Luwa TLT形エリミネータの分離特性*

杉田 英昭**・馬路 光二***

Separation Performance of Luwa TLT Eliminator

By Hideaki Sugita, Mitsuji Baji

Luwa TLT eliminator is a kind of the eliminators constructed by zigzag bended thin-plates. A bending angle of this eliminator is 60° , a bending number of 3, and a thickness of plate made of CPVC is about 2 mm. The each bending corner of this is round more or less, and the each bending plate has a few zigzag parts. Luwa TLT eliminators used here have two different dimensionless pitches, one is 0.64 (pitch of 24 mm) which the other is 1.07 (pitch of 40 mm).

In this paper, separation of water droplets from air including water droplets by Luwa TLT eliminators is investigated through experiments, and obtained separation performances are considered as compared with the results predicted by theoretical analysis which has been presented by one of the authors of this paper. And furthermore resistance coefficients of these eliminators are also investigated.

The test section is the vessel made of 10 mm thick transparent acrylic sheet (same material used in the existing horizontal duct), and Luwa TLT eliminator is incased in it. Experiments have been made varying from 2.0 to 10.0 m/s in mean air velocity and varying from 0.085 to 0.95 mg/($\text{mm}^2 \cdot \text{min.}$) in mass flow rates of water droplets at inlet of the test section, respectively. The water droplets have been obtained in various sizes from about 5 to $170 \mu\text{m}$.

1. ま え が き

折れ板形エリミネータは動力プラントや各種工業プラントに広く使用されており、その分離性能はプラント全体に大きな影響を及ぼす場合が多い。筆者らはこれまで折れ板形エリミネータに関する理論的、実験的研究を行ってきたが^{1,2)}、対象としたエリミネータは屈折角、屈折数及びピッチなど基本的なパラメータの影響を調べるために平板を任意な屈折角に折り曲げた簡単な構造のものであった。そこで、本論文は、実際に工業用として用いられているLuwa TLT形エリミネータを対象として、これまでに得られた簡単な折れ板形エリミネータに対する実験結果との比較や、理論計算を行うことによってその分離特性を評価した結果について報告するものである。このLuwa TLT形エリミネータを選んだ理由は、その構造が特異なものではなく一般に見受けられるものの内の一つであること、屈折角や屈折数がこれまでの実験結

果との比較に便利な値であること、詳細な図面や実物が入手し易い状態であったこと、材料がCPVC製であるので工作が容易であること、国内外での使用実績が大であること、などである。なお、本実験は空気-水系の装置を用いて行われた。

2. 実験装置及び実験方法

実験に用いた水平ダクトは長さ4.15 m、有効断面 $120 \times 120 \text{ mm}$ で、気流の状態およびエリミネータでの捕集状況が観察できるようにすべて厚さ10 mmの透明アクリル板でできている。空気はシロッコファンによって吸引流入させ、空気速度はダクト入口に設けたJIS規格による入口ノズルで測定した。一方、噴霧液滴はダクト入口から40 cmの位置に気流に向けて設けた噴霧ノズル(噴霧角 60° 、孔径0.48 mmのバーナ用ノズル)1個によって発生し、空気に同伴されて2.1 m後方の供試エリミネータに流入する。なお、噴霧圧力は4 atgと一定にした。

供試エリミネータは図1の状態でダクトのテストセクション部に取り付けられている。空気及び同伴液滴は矢印の方向に流れ、捕集された液滴はダクトの外へ導かれ

* 原稿受付 昭和57年12月3日

昭和57年秋季学術講演(昭和57年10月28日)

** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 日本ルーワ(株)(名古屋市中区東桜1-10-37)

図1 ダクト上部から見たテストセクション部における供試エリミネータ

テストセクションの底部にはドレンがたまることはない。エリミネータの全長は268 mm、折れ板の厚さは約2 mm、各屈折部に設けられた小さい山形部の高さは約7 mmである。ピッチが24 mm(有効流路幅22 mm)のエリミネータをNo.1、ピッチが40 mm(有効流路幅38 mm)のエリミネータをNo.2とする。実際に工業用として用いられているのはNo.1の方である。

同伴液滴の粒度分布の測定は計測方法が容易で、比較的精度の高い液浸法によった。ガラス板に塗布したシリンドラ油に液滴を捕獲して顕微鏡撮影した後、印画紙上に100倍に焼き付けて粒径の測定を行ったが、このとき5 μm ごと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。

$$w_p = \frac{\rho_p}{5} \int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi}{6} D_p^3 dD_p = \frac{\rho_p}{120} \pi (D_2^4 - D_1^4) \quad (1)$$

$$D_p = \{(D_2^4 - D_1^4)/20\}^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 ρ_p は液滴の密度、 D_1 と D_2 は液滴粒径区分の上限と下限の粒径である。

