

洗淨集塵における蒸気噴射効果に関する研究

(第2報 凝縮水滴量の影響)

門脇 重道*・竹本 貞人**・上野 五郎***

An Experimental Study on Steam Injection Effects into The Wet Dust Scrubber

—2nd Report Effects of The Quantity of Condensed—

Shigemichi KADOWAKI, Sadato TAKEMOTO and Gorō UENO

Abstract

It is obvious that steam injection into the wet dust scrubber with whitecarbon as dust improves scrubber performance. Experimental results show that the quantity of steam condensing is related to scrubber performance. So it is considered that the major mechanism of the collection is particle build up.

The simple model is used to calculate the quantity of steam condensing.

1. 緒 言

1 μ 以下の微粒子は人体に有害であるので、発生源において除去する必要があるが、従来の集塵器ではなかなか困難である。そこで Wilson の霧箱の原理を応用した集塵装置が考えられている。すなわち蒸気が凝縮する時、微粒子を核として水滴ができるため、微粒子のみかけの粒径が大きくなり、分離捕集が容易になることを利用したものである。P.J. Shauer¹⁾は蒸気エゼクタのノズル形状が最適の時、0.3 μ の粉塵を用いて99.8%の捕集効率が得られたことを報告しているが、蒸気エゼクタを用いるため、消費蒸気量が大きく、蒸気圧力も高いという欠点を持っている。K.T. Semrau²⁾は、洗淨集塵における洗淨水に冷水と温水を用いて実験を行ない、冷水を用いた場合の方が捕集効率が高くなることを実験的に確めている。彼等は冷水によって捕集効率が高くなるのは蒸気の凝縮作用によるものであると述べその凝縮過程にはスウィープ・ディフュージョン (Sweep diffusion) とフォグ・メイキング (Fog making) とがあると指摘している。Sweep diffusionとは、蒸気が凝縮しつつある時、凝縮水滴の方向に蒸気の流れが生じ、流れに乗った粉塵が水滴との

衝突により捕集されることである。また Fog making とは、微小水滴のまわりにガス・フィルムが形成され、粉塵は核として働き、まわりの蒸気がそれに凝縮して粒径が増大することである。B.W. Lancaster³⁾は湿式サイクロンによる集塵で蒸気噴射による捕集効率の上昇を確認し、効率の上昇は蒸気凝縮過程のうちのビルドアップ (Buildup) によるものであり、Sweep diffusion によるものではないと実験結果をもとに述べている。Buildupとは Fog making と同じ現象のことである。

そして蒸気噴射量が効率に関係するとして実験式を与え、凝縮水滴量には影響を受けないと結論している。またノズル形状、蒸気滞留時間、乱れによる凝集等の影響も小さいと述べている。

筆者らは第一報⁴⁾でも述べたように、充填塔を用いた集塵では粉塵粒子径が小さい場合に、すなわち粉体としてホワイトカーボンを用いた時に、蒸気噴射の効果があるという結果を得ている。また蒸気量を増加させても捕集効率に上限があることが確認されている。

そこで筆者らは、蒸気噴射によって生じる凝縮水滴を有効に捕集するために、ノズル直後にオリフィスクラブを設置して捕集効率を高めることを試みた。また蒸気噴射効果の機構としては凝縮核効果によるものであることが、第一報の顕微鏡写真や B.W. Lancaster らの研究からも明らかであるので、凝縮核効果によ

* 機械工学科

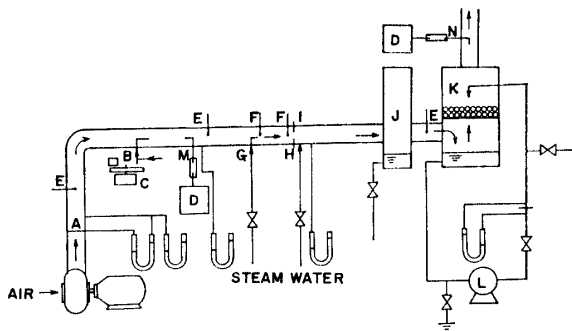
** 東洋曹達工業 K.K.

