垂直上昇気流中におけるワイヤメッシュデミスタの分離特性*

杉 田 英 昭** ・ 中 澤 武**
小牟田 廣 己*** ・ 真 野 康 治****

Separation Performance of Wire-mesh Demister in Vertical Upward Air Flow

By Hideaki Sugita, Takeshi Nakazawa, Hiromi Komuta, Kouji Mano

In this paper, effects of the number of the layers on the separation characteristics of the wire-mesh demister is described. The wire-mesh demister used here is constructed with galvanized iron wires 850 μ m in diameter, and is held perpendicular to the vertical upward flow of air laden with water droplets.

Experiments have been made with mesh layers from one to four layers and for mean air velocity from 0.5 to 4.0 m/s. In the case of the vertical upward air flow, the water-film on the wire-mesh surface has important influences on the size distribution of water droplets, the separation efficiency and the pressure loss coefficient.

Obtained separation performances are compared with the results predicted by theoretical analysis which has been presented before.

1. ま え が き

ワイヤメッシュデミスタは、サイクロンや折れ板形エリミネータ等の気水分離器と比較して、一般に捕集効率劣るが圧力損失は小さく、また構造が簡単で装置への取り付けが容易であることから動力プラントや各種工業プラントに広く使用されている。

筆者らはすでに水平気流中に置かれたワイヤメッシュデミスタの分離特性に関してこれまで研究を行い、その結果を発表してきたが^{1),2)}、実際のワイヤメッシュデミスタは水平方向の流れ以外に垂直上昇気流中において用いられる場合も多い。

そこで、本研究では層数を1層から4層まで変えた4種類のワイヤメッシュデミスタを対象にし、垂直上昇気流中に置かれたこれらのデミスタの粒度分布特性、捕集効率及び圧力損失を実験的に求めた。そして、すでに得られている水平気流中におけるデミスタの分離特性との比較を行い、さらにすでに発表されている理論式を用いて求めたデミスタの理論捕集効率と実験値との比較も行った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置 本実験に用いた装置の概略図を図1に示す。実験装置の主要部であるダクト③は、厚さ10 mm、有効断面120×120 mmの透明アクリル板でできており、ノズル⑥の噴霧状態やダクト及びテストセクション②の液滴同伴気流の状態を観察することができる。

空気は、シロッコファン①によって空気流量測定用のJIS規格による水平入口ノズル④から吸引されて、水平ダクトを経て、R 360 mmの曲がり部終端の整流格子⑦を通り、ほぼ均一な流れとなって垂直ダクト③に入る。ここで空気は加圧ポンプ⑧及び気流に向けて設けられた噴霧ノズル⑥によって発生した噴霧液滴と混合して垂直ダクト③内を上昇し、ダクトの断面全体を覆うようにしてはめ込んだワイヤメッシュで構成されるテストセクション②に入る。テストセクションにはできるだけ完全に空気に同伴された液滴のみが混入するように、噴霧ノズルからテストセクション入口までの距離を大きくとった。気流に同伴されない落下液滴や、垂直ダクト内壁に沿って流下する液膜は、水平ダクト底部の水封じされた排水管⑤を通して外部に排出される。

空気流量はシロッコファン①の空気出口開度を変えることによって調節し、入口ノズル④の負圧はベッツ形マノメータで測定した。また、入口ノズルは空気流量に応じて内径 ϕ 47.8 mm 及び ϕ 99.5 mm の2種類を使い分

*原稿受付 平成1年10月6日

平成元年春期学術講演(平成1年5月17日)

**正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

****学生会員 神戸商船大学大学院

図1 実験装置

けた。

2.2 供試デミスタ及び実験範囲 実験に使用したワイヤメッシュデミスタの要目を表1に示す。表中の相対投影面積 p_1 、ポイドフラクション ϵ 及び比表面積 a はそれぞれ次式で定義される。

