

# 電気集じん装置の内部バイパス流が集じん率に及ぼす影響

藤村 謙 祐\*

## Influence of Internal By-path Flow on Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator

Kensuke FUJIMURA

### Abstract

In order to calculate the collection efficiency in an Electrostatic Precipitator (EP), it is necessary to take into account the effect of gas-sneakage which pass through the upper and down side of effective collection space. There have been reports on the calculation of the collection efficiency with the effect of gas-sneakage. However, since the calculation method used in these reports is relatively complicated and needs to input the dust particle-size distribution, in practice it is difficult to apply the method easily.

In this paper, the effect of gas-sneakage on the collection efficiency in EP is calculated on the base of new corrected formula of Deutsch's equation, which gives collection efficiency over the wide range of specific collection area (SCA), by using the apparent migration velocity of dust particle for parameter.

The results of calculation are graphed and the several important characteristics related to the effect of gas-sneakage on the collection efficiency are explained by the examination in these graphs.

### 1. はじめに

工業用電気集じん装置は線対平板型あるいはこれに準じる構造のものが多く使用されており、この種の形式の電気集じん装置（以下EPと略記）の内部には集じん作用を行う電極を配置した空間を避けて通るガスのバイパス流が発生している。このバイパス流はガススニーケージ（Gas-sneakage）と呼ばれEPの集じん率を低下させる要因のひとつとみられている。しかしその発生状況の観察や測定が難しいために具体的な検討はあまり行われておらず集じん率への影響は他の要因たとえば捕集ダストの再飛散現象などの中にくるめて取扱われることが多い。しかしながらこのバイパス現象はEPの性能と密接な関係をもつ設計上重要な問題である。そこでその特性解明の手がかりを得るひとつの手段としてガススニーケージがEPの集じん率にどのような影響を及ぼすかについて解析的に試算した。そしてその結果興味あるいくつかの所見が得られたので報告する。

### 2. EP内のガススニーケージとスニーケージ率

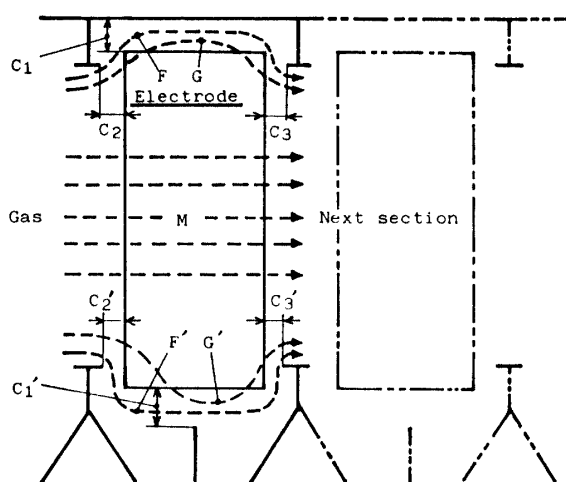


Fig. 1 Schematic diagram of flow pattern in EP.

EPの内部においては高電圧部からケーシングへの短絡放電を防ぐためにFig. 1のC<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>あるいはC<sub>1</sub>', C<sub>2</sub>', C<sub>3</sub>'のような絶縁のための空間（絶縁空間）がおかれている。そのためにガス流の一部は正常な集じん作

\* 生産機械工学科

用をうける主流MからはなれてF, GやF', G'などのように集じん作用のない絶縁空間にバイパスしている。このバイパス現象をガススニーケージあるいはたんにスニーケージと呼んでいる。実際のEPにおけるスニーケージの大きさの測定は容易でないため測定例は少ないが、一例としてSouthern Research研究所の報告<sup>1)</sup>によるとEP内のガス流速分布の測定データからの推算値ではあるが全ガス流量の約8%となっている。

スニーケージが集じん率に及ぼす影響を検討するにはまずその大きさを表わすためのスニーケージ率を定義する必要がある。バイパス流の中にはFig. 1中のFやF'のように集じん空間を完全にバイパスするもの他にGやG'のように部分的にバイパスしたがってその経路に応じていくらかの集じん作用をうけているものもあり集じん率への影響もそれぞれ異なる。しかしそれらの個々のバイパス流についていちいち検討することは実際にはできないので全バイパス流についての集じん率の平均値が主流の集じん率のm倍( $m < 1$ )であるときはバイパス流量は全バイパス流量の(1-m)倍であるとみなしてこれを $q_e$ で表わすことにする。すなわち $q_e$ は完全バイパスの状態に換算されたスニーケージ流量でありこれを全ガス流量Qで割って

$$s = \frac{q_e}{Q} \quad (1)$$

で表わされるSをスニーケージ率とする。

### 3. 計算条件

スニーケージ率を前記のように定義してもEPの作動そのものが複雑であるために計算を進めるにはさらにいくつかの仮定を設ける必要がある以下においてはつぎの条件に従うことにする。

