブローダウン流量による部分捕集効率の増加は平板羽根の場合は顕著で、たとえばブローダウンの無いときに0.4であったのが約2倍となったが、山形羽根では影響は見られなかった。このため、平板と山形羽根の捕集効率の差はほとんど無くなった。したがってブローダウンの不要な山形羽根がすぐれている。

4) 粒子の乱流混合を考慮した慣性捕集効率を計算することにより、実測と良好に一致する部分捕集効率曲線を推定できた。

## 補遺2-1 Naphthol Green Bゼラチン膜被覆スライドガラスによる水滴径分布測定

### 2. 1. 1. ゼラチン膜上のこん跡径と水滴径の相関測定

本章で使用したNaphthol Green Bゼラチン膜<sup>5)</sup>の調整法は次のとおりである。まず蒸留水10mlを汙過した後ビーカーに入れて水浴中で加熱する。そこへ精製粉末ゼラチン0.42gを入れて完全に溶解し、さらにNaphthol Green B ( $(C_{10}H_5N : OSO_3NaO)_3Fe$ , 和光純薬K. K. 製試薬特級, 以下NGBと略記する) 0.5gを加えて溶解後汙過する。この液をガラス製リボンサンプラーに均一に塗布し、ガラスの炎にかざして蒸発乾固を行ないゼラチン膜を作る。

この膜に水滴を捕集するとNGBが水滴中に溶出し、捕集水滴が蒸発してもゼラチン膜上には鮮明な円環状のこん跡が保存される。このこん跡径を測定することによってもとの水滴径を知ることができる。

ここでは、シリコンオイルを用いた油膜法およびラテックス粒子を用いた固体粒子トレーサー法によってこん跡径と水滴径の相関を実験によって求めた結果について述べる。

a) 油膜法による検定：

シリコンオイルを塗ったガラス製リボンサンプラーに水滴を捕集すると、油膜中に球形を保ったまま浮遊するので顕微鏡写真撮影によって直接水滴径の測定が可能である。ここでは油膜を塗布したリボンサンプラーと、前述のNGB膜で被覆したリボンサンプラーを交互に各4回すなわち計8回水滴流中に挿入して、同一条件で水滴を捕集した。さらに油膜法とNGB法による水滴径分布測定結果が一致するように水滴径とこん跡径の相関を求めた。

しかし、シリコンオイル中での水滴径の経時変化はその測定結果をTable A 2-1に示すように無視できず、特に微小水滴程顕著に変化している。30秒間の経時変化が3%以内の場合すなわち水滴径が40 $\mu$ m以上の範囲を一応信頼できるものと考え、その範囲での水滴径とこん跡径の相関をFig. A 2-1中の黒三角印で示した。

Table A2-1 Change of water droplet size in silicone oil film (Exp.)

Initial droplet size [ $\mu$ m]	Droplet size after 33 sec [ $\mu$ m]
12.5	5.7
16.4	10.7
20.8	18.2
27.4	25.3
33.3	32.1
39.9	38.7
47.3	46.1
53.3	52.7
59.5	59.5

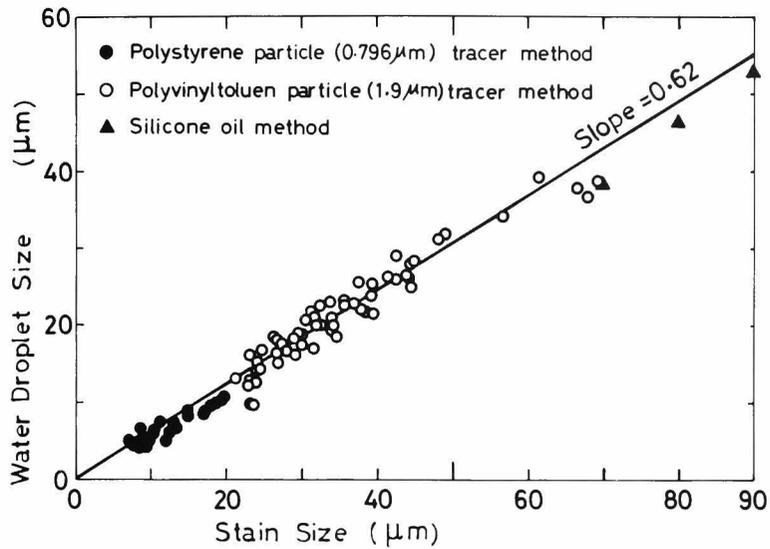


Fig. A 2 - 1 Calibration curve relating NGB-gelatin film stain size with droplet size

b) 固体粒子トレーサー法による検定：

さらに微小水滴については、Farlow の固体粒子トレーサー法<sup>1)</sup>によって水滴径とこん跡径の相関を求めた。実験装置概略をFig. A 2 - 2 に示すが、まず2本の洗気瓶で加湿するとともに除塵した空気によって噴霧する。噴霧器は市販のガラス製の標準品を用いており、 $20\mu\text{m}$  以下の水滴の測定では噴霧口に口径 $3.5\text{mm}$  の加速ノズルを取り付け水滴のスライドガラスへの衝突効率を高めた。なお、スライドガラ

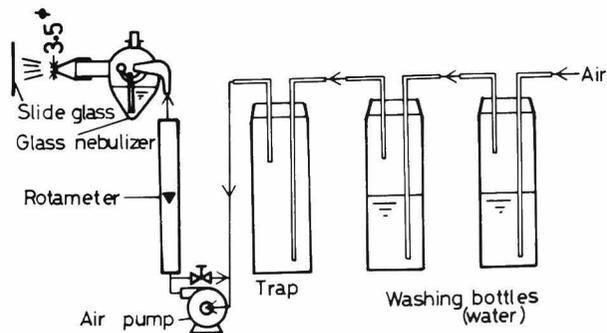


Fig. A 2 - 2 Experimental apparatus for calibration of NGB-gelatin film

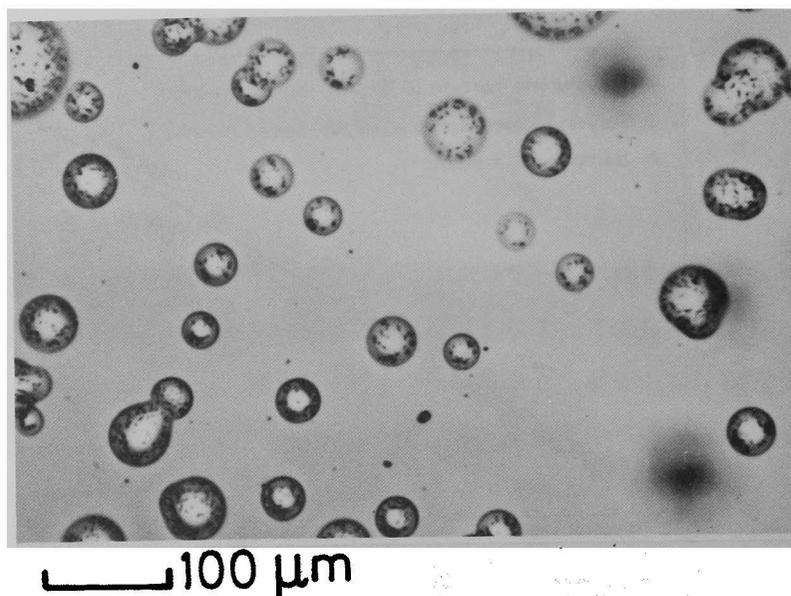


Fig. A 2-3 Polystyrene particles in NGB-gelatin film stain

ス表面はNGBゼラチン膜で被覆してある。水滴径が $20\mu m$ 以下の微小な場合には、トレーサー粒子として径が $0.796\mu m$ のポリスチレンラテックス粒子 (Dow Chemical Co, Ltd 製  $\rho_p = 1.05g/cm^3$ ) を用い、1.6wt%の濃度まで蒸留水で希釈したものを噴霧液とした。 $20\mu m$ 以上の水滴について検定を行なう場合には、 $2\mu m$ のポリビニルトルエンラテックス粒子 (Dow Chemical Co, Ltd 製、 $\rho_p = 1.027g/cm^3$ ) の5.1wt%水溶液を噴霧液とした。噴霧空気流量は $6.1\sim 12.5l/min$ である。以上のようにして、NGBゼラチン膜上に水滴のこん跡を作ると、Fig. A 2-3に示すように水滴のこん跡内にラテックス粒子が付着している。このラテックス粒子を計数することによって元の水滴径を推定し、こん跡径との相関を調べたが、その結果をFig. A 2-1中の黒丸および白丸に示す。これらを前述の油膜法による結果と合わせて最小二乗法によって水滴径とこん跡径の比を求めたが、その平均値は約0.62であった。したがって、NGBゼラチン膜上のこん跡径を測定し、補正係数0.62を乗ずることによってほぼ元の水滴径を推定できることがわかった。

## 2. 1. 2. シャッター付サンプラーとリボンの粒子捕集性能の比較

高濃度の液滴のサンプリングではシャッター装置付サンプラーを用いる場合が多いが、その結果からもとの液滴径分布を推定するときに、シャッター装置付サンプラーの粒子捕集効率がリボンのそれに等しいと従来仮定されてきた。しかし、この

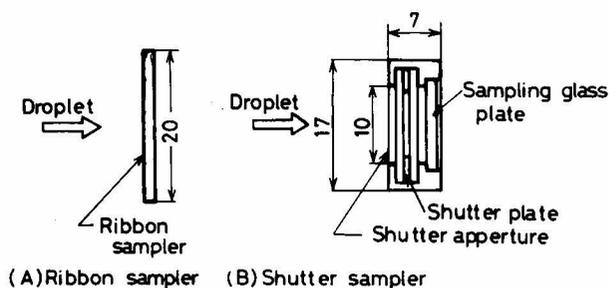
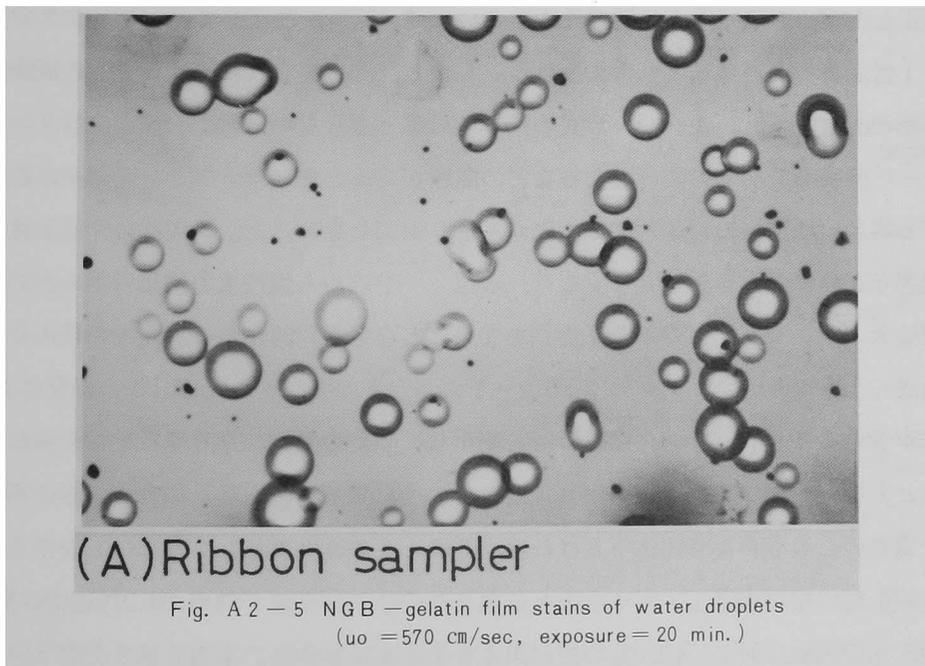


Fig. A 2 - 4 Ribbon sampler and shutter sampler

仮定の妥当性は検証されておらず，ここではFig. A 2 - 4 に示すリボンサンプラーおよびシャッター装置付サンプラーを用いその液滴捕集性能の差異を調べた。Fig. A 2 - 5 に同一条件で水滴をサンプリングした場合の結果を示すが，リボンサンプラーには多数の水滴が衝突しているにもかかわらずシャッター装置付サンプラーにはほとんど水滴は衝突していない。このように両者のサンプリング性能にはかなり顕著な差異があるので本章ではシャッター装置を用いずリボンサンプラーを使用し，水滴流量を小さくしてその滴径分布を測定した。



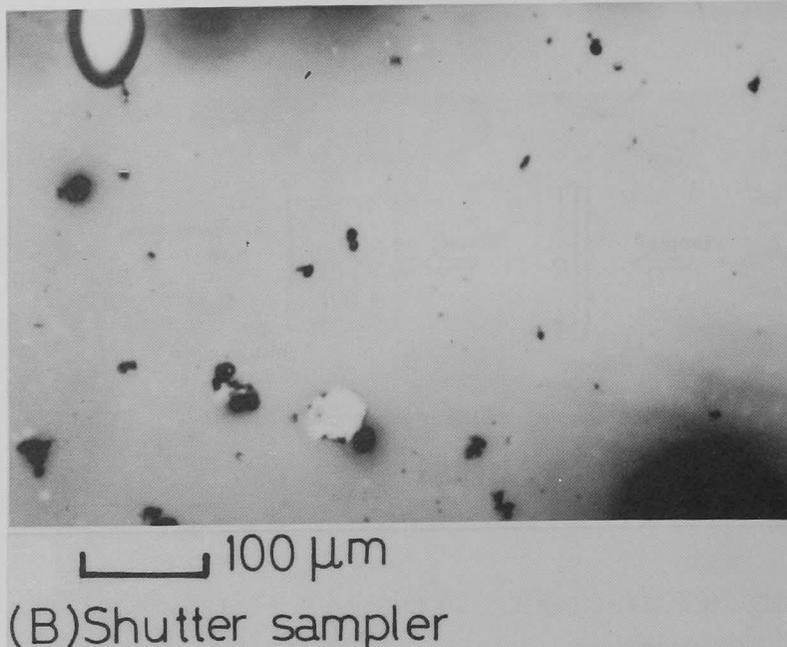


Fig. A 2-5 NGB-gelatin film stains of water droplets  
( $u_0 = 5.70$  cm/sec, exposure = 20 min.)