$$p_1 = \frac{\text{ワイヤの投影面積}}{\text{デミスタの投影面積}} \quad (1)$$

$$\epsilon = 1 - \frac{\text{ワイヤによって占められる容積}}{\text{デミスタの容積}} \quad (2)$$

$$a = \frac{\text{ワイヤの表面積}}{\text{デミスタの容積}} \quad (3)$$

図2の写真は、4枚のワイヤメッシュを50mmの間隔ではめ込み、4層のデミスタとして構成されたテストセ

図2 テストセクションの写真

クションを示す。実際の使用に当たっては、1層から順次後流側にワイヤメッシュを付け加えることによって1層から4層までの4種類のデミスタとした。

実験は、噴霧ノズル圧力をゲージ圧力で0.39MPaと一定にし、平均空気速度を0.5m/sから4.0m/sまで変化させて行った。

2.3 同伴液滴の粒度分布の測定 気流に伴った液滴の粒径測定は液浸法によった。液滴を受け止めるガラス板は、図3に示す液滴捕獲器に取り付けられ、この捕獲器をデミスタ前後のダクト側板に開けた孔に水平に挿入する。捕獲器にはφ6.5mmの窓が気流方向に向かって開けられており、液滴はシャッタを開けることによってこの窓を通り、ガラス板に捕獲される。窓はダクトの断面中心に位置するようにしている。

ガラス板に塗布する受け止め液としては、高粘度である特3号シリンダ油が適しており、捕獲された液滴がガラス板に直接接触しないだけの厚さに塗ったガラス板を水平に支持しても、この短い測定時間内では油は全く垂れることはなかった。液滴を捕獲した後は素早くガラス板を捕獲器から取り出し、直ちに顕微鏡撮影し、印画紙上に100倍に焼き付けて粒径の測定を行った。この粒径測定の際、5μm毎に粒径区分を設けてそれぞれの区分範囲に含まれる1個の液滴粒子の平均質量 w_p と平均直

表1 供試デミスタの要目

ワイヤ径D	メッシュ	相対投影面積 p_1	層数N	ポイドフラクション ϵ	比表面積 a
850μm	5.03	0.30	1	0.765	11.06 cm ² /cm ³
			2	0.992	0.370
			3	0.994	0.280
			4	0.995	0.249

図3 液滴捕獲器

径 D_p をそれぞれ次式で定義した.

$$w_p = \frac{\rho_p}{5} \int_{D_1}^{D_2} \pi D_p^3 dD_p = \frac{\rho_p}{120} \pi (D_2^4 - D_1^4) \quad (4)$$

$$D_p = \left(\frac{D_2^4 - D_1^4}{20} \right)^{1/3} \quad (5)$$

ここで, ρ_p : 液滴の密度, D_1, D_2 : 液滴粒子径区分の下限及び上限の粒径.

なお, 液滴を捕獲してから顕微鏡撮影するまでに要する時間は約10秒であり, この時間内ではほとんど液滴の蒸発による影響は無視できることを確認した.

2.4 同伴液滴の質量流量の測定 同伴液滴の質量流量の測定は図4に示す捕集器を用いて行った. 液滴を付着させるガーゼはガーゼ押えによってガーゼ保持器に納められ, その保持器は操作棒によって捕集器本体の枠の中を移動することができる. 枠には□40mmの窓が開けられている.

捕集器は, 粒径測定用の捕獲器と同じように, ダクト側板の孔からダクト内へ水平に挿入される. そして, 操

図4 質量流量測定用液滴捕集器

作棒によってガーゼ保持器を窓の位置に移動して一定時間気流中に曝すことによってガーゼに液滴を付着させ, ガーゼの質量増加を0.1 mg まで測定できる精密級化学天秤にて計量することによって液滴の質量流量を求めた. このとき付着水の蒸発による影響をできるだけ少なくするために, 保持器から取り出したガーゼを素早くポリ袋に入れて計量した. なお, ガーゼ保持器の前後にラバを取り付けることによって, ワイパの働きをして窓の周辺の付着水滴がガーゼに吸い取られることなく, 正確に測定できるようになった.

3. 実験結果及び考察

3.1 デミスタ前後における液滴の粒度分布

図5は, 平均空気速度 $U=2.0\text{m/s}$, 捕獲時間 $t=1$ 秒のとき, 層数 N を変化させた場合のワイヤメッシュデミスタ前後における液滴の顕微鏡写真の一例である. 液滴の個数はデミスタ前よりデミスタ通過後の方が減少しており, その減少の程度は層数が増えるほど著しく液滴がよく捕集されていることがわかる. また, $N=1$ のとき再同伴の現象によりデミスタ前の最大径の液滴よりも大きい液滴が見られる.

これらの顕微鏡写真から得られた液滴の個数と粒径をもとに, 次式で定義される質量ひん度 f_p を求めた.

$$f_p = \frac{w_i}{\sum_i w_i} = \frac{n_i D_{pi}^3}{\sum_i n_i D_{pi}^3} \quad (6)$$

ここで, w_i : 粒径が D_{pi} である液滴の質量, n_i : 粒径が D_{pi} である液滴の個数.