又、液滴の質量流量の測定は液滴捕集器にはさんだ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びんにて計量することによって行った。

これらの測定方法は十分な検定を行い、測定結果の信頼性が高いことを確認している^{2,3)}。

実験範囲を次に示す。

$$U = 2.0 \sim 10.0 \text{ m/s}, G_l = 0.085 \sim 0.95 \text{ mg/mm}^2 \text{ min.}$$

$$G_l/G_a = 6 \times 10^{-4} \sim 2.4 \times 10^{-3}, D_p = 5 \sim 170 \mu\text{m}$$

ここで、 U は平均空気速度、 G_l と G_a はエリミネータ入口における同伴液滴の流量と空気の流量である。

3. 実験結果及び考察

3.1 エリミネータ前後における液滴の粒度分布

液滴の粒度分布は個数ひん度や質量ひん度をヒストグラムで表示する方法があるが、エリミネータの分離特性を評価するためには個数ひん度よりも質量ひん度が重要である。この質量ひん度 f_p は次式で表される。

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

ここで、 w_i は粒径が D_{pi} である液滴の質量、 n_i は粒径が D_{pi} である液滴の数である。

質量ひん度を用いて粒度分布を定量的に解析するために次のRosin-Rammler分布式を採用した。

$$R = 100 \left(1 - \sum_{D_p=0}^{D_p} f_p \right) = 100 \exp \left(- \frac{D_p}{D_e} \right)^n \quad (4)$$

ここで、 R は積算残留率、 D_e は代表粒径、 n は分布指数である。

図2はNo.1エリミネータ前後の液滴の積算残留率をRosin-Rammler線図上にプロットした一例である。黒丸がエリミネータ前で、白丸がエリミネータ後であるが、ともによい直線性を示している。この直線の傾きから分布の均一性を示す分布指数 n が、またこの分布式で $D_p = D_e$ とおいたときの $R = 36.8\%$ 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。この図よりエリミネータ通過後の液滴は粒径も小さく、分布も均一になっていることがわかる。このようにして求めた n と D_e の値をまとめたものが図3であり、左側がNo.1エリミネータ、右側がNo.2エリミネータに対する線図である。全体に液滴の分布の均一性はエリミネータ前後とも

図2 Rosin-Rammler線図

図3 分布指数 n と代表粒径 D_e

空気速度の増加とともに悪くなっているが、その傾向はエリミネータ前の方が著しい。一方、代表粒径はエリミネータ前で空気速度の増加とともに大きくなり、約5.0 m/s以上になるとほぼ飽和の状態になってくる。これは同伴液滴の粒径がもはや空気速度ではなく、噴霧ノズルの特性に従うようになるからである。このことは図8のエリミネータ前における最大粒径の線図からも分かる。一方、エリミネータ後では逆に空気速度の増加とともに代表粒径は減少しており、エリミネータ前よりもかなり小さくなっていることから、大粒径の液滴が捕集されていることが分かる。また、No.1とNo.2のエリミネータを比較するとピッチによる影響が顕著にあらわれている。

図4 単純化したエリミネータ流路における液滴の運動軌跡

特にエリミネータ後の代表粒径はNo.1で U の増加とともに $30\text{ }\mu\text{m}$ から $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度まで減少するのに対して、No.2では $50\text{ }\mu\text{m}$ 付近で U の増加とともに若干減少している程度である。これはピッチを大きくすると捕集されない液滴の粒径が全体に大きくなることを示し、次の捕集限界粒径と密接な関係にある。なお、金網を用いた気水分離器であるワイヤメッシュデミスタの場合は、デミスタ後の液滴の粒径も空気速度の増加とともに大きくなる傾向を示している^{4,5)}。

3.2 理論値との比較 筆者らがすでに発表した折れ板形エリミネータに対する理論解析¹⁾をこの Lawa TLT形に適用して計算した結果を以下に示す。

まず、エリミネータの流路を図4に示す形状で近似し、屈折角 θ を 60° 、屈折数 N を3、折れ板長さ l を 74.6 mm とした。各屈折部の無次元座標 x^* 、 y^* を図4のようにとり、次式で表される液滴の運動軌跡の式から計算した結果を同図に示す。

$$y_n^* = x^* + y_{n,i}^* - \frac{(1-\beta^{x^*})}{\ln(1/\beta)} \left[1 + \frac{1-\beta}{1+\beta} \{1 - (-\beta)^{n-1}\} \right] \quad (5)$$