#### 補遺 2-2 液滴測定について

本報では前述の加速ノズルを用いることによって少なくともサンプリング効率が0.2以上の条件で測定し、部分捕集効率を計算するときサンプリング効率の影響を補正したが、ここでさらに開口比の小さい加速ノズルを使用してサンプリング効率を1付近まで高めることも考えられる。しかし、その場合にはノズル壁への液滴付着率が大きいこと、ルーバー形式の捕集の対象とならない極微小液滴が多数サンプルへ衝突して測定の防げとなるなどの問題がある。逆にサンプリング効率が低過ぎる場合には測定の対象とする液滴があまり衝突しないこと、乱流混合や乱流拡散沈着などの影響が無視できなくなり、前報<sup>16,17)</sup>で求めた慣性重力捕集効率のみでは精度よくサンプリング効率を推定できないことなどの問題がある。以上の理由から前述のようにサンプリング効率が0.2~1の測定条件を採用したが、この場合には風速が変わるとサンプリング効率の値も変化し、誤差の原因になりうると考えられる。たとえば、サンプリング効率が0.41となるように風速を設定した場合、実際の風速が誤差のためそれより10%小さければ、このときのサンプリング効率は0.38であって約7%の相対誤差を生ずる。また最悪条件のサンプリング効率が0.2付近では風速の10%の誤差に対して約20%の相対誤差を生じる。しかし、本報ではサンプリング直前に風速を再調節しており、さらにサンプリングを8~10回行ってその平均値

を用いているので、風速の設定値からのずれの測定精度におよぼす影響はわずかと思われる。一方ノズル壁への沈着率は湯ら<sup>1)</sup>の結果を用いた計算では0.6%程度で、最悪条件でも3.8%しかなくその影響はわずかと思われる。

次にノズル出口での濃度分布の影響を検討しよう。顕微鏡観察ではリボン中心線上での濃度分布はあまり無くほぼ一様であったが、念のため毎回リボンサンプラー中心線上でノズルの中心と壁面との中点（両側計2ヶ所）で測定するようにした。これは、もし濃度分布があるとしても、ノズル中心で高く壁面で低いか、あるいは反対にノズル中心で低く壁面で高いかのいずれかであるから、上記位置で測定すれば比較的平均値に近い結果が得られると考えたからである。

#### 補遺2-3 ルーバー形式による固体粒子捕集性能測定

本章ではルーバー形式の固体粒子捕集性能を測定し液滴捕集性能と比較した結果を述べる。

測定装置の概要をFig. A 2-6に示すが、試験用分離機は液滴捕集性能測定に使用したものと同一である。供試粒子はミキサー型分散機からダクト内へ供給し、気流と共に整流ノズルを経て分離機内へ流入する。

ルーバー形式の分離径は通常の粒子を捕集する場合にはサブシーブの領域にあって測定能率および精度が悪いので、ここでは供試粒子として密度の非常に小さいガラスマイクロバルーン I G 1 0 1（密度=0.311g/cm<sup>3</sup>）を採用し篩によって粒子径分布を求めた。供試粒子および捕集粒子の質量および粒子径分布を測定して部分捕集効率を求めたが、Fig. A 2-7に供試粒子、捕集粒子の測定粒子径分布および通過粒子の推定粒子径分布の例を示す。またFig. A 2

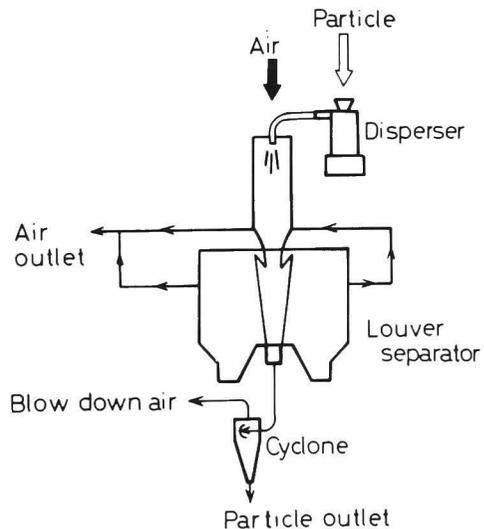


Fig. A 2-6 Schematic diagram of experimental apparatus ( $u_0 = 1000 \text{ cm/sec}$ )

— 8 に部分捕集効率曲線測定結果を示すが、ブローダウン空気が10%の場合と0%の場合の両方共、水滴の部分捕集効率に比べて固体粒子のそれがかなり低くなっている。これは本文で述べたように通常の条件では水滴は羽根表面に衝突後他の捕集水滴と合体して羽根表面を流下し、羽根下端から数mmの粗大水滴となって次段へ滴下するか、あるいは液膜のまま次段へ流下し、集塵口へ至る。したがって羽根に衝突した水滴は全て捕集される。これに対して、固体粒子の捕集機構は通常の条件では、Fig. A 2—9 のJones ら<sup>6)</sup>が計算した粒子軌跡のように、粒子は羽根と衝突しても付着せず反発し、さらに数段おきに羽根との反発を繰り返して集塵口へ至る。しかし、一度羽根と衝突したものが必ず捕集されるわけではなく、かなりの部分は集塵口に至るまでに羽根間隙を通り抜けてしまう。これが固体粒子の部分捕集効率が低いことの原因であろう。

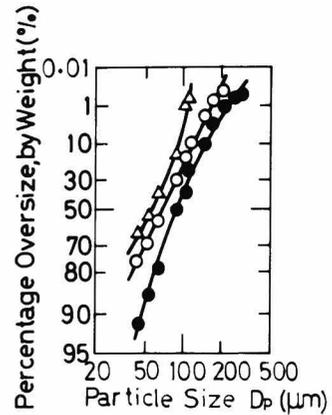


Fig. A 2—7

Size distributions of classified particles by V—shape blades with 10% blow down air and without central partition plate. (○ test dust, ● coarse product, △ fine product)

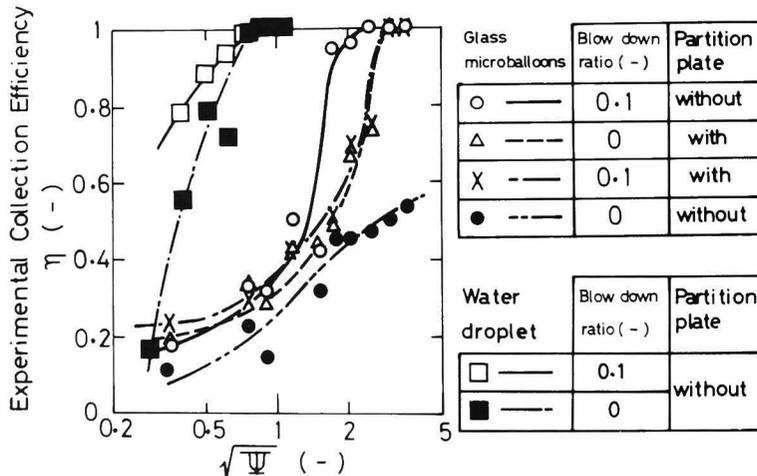


Fig. A 2—8 Comparison of experimental partial collection efficiencies for droplets and solid particles (V—shape blade)

次に固体粒子捕集におよぼすブローダウンおよび特に固体粒子捕集に用いられる中間隔壁の影響をみよう。Fig. A 2—8 からブローダウン流量を10%とすればブローダウン流量が0の場合に比べてかなり捕集効率が高いことがわかる。ブローダウンによる捕集効率の向上は流速が各羽根間隙入口で等しくなるためであろう。とくに固体粒子の場合には下段程粒子が濃縮されておりその影響は顕著なのである。

一方中間隔壁の設置による捕集効率の増大も顕著である。これは羽根に粒子が反発した後反対側の羽根列の間隙を通過するのを防止する効果と、分離機内の流れを整流する効果によると考えられる。

しかしブローダウンと中間隔壁を併用した場合の捕集効率向上に対する相乗効果は見られず、むしろブローダウンのみの方がなぜか効果的である。

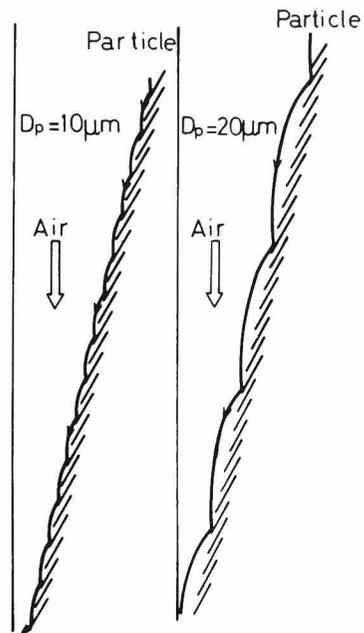


Fig. A 2—9

Solid particle trajectories in a lower separator calculated by Jones et al.<sup>6)</sup>

#### Nomenclature

B	= distance between two adjacent blades	[cm]
D <sub>p</sub>	= particle size	[cm] [μm]
Fr	= Froude number [=u <sub>0</sub> <sup>2</sup> /(g.B)]	[ - ]
g	= acceleration of gravity	[cm/sec <sup>2</sup> ]
N <sub>d</sub>	= number of droplets caught by ribbon sampler per unit time and unit area	[No./cm <sup>2</sup> .sec.μm]
p	= blade pitch	[cm]
Δp	= pressure drop	[mmH <sub>2</sub> O]
r	= half width of ribbon	[cm]
Re	= Reynolds number of air flow based on blade distance and inlet velocity (= $\frac{Bu_0\rho}{\mu}$ )	[ - ]

t	= time	[sec]
T	= dimensionless time (=tu <sub>0</sub> /B)	[ - ]
u <sub>0</sub>	= inlet air velocity	[cm/sec]
u <sub>x</sub> , u <sub>y</sub>	= x, y components of air velocity	[cm/sec]
U <sub>x</sub> , U <sub>y</sub>	= X, Y components of dimensionless air	[cm/sec]
V <sub>r</sub>	= dimensionless relative velocity [ = √ (d X /dT - U <sub>x</sub> ) <sup>2</sup> + (dY / dT - U <sub>y</sub> ) <sup>2</sup> ]	[ - ]
x, y	= co-ordinates	[cm]
X, Y	= dimensionless co-ordinates (=x/B, y/B)	[ - ]
α	= angle between flow direction of inlet air and center line of blade row	[deg]
β	= geometric change of air flow direction at blade entrance	[deg, rad]
η	= collection efficiency	[ - ]
ρ	= air density	[g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>p</sub>	= particle density	[g/cm <sup>3</sup> ]
μ	= air viscosity	[poise]
Φ	= parameter (=18 Bu <sub>0</sub> ρ <sup>2</sup> /ρ <sub>p</sub> μ)	[ - ]
Φ <sub>r</sub>	= parameter (=18ru <sub>0</sub> ρ <sup>2</sup> /ρ <sub>p</sub> μ)	[ - ]
Ψ	= inertial parameter based on blade distance (= D <sub>p</sub> ρ <sub>p</sub> u <sub>0</sub> <sup>2</sup> / 18μB)	[ - ]
Ψ <sub>p</sub>	= inertial parameter based on blades pitch (= D <sub>p</sub> ρ <sub>p</sub> u <sub>0</sub> <sup>2</sup> / 18μp)	[ - ]
Ψ <sub>m</sub>	= modified inertial parameter taking into account particle turbulent mixing	[ - ]