*** 徳山工業高等専門学校

て発生する凝縮水滴量と捕集効率との関係を明らかにしようとした。合わせてオリフィスクラバの供給水量の影響や、蒸気の凝縮に関与すると思われるオリフィスクラバと蒸気噴射ノズルとの距離による影響も調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。ブローヤから送られた空気は B 点で粉塵供給装置から供給される粉塵と混合し、その下流では粉塵濃度測定のための吸引が行なわれる。G 点で蒸気噴射ノズルから蒸気を供給され、蒸気と混合した空気はオリフィスクラバへ入りオリフィスクラバ供給水と衝突して凝縮水滴の捕集が行なわれる。その後流れは充填塔に入り、洗浄水でぬれたプラスチック球の層を通りぬけて、エリミネータで水滴が除去された後戸外へ排出される。その途中で再び粉塵濃度の測定のためのサンプリングが行なわれる。



- A: Pitot tube
- B: Dust injection point
- C: Dust supply device
- D: Dust suction device
- E: Thermometer
- F: Thermocouple
- G: Steam injection point
- H: Water injection point
- I: Orifice
- J: Air chamber
- K: Spray tower
- L: Pump

Fig. 1 Layout of apparatus

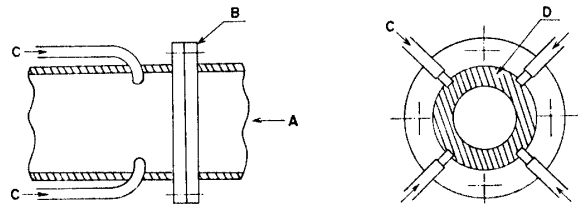
オリフィスクラバの概略図を Fig. 2 に示す。オリフィスクラバはベンチュリクラバと原理はまったく同じで、高速の気流に水を噴射することにより、気流中の粉塵と霧化してできた水滴との衝突によって集塵を行なう。実験に用いたオリフィスは断面積比が 1/2 になるもので、オリフィス直後で直径 6.5mm のノズルから水が噴射される。

蒸気は圧力 0.4~0.5 kg/cm² で Fig. 3 に示すノズルから噴射される。ノズルからオリフィスクラバへの距離を変化させるため、Fig. 4 に示すような短管をオリフィス前に設けた。これによりノズル位置はオリフ

イスの位置から 100mm 間隔で 1200mm まで変化させる。

使用粉体はホワイトカーボンで、平均粒径 $1.6 \times 10^{-2} \mu$ の非常に微細な粉体で、白色・弱吸湿性である。粉塵濃度は JIS Z 8808 により測定された。

実験条件としては第一報からわかるように、最高効率を得られる管内平均風速 20 m/s、充填塔供給水量 $6 l/m^3$ の条件であり、実験精度を高めるため粉塵濃度は $250 mg/Nm^3$ とした。水蒸気量は 6, 13, 20, 40, $48 g/m^3$ と変化させ、オリフィスクラバ供給水量も 0.46, 0.93, 1.48, 1.85, $2.78 l/m^3$ と変化させて実験を行なった。



- A: Gas flow
- B: Flange
- C: Water
- D: Orifice

Fig. 2 Orifice scrubber

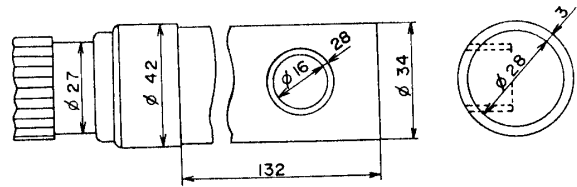


Fig. 3 Steam injection nozzle

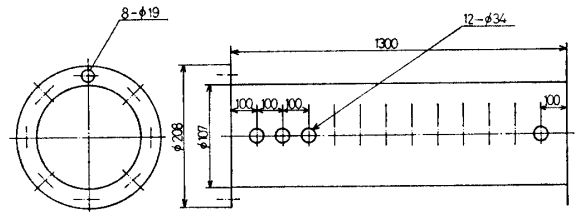


Fig. 4 Short pipe

3. 実験結果および考察

3.1 オリフィスクラバ設置の影響

蒸気噴射による凝縮水滴を有効に捕集するためオリフィスクラバを設けた。Fig. 5 にオリフィスクラバを設けた場合の効果を示している。これによると、オリフィスクラバがない場合には、噴射蒸気量の増加にともない効率もある程度上昇するが、さらに蒸気