図5 液滴の顕微鏡写真

また、粒度分布を定量的に表わすために、質量ひん度 f_p から求める積算残留率 R (%) を次の Rosin-Rammler 分布式で整理した。

$$R = 100 \exp(-D_p/D_e)^n = 100 \left(1 - \sum_{D_p=0}^{D_p} f_p \right) \quad (7)$$

ここで、 D_e : 代表粒径, n : 分布指数。

図6は、 $U=1.5\text{m/s}$ のときのデミスタ前及び通過後の液滴の積算残留率を Rosin-Rammler 線図上にプロットしたもので、層数をパラメータにとっている。いずれのデータもよい直線性を示しており、本実験の液滴の粒度分布は Rosin-Rammler 分布で近似することができる。

デミスタ通過後の液滴はデミスタ前の液滴よりも粒径の小さい範囲にあり、分布のばらつきも小さくなっていることがわかる。

また、図7は平均流速を変化させた場合の3層デミスタ通過後の液滴の Rosin-Rammler 線図を示している。流速が 1.5m/s から 3.0m/s までは、流速が増加すると直線は粒径の小さい範囲に移っていくが、 4.0m/s になると再び粒径の大きい範囲に戻っている。これは再同伴に

よる大粒径の液滴の影響によるためと考えられる。なお、分布のばらつきは 3.0m/s のときがやや小さい程度で他はほぼ一定である。

次に各直線において、その傾きから分布の均一性を示す分布指数 n が、そして式(7)で $D_p=D_e$ とおいて得られる $R=36.8\%$ のときの D_p の値から一種の平均粒径を示す代表粒径 D_e がそれぞれ求まる。すべての実験条件に対して Rosin-Rammler 線図を描いて求めた n と D_e の値を図8に示す。 D_e の値は平均空気速度 $U=3.0\text{m/s}$ までは1層、2層の場合あまり大きな変化はないが、3層、4層になるとやや漸減傾向が見られる。一方、 $U=4.0\text{m/s}$ になると1層以外は大きくなっており、再同伴による影響が粒度分布にあらわれている。また、 n の値は大変ばらついており、平均速度による影響は見られないが、層数に関しては、 $U=2.0\text{m/s}$ 以外は層数が多いほど分布の均一性がよくなるという傾向を示している。

図6 デミスタ前後における液滴の Rosin-Rammler 線図

図7 デミスタ通過後の液滴の Rosin-Rammler 線図

3.2 捕集限界粒径 一般に、折れ板形エリミネータのような気水分離器によって完全に捕集される液滴の最小粒径を捕集限界粒径 D_{pc} と定義され、分離特性の重要な特性値の一つとなっている。これを実験的に求めることは困難で、ふつう分離器通過後の液滴の最大粒

図8 デミスタ前後における分布指数と代表粒径

図9 デミスタ前の最大粒径及び捕集限界粒径

径を捕集限界粒径と見なしている。同様のやり方でワイヤメッシュデミスタの捕集限界粒径を求めた結果を図9に示す。 D_{pmax} はデミスタに流入する液滴群中の最大粒径である。ワイヤメッシュデミスタは他の分離器よりも比較的再同伴現象が生じやすく、図より明かなように層数が少ない程、また高速になる程 D_{pc} の値が大きく、 D_{pmax} を越える場合もある。しかし、再同伴の生じにくい層数が多くて低速の場合には、他の分離器と同様に平均速度が大きくなるにつれて D_{pc} が小さくなるという傾向を示している。

3.3 ワイヤメッシュデミスタの捕集効率

観察によると、ワイヤメッシュデミスタによって捕集、

図10 供試デミスタの捕集効率

分離された液滴は、ワイヤメッシュを伝って側壁に到達し、壁面に沿って流下する。また、ワイヤメッシュ面に生じた水膜は、垂下するように成長したり、隣のメッシュの水膜同士で合体すると、大きな液滴となってデミスタから直接落下し始めている。したがって、平均空気速度の小さい範囲では捕集液滴の多くは壁面に沿って流下し、速度が大きくなると間接的に落下する大きな液滴が多くなってこれらは共に図1の⑤の排水管から外部に排出される。