#### Literature cited

- 1 ) Farlow, N.H., and F.A. French; Calibration of liquid aerosol collectors by droplets containing uniform size particles: J. Colloid Sci., 11, 177 (1955)
- 2 ) Foster, P.M., M.I. Williams and R.J. Winter: Comparative performance evaluation of current

- design evaporative cooling tower drift eliminators:  
Atmos. Environ., 8, 349 (1974)
- 3 ) Gee, D.E. and B.N. Cole; A study of the performance of inertia air filters: Proc. Instn. Mech. Engrs., 184, Pt 3C, 166 (1969-70)
- 4 ) Jackson, S. and S. Calvert; Entrained particle collection in packed bed: A.I.Ch.E.J., 12, 1075 (1966)
- 5 ) Liddell, H.F. and N.W. Wooten ; The detection and measurement of water droplets: Q.J.Roy. Met. Soc., 83, 263 (1957)
- 6 ) Jones, G.J., F.R. Mobbs and B.N. Cole; Development of a theoretical model for an inertia filter: Proceedings of first international conference on the pneumatic transport of solids in pipes, paper B1 (1971-9)
- 7 ) Muschelknautz, E.; Tropfenabscheider — Übersicht zum Stande des Wissens: Chemie-Ing-Techn, 39, 306 (1967)
- 8 ) Ranz, W. E.: Eng. Res. Bull, B-66, Pennsylvania State Univ., University Park (1956)
- 9 ) Smith, J.L. and M.J. Goglia; The mechanism of separation in the louver-type dust separator: REPAIR, 5, 51 (1955)
- 10) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分離器の分級特性: 粉砕No.3 (1959-7) p.18  
(細川粉体工学研究所)
- 11) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 中村幸夫; ルーバー式慣性集塵器の模形実験結果: 粉体工学研究会研究資料No.18 (1959-5)
- 12) 井伊谷鋼一, 木村典夫: ルーバー式分級器の分級精度: 粉体工学研究会研究資料 No.27 (1960-6)
- 13) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 田中善之助; サイクロンおよびルーバーによる分級試験の一例: 粉体工学研究会誌, 1, 114 (1964)

- 14) 宇敷建一, 田中善之助, 井伊谷鋼一; 上端供給ルーバー分級機の性能: 化学工学, 38, 151 (1974)
- 15) 宇敷建一, 井伊谷鋼一; 液滴径測定: 粉体工学研究会誌, 13, 315 (1976)
- 16) 宇敷建一, 久保清和, 井伊谷鋼一; リボンによる粒子の慣性分離—傾斜角およびストークス域からのずれの影響—: 化学工学論文集, 3, 172 (1977)
- 17) 宇敷建一, 久保清和, 平野茂樹, 井伊谷鋼一; リボンによる粒子の慣性重力捕集効率: 化学工学論文集, 4, 425 (1978)
- 18) 岡田定五, 坪井信義, 佐々木昭夫; 慣性分離形集じん器 (ハイルーバーフィルタ) の開発: 日立評論, 52, 881 (1970)
- 19) 新津靖, 吉川暲; ルーバー型集じん器の性能に関する報告: 空気調和・衛生工学, 37, 159 (1963)
- 20) 新津靖, 稲垣金吾, 乾永房; 衝突形集じん器に関する研究—横形ルーバー集じん器の基礎的特性: 空気調和・衛生工学, 42, 1089 (1968)
- 21) 湯普一, 井伊谷鋼一; 2次元ノズル壁への粒子の沈着: 化学工学, 35, 1251 (1971)
- 22) 吉川暲, 加賀昭和; ルーバー形エリミネーターの脱水特性に関する研究: 空気調和・衛生工学, 47, 11 (1973)

### 第3章 ルーバー羽根列への粒子の捕集性能実験

#### 緒 言

ルーバー羽根列の液滴捕集性能を前章で述べたが、つづいてその設計条件を明らかにするため、2次元ルーバー羽根列における粒子の衝突効率および圧力損失におよぼす羽根列傾斜角、羽根間隙および羽根長さの影響を実験的に検討した。本報ではその結果得た知見を述べる。なお、液滴捕集効率は、風速がさほど大きくなければ再飛散は起こらず衝突効率と一致する。

#### 3. 1. 実験装置と方法

##### 3. 1. 1. 衝突効率の測定

Fig. 3・1に実験装置の概略を示すが、分離機本体は鉄板製のものを使用した。気流は分離機入口のベルマウスより流入下降し羽根間隙を通り抜け、分離機外へ排出する。一方粒子は分散器（島津製作所K.K.製ミキサー型分散器P100型）を経て主気流と混合し、慣性の大きい粒子は羽根に衝突して捕集されるが、残りは羽根間隙を通り抜ける。羽根はステンレス平板（厚さ0.8mm）で捕集面にはグリス（島津製作所K.K.製「Vacuum Grease Soft Type」を用いたが、その蒸発による重量変化は無視できる。）を塗布して再飛散を防止し、粒子の供給量、捕集量および

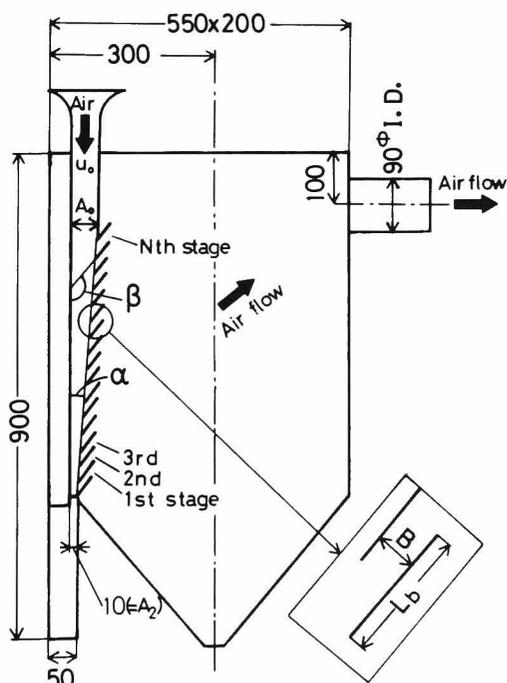


Fig. 3 1 Experimental louver separator

器壁や分散器内の付着量を秤量することにより衝突効率を求めた。供試粒子は前報<sup>3)</sup>で用いた石松子のほか、篩分けしたアクリルビーズおよび超大形カスケードインパクトで分級したフライアッシュの単分散試料であり、アクリルビーズおよびフライアッシュにはそれぞれ粒子径の異なる数種類の試料がありそれらの粒子径分布をFig. 3・2に示すが合計14種類である。なお、再飛散防止のため粒子捕集量は石松子では $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 、フライアッシュおよびアクリルビーズでは $4.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 以下にした。

また気流の方向転換角 $\beta$ は $146^\circ$ 一定とし、入口風速 $u_0$ は、2, 4, 8および $16\text{m}/\text{sec}$ 、ルーバー面の傾斜角 $\alpha$ は $2^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ 、羽根長さ $L_b$ は2, 4, 4, 12cm, 羽根間隙B

は1~25cmとし、装置として簡単なブローダウン流量の無い場合を検討した。

### 3. 1. 2. 分離機内での粒子捕集量の分布

分離機内のどの位置で粒子が捕集されるかを知るため、長さ4cmの板3枚から成る長さ12cmの羽根を用い、下から2段目、4段目および6段目の羽根について各段での捕集粒子量の総供給量に対する割合を求めた。なお、このときの総段数は7段である。

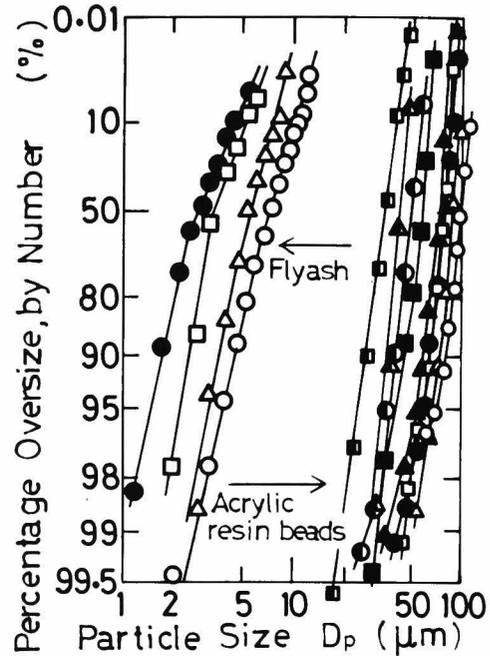


Fig. 3 2 Particle size distribution of test dusts (by microscope)  
 $(\rho_p = 2.17\text{g}/\text{cm}^3$  for flyash,  
 $\rho_p = 1.17\text{g}/\text{cm}^3$  for acrylic resin)

### 3. 2. 結果と考察

#### 3. 2. 1. 粒子の種類, 粒子径および風速の影響

Bürkholtz ら<sup>1)</sup>はいくつかの慣性液滴分離機（ジグザグ流）の性能を測定し、種々の風速における部分捕集効率の測定値を慣性パラメーター $\Psi$ でまとめることを試みている。しかし、その結果はうまくまとまらず、例えば折れ板形式では風速が9 m/secの場合の50%捕集 $\sqrt{\Psi}$ の値は3 m/secの場合の約1/4となっている。このことは常識に反するので筆者らは粒子の種類, 粒子径および風速を変えてルーバー分離機の粒子捕集効率測定を行ない、慣性パラメーター $\Psi$ と部分捕集効率の関係を求めたが、その結果はFig. 3・3に示すようにうまく一本の曲線にまとまっており、少なくともルーバー分離機の場合には $\Psi$ だけで捕集効率を説明できることがわかった。