量を増加させると、効率は低下する傾向にある。これに対してオリフィスクラバを設けると、蒸気量の増加とともに捕集効率は上昇する。このことは、蒸気噴射によって発生する凝縮水滴を有効に捕集すると捕集効率も上昇することを示しているものと考えられる。

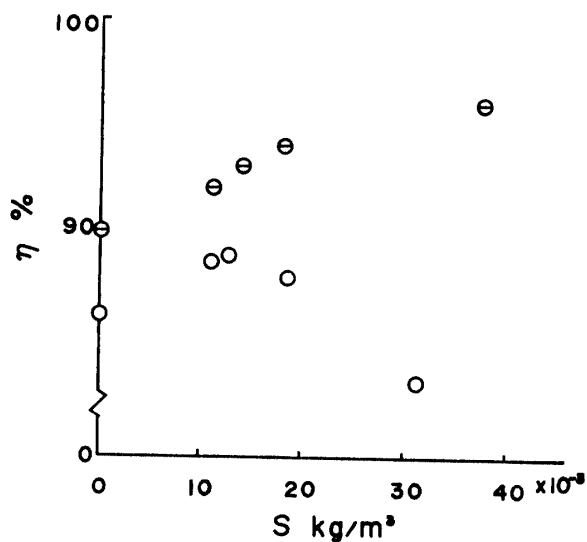


Fig. 5 Relation between quantity of steam injection and scrubber performance.
Experimental conditions: dust load, 50 mg/N m³
⊖, with orifice scrubber ○, without orifice scrubber

3.2 オリフィスクラバ供給水量の影響

オリフィスクラバへの供給水量によって、霧化される水滴径が影響を受けることは、抜山・棚沢⁵⁾によ

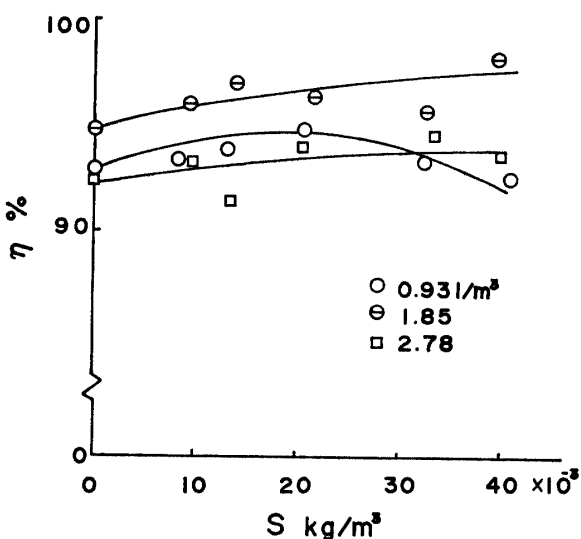


Fig. 6 Relation between quantity of steam injection and scrubber performance for some quantities of water injection

って明らかにされており、筆者らは上岡⁶⁾の提案した衝突係数の式より、水滴一個に対する衝突効率を算出して、オリフィスクラバでミクロンの大きさの水滴が十分捕集できることを明らかにした⁷⁾。Fig. 6にオリフィスクラバ供給水量が捕集効率におよぼす影響を示している。これによると供給水量が 0.93 l/m³の時に比して 1.85 l/m³の場合が捕集効率は上昇し、さらに 2.78 l/m³になると捕集効率は低下している。これは供給水が霧化してできる水滴径が大きくなり、衝突効率が悪くなるためと考えられる。そこで実験では 1.85 l/m³の供給水量を用いた。

3.3 噴射蒸気量の効率におよぼす影響

オリフィスクラバを設け、供給水量を 1.85 l/m³とした時、噴射蒸気量によって捕集効率がどのような影響を受けるか実験を行なった。また噴射蒸気量の凝縮状態に影響を与えらると思われる、ノズルとオリフィスとの距離を変化させた場合の実験も合わせて行なった。

Fig. 7 はオリフィスからのノズル距離が約 500 mm の位置で固定した時の噴射蒸気量と効率との関係を示すものである。多少のばらつきはあるが、蒸気量の増加とともに効率は上昇する。Fig. 8 はノズル距離を変化させた時のもので、ノズル距離が大きくなるにつれて効率がごくわずかに上昇する傾向にある。これは距離が長いほど、蒸気と空気の混合がよく行なわれ、凝縮が進むためと考えられる。また全体的には、蒸気量