- (1) 集じん率に関する比例則の式としては筆者がさきに足立らとともに提案したDeutschの式の修正式<sup>2) 3)</sup> (以下新修正式とよぶ)を使用できる。
- (2) EPが複数の区(Section)から構成されていて被集じんガスがこれらの区を直列的に通過する場合は各区の構造ならびに運転条件すなわち印加電圧、ガスの温度圧力などは等しい。したがって
  - i) 各区の比集じん面積(SCA)は等しい。
  - ii) 各区のスニーケージ率は等しい。
- (3) 複数の区で構成されているEPにおいてひとつの区を出たガス流は完全混合されダスト濃度は均一になって次の区に流入する。すなわちひとつの区においてバイパスしたガス塊がそのままつぎの区に入っ

てふたたびバイパスすることはない。

### 4. スニーケージ率と集じん率の関係

n区構成のEPにおいて各区の集じん率を $y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_n$ としそのEP全体としての集じん率(総合集じん率)を $\eta$ とすると一般につきの関係がある。

$$\eta = 1 - (1 - y_1)(1 - y_2)(1 - y_3) \dots (1 - y_i) \dots (1 - y_n) \quad (2)$$

したがってスニーケージが発生しているときの全体の集じん率 $\eta$ はそのときの各区の集じん率つまり任意の第i区の集じん率 $y_i$ がわかれば計算できる。

この種の計算においては従来から粒径別計算法により集じん率を求める際に各粒径の集じん量を計算する段階でスニーケージの影響を考慮する手法<sup>4)</sup>がとられてきた。しかしこの方法では詳細なダストの粒径分布データが必要でありまた計算そのものもかなり煩雑である。そこで今回はダストの粒径分布には直接にはふれないで見かけの粒子移動速度をパラメータとするEPの集じん率に関する比例則をベースにして計算を進めた。比例則の式としては前章で仮定したように筆者らが提案したDeutschの式の新修正式を用いる。この式を選んだ理由はDeutschの原式<sup>5)</sup>あるいはその修正式であるMatt'sの式<sup>6)</sup>に比べてSCAの広い範囲にわたって実測データとよい対応が得られ式の構成も簡単で使用しやすいためである。

新修正式は集じん率を $\eta$ 、見かけの粒子移動速度を $w_f(m/s)$ 、SCAを $f(s/m)$ および $f_0(s/m)$ 、K(-)を定数としてつぎのように表わされる。

$$\eta = 1 - \exp - (w_f f) \left( \frac{f_0}{f} \right)^K \quad (3)$$

したがってn区構成のEPの第i区においてスニーケージがないときの集じん率を $y_{0i}$ 、見かけの粒子移動速度を $w_{0i}$ 、SCAを $f_i$ とすると(3)式から

$$y_{0i} = 1 - \exp - (w_{0i} f_i) \left( \frac{f_0}{f_i} \right)^K \quad (4)$$

となる。そしてこれにスニーケージ率が $s_i$ のバイパス流が発生するとつぎのような変化が生じる。

- (i) バイパスした流れの集じん率は零であるからダストの通過率(Penetration)は $s_i$ だけ大きくなる。
- (ii) 主流の流量はバイパス分だけ少くなるからその通過率は(1- $s_i$ )倍と小さくなる。
- (iii) 主流の流量減少に伴ってSCAは(1/1- $s_i$ )倍と大きくなる。

したがってこれらを総合すると $s_i$ だけのスニーケージが発生したときの第i区の集じん率 $y_{si}$ は

$$y_{si} = 1 - (1 - s_i) \left\{ \exp - (w_{0i} \frac{f_i}{1 - s_i}) \left( \frac{(1 - s_i) f_0}{f_i} \right)^K \right\} - s_i$$

となり整理すると

$$y_{si} = (1 - s_i) \left\{ 1 - \exp - (w_{0i} \frac{f_i}{1 - s_i}) \left( \frac{(1 - s_i) f_0}{f_i} \right)^K \right\} \quad (5)$$

となりさらに

$$p_{si} = \exp - (w_{0i} \frac{f_i}{1 - s_i}) \left( \frac{(1 - s_i) f_0}{f_i} \right)^K \quad (6)$$

とおくと (5) 式はつぎのように書くことができる.

$$y_{si} = (1 - s_i)(1 - p_{si}) \quad (7)$$

したがってこのときの総合集じん率を $\eta_s$ とすると(2)式より

$$\eta_s = 1 - \{1 - (1 - s_1)(1 - p_{s1})\} \{1 - (1 - s_2)(1 - p_{s2})\} \cdots \{1 - (1 - s_n)(1 - p_{sn})\} \cdots \{1 - (1 - s_n)(1 - p_{sn})\} \quad (8)$$

となる. 実際の計算では第3章の仮定により

$$s_1 = s_2 = \cdots = s_i = \cdots = s_n = s$$

$$f_1 = f_2 = \cdots = f_i = \cdots = f_n = f$$

としました(3)式の定数は $f_0 = 30s/m$ ,  $K = 0.166$ とする.