ここで、

$$\beta = \exp \left(-\frac{18 \nu_a \rho_a l \cos \theta / 2}{\rho_p U D_p^2} \right)$$

ν_a は空気動粘性係数、 ρ_a は空気密度、添字 n は入口から数えた屈折部の番号、 i は各屈折部の入口である。

図4はNo.1とNo.2エリミネータを近似した流路において、直径 $40\text{ }\mu\text{m}$ の液滴が平均空気速度が2.0, 4.0, 6.0 m/sと増加するにつれてどのような軌跡を描くかを表しており、ハッチング部分がその屈折部で捕集される液滴の存在する領域を示す。No.1の $U=6.0\text{ m/s}$ では2屈折で完全に $40\text{ }\mu\text{m}$ の液滴は捕集されている。これらの運動

軌跡から各液滴粒子の粒径捕集効率 η_d が求められ、その η_d の式を次に示す。

$$\eta_d = \frac{1-\beta}{\ln(1/\beta)} \left(1 + \frac{1-\beta^N}{1+\beta}\right) \frac{1}{p^*} \quad (6)$$

ここで、 p^* は無次元ピッチで、ピッチ p と折れ板の山高さとの比、すなわち $p^* = p/(l \cdot \sin\theta/2)$ で表される。No.1で $p^* = 0.64$ 、No.2で $p^* = 1.07$ である。

図5に上式から得られた粒径捕集効率 η_d と平均空気速度 U との関係を示す。図より粒径の大きい液滴ほど、また空気速度が大きいくほど捕集効率が高くなることがわかる。No.1とNo.2を比較すると、No.2の方は粒径が大きくなると U が増してもその増加割合は徐々に小さくなってきており、増加が直線の範囲でNo.1の η_d はNo.2のその約1.7倍である。この粒径捕集効率を実験的に求めるためには、理想的には同一粒径の液滴群のみをエリミネータに流入させて実験する必要があるが現実にはこれはかなり困難である。そこで本実験では顕微鏡写真から得られたエリミネータ前後における同一粒径の液滴の個数から粒径捕集効率を求めた。図6にNo.1に対する効率 η_d の結果を示している。定性的な傾向は理論と同じであるが、定量的には実験値の η_d の値の方が全体的に大きくなっている。これは理論に対するエリミネータの構造を単純化したためと、液浸法による捕獲液滴の衝突効率の影響などによるものと考えられる。

次に、エリミネータの捕集限界粒径 D_{pc} に対する理論値と実験値との比較を行う。捕集限界粒径とはエリミネータによって完全に捕集される液滴の最小粒径である。 D_{pc} の理論値は式(6)から求めることができるが、具体的には式(6)から得られる図7において、パラメータ U の曲線が $\eta_d = 100\%$ を示すときの横軸 D_p の値が捕集限界粒径である。また、実験値はエリミネータ通過後に得られる最大粒径を D_{pc} とした。これは厳密には実際の D_{pc} よりも小さいはずであるが近似的に D_{pc} とみなした。図8に示す結果において、 $D_{p\max}$ はエリミネータに流入する液滴群の中で最大液滴の粒径であり、図中の曲線は D_{pc} の理論値、白丸は D_{pc} の実験値である。実験値は理論値に比較的近いことがわかる。特にNo.1に対してはかなり理論値とよく一致しており、 $U = 10.0 \text{ m/s}$ 付近の高速域でも実験値が理論値に近いことから再同伴は生じていないことを示している。一方、No.2に対しては高速域で D_{pc} が理論値よりも大きく、ピッチが大きいくことによる再同伴液滴の存在を示している。また両エリミネータとも $U = 4.0 \text{ m/s}$ 以下の低速域では D_{pc} が小さく、これは各屈折部における小さい山形部の効果によるものと思われる。

図5 粒径捕集効率 η_d と平均空気速度 U の関係(理論値)

図6 粒径捕集効率 η_d と平均空気速度 U の関係(実験値)

図7 粒径捕集効率 η_d と平均粒径 D_p の関係(理論値)