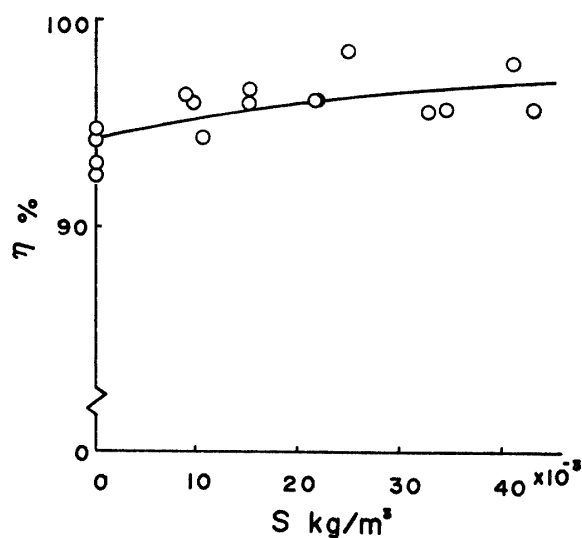


Fig. 7 Relation between quantity of steam injection and scrubber performance for case the distance from orifice to nozzle is about 500 mm.

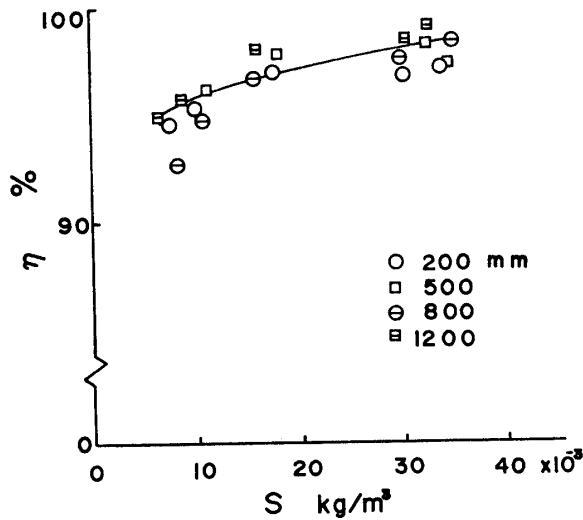


Fig. 8 Relation between quantity of steam injection and scrubber performance for some distances from orifice to nozzle

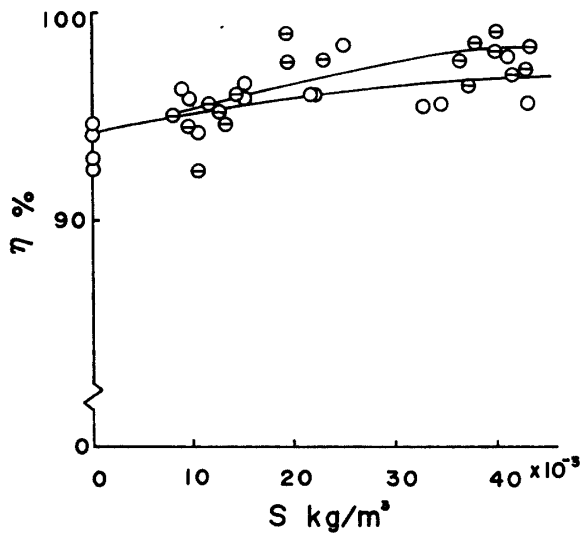


Fig. 9 Relation between quantity of steam injection and scrubber performance.

Experimental conditions: ⊙, change of distance from orifice to nozzle ○, fixed nozzle

が増す程、捕集効率が上昇する傾向がある。

Fig. 9はFig. 7とFig. 8を合わせて表わしたものであるが、この図からわかるように蒸気量の増加による効率の上昇の割合が異なっている。これはFig. 7とFig. 8の500mmがノズル距離がほぼ等しいことから考えると矛盾している。しかしこれは逆に言う、噴射蒸気量と捕集効率とを関係づけることが誤りであることを示している。すなわち入口空気条件が異なれば同一蒸気量でも凝縮水滴量は異なっているはずであるから、凝縮核としてとりこまれる粉塵量も異なる。