(8)式により $\eta_s$ を計算するには(6)式の $p_{si}$ が必要であり $p_{si}$ を計算するにはスニーケージがないときの第*i*区の見かけの粒子移動速度 $w_{0i}$ の値が必要である. この場合EP全体としてのスニーケージがないときの粒子移動速度 $w_0$ は与えられるものとすれば $w_{0i}$ はつぎのようにして求められる. すなわち各区のSCAは等しいからEP入口から第*i*区出口までの集じん率 $\eta_i$ は

$$\eta_i = 1 - \exp - (w_{0i} \frac{f}{n}) \left( \frac{nf_0}{if} \right)^K \quad (9)$$

でありしたがってスニーケージがないときの第*i*区の集じん率 $y_{0i}$ は

$$y_{0i} = \frac{(1 - \eta_{i-1}) - (1 - \eta_i)}{1 - \eta_{i-1}} = \frac{\eta_i - \eta_{i-1}}{1 - \eta_{i-1}} \quad (10)$$

となるから $w_{0i}$ は次式で計算することができる.

$$w_{0i} = \{-\ln(1 - y_{0i})\} \left( \frac{if}{nf_0} \right)^K \frac{f}{n} \quad (11)$$

なお計算条件として $w_0$ の代りに総合集じん率 $\eta_0$ が与えられた場合は次式により $w_0$ に換算する.

$$w_0 = \{-\ln(1 - \eta_0)\} \left( \frac{f}{f_0} \right)^K \frac{f}{n} \quad (12)$$

### 5. 計算結果とその検討

計算は前章で求めた諸式を用いてつぎの手順で行った.

- (i)  $w_0$ が $\eta_0$ のいずれかひとつおよび $f$ ,  $n$ ,  $s$ の値を指定する.
- (ii)  $\eta_0$ が与えられたときはこれを(12)式により $w_0$ に換算する.
- (iii) (9), (10)式により $y_{0i}$ を求める. ( $i=1 \sim n$ )
- (iv) (11)式により $w_{0i}$ を求める. ( $i=1 \sim n$ )
- (v) (6)式により $p_{si}$ を求める. ( $i=1 \sim n$ )
- (vi) (8)式により $\eta_s$ を求める.
- (vii) (i)の設定値を変えて同様な計算をくりかえす.

このようにして計算した結果をまとめるとFig. 2以降のようなグラフになった. 以下においてこれらのグラフにもとづいてスニーケージが集じん率にどのように影響するかを検討する.

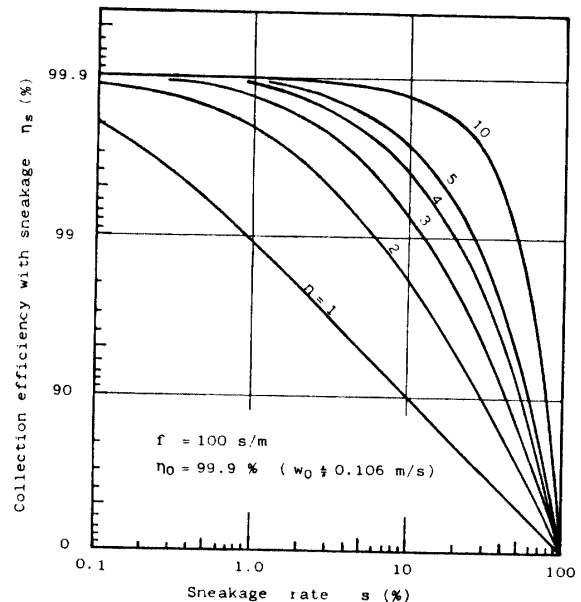


Fig. 2 Effect of sneeage rate and number of section on the collection efficiency. ( $f=100s/m$ )

- (1) Fig. 2はSCAつまり $f$ が $100s/m$ で不変としてスニーケージがないときの集じん率 $\eta_0$ が99.9%のときにスニーケージ率 $s$ と構成区数 $n$ が総合集じん率 $\eta_s$ にどのように影響するかを表わしている. 本図から $s$ の増大により $\eta_s$ は低下するが低下の度合は $n$ の大小によって大巾に異なり $n$ が大きいほど $\eta_s$ の低下が少いことがわかる.
- (2) Fig. 3の(A), (B)は同じく $f$ が $100s/m$ のときに $\eta_0$ と $s$ の大きさが $\eta_s$ にどのようにひびくかを(A)は1区構成, (B)は4区構成の場合について示す. これらの図からつぎのことがわかる. すなわち $f$ が不変のときはスニーケージのために $\eta_s$ は $\eta_0$ に比例し