一方、Fig. 3・4に種々の条件下で気流が粒子を含まない場合の圧力損失を示すが、当然ながら入口風速の2乗に比例して増大する。

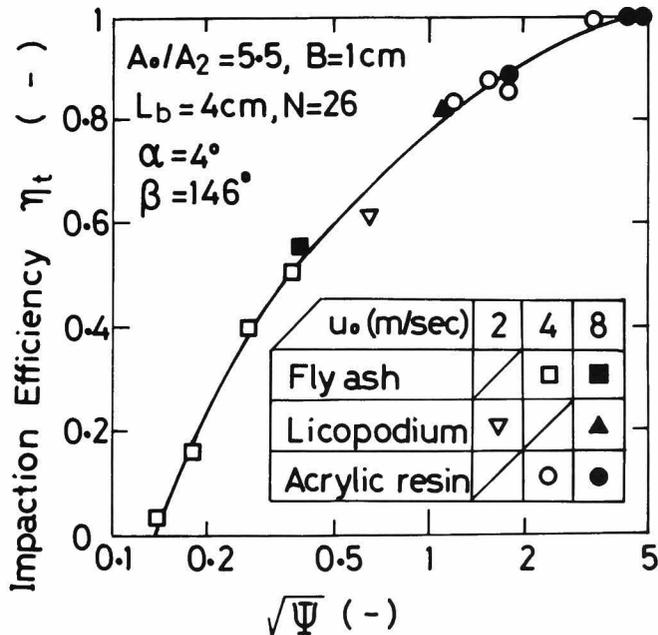


Fig. 3・3 Relation between impaction efficiency and inertial parameter

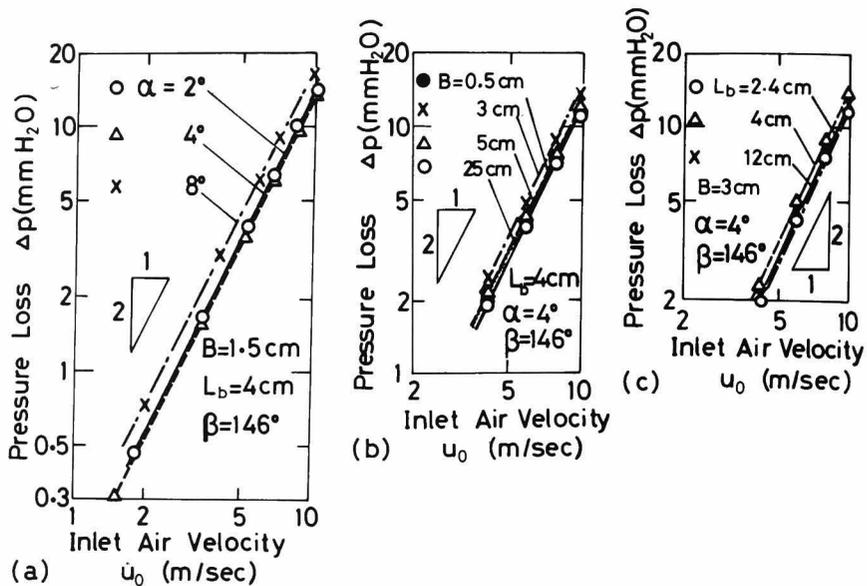
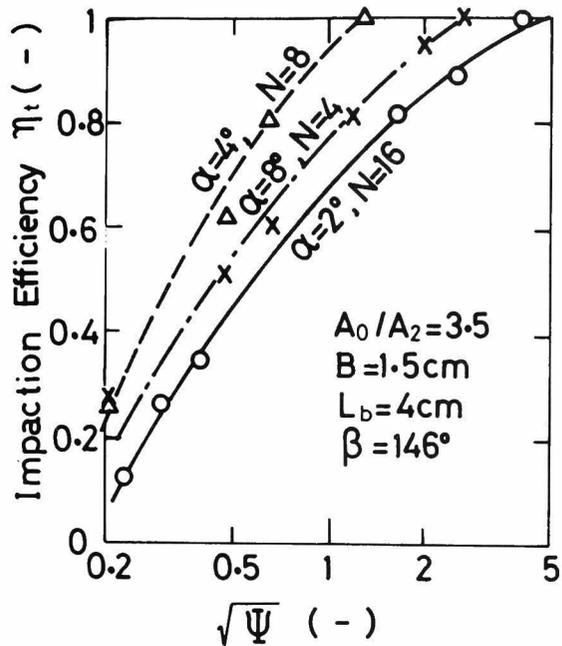


Fig. 3-4 Pressure loss of louver blade row  
 (A) Effect of inclination angle  $\alpha$  of blade row ( $A_0/A_2 = 3.5$ )  
 (B) Effect of blade distance  $B$  ( $A_0/A_2 = 5.5$ )  
 (C) Effect of blade length  $L_b$  ( $A_0/A_2 = 5.5$ )

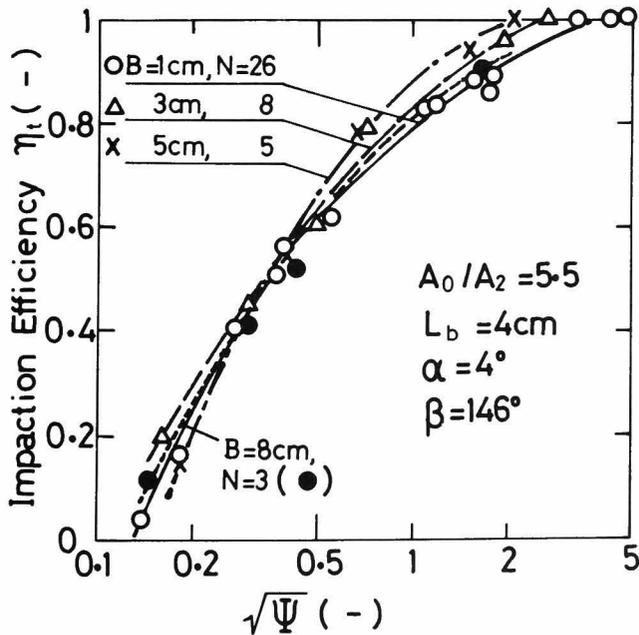
### 3. 2. 2. ルーバー面傾斜角 $\alpha$ の影響

Fig. 3-5 A に、入口幅  $A_0$  ( $=3.5$  cm), 集塵口幅  $A_2$  ( $=1$  cm) および羽根間隙  $B$  ( $=1.5$  cm) を一定に保ちルーバー面傾斜角  $\alpha$  を変化させた場合の衝突効率を示すが、影響はかなり顕著で、 $\alpha$  が  $4^\circ$  付近のときその値は最大となる。 $A_0$ ,  $A_2$ ,  $B$  を一定に保ち  $\alpha$  の値を小さくすると、段数が増大するため羽根間隙風速は小さくなる。ところで、入口風速が大きければ粒子の慣性が増大し羽根への衝突が促進され、逆に羽根間隙風速が大きければ粒子が速やかに羽根間隙から排出され衝突が抑制される。したがって  $\alpha$  の値が小さくなると上記のように羽根間隙風速は減少し衝突効率は増大する。

しかし、 $\alpha$  がさらに小さくなると、粒子捕集に重要な羽根前縁付近の、分離機入口から見て羽根重なりが無い部分が短くなり、捕集されるべき粒子の一部が一段下の間隙を通り抜けるため衝突効率は逆に低下するであろう。たとえば、その長さは  $8^\circ$  で  $5.5$  mm であったのが  $4^\circ$  で  $3.7$  mm,  $2^\circ$  では  $1.8$  mm となる。このことは、岡田らの粉塵集塵率測定結果<sup>5)</sup> も  $4^\circ$  付近で最大値を有することの裏付けとなる。



(A) Effect of inclination angle  $\alpha$  of blade row

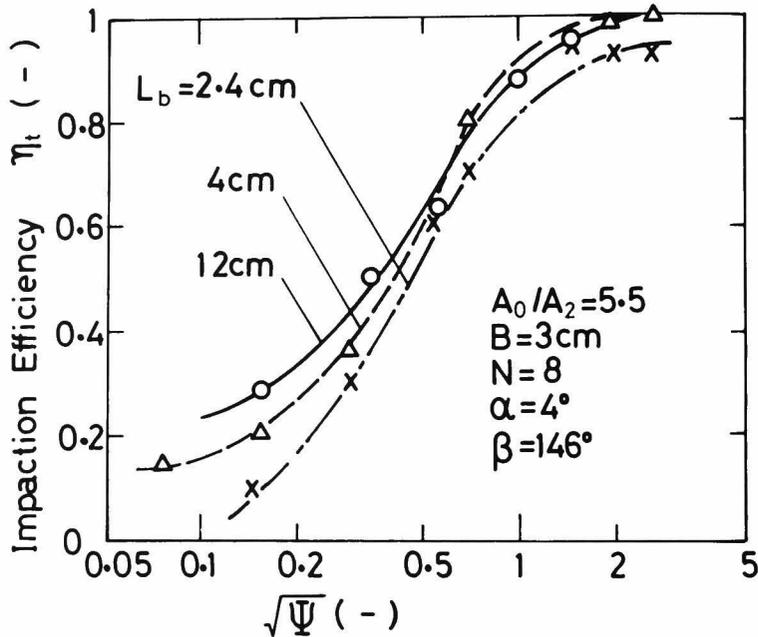


(B) Effect of blade distance  $B$

Fig. 3 · 5 Particle impaction efficiency of louver blade row

一方圧力損失はFig. 3・4 Aからわかるように、 $\alpha$  を $8^\circ$ から $4^\circ$ へ小さくすると減少するが、さらに小さくして $2^\circ$ としてもほとんど変わらない。これは $\alpha > 4^\circ$ では、圧力損失が羽根間隙最大風速によって支配されるが、 $\alpha \leq 4^\circ$ では入口風速が羽根間隙最大風速を上回るか等しく、前者によって圧力損失が決定されるからである。

以上の結果から、ルーバー面傾斜角には最適値があり、 $4^\circ$ 付近で衝突効率、圧力損失とも優れていると推定できる。



(C) Effect of blade length  $L_b$  on impaction efficiency

Fig. 3 5 Particle impaction efficiency of louver blade row

### 3. 2. 3. 羽根間隙Bの影響

Fig. 3・5 Bに示すように、段数を変えることによってBを変化させた場合の衝突効率は概略慣性パラメーターだけで定まることがわかる。すなわち50%分離径はBの1/2乗にほぼ反比例している。一方圧力損失はFig. 3・4 Bに示すようにBの値を0.5~25cmの広範囲に変化させてもほとんど変化しない。これは、羽根間隙風速がBの影響を受けないことと、気流と羽根との摩擦による圧力損失がわずかなためであろう。

### 3. 2. 4. 羽根長さ $L_b$ の影響

Fig. 3・5 Cに示すように $L_b$ を増大させれば当然ながら衝突効率は増大するが、粒子と羽根との衝突は後述のように羽根前縁付近の羽根重なりが無い部分で集中的に起こるため $L_b$ をある程度以上増大させてもその増加はわずかである。しかし、逆に $L_b$ が小さくなり羽根重なりが無くなると衝突効率が1より小さくなる場合もある。一方圧力損失はFig. 3-4 Cに示すように当然 $L_b$ が大きい程大きい、前述の羽根間隙の影響と同様の理由によってその変化はわずかである。

### 3. 2. 5. 分離機内の粒子捕集量の分布

Fig. 3・6に示すように、羽根の前縁付近で粒子捕集量が多いのは、そこで気流の方向転換が著しいためである。また同図では、下段ほど粒子捕集量が多いが、これは気流が側方へ吸引されても慣性のため粒子は直進し、下方へ進むにつれてしだ

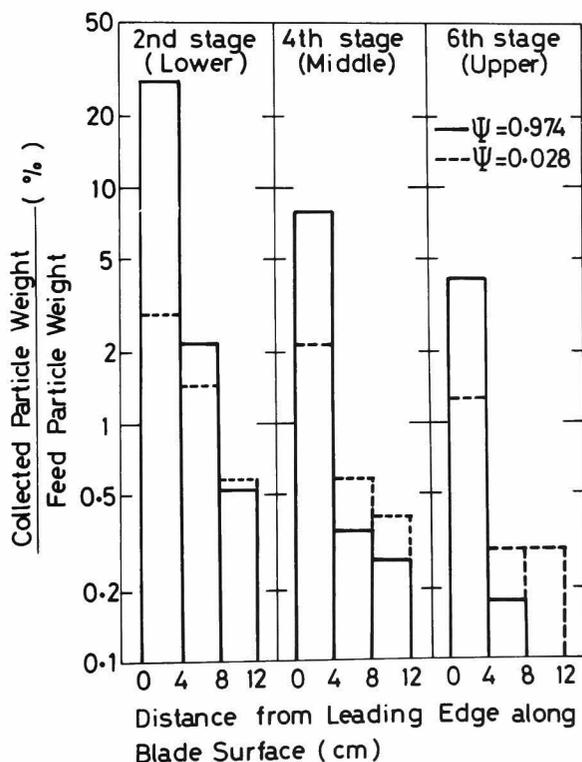


Fig. 3・6 Weight distributions of collected particles on blades ( $B_r = 3$  cm,  $N = 7$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\beta = 14.6^\circ$ )

いに粒子が濃縮されるためであるが、下段の方で前章で示したように、羽根間隙中のウエイクが小さく、流量の多いこともその一因であろう。やはり慣性パラメータの値が大きい程その傾向は顕著である。

## 結 言

2次元ルーバー羽根列への粒子の衝突効率および圧力損失を実験的に検討した。ルーバー面と入口気流方向のなす角の影響は大きく、4度付近で衝突効率は最大となり圧力損失も小さく最適である。また50%衝突粒子径は羽根間隙の平方根に反比例し、羽根が長い程衝突効率は高いが、ある程度以上大きくなるとその効果は少ない。さらに粒子は羽根間隙の入口付近において主に衝突捕集される。

## Nomenclature

$A_0$	= inlet width of louver collector	[cm]
$A_2$	= inlet width of dust chamber = 1 cm	[cm]
$B$	= distance between two adjacent blades (blade slit width)	[cm]
$D_p$	= particle size	[cm]
$N$	= number of blade slits or stages	[ - ]
$\Delta p$	= pressure loss	[mmH <sub>2</sub> O]
$u_0$	= inlet air velocity	[cm/sec]
$\alpha$	= inclination angle between inlet plane of louver blades and inlet flow direction ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ )	[deg]
$\beta$	= change of flow direction at entrance of blade slit = $146^\circ$	[deg]
$\eta_t$	= impaction efficiency	[ - ]
$\rho_p$	= particle density	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\mu$	= air viscosity	[poise]
$\Psi$	= inertial parameter = $\rho_p D_p^2 u_0 / (18\mu B)$	[ - ]