オリフィススクラバの効率は同一としても凝縮水滴量が増大すれば、粉塵の捕集量も大きくなり、効率は上昇すると考えられる。そこで凝縮水滴量と捕集効率との関係で実験データを整理してみる。

3.4 凝縮水滴量による整理

3.4.1 凝縮水滴量の算出

凝縮水滴量を実験的に求めることは困難であるので、実験値より算出する。そのためFig. 10のようなモデルを考える。ノズルから噴射された蒸気は周囲の空気をまき込みながら断面IIに達する。蒸気は空気と混合しながら飽和度1に達すると瞬時的に凝縮するものとし、断面IIでは噴射蒸気量Hとまき込み空気量Eとが完全に混合して、飽和湿り空気と凝縮水滴になると仮定する。そこで検査面における断面Iと断面IIとで物質と熱との収支を考えると次式のようなになる。

$$H - E(x_2 - x_1) = D \quad (1)$$

$$D \cdot i_{2D} + E \cdot i_2 = E \cdot i_1 + H \cdot i_H \quad (2)$$

ここで

H : 噴射蒸気量 kg/h

E : まき込み乾燥空気重量 kg/h

D : 凝縮水滴量 kg/h

i_1 : まき込み空気エンタルピ kcal/kg

i_2 : 混合後空気エンタルピ kcal/kg

i_{2D} : 凝縮水滴のエンタルピ kcal/kg

i_H : 噴射蒸気のエンタルピ kcal/kg

x_1 : まき込み空気絶対湿度 kg/kg

x_2 : 混合後空気絶対湿度 kg/kg

(1)式は水分についての物質収支の式であり、(2)式は熱収支の式である。この二式から断面IIまでに蒸気がまき込んだ空気量と凝縮水滴量とが各々次のように求まる。

$$E = (i_H - i_{2D}) \cdot H / \{(i_2 - i_1) - i_{2D} \cdot (x_2 - x_1)\} \quad (3)$$

$$D = \{H \cdot (i_1 - i_2) + i_H(x_2 - x_1)\} / \{i_{2D}(x_2 - x_1) + (i_1 - i_2)\} \quad (4)$$

(4)式より断面IIの温度を仮定し、各々の実験条件を代入すると、その時の凝縮水滴量が求まる。Fig. 11は断面IIの温度を仮定して求めた凝縮水滴量の一例である。この図からわかるように、蒸気は空気と混合して冷却されるにつれて、水滴量は漸次増加し、ある温度で最高値を示した後急激に減少して行く。この曲線にオリフィススクラバ直前での温度を測定してあてはめると、凝縮水滴量と凝縮の状態が判明する。たとえ

ばオリフィス前温度が水滴量の最高値の温度より高いならば、凝縮が進行している状態でオリフィスに入り、凝縮に関与する空気量はその時のまき込み空気量となる。オリフィス前温度が水滴量の最高値の温度より低いならば、再蒸発しながらオリフィスに入り、凝縮に有効に働くまき込み空気量は水滴量最高値を示す点での空気量となる。