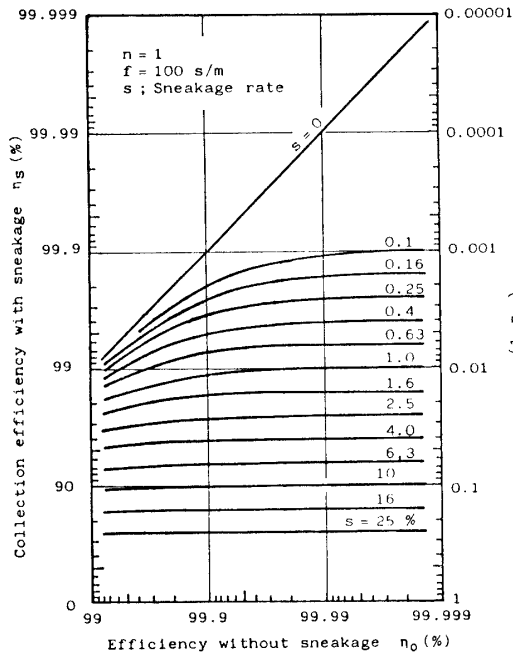


Fig. 3(A) Decline of collection efficiency on account of sneakage. ( $f=100s/m, n=1$ )

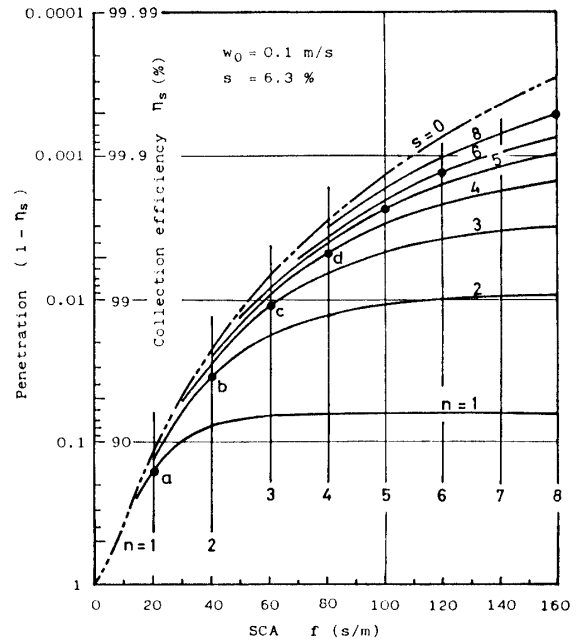


Fig. 4(A) Relation between the collection efficiency with SCA for different number of section. ( $s=6.3\%$ )

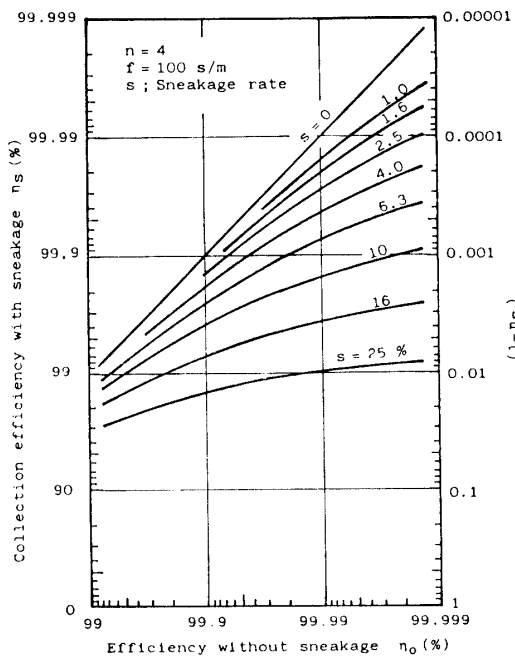


Fig. 3(B) Decline of collection efficiency on account of sneakage. ( $f=100s/m, n=4$ )