このように捕集、分離された液滴の量が、上昇気流に伴伴された全液滴の量に対してどのような割合かを示すデミスタの捕集効率 η (%)は、次式によって定義することができる。

$$\eta = 100(1 - G_0/G) \quad (8)$$

ここで、 G 、 G_0 ：捕集器によって求めたデミスタ前及びデミスタ通過後の液滴の質量流量。

図10は上式から求めた捕集効率 η と平均空気速度 U の関係を層数 N をパラメータにして示したものである。捕集効率は層数の増加とともに高くなっているが、1層と2層に関しては特異な鞍形分布の形状を示した。これは水平気流中に垂直に置かれたデミスタでは見られなかった現象である。その原因としては、デミスタが水平に置かれているためにワイヤメッシュ面に生じる水膜の影響によるものと考えられる。現象としては、 $U=1.0$ m/sまでは水膜はまだ発生していないで、液滴の捕集はワイヤの部分で行われるので、その速度範囲では空気速度の増加と共に捕集効率は増加する。空気速度がさらに増加して2.0 m/s付近になると、数個のメッシュを覆

うぐらいの水膜がワイヤメッシュ面に発生し、この水膜は薄くすぐに気流によって破壊されるという現象を繰り返して再同伴による捕集効率の減少となる。\$U=2.0\text{ m/s}\$以上になると捕集液滴が多くなり、水膜も厚くデミスタの広い範囲を覆うようになってくる。そうすると、水膜の破壊による再同伴も一部には生じているものの、水膜による捕集面積の増加等により捕集効率が再び増加してくる。この場合、水膜が大きな液滴となって落下してもすぐにその部分に水膜が発生する。3層、4層になると最終出口層には水膜が生じにくくなるためにその影響は無くなり効率は漸増している。\$U=4.0\text{ m/s}\$になるといずれの層の場合も、高速流れによる再同伴により顕著な効率低下となっている。これらの捕集効率と、層間隔は異なるが筆者らが行った水平気流中のデミスタの捕集効率²⁾とを比較すると、垂直気流中の方が10~20%高い値が得られた。

次に、供試デミスタの理論捕集効率を求める。ワイヤメッシュデミスタの理論捕集効率は、1本のワイヤに対する粒径捕集効率を基礎にしており、本論文ではこの粒径捕集効率 \$\eta_d'\$ を周知の Brunらの線図³⁾から求めて計算を行った。まず、1層のデミスタの理論粒径捕集効率 \$\eta_{dN=1}\$ を、筆者らが層数の少ないデミスタに対して提案した次式²⁾から求めた。\$D\$ はワイヤ径である。

$$\eta_{dN=1} = \frac{4(1-\varepsilon)}{\pi} \eta_d' = \frac{aD}{\pi} \eta_d' \quad (9)$$

上式のポイドフラクション \$\varepsilon\$ と比表面積 \$a\$ は、一辺の長さが \$L\$ である1個の網目に対するもので、それぞれ次式から求めることができる。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi D}{2L} \quad (10)$$

$$a = 2\pi/L \quad (11)$$

そして、求めた \$\eta_{dN=1}\$ より次式を用いて層数 \$N\$ のデミスタの粒径捕集効率 \$\eta_d\$ が得られる。

$$\eta_d = 1 - (1 - \eta_{dN=1})^N \quad (12)$$

一方、種々の粒径をもつ液滴群に対するワイヤメッシュデミスタの理論捕集効率 \$\eta_{th}\$ は、デミスタ前の液滴の質量ひん度 \$f_p\$ を用いて次式から計算することができる。

$$\eta_{th} = 1 - \sum \frac{f_p}{D_p} (1 - \eta_d) \quad (13)$$

図11に結算結果を示す。理論捕集効率は層数が増加する程大きくなっているが、\$U=1.5\sim 4.0\text{ m/s}\$ の範囲では流速による効率の差はほとんど見られない。実験値と比較すると、層数が増えるにつれて理論値と実験値との差は近づいてくるが、全体に理論値の方が小さくなっている。その原因としてはデミスタの捕集機構が複雑で理論式の仮定にまだ不満点があり、また実際にはワイヤ回りに生成された水膜が液滴の付着を容易にしている、などが考えられる。

図11 供試デミスタの理論捕集効率

3.4 ワイヤメッシュデミスタの圧力損失

デミスタの圧力損失は、ベッツ形マノメータによってデミスタ前後の静圧差を測定することによって求めた。供試デミスタの乾燥時における圧力損失 \$\Delta P\$ を図12に、噴霧時における \$\Delta P\$ を図13にそれぞれ示す。図中の白丸のデータはダクトのみの圧力損失を示している。