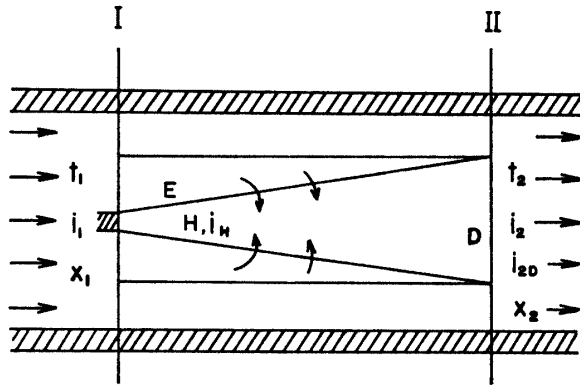


Fig. 10 Model of steam injection

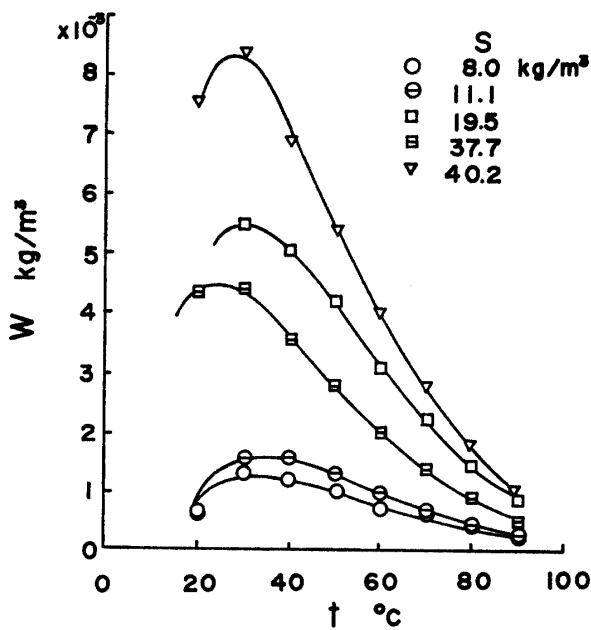


Fig. 11 Condensed quantity calculated from temperature taken in front of orifice

3.4.2 凝縮水滴量と捕集効率との関係

前述の計算方法によって凝縮水滴量を算出してFig. 7, 8, 9の蒸気量と効率との関係を整理し直したものがFig. 12, 13, 14である。Fig. 7がFig. 12に対応し、Fig. 8はFig. 13に対応している。凝縮水滴量により整理すると各々の曲線がほぼ重なり合うことがわかる。

Fig. 14はFig. 12とFig. 13とを合せて表わしたもので、一つの曲線で表わされる傾向によく一致している。このことは凝縮水滴量が捕集効率に決定的な影響を与えることを示しており、蒸気噴射効果が凝縮核効果によるものであることを実験的に証明していることになる。

Fig. 15はFig. 14を片対数グラフに表わしたもので、凝縮水滴量と通過率との間に直線関係があることを示している。最小自乗法でこの式を求めると次のような実験式が求められた。

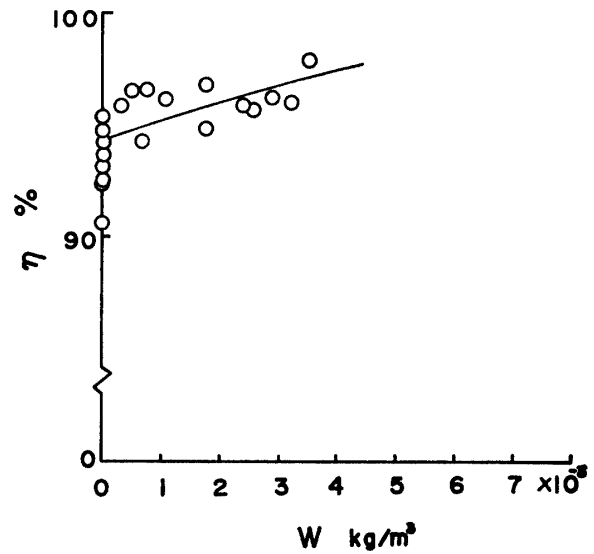


Fig. 12 Relation between condensed quantity and scrubber performance for case the distance from orifice to nozzle is about 500 mm

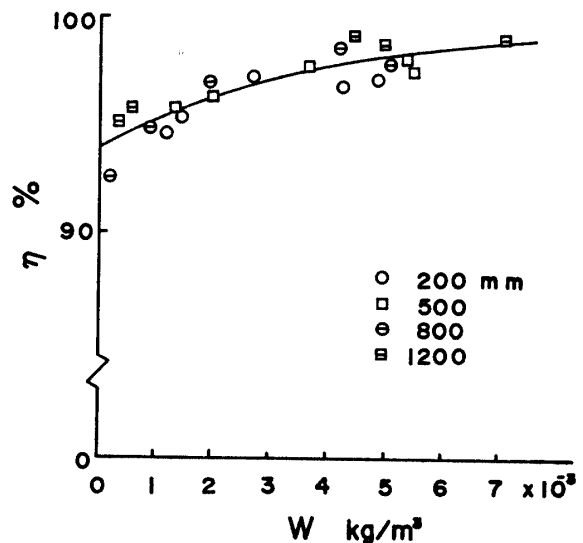


Fig. 13 Relation between condensed quantity and scrubber performance for some distances from orifice to nozzle