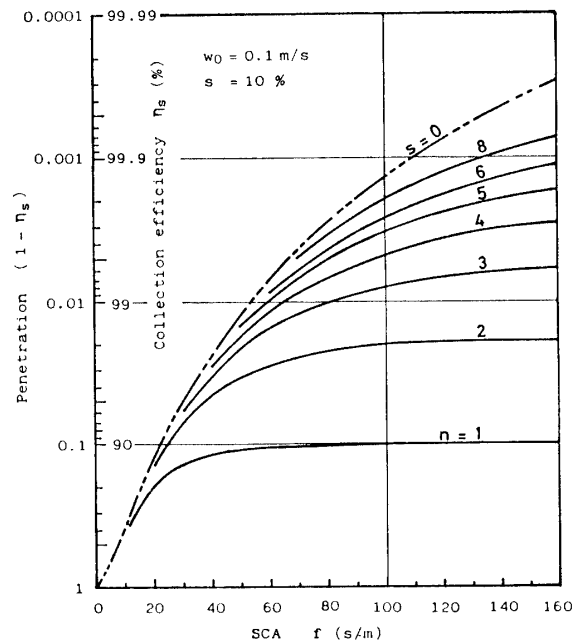


Fig. 4(B) Relation between the collection efficiency with SCA for different number of section. ( $s=10\%$ )

て大きくなることができず  $s$  の値に応じた  $\eta_0$  よりも低い値で飽和する。そしてこの傾向は  $n$  が 1 のときにもっとも顕著で  $n$  の増大につれて緩和される。

(3) Fig. 2 および Fig. 3 は SCA を  $100s/m$  で一定として

いるため実際の EP の特性とむすびつけて検討しにくいうらみがある。そこで Fig. 4 以降は一般によく

用いられるグラフと同様に横軸をSCAにしてまとめた。Fig. 4(A), (B)は $f$ に対応する $\eta_s$ の値が $n$ のちがいに  
よりどのように変るかをスニーケージがないときの見  
かけの粒子移動速度 $w_0$ を0.1m/sとして $s$ が6.3%のとき  
を(A)に、10%のときを(B)に示す。図中の二点鎖線は $s=0$ つまりスニーケージがないときの本来の  
特性を、実線はスニーケージが発生した場合で構成区  
数がそれぞれ添記された $n$ の値であるときの特性である。

実際のEPでは1区当りのSCAの大きさ $f_u$ の値はほ  
ぼきまっており通常20~30s/m程度にとられるから $f$   
の大きい装置では $n$ も大きくなっている。そこでFig.  
4(A)において $f_u$ を20s/mとして各区の境界を記入する  
と $n$ の値を添記したたて線となる。したがってこれら  
のたて線と実線の曲線の $n$ の値が同じもの同志の交点  
a, b, c, ...は $f_u$ が20s/mの場合の1区, 2区...の出口  
における集じん率を示しておりしたがってこれらの  
点を順次むすんで得られる曲線は $f_u = 20s/m$ ,  $w_0$   
=0.1m/s,  $s=6.3%$ のときの $f$ と $\eta_s$ の関係を示すこと  
になる。

(4) Fig. 4(A)からは $f \sim \eta_s$ 曲線は $s$ が6.3%のとき  
の本しか得られないので $s$ と $w_0$ の値を変えて同様な操  
作をくりかえすとFig. 5(A), (B)ができる。(A)は  
 $w_0$ が0.1m/s, (B)は0.125m/sの場合である。(図  
中の数表ならびに点線の曲線については後述)こ

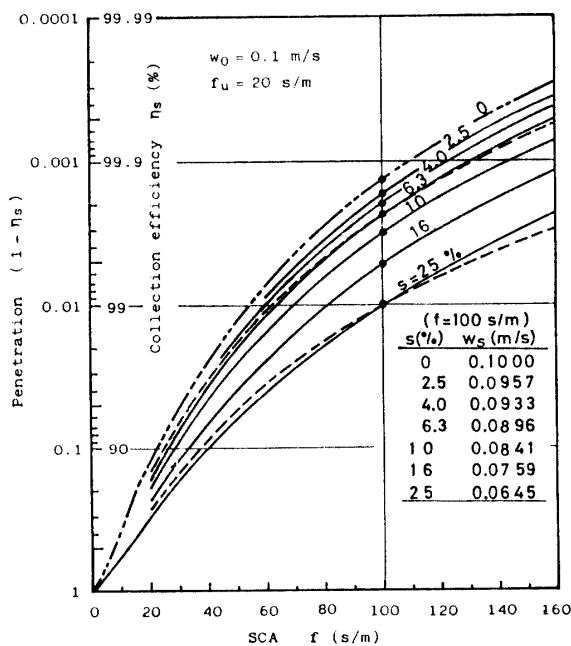


Fig. 5(A) Relation between the collection efficiency with SCA for different sneeage rate. ( $w_0 = 0.1m/s$ )