#### Literature Cited

- 1) Bürkholtz, A. und E. Muschelknautz; Tropfen-abscheider, Übersicht zum Stande des Wissens: Chemie. Ing. Techn., 44, 503 (1972)
- 2) 宇敷建一, 田中善之助, 井伊谷鋼一; 上端供給ルーバー分級機の性能: 化学工学, 38, 151 (1974)
- 3) 宇敷建一, 久保清和, 井伊谷鋼一; リボンによる粒子の慣性分離—傾斜角およびストークス域からのずれの影響—: 化学工学論文集, 3, 172 (1977)
- 4) 宇敷建一, 加藤秀夫, 高橋成夫, 井伊谷鋼一; ルーバー液滴分離機の性能: 化学工学論文集, 5, 348 (1979)
- 5) 岡田定五, 坪井信義, 佐々木昭夫, 筒井隆; 慣性分離形集じん器 (ハイルーバーフィルター) の開発: 日立評論, 52, 881 (1970)

## 第4章 上端供給ルーバー分級機の性能

### 緒言

慣性集塵機的一种として用いられてきたルーバー形式を分級機として使う場合、粉体粒子を気流中に分散した状態で供給する方式が従来検討されてきた<sup>2, 4, 5, 6, 7)</sup>。従来方式では、ルーバー全面に粒子が供給されるために同一粒子径であっても流入位置によって細粉へ入る場合と粗粉へ入る場合があり、高精度で分級を行なうことはできない。

本章では粉体を2次元ルーバー羽根列最上端に供給し分級性能の向上をはかった結果を述べる。

### 4. 1. 分級機構

#### 4. 1. 1. 粒子の運動方程式 (Fig 4・1 参照)

羽根下端を原点とし、重力と反対の鉛直上方に y 軸をとると、粒子の運動方程式は次のようになる。ここで羽根下端から次段の羽根に垂線を下し、その交点を 0 とし、 $\varrho$ , b 座標の原点とする。 $\varrho$  は羽根に沿った座標である。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -C \frac{3 \rho V}{4 \rho_p D_p} \left\{ \frac{dx}{dt} - u_x \right\} \quad (4-1)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -C \frac{3 \rho V}{4 \rho_p D_p} \left\{ \frac{dy}{dt} - u_y \right\} - g \quad (4-2)$$

ただし、

$$v = \left\{ \left( \frac{dx}{dt} - u_x \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} - u_y \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4-3)$$

$$C = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (Re_p < 800) \quad (4-4)$$

$$u_x = u_\varrho \cos\theta - u_b \sin\theta \quad (4-5)$$

$$u_y = u_l \sin\theta + u_b \cos\theta \quad (4-6)$$

$$X = l/B \quad (4-7)$$

$$Y = b/B \quad (4-8)$$

$$\frac{u_l}{\bar{u}} = \frac{\partial\psi}{\partial Y}, \quad \frac{u_b}{\bar{u}} = \frac{\partial\psi}{\partial X} \quad (4-9)$$

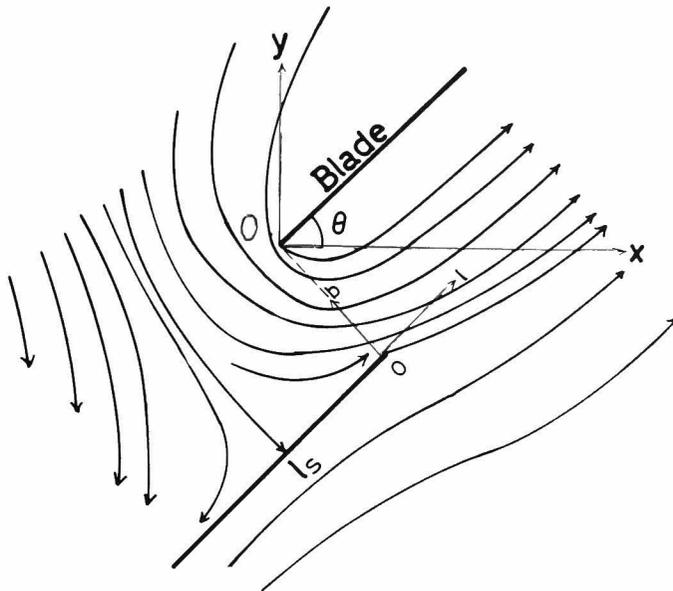


Fig. 4 · 1 Flow pattern in the louver type classifier  
 ( $\bar{u} = 1.5 \text{ m/sec}$ ,  $L = 0 \text{ cm}$ ,  $N = 3$ ,  $B = 3.6 \text{ cm}$ ,  
 $\theta = 45 \text{ deg}$ )

ここで $\bar{u}$ は羽根間隙断面積の総和で空気流量を割った平均風速である。

#### 4. 1. 2. 実験装置と方法

アクリル製二次元ルーバー分級機を用い分級過程を観察した。さらに装置の壁に垂直に長さ5cmの針金を45本植え込み、各先端に糸を取りつけて流線の測定を行ないその無次元流れ関数 $\psi$ の値をきめて、Eqs. (4-1) ~ (4-9)によって粒子軌跡の計算を行なった。粒子が羽根下端を離れる速度は、 $100\mu\text{m}$ 以下の場合には観察

が困難なので、 $150\mu m$  程度の珪砂粒子を用い写真を撮り粒子軌跡の長さでシャッター速度から求めた。一方粒子軌跡の測定には $53\sim 63\mu$  および $88\sim 105\mu$  に篩分けた珪砂を使用した。

#### 4. 1. 3. 結果

実測した流線をFig. 4・1に、粒子の計算軌跡をFig. 4・2に実線で示した。また気流が羽根に平行な一様流であるとした時の粒子の計算軌跡を破線で、実測の粒子軌跡範囲を図中に斜線をほどこして表した。実測した粒子初速は $140\text{cm/sec}$ であったが、粉体供給速度や粒子径等の影響も受けると考えられるので、一応 $100\text{cm/sec}$ 及び $140\text{cm/sec}$ の2種の初速を用いて計算を行なった。測定流線によって計算した軌跡と実測とはだいたい一致しており、一方平行一様流を用いて計算した軌跡はあまり一致していないことがわかる。

#### 4. 1. 4. 分級径の計算

羽根下端から滑り落ちた粒子のうち、大粒子は羽根に衝突後、重力の羽根方向成分が気流の抵抗力より大きいので、羽根に沿って下降し再び次段以下で分級作用を繰返し受け、粗粉側へ入る。一方小粒子は気流の抵抗力が重力の羽根方向成分より

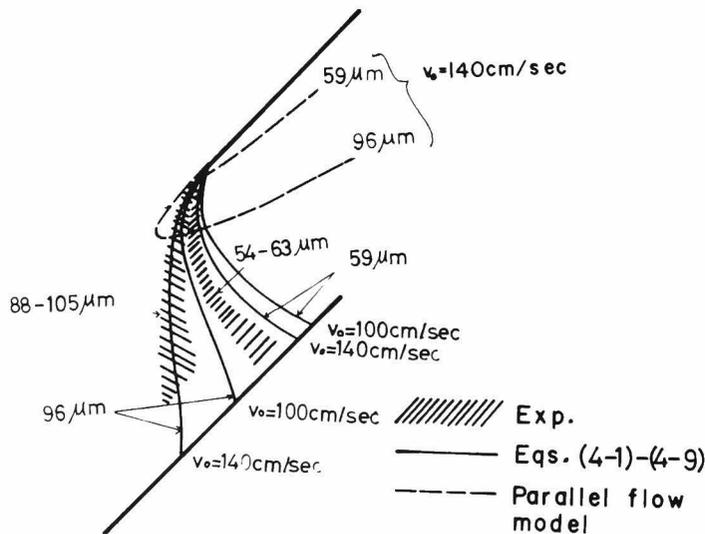


Fig. 4・2 Comparisons between calculated and observed trajectories of silica-particles ( $\bar{u} = 1.5\text{ m/sec}$ ,  $L = 0\text{ cm}$ ,  $N = 3$ ,  $B = 3.6\text{ cm}$ ,  $\theta = 45\text{ deg}$ )

大きいので羽根に沿って上昇し細粉側へ入る。そこで分級径を計算するには羽根近くの風速が必要となるが実測は難しいのでよどみ点ポテンシャル流れを仮定すると、主流速度の羽根方向成分は次式で表わされる<sup>3)</sup>。

$$\frac{u_m}{\bar{u}} = \frac{a(\ell - \ell_s)}{B} \quad (4-10)$$

ここでaは定数であり、実測流線からEq. (4-10)を満足する様にa=1.4とした。よどみ点付近の境界層の厚さは次式によって計算される<sup>3)</sup>。

$$\delta = 2.4 \sqrt{\frac{uB}{a\bar{u}}} \quad (4-11)$$

この式によれば、実験を行なった条件では $\delta$ は500~1000 $\mu m$ であり、分級径の決定に影響があると考えられる。

1) 境界層の外側で分級される場合：粒子が大きくて、羽根と反発して $\delta$ 以上の高さに跳ね上がる場合を考える。 $Re_p$ は4以下なのでストークスの抵抗法則が適用でき、羽根方向に働く力のつり合いを考えて次式を得る。

$$\frac{\pi \rho_p D_p^3 g \sin\theta}{6} = 3\pi\mu u_m D_p \quad (4-12)$$

Eq. (4-10)を代入して整理すると次式を得る。

$$\frac{D_p^2 \rho_p g \sin\theta}{18\mu} - a \left( \frac{\ell_c - \ell_s}{B} \right) \bar{u} = 0 \quad (4-13)$$

ここで $\ell_c$ は粒子と羽根との衝突点の $\ell$ 座標であり粒子軌跡の計算により粒子径の関数として求まる。

2) 粒子径が小さく羽根との反発が全くない場合：羽根に垂直な方向の無次元長さを次式により定義すると、

$$\eta = \sqrt{\frac{a\bar{u}}{uB}} \cdot b = \frac{2.4b}{\delta} \quad (4-14)$$

$\eta > 0.6$ のときは $u/u_0 \doteq \eta$ となり<sup>3)</sup>、境界層中の風速 $u$ を計算できる。ここで仮りにストークスの抵抗法則を使用すると羽根上での重力の羽根方向成分と粒子の受ける抵抗力とのつり合いより次式を得る。

$$\frac{\pi D_p^3 \rho_p g \sin\theta}{6} = 3 \pi \mu D_p \left\{ \bar{a} \bar{u} \left( \frac{l_c - l_s}{B} \right) \sqrt{\frac{\bar{a} \bar{u}}{v_B}} \cdot \frac{D_p}{2} \right\} \quad (4-15)$$

整理すると次式となる。

$$\frac{D_p \rho_p}{9 \mu} \cdot g \sin\theta - \bar{a} \bar{u} \left( \frac{l_c - l_s}{B} \right) \frac{\bar{a} \bar{u}}{v_B} = 0 \quad (4-16)$$

3) 平衡粒子径の計算：平衡粒子径とは、分級の結果ある粒子径を境界にして、その粒子径より大きい粗粒が細粉に迷い込んだ量と、その粒子径より小さい微粒が粗粉に迷い込んだ量とがちょうど等しくなる粒子径である。後述の様に平衡粒子径は段数の約1/4乗に比例して増大する事が実験により求まるので、Eqs. (4-13) と (4-16) から求められる計算値に段数の補正をして平衡粒子径の計算値とした。

## 4. 2 分級実験

### 4. 2. 1. 実験装置と方法

実験装置の概略をFig. 4・3に示す。供給機を出た粉体は、ルーバー羽根列の最

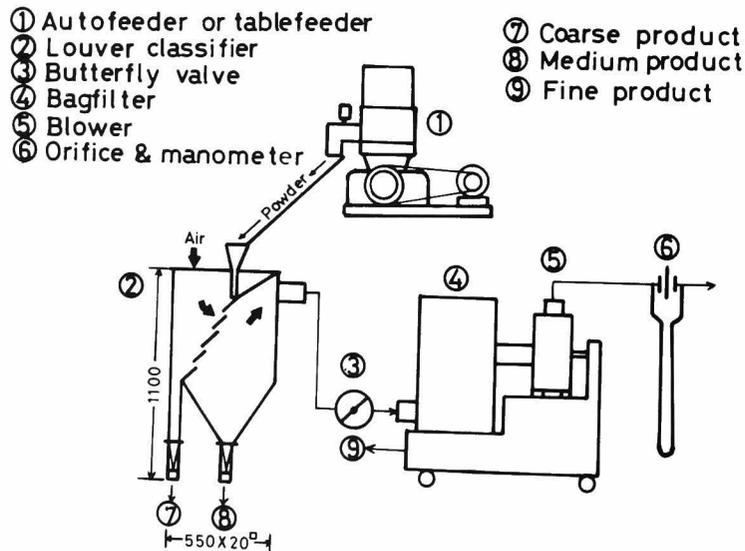


Fig. 4・3 Schematic diagram of experimental apparatus

上端にあるシュートより供給され分級される。分級後粗粉は粗粉出口へ、細粉の一部は本体下部へ沈降し中粉出口へ、残りはバッグフィルターによって捕集されて微粉となる。供給機は主としてスムーズオート・フィーダーを使用した。入粉流量