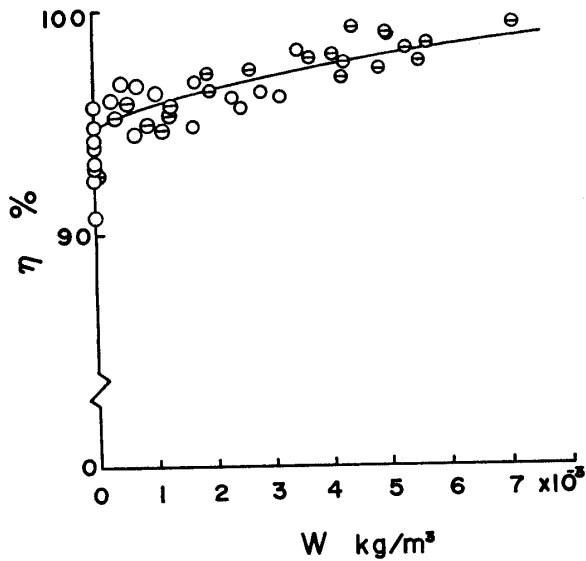


Fig. 14 Relation between condensed quantity and scrubber performance.

Experimental conditions: ⊖, change of distance from orifice to nozzle ○, fixed nozzle

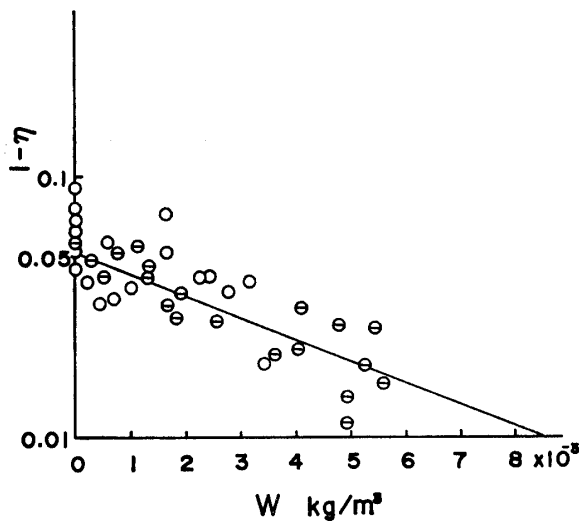


Fig. 15 Relation between condensed quantity and penetration.

Experimental condition:

⊖, change of distance from orifice to nozzle
○, fixed nozzle

$$\log(1-\eta) = -0.0837W - 1.279 \quad (5)$$

Fig. 12, 13, 14 の曲線は各々上のような方法で求められたもので、相関係数は各々0.68, 0.86, 0.67であった。

3.5 Lancaster らの結果との比較検討

Lancaster らは入口空気条件を制御し得る装置を用い、湿式サイクロンによる捕集実験を行なっている。

彼等は実験結果より、噴射蒸気量が捕集効率を決定し、凝縮水滴量は効率に無関係であるという結論を導いている。このことは前述した筆者らの実験結果と相反するものであるため、彼等の実験方法について検討してみる。彼等は噴射蒸気量を計算によって求めている。すなわち Fig. 10 のモデル図において断面 I と II の温度を実測することから、噴射蒸気量を求めている。ところが(1), (2)式より明らかであるが、蒸気量 H と凝縮水滴量 D を未知数として求めるには、まき込み空気量が既知であることが必要であり、彼等は管内空気流量をまき込み空気量として計算を行なっている。すなわち蒸気が空気流量と完全に混合するという仮定のもとに計算を行なっていることになる。しかしこの条件は十分満足されているとは考えがたく、彼等の計算蒸気量は相当な誤差を含んでいると考えられる。凝縮水滴量もこの条件で計算されており、これも誤差が大きいと考えられるので、彼等の上記の結論は不完全なものと考えられる。また彼等の結論は、彼等自身が実験的に確めた buildup の効果とも矛盾している。

筆者らは蒸気量を実測で求めており、またモデルも現象により近いものと考えられるので、算出した凝縮水滴量も信頼できるものと考えられる。そして筆者らが顕微鏡写真で確認した凝縮核効果や同一の現象であるが、Lancaster らが実験的に確認した buildup 効果は凝縮水滴量によって表わすことができることを考えると、筆者らの結果、すなわち凝縮水滴量が捕集効率を決定するという結果は妥当なものと言える。