これらの図から $s$ の大小により $f$ と $\eta_s$ の関係がどのよ  
うに変化するかがわかる。

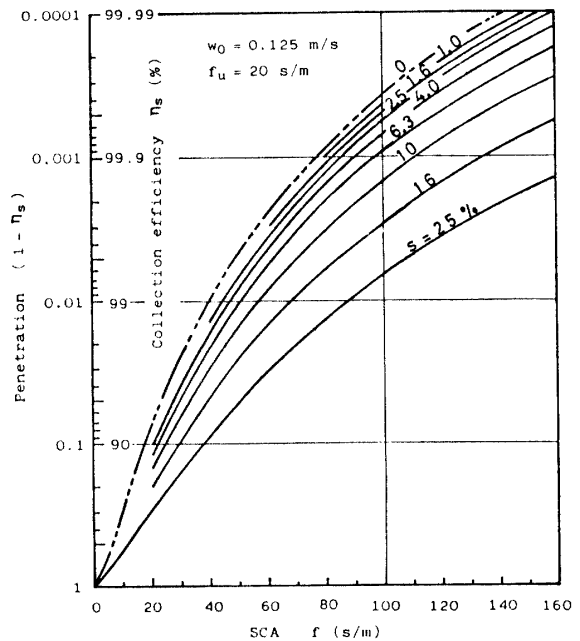


Fig. 5(B) Relation between the collection efficiency with SCA for different sneeage rate. ( $w_0 = 0.125m/s$ )

(5) Fig. 5における二点鎖線と実線を含めた曲線群は  
(3)式で $w_F$ の値を変えて得られる曲線群(たと  
えば参考文献3)中の図6)と形状がよく似てい  
る。このことから $s=0$ の二点鎖線も含めた各 $s$ 値の  
曲線群の間には相似関係が成り立ちしたがってこ  
れらの曲線群は二点鎖線の曲線を計算した(3)  
式を用いて算出できる可能性がある。このことを  
確かめるためにまずFig. 5(A)中で $f=100s/m$ にお  
ける各曲線の $\eta_s$ の値に対応する見かけの粒子移動速度  
 $w_s$ を

$$w_s = \left\{ -\ln(1 - \eta_s) \left( \frac{f}{f_0} \right)^K \right\} / f \quad (13)$$

として逆算すると図中の表のごとくなる。したが  
って上記の相似関係があるならばこれらの $w_s$ の値を  
(3)式に入れて得られる曲線はもとの各曲線と  
一致するはずである。そして $s$ を6.3および25%にと  
ってこの計算をしてみると図中の点線の曲線とな  
り、 $s$ が25%と極端に大きいときは両者のちがいが  
やや目につくが6.3%ではちがいは実用上無視でき  
る程度によく一致している。したがってこの相似  
関係は $s$ がとくに大きくないかぎり近似的に成立す

るとみてよい。

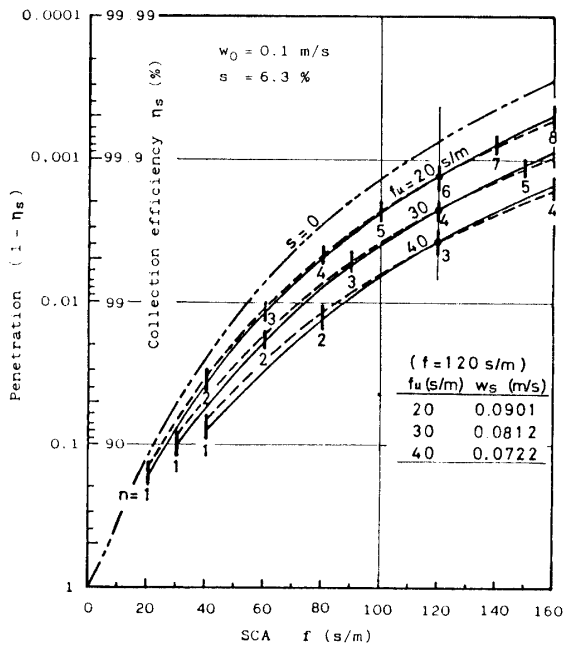


Fig. 6 Similarity character of the collection efficiency for different value of SCA per section.

Fig. 5(A)は $f_u$ が20s/mの場合であるが $f_u$ を20, 30, および40s/mとした場合はFig. 6のようになり $f_u$ が大きくなるつまり同一 $f$ に対する $n$ が小さくなるほど相似関係は悪くなっている。しかし実機における $f_u$ は通常30s/mよりあまり大きくはとれないから実

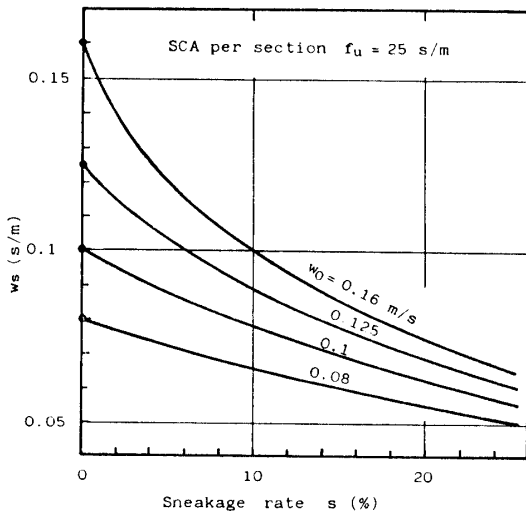


Fig. 7 Effect of sneakage rate to apparent migration velocity of dust.