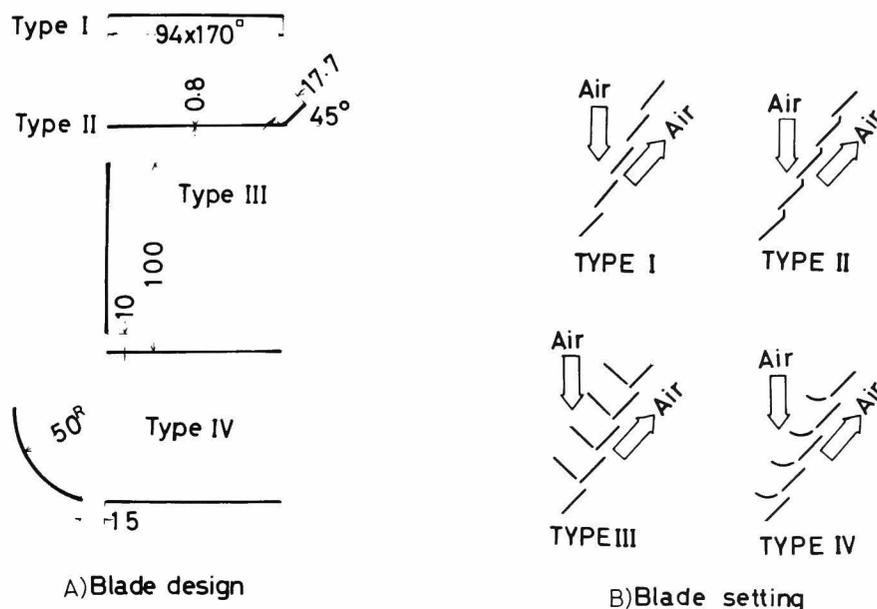


Fig. 4・4 Blade design and setting

が大きいとき（珪砂7・8号では60g/sec以上）には能力が足りないのでテーブルフィーダーを使用した。空気流量はオリフィスで測定し、運転中一定となるようにバタフライバルブによって調節した。分級機本体は鉄板製で、羽根板を5mm間隔に切っている溝にはめ込むようになっているので、羽根間隙、羽根重なり長さおよび羽根勾配を変化できる。圧力損失は傾斜マンメータによって測定した。実験に使用した4種類のルーバ羽根の寸法をFig. 4・4に示し、供試粉体の粒子径分布をFig. 4・5に示す。試料の粒子径分布が狭いと実験条件を大きく変化させる事ができないので、珪砂7・8号の混合砂を主として用いた。また一度使った粉体をV型ブレンダーで混合し同一粉体を繰返して使用し、入粉の粒子径分布を一定に保った。なお粒子径の測定には標準篩を使用した。分級径としては平衡粒子径を用い、また分級効率としては平衡粒子径におけるニュートン効率を使用した。

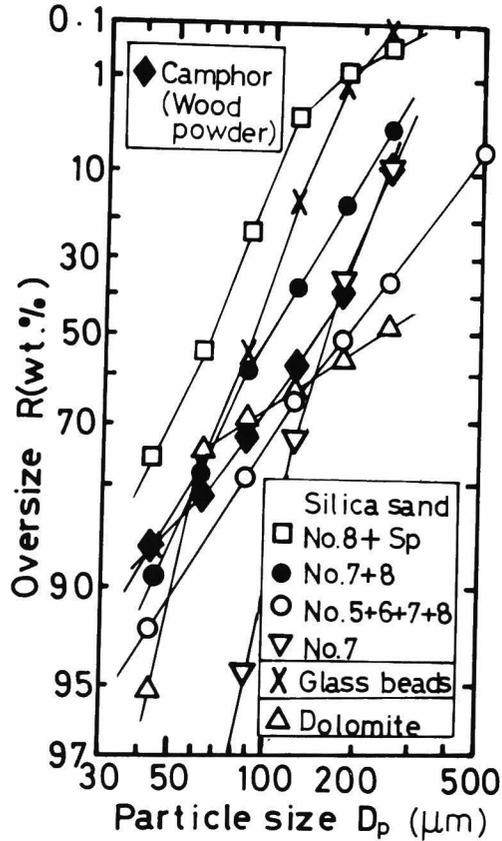


Fig. 4 · 5 Particle-size distribution of test powders measured by sieve

#### 4. 2. 2. 結果と考察

1) 段数Nの影響：上端供給ルーバー分級機では、下降した粒子のみが次々と分級され最後に粗粉へ入る。各段が全く同じ条件であると仮定し、一段の分級機の粒子径 $D_p$ における部分分離効率を $\Delta\eta_1$ で表わすと、N段の分級機の粒子径 $D_p$ に於ける部分分離効率は次式となる。

$$\Delta\eta_N = (\Delta\eta_1)^N \quad (4-17)$$

Eq. (4-17) を用いて、 $N=4$  段のときの実験結果をもとにして段数の部分分離効率曲線におよぼす影響を計算した。

結果をFig. 4 · 6 に示すが、この計算結果から段数を大きくすると分級精度が向上

することがわかり、また8段の実験結果は計算線上にのっている。  
 Fig. 4・7にⅢ型羽根を用いたときの段数の平衡粒子径におよぼす影響を示す。なお段数は4段の装置を繰り返して使用する事により変化させた。

2) 平均風速  $\bar{u}$  および羽根形式の影響：Fig. 4・8に平均風速の平衡粒子径への影響を実験値およびEqs. (4-13) と (4-16) による計算値として示す。平衡粒子径が比較的大きい場合には羽根との反発が強くEq. (4-13) がよく合い、小さくなると反発力が次第に弱まり平衡粒子径の実験値はEq. (4-16) の全く反発の無い場合に近づいていることがわかる。全体として平衡粒子径はだいたい平均風速に比例しており、風速に

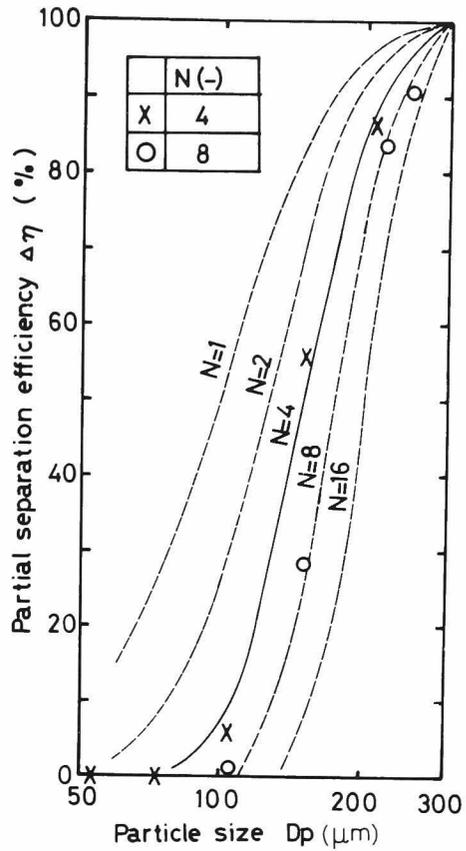


Fig. 4 6  
 Effect of total number of stages on partial separation efficiency ( $\bar{u} = 2.76$  m/sec,  $L = 0$  cm,  $w = 0.73$  g/cm<sup>3</sup>,  $B = 2.5$  cm,  $\theta = 45$  deg, silica No.7 8, type I)

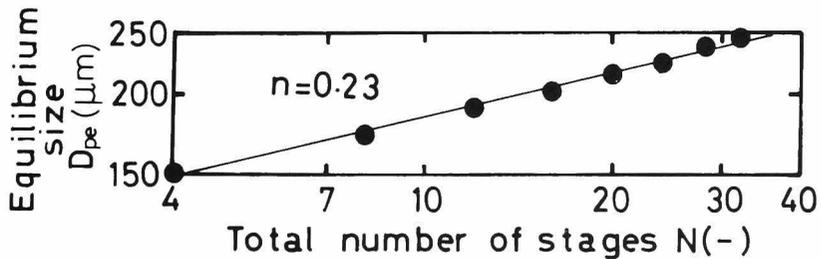


Fig. 4・7 Effect of total number of stages on equilibrium size ( $\bar{u} = 2.76$  m/sec,  $L = 0$  cm,  $w = 0.73$  g/cm<sup>3</sup>,  $B = 2.5$  cm,  $\theta = 45$  deg, silica No.5, 6, 7, 8, type III)

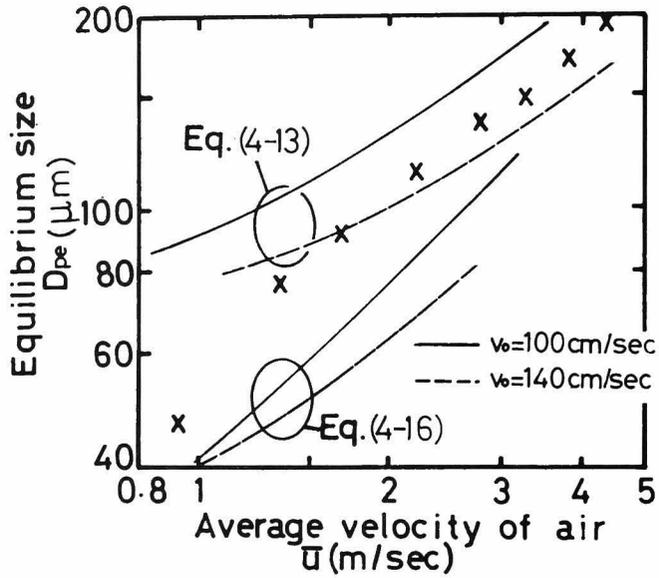


Fig. 4 · 8 Effect of average velocity of air on equilibrium size ( $L = 0$  cm,  $m_1 = 2$ ,  $N = 4$ ,  $B = 2 \cdot 5$  cm,  $\theta = 45$  deg, silica No. 7 · 8, type I)

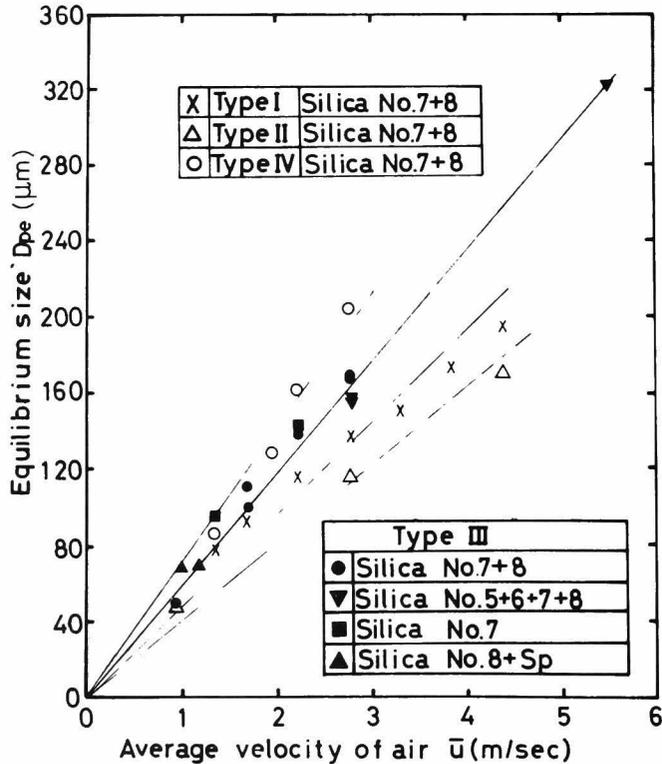


Fig. 4 · 9 Effect of average velocity of air on equilibrium size ( $L = 0$  cm,  $m_1 = 2$ ,  $N = 4$ ,  $B = 2 \cdot 5$  cm,  $\theta = 45$  deg)