乾燥時の圧力損失は、いずれの層数の場合にも平均速度の1.8乗に比例して単調に増加している。一方、噴霧時の圧力損失は乾燥時に比べて大きく増加しているが、平均速度に対する圧力損失の増加傾向は一定でない。すなわち、低速域と高速域の中間に平均空気速度 \$U\$ が増加しても圧力損失 \$\Delta P\$ がほぼ一定の領域が生じている。これは本実験のようにデミスタを上昇気流中に水平に設置して速度を増加させる場合、摩擦による圧力損失の増加と、ワイヤメッシュ面に生じる水膜の破壊による圧力損失の減少の、両者のバランスがとれている領域と考えられる。層数が増えると \$\Delta P\$ が一定の範囲が狭くなり、4層になると一定でなく漸増し始める。なお、デミスタを水平気流中に設置した場合にはこのような現象は示さなかった。

次に、各直線の傾き \$k\$ を用いて次式で定義した圧力損失係数 \$\zeta\$ を求めると図14のようになった。

$$\zeta = \Delta P / \left(\frac{\rho_a}{2g} U^k \right) \quad (14)$$

ここで、\$\rho_a\$: 空気の密度、\$g\$: 重力加速度

乾燥時の圧力損失係数と、噴霧時には低速域に

図12 供試デミスタの圧力損失（乾燥時）

図13 供試デミスタの圧力損失（噴霧時）

における圧力損失係数と高速域におけるそれとが得られる。噴霧時の ζ は各デミスタとも、低速域では高速域の約2.4倍の値を示している。一方、乾燥時の ζ と比較すると、低速域では約2.9～5.8倍、高速域では約1.4～2.4倍大きくなっている。また、層数の影響に関しては、乾燥時において2, 3, 4層の ζ がそれぞれ1層の ζ の2.0, 2.8, 4.4倍となっており層数にほぼ比例している。しかし、噴霧時においてはそのような傾向は見られなかった。

水平気流中における圧力損失係数²⁾と比較すると、乾燥時の ζ の値はほとんど同じであり、噴霧時の水平気流中の ζ の値は垂直気流中の低速域と高速域の ζ の平均値に近い値であった。なお、水平気流中の噴霧時と乾燥時の ζ の比は層数に関係なく約2.1であった。

4. まとめ

本研究で対象とした垂直上昇気流中に水平に置かれたワイヤメッシュデミスタの分離特性は、水平気流中に垂直に置かれたデミスタでは見られなかったワイヤメッシュ面に生じた水の膜による影響が非常に大きく効いていることが明らかになった。特に、水の膜による影響が顕著に現れる層数の少ない1, 2層のデミスタでは捕集効率曲線が鞍形のような特異な形状になり、水膜が薄くて気流によって破壊しやすい領域から、水膜が成長して厚くなり液滴の捕集に寄与し始める領域に移行するときに捕集効率の極小値を示した。また、圧力損失に関してもこの水の膜の影響により圧力損失係数の大きい低速域、損失係数一定の中間域そして損失係数が低速域の約

図14 供試デミスタの圧力損失係数

1/2.4に減少する高速域と3つの領域の存在することがわかった。そして、この中間域は層数が増加するにつれて狭くなり、その領域の圧力損失が一定から漸増するようになることも明らかになった。

5. あとがき

層数が1～4層と非常に少ない層数のワイヤメッシュデミスタを対象に研究を行い、垂直上昇気流中における分離特性を多少とも明らかにすることができた。今後、層間隔の影響を調べたり、さらにメッシュの種類を多くしたデミスタを対象に実験を行っていく予定である。また、水平気流中の場合も含めたより精度の高い捕集効率の理論式を導くことも必要であると考ええる。

最後に、本研究の遂行にあたってデータの採取等ご協力いただいた神戸商船大学川井潔君（現川崎重工工業株式会社）、宮田裕次君（現川崎航空サービス株式会社）及び山根浩君（現神戸商船大学大学院）に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 石谷・中西・杉田, 舶機誌, 15-12 (昭55-12), 930.
- 2) 杉田・石谷・中西, 舶機誌, 17-7 (昭57-7), 527.
- 3) Brun, R.J., Lewis, W., Perkins, P.J., Serafini, J.S., NACA Report, 1215 (1955), 141.