際にはあまり大きな誤差にはならない。結果として、EPの通常の運転条件下においてはスニーケージがないときと発生しているときの集じん率特性の間には近似的に相似関係が成立し、両者は同一比例則の式を用いて見かけの粒子移動速度の値を変えることにより計算できることになる。ただし計算誤差は見かけの粒子移動速度、スニーケージ率および1区当りのSCA値のいずれが大きくなっても大きくなる。

(6) Fig. 7はこのように相似関係が成立するときの見かけの粒子移動速度 $w_s$ とスニーケージ率 $s$ の関係を示しており $f$ が100s/mのときを基準とし $f_u$ が25s/mの場合について $w_0$ が0.08, 0.1, 0.125および0.16m/sに対応する $w_s$ の値を示す。図から $w_0$ の値の大きいものほどスニーケージの影響を強くうけることがわかる。

(7) いままでの検討は1区当りのSCA値 $f_u$ を一定として構成区数 $n$ を増減してEPのSCA値 $f$ を変化させた場合に対するものであった。しかしSCAの大きさは同一EPにおいてガス流量を増減しても当然変化する。そしてこの場合は $n$ が不変で $f_u$ が変化することになるからスニーケージの集じん率への影響のしかたも今までの検討結果とは異なる様相となる。たとえば前者つまり $f$ を変化させるのに $n$ を増減

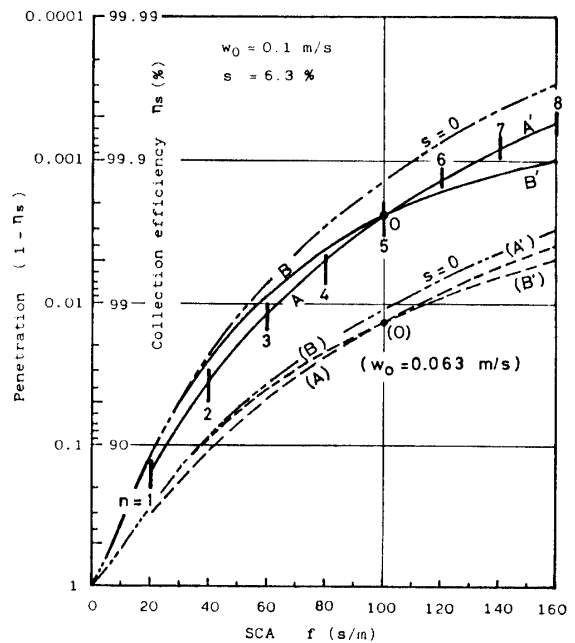


Fig. 8 Comparison of collection efficiency character between the case of number of section is constant and value of SCA per section is constant when SCA is changed.

する場合で $w_0=0.1\text{m/s}$ ,  $f_u=20\text{s/m}$ ,  $s=6.3\%$ のときの特性はFig. 5(A)中の6.3%の曲線であり、後者つまり $n$ は不変で $f_u$ を増減する場合で $s=6.3\%$ ,  $n=5$ のときの特性はFig. 4(A)中の $n=5$ の曲線である。そこでこのふたつの曲線を重ねてみるとFig. 8のようになり前者がA-O-A', 後者がB-O-B'で両者は一致せず $f=100\text{s/m}$ のO点で交っている。

したがってO点で運転されていたEPのガス流量を減少してSCAを大きくして行くと集じん率 $\eta_s$ はO-B'に沿って変化するからO-A'つまり $f_u$ 一定で $n$ を増加したときの $\eta_s$ よりも低い値になる。また逆にガス流量を増加して $f$ を小さくしたときの $\eta_s$ はO-B'に沿って変化するから $n$ を減少したときのO-Aの値よりも高くなる。そしてこの傾向は $w_0$ ,  $f_u$ および $s$ のいずれが大きくなっても当然顕著になる。逆に言えばこれらの値が小さいほど両者の特性は近くなる。たとえば図中の点線の曲線(A)-(O)-(A')および(B)-(O)-(B')は比較のために $w_0$ を0.063と小さくした場合の特性であるが実線の0.1m/sの場合と比べて両特性はかなり近づいている。