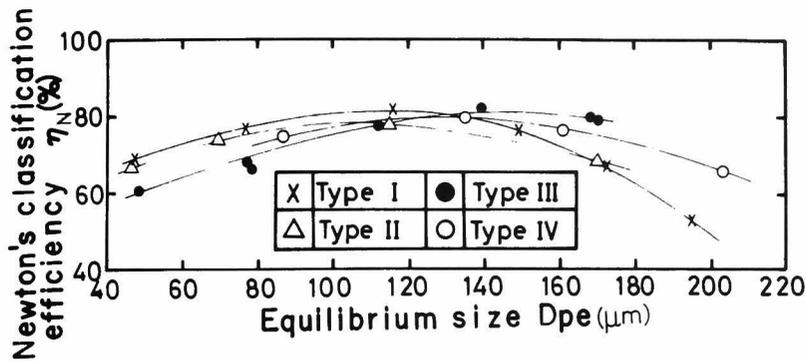


Fig. 4 · 10 Effect of blade design on performance (  $L = 0 \text{ cm}$ ,  
 $m_1 = 2$ ,  $N = 4$ ,  $B = 2 \cdot 5 \text{ cm}$ ,  $\theta = 45 \text{ deg}$ , silica No.7 · 8 )

よって容易に平衡粒子径を変化させうる事がわかる。Fig. 4 · 9 に 4 種類の羽根を用いたときの平衡粒子径におよぼす平均風速の影響を示す。

Ⅲ型およびⅣ型はⅠ型に較べ気流が平行一様流に近いいため同一風量のとき平衡粒子径は大きくなる。Fig. 4 · 10 に風量を変化させた時の平衡粒子径対ニュートン効率を示す。

大粒子の、羽根との不規則な反発による分級性能の低下を防止できるⅢ型羽根が  $130 \mu\text{m}$  以上での分級に効果のある事がわかり、Ⅰ型とⅢ型とを用いる事によって  $50 \sim 200 \mu\text{m}$  の範囲でのニュートン効率を  $70 \sim 80\%$  に保つことができた。また羽根形式にかかわらず平均風速が  $2 \sim 3 \text{ m/sec}$  のときニュートン効率は最大となる。大きい粒子と小さい粒子の軌跡の差が大きければ、互いに迷い込みにくく、分級の鋭さは上昇すると考えられる。粒子径による粒子が羽根に衝突する点の変化  $-d\theta_c / dD_p$  に及ぼす平均風速の影響を調べてみたが、この結果より平均風速が大きくなると分級の鋭さが低下すると考えられる。

さらに、風速が大きくなると気流の乱れが大きくなる事も分級性能低下の一因と考えられる。参考としてニュートン効率をみると、風速が大きいときには効率が低く、分級性能は悪い。一方風速が小さくなると、観察によれば羽根上での流動性、分散性の悪化がみられ分級性能は低下すると考えられ、ニュートン効率も低くなる。以後特に断らない限りⅠ型羽根を用いた場合である。

3) 羽根重なり長さ  $L$  の影響：隣り合う羽根と羽根との重なりを羽根重なり長さ

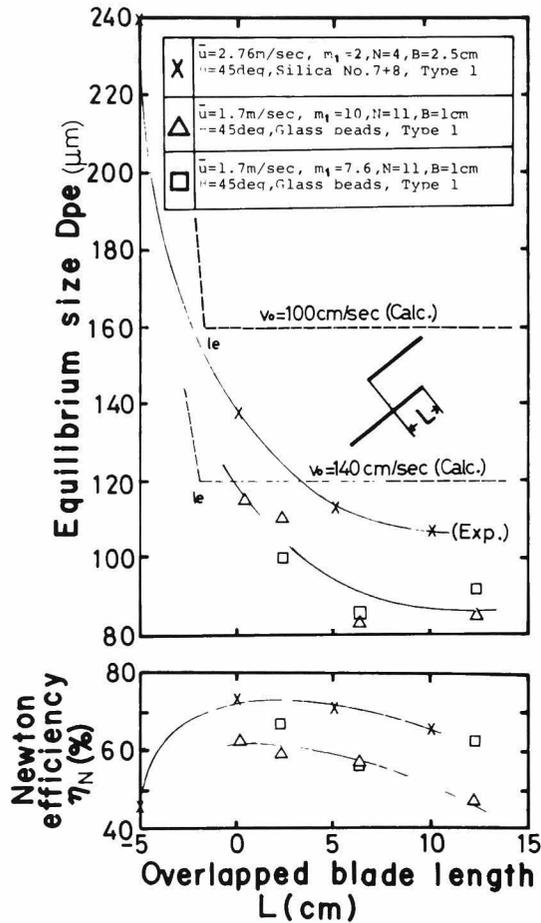


Fig. 4 · 11 Effect of overlapped blade length on classification performance

Lとする。Fig. 4 · 11に羽根の重なりが平衡粒子径およびニュートン効率におよぼす影響を示す。羽根重なりが大きい場合の、羽根に衝突後上昇する粒子と下降する粒子とに別れる位置を平衡点 $le$ とする。また簡単のため流線が羽根重なりの影響をあまり受けないとする。このとき $L > le$ なら羽根重なりを長くしても平衡点は変化しないので、平衡粒子径は一定である。 $le > L$ なら $le$ は実際の羽根上になく、仮想点で意味を持たなくなる。従って実際は羽根上端の位置で分級されるので平衡粒子径は大きく変化するであろう。実験結果は $L > le$ であってもなおいくらか平

平衡粒子径は減少している。これはLが大きいと細粉側へ入るはずの上昇粒子の一部が羽根上に薄層状に堆積し、間歇的に羽根上を滑り落ちるためであろう。またこのためにLが大きくなるとニュートン効率の低下がみられる。したがって羽根重なりは不要であろう。一方Lが負の大きな値のときは、大粒子が羽根と大きく反発し、反発後の落下地点が悪ければ細粉へ入り、ニュートン効率の低下がみられるが、部分分離効率曲線（対数確率紙上にプロットしている）の傾斜はむしろ急となっている。

4) 粉体供給速度 w の影響：入粉流量を1段の羽根間隙面積で割ったものを粉体供給速度 w とする。Fig. 4・12に w の平衡粒子径およびニュートン効率に及ぼす影響を示す。供給速度が大きいと粒子の凝集や初速の増加のため平衡粒子径は小さくなる。一方ニュートン効率は、珪砂等の場合が w が  $1.3g/cm^2 \cdot sec$  まではほとんど変化がなく、これより大きくなると低下が起こる。クス（木粉）では、 $w \approx 0.2g/cm^2 \cdot sec$  から低下が見られるが、珪砂の嵩密度は  $1.5g/cm^3$  であるのに対しクスでは  $0.34g/cm^3$  とかなり小さく、ニュートン効率は容積流量によって影響されている様である。従って設計基準としては  $W/\rho_b = 0.8cm/sec$  位が適当であろう。

5) 羽根間隙 B の影響：平衡粒子径は実験値および Eq. (4-13) による計算値共 B の増大にしたがって大きくなる。一方ニュートン効率および  $-d\ell_c/dD_p$  共あまり変化しない。

6) 羽根勾配  $\theta$  の影響：Müller<sup>1)</sup>によれば、石灰石粒子が板を滑り落ちて板の下端を離れる速度  $v_o$  と板の勾配  $\theta$  との関係は次式で与えられている。

$$v_o^2 \propto 2.86 (\pi \theta/180) - 1.45 \quad (4-18)$$

本実験では珪砂7・8号を使用したため摩擦係数が異なり、かつ気流の抵抗力の影響もあると思われるが、Eq. (4-18) が成り立つと仮定し、Eq. (4-13) によって平衡粒子径を計算した。Fig. 4・13に示すように計算値と実験値は大体傾向が一致している。またニュートン効率は計算した平衡粒子径における  $-d\ell_c/dD_p$  と傾向が一致しており、 $\theta$  が大きい方が少しよいと思われる。

7) 供給方式の影響：従来の羽根全面に均一分散して供給する方式は上端供給方式に較べ、同一条件の場合ニュートン効率が10~40%低い結果が得られた。また珪

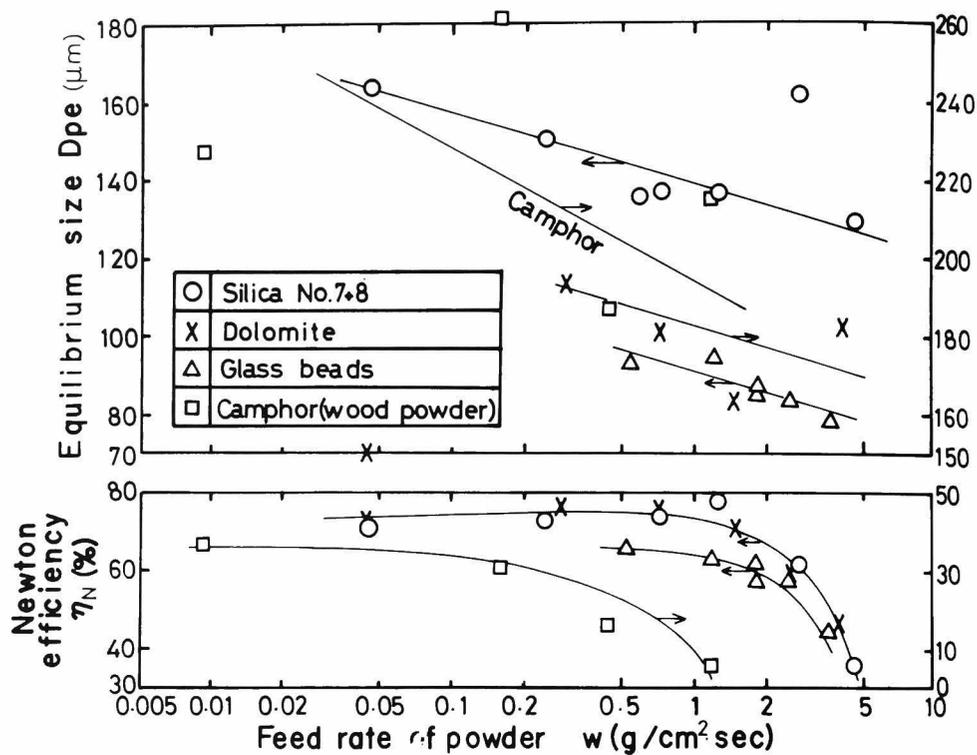


Fig. 4 · 12 Effect of flow rate of test powder on performance  
 ( $\bar{u} = 2.76 \text{ m/sec}$ ,  $L = 0 \text{ cm}$ ,  $N = 4$ ,  $B = 2.5 \text{ cm}$ ,  
 $\theta = 45 \text{ deg}$ , silica No.7. 8 or dolomite, type I ;  
 $\bar{u} = 1.7 \text{ m/sec}$ ,  $L = 6.3 \text{ cm}$ ,  $N = 11$ ,  $B = 1 \text{ cm}$ ,  $\theta = 45 \text{ deg}$ ,  
 glass beads type I ;  $\bar{u} = 1.5 \text{ m/sec}$ ,  $L = 0 \text{ cm}$ ,  $N = 4$ ,  
 $B = 2.5 \text{ cm}$ ,  $\theta = 45 \text{ deg}$ , camphor, type I )

砂7・8号と粒度分布のほぼ等しい珪砂を用いて均一分散供給方式により分級した結果が報告されているので<sup>7)</sup>、平衡粒子径対ニュートン効率の形で性能を表示し比較した結果をFig. 4・14に示す。上端供給方式の方がかなりニュートン効率の高い事がわかる。これは、上端供給方式では全ての粒子が羽根下端を通過して分級されるのに対して、均一分散供給方式では同一粒子径であっても流入位置によって細粉側へ行くか粗粉側へ行くかわからないからであろう。

なお、本編第2章補遺2-4でガラスマイクロバルーンの均一分散方式による山形羽根形式ルーバーを用いた分離実験を行なったが、その際のニュートン効率は20~40%とやはり低い。