3.6 空気温度の影響

空気温度によって凝縮水滴量が影響を受け、捕集効

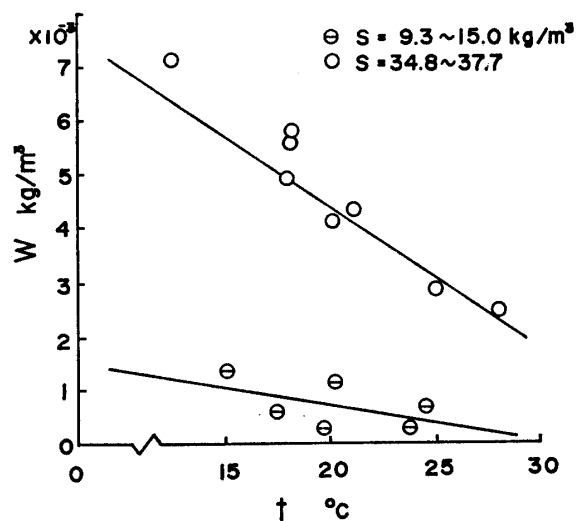


Fig. 16 Relation between inlet air temperature and condensed quantity

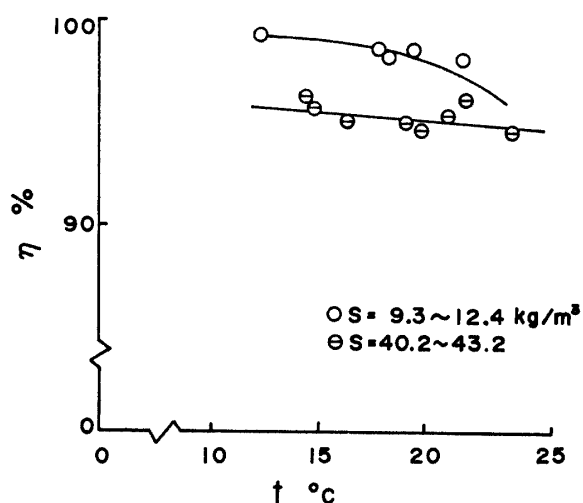


Fig. 17 Relation between inlet air temperature and scrubber performance

率が影響を受けることは、これまでの考察の中で明らかである。Fig. 16 に空気温度の変化による凝縮水滴量の影響を、Fig. 17 には捕集効率の影響を表わす。Fig. 16 より空気温度が高くなると凝縮水滴量は減少しその傾向は蒸気量が大きいほど顕著である。Fig. 17 でも空気温度が上昇すると、効率は低下し蒸気量が大きい方が低下する割合が著しい。これらのことは、空気温度が低い方が凝縮水滴量も多く、捕集効率が上昇することを示している。

4. 結 論

1) オリフィススクラバを設けることにより、凝縮

水滴を有効に捕集して集塵効率を上昇させることができる。

2) 凝縮水滴量が捕集効率を決定することがわかり、凝縮核効果を確認した。

3) 空気温度が低いほど、凝縮水滴量は増加し、捕集効率も上昇する。

おわりに、本研究に貴重な助言をいただいた本学大坂英雄講師に感謝するとともに、実験に協力された、安部伸樹・飯山和友・今川祐二・今村好博・黒木隆憲・齊藤誠一郎の諸君に感謝いたします。

使用記号

S : 噴射蒸気量 kg/m^3

W : 凝縮水滴量 kg/m^3

η : 捕集効率

参 考 文 献

- 1) P.J. Shauer: Ind. Eng. Chem. **43**, 1532 (1951)
- 2) K.T. Semurau et al: Ind. Eng. Chem. **50**, 1615(1958)
- 3) B.W. Lancaster and W. Strauss: Ind. Eng. Chem. Fundam., **10**, 362 (1971)
- 4) 上野五郎, 門脇重道, 荒谷秀治: 山口大学工学部研究報告, 27 (1976)
- 5) 抜山, 棚沢: 日本機械学会論文集, **5**, 68 (1939)
- 6) 上岡豊: ベンチュリ・スクラバ, 日刊工業 (1962) p. 42.
- 7) 安部, 飯山, 今川, 今村: 昭和49年度山口大学工学部卒業論文 (1975)

(昭和51年4月15日 受理)