SCAが変化したときの集じん率の変化の実測データは実験しやすいこともあって同一EPにおいて処理ガス量の増減によりSCA値を変化させて採取されることが多い。一方EPのスケールアップあるいはダウンは通常一区当りのSCA値は一定にして構成区数を増減して行われる。したがって上記のような実測データをそのまま設計のベースにすると前述の曲線A-O-A'とB-O-B'のちがひにより集じん率の予測をあやまる恐れがある。

## 7. まとめ

見かけの粒子移動速度をパラメータとするEPの集じん率に関するDeutschの式の新修正式を用いてEP内のガススニーケージが集じん率に及ぼす影響の推算を行い計算結果の検討によりつぎの所見が得られた。

- (1) SCAが一定の場合は構成区数が多いつまり1区当りのSCA値が小さいほど集じん率に対するスニーケージの影響は少い。またスニーケージがあるときの集じん率はないときつまり本来の集じん率を高くしてもそれに比例して高くはならずスニーケージ率に応じたそれよりも低い値で飽和する。この傾向はスニーケージ率が大きいほどまた構成区数が少いほど顕著である。
- (2) 1区当りのSCA値は同じで構成区数を増減してSCAを変化させる場合は、スニーケージ率が変化

した場合の集じん率特性の間には近似的に相似関係が成立しこれらは同一相似則の式において見かけの粒子移動速度を変えることにより計算できる。ただしこの相似関係は見かけの粒子移動速度、スニーケージ率および1区当りのSCA値が大きくなるほど誤差が大きくなる。

- (3) 構成区数および集じん面積が不変つまり同一のEPにおいて処理ガス量を増減してSCAを変化させるつまり1区当りのSCA値を変化させて全体のSCAを変化させる場合は前記(2)の特性に比べて集じん率はSCAを大きくした場合は低く、小さくした場合は高くなる。そしてこの傾向は見かけの粒子移動速度、スニーケージ率および1区当りのSCA値の大きいほど顕著である。

本報告では所定の大きさのスニーケージが発生するとそれがEPの集じん率にどのように影響するかを計算データの面から検討した。したがってこの検討結果と実機データの対比ならびにスニーケージの発生機構の解明によるその発生率の予測手法の確立が必要でありこれらについては今後の課題としたい。

おわりに本研究に対しご支援ご指導をいただいた足立宜良(大分大学教授), 大久保利一(大分大学助手), 早野延男(本学教授)ならびに計算を手伝っていただいた奥野雅之, 木村頼明(当時卒論生)の諸氏に深く感謝する。

## 記号説明

- $f$ ; 線対平板型あるいはこれに準じる電気集じん装置(EP)の比集じん面積(SCA)(s/m)
- $f_i$ ; 任意の第*i*区のSCAの値(s/m)
- $f_u$ ; 1区当りのSCAの値(s/m)
- $n$ ; EPの構成区数(—)
- $p_{si}$ ; (6)式によって表わされる通過率(—)
- $Q$ ; EPを通過するガスの全流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $q_e$ ; 完全バイパスの状態に換算されたスニーケージ流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $s$ ; スニーケージ率(—または%)
- $s_i$ ; 第*i*区におけるスニーケージ率(—または%)
- $w_F$ ; Deutschの式の新修正式における見かけの粒子移動速度(m/s)
- $w_0$ ; スニーケージがないときの $w_F$ (m/s)
- $w_s$ ; スニーケージがあるときの $w_F$ (m/s)
- $\eta$ ; EPの集じん率(—または%)
- $\eta_0$ ; スニーケージがないときの $\eta$ (—または%)
- $\eta_s$ ; スニーケージがあるときの $\eta$ (—または%)

$\eta_i$ ; EP 入口から第*i*区出口までの集じん率 (一または%)

$\eta_{0i}$ ; スニーケージがないときの $\eta_i$  (一または%)

#### 参 考 文 献

- 1) Jack R. McDonald and Alan H. Dean ; A Manual for Use of Electrostatic Precipitators to collect Fly Ash Particles, Alabama (1980) p 446
- 2) 藤村謙祐, 大久保利一, 足立宜良・電気学会研究会資料 ES-82-9 (1982)
- 3) 藤村謙祐, 足立宜良・静電気学会誌 **6**, 312 (1982)
- 4) John P. Gooch and Norman L. Francis; Journal of Air Pollution Control Association, **25**, 108 (1975)
- 5) W. Deutsch; Ann. Physik, **68**, 335 (1922)
- 6) S. Matts; Proc. of CSIRO Conf. on Electrostatic Precipitator, (1978) p 3-1

(昭和59年10月8日受理)