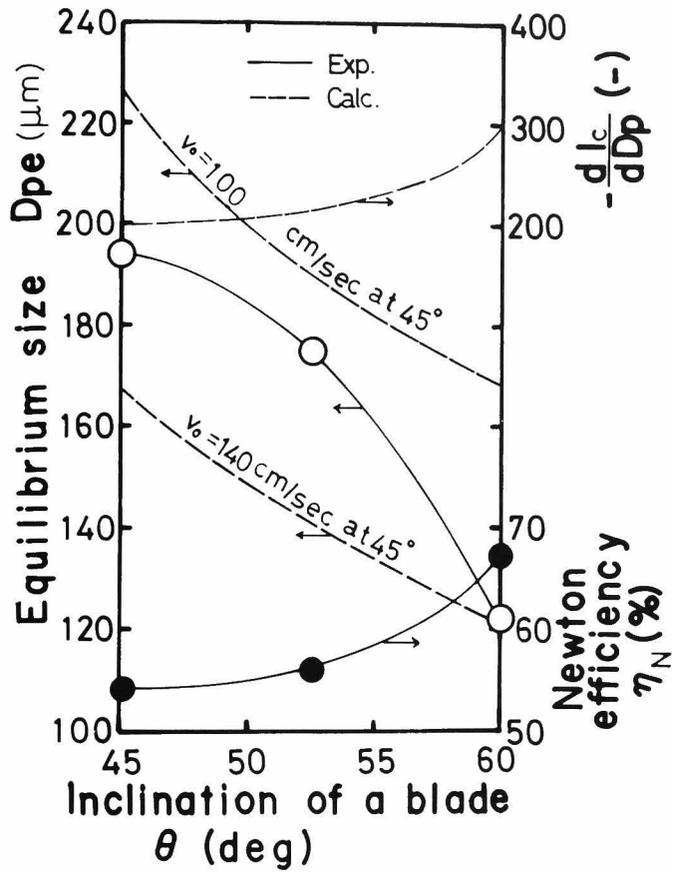


Fig. 4.13 Effect of inclination of a blade on performance  
 ( $\bar{u} = 2.76 \text{ m/sec}$ ,  $L = 0 \text{ cm}$ ,  $w = 0.73 \text{ g/cm}^2\text{sec}$ ,  
 $N = 4$ ,  $B = 2.5 \text{ cm}$ , silica No. 7, 8)

8) その他：殆どの場合圧力損失は4 mmH 20以下で、細粉捕集用集塵機の圧力損失に比して無視できる。またデータは省略するが、セメントなどのやや流動性の悪い粉体でもバイブレーターを使用することにより分級可能であることを確めた。

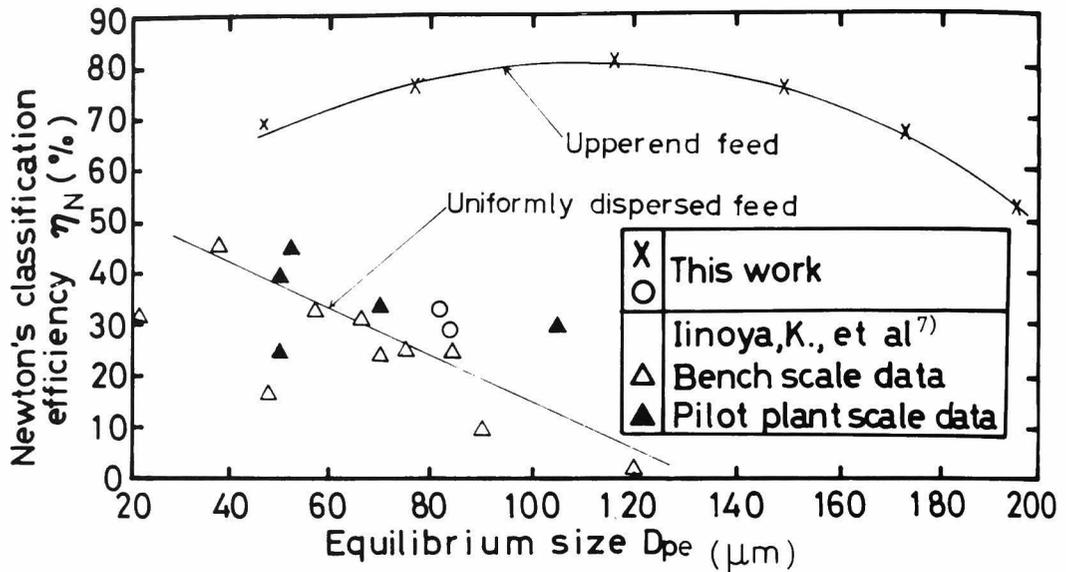


Fig. 4 · 14 Effect of feeding methods on performance

## 結 言

ルーバー分級機を使用する際従来は均一分散供給方式が用いられていたが、本報告においては上端供給方式を採用し、分級精度の向上を図った結果についてのべた。すなわち2次元ルーバー分級機を用い、分級機構と性能とを実験および計算によって検討した。その結果得た主な結論は次の通りである。

- (1)分級機構の説明を試みた。
- (2)均一分散供給方式よりも上端供給方式の方がかなり分級精度が高い。
- (3)風量を変化させる事によって分級径を50~200ミクロンの間で容易に変化できる。
- (4)処理能力がかなり高く、総合混合比で1まで分級効率が低下しない。
- (5)ルーバー羽根列の設計基準がえられた。

## Nomenclature

a	= constant	[ - ]
B	= distance between blades	[cm ]
b	= coordinate perpendicular to blade	[cm ]
C	= drag coefficient	[ - ]
$D_p$	= particle size	[ $\mu$ m] or [cm]
$D_{pe}$	= equilibrium size	[ $\mu$ m]
g	= acceleration of gravity	[cm/sec <sup>2</sup> ]
L	= overlapped blade length	[cm ]
l	= coordinate parallel to blade	[cm ]
m	= ratio of particle feed rate to air flow rate	[ ]
$m_1$	= ratio of particle feed rate to air flow rate based on first stage (=m/N)	[ - ]
N	= total number of stages	[ ]
n	= slope on the log.-log. plane	[ ]
R	= oversize fraction of particles	[wt.%]
$Re_p$	= Reynolds number ( $D_p v \rho / \mu$ )	[ - ]
u	= air velocity	[cm/sec]
$\bar{u}$	= average air velocity between blades	[m/sec]
$u_m$	= air velocity of main flow	[cm/sec]
$v_0$	= initial velocity of particle	[cm/sec]
v	= relative velocity between particle and air	[cm/sec]
w	= particle feed rate per unit area between blades (based on one stage)	[g/cm <sup>2</sup> .sec]
X,Y	= dimensionless coordinates defined by Eqs.(4-7) & (4-8)	[ ]
x,y	= coordinates (see Fig.4.1)	[cm]
$\delta$	= thickness of boundary layer	[cm]
$\eta$	= dimensionless coordinate defined by Eq.(4-14)	[ ]
$\eta_N$	= Newton's classification efficiency	[ % ]
$\Delta\eta$	= partial separation efficiency	[ % ]
$\theta$	= inclination of a blade	[deg]

$\mu$	= viscosity of air	[poise]
$\nu$	= kinematic viscosity ( $\mu/\rho$ )	[cm <sup>2</sup> /sec]
$\rho$	= density of air	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	= density of particle	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\psi$	= dimensionless stream function	[ - ]

#### Subscripts

b	= bulk
c	= impact
e	= equilibrium point
s	= stagnation point

#### Literature Cited

- 1) Müller, K.; Die Grundlagen der Gegenstrom-Umlenk-  
sichtung: VDI Forschungsheft, No.513, p.24 (1966)
- 2) Mushelknautz, E.; Untersuchungen an Fliehkraft-  
abscheidern: Chemie Ing. Techn., 39, 306 (1967)
- 3) Schlichting, H.: "Boundary layer theory", p.78 (1960)  
(McGraw-Hill)
- 4) Smith, J.L. and M.J. Goglia; The mechanism of  
separation in the louver-type dust separator: REPAIR,  
5, 51 (1955)  
(邦訳; 粉体工学研究会文献紹介No.73 (1959-5))
- 5) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分離器の分級特性: 粉砕No.3 (1959-7)p.18  
(細川粉体工学研究所)
- 6) 井伊谷鋼一, 木村典夫; ルーバー式分級器の分級精度: 粉体工学研究会研究資料,  
No.27 (1960-6)
- 7) 井伊谷鋼一, 木村典夫, 田中善之助; サイクロンおよびルーバーによる分級試験の  
一例: 粉体工学研究会誌, 1, 114 (1964)

## 第5章 結 論

本編はルーバー形式による粒子の慣性分離と分級を中心とした一連の研究をまとめたものである。全体は5章であるが、2章から4章までに実際の研究内容が含まれている。

まず第2章ではルーバー液滴分離機の性能を種々の条件で実測した。その結果液滴の部分捕集効率は固体粒子のそれよりかなり高いことが明らかになった。またブローダウン流量および羽根形状の部分捕集効率におよぼす影響の程度を調べた結果、ブローダウンの無い場合には、山形羽根は平板羽根に比べて部分捕集効率はかなり高く、圧力損失は小さいことがわかった。約10%のブローダウン流量による部分捕集効率の増加は平板羽根の場合は顕著であるが山形羽根ではわずかで、このため平板と山形羽根の捕集効率の差はほとんどなくなった。ルーバー分離機を実用する際の唯一の不便な点はブローダウン空気の吸引を必要とすることがあって、山形羽根はブローダウンが無くても捕集効率が高く優れている。一方分離機内流れを数値的に求め粒子軌跡を計算して理論捕集効率を求め、乱流混合の影響を補正した結果は実測と良好に一致しており、分離機構は一応解明できたと考える。

第3章ではルーバー形式の液滴捕集装置仕様の選定の目安を得るため、種々の条件で衝突効率および圧力損失を実測し、設計上の要点をまとめたものである。ルーバー面と入口気流方向のなす角の影響は大きく、4度付近で衝突効率は最大となり圧力損失も小さく最適である。また50%衝突粒子径は羽根間隙の平方根に反比例し、羽根が長い程衝突効率は高いが、ある程度以上大きくなるとその効果は少ない。

第4章は、ルーバー形式を分級機として用いた場合の性能の検討であり、従来粉体粒子を気流中に分散した状態で供給する方式が検討されてきたが、ここでは上端供給方式を採用し、分級精度の向上を図った場合の分級機構と性能を検討した。その結果、均一分散供給方式よりも上端供給方式の方がかなり分級精度が高く、風量を変える事によって分級径を50~200ミクロンの間で容易に変えることができ、処理能力はかなり高いことが明らかになった。また、段数、羽根形状、羽根重なり長さ、羽根間隙および羽根傾斜角などの設計条件の目安が得られた。さらに分級機構

についても一応の説明が可能となった。

以上が本編の結論であってルーバー形式による粒子の捕集と分級の機構および性能が一応解明された。本研究の成果が今後工業的に実用されれば幸いである。なお、液滴分離では捕集液滴の再飛散防止、スケール付着の予測と防止などが今後の課題であろう。また固体粒子の分級では、各段の分級径を同じにするため、例えば羽根間隙を下段で狭く、上段で広くとったり、羽根勾配を各段毎に変えるなどさらに分級性能を改良することが今後の課題となろう。

## 総 括

本論文は、衝突板による粒子の分離と分級についての一連の研究を、単一リボンの場合とルーバー羽根列の場合に分けてまとめたもので、各編においてそれぞれ次のような結果を得た。

第1編では、リボンによる粒子捕集機構および平均または局所捕集効率を、慣性支配、重力およびさえぎり支配ならびに慣性および重力支配の各場合について検討した。その結果これら各場合の捕集効率が予測可能となり、また粒子捕集機構もほぼ解明できた。これらの結果はスライドガラス法による粒子サンプリングなどに大いに役立つと考えられる。

第2編では、まずルーバー液滴分離機の性能におよぼす羽根形状、ブローダウン流量、ルーバー面と入口気流方向のなす角、羽根間隙、および羽根長さの影響を実験的に検討するとともに、数値計算によって慣性捕集効率を求め実測と比較した。その結果ルーバー液滴分離機の仕様選定の目安が得られた。しかし、液滴捕集機構は慣性のみでは説明できず、粒子の乱流混合による捕集効率の低下を考慮せねばならないことがわかった。また、ルーバー形式は固体粒子の場合と比べ液滴捕集効率はかなり高いことが明らかとなった。

次に、ルーバー分級機の改良型である上端供給ルーバーの固体粒子分級性能および分級機構の解明を試みた。その結果、仕様選定の目安が得られ、また分級機構も一応の説明が可能となった。

以上2編にわたって衝突板による粒子の分離と分級に関する検討を行なったが、本論文の成果が今後工業あるいは研究に利用されることを期待する。

## 謝 辞

終わりにのぞみ、本研究を行なうにあたり、終始ご指導いただきました京都大学教授井伊谷鋼一博士に心から感謝の意を表します。また本研究に御理解と助言をいただきました京都大学教授吉岡直哉博士に厚く御礼申し上げます。さらに当時研究室において御助力いただきました田中善之助博士（現岡山大学助教授）、助言と協力をして下さいました京都大学助教授牧野和孝博士をはじめ研究室の皆様深く感謝致します。

本研究をすすめるにあたり献身的に御協力いただいた当時の京都大学大学院学生および学部学生の山口朝行、久保清和、平野茂樹、沢田宏之、福本千尋、加藤秀夫、西沢英一、高橋成夫、紅粉寿雄、井元正文および川西秀明の諸氏に心から御礼申し上げます。