図8 エリミネータ前の最大粒径 $D_{p\max}$ および捕集限界粒径 D_{pc}

3.3 エリミネータの捕集効率

エリミネータの捕集効率 η は次式によって計算した。

$$\eta = 100 \left(1 - \frac{G_{lo}}{G_{li}} \right) \quad (7)$$

ここで、 G_{li} および G_{lo} はそれぞれガーゼによる方法で求めたエリミネータ前及びエリミネータ後の液滴の質量流量である。

実験結果を図9に示す。No.1エリミネータにおいて、 η の値は $U=4.0$ m/s付近まで急上昇するがそれ以後はゆるやかな増加となっている。データのばらつきもほとんどなく非常に安定した分離性能を示している。また、本実験範囲の空気速度では再同伴による効率の減少は見られない。このことは図8によっても示された。一方、No.2エリミネータにおいては実験データがかなりばらついており不安定な状態を示しているが、全体としては空気速度の増加とともに捕集効率はなだらかに増加している。No.2は図8により再同伴が示されたが、 η に及ぼすその影響は $U=10.0$ m/sのときの効率低下にあらわれている。No.1の図の破線は、ブリキ平板でできた $\theta=90^\circ$ 、 $N=1$ 、 $p^*=0.75$ ($p=30$ mm)のエリミネータに対する実験結果であるが、 $U=5.0$ m/s以上で再同伴による効率低下が生じている。同じ要目の $N=2$ のエリミネータにおいても $U=6.0$ m/s以上で再同伴による効率低下が見られた²⁾。

3.4 エリミネータの圧力損失 圧力損失 Δp はエリミネータの前方150 mm、後方250 mmの位置においてベッツ形マノメータによって測定した。No.1エリミネータに対する実験結果を図10に示す。図中に文献2)の実験結果も示している。供試エリミネータに比較的形状が似ている60-N4 ($\theta=60^\circ$ 、 $N=4$ 、 $p^*=0.75$ 、 $p=26$ mm、全長240 mm)と比較してもNo.1エリミネータの

図9 エリミネータの捕集効率

図10 圧力損失

圧力損失は小さい。いま、圧力損失係数 ζ を次式で求める。

$$\zeta = \Delta p / \left(\frac{\rho_a}{2g} U^k \right) \quad (8)$$

ここで、 g は重力加速度、 k は図10の直線の傾きでNo.1では $k=1.91$ であった。

No.1の ζ の値は噴霧時で5.38、乾燥時で5.32とほとんど両者に差はなかった。60-N4の ζ は7.21でNo.1の約1.3倍である。60-N4Sはエリミネータ出口端の折れ板に対して直角に5 mmの長さの再同伴防止用のスクープを取り付けたものであるが、その ζ は11.46とNo.1の

図11 圧力損失 (No.1とNo.2の比較)

2.14倍にもなっている。供試エリミネータは折れ板部に抵抗があるにもかかわらず、流路全体が非常に滑らかな形状になっており圧力損失に関してすぐれていることがわかる。なお、図11にNo.1とNo.2エリミネータの圧力損失の比較を示しているが、当然ピッチの大きいNo.2の方が Δp は小さく、 ζ は噴霧時と乾燥時でまったく差がなく1.85($k=1.97$)である。

4. ま と め

Luwa TLT形エリミネータの分離特性は、その形状を単純化して理論解析を行うことによって十分評価できることが確認できた。一般に、折れ板形エリミネータに限らず衝突形の気水分離器全体に問題となることは再同伴現象であるが、この現象による影響は理論の中にはあらわれてこない。したがって再同伴を防止するための工夫が特に高速域における捕集効率に大きな影響を与える。このLuwa TLT形は各屈折部に小さな山形部を設けて再同伴を防止しているが、その効果は十分発揮されている。

また、圧力損失は折れ曲がり部を滑らかにしていることにより非常に小さくすることができ、各屈折部の山形部の抵抗はあまり影響されない。このことと、60-N4と60-N4Sの圧力損失係数に大きな差があることから考えると、再同伴防止の突起物ではできるだけ鋭角にしないことが圧力損失に関して必要である。

なお、本実験ではピッチを設計値よりも大きくしたエリミネータも対象としたが、これは圧力損失が極めて小さく、捕集効率をある程度犠牲にしても圧力損失が問題となる場合に十分実用できるものと考ええる。

5. あと が き

実用されている折れ板形エリミネータはLuwa TLT形以外に種々の形状に改良されて用いられている。しかし、いずれもその基本は図4に示される簡単な形状であり、本実験の結果はかなりのはん用性を有するものと思われる。

最後に、本研究にご協力いただいた日本ルーワ(株)の関係各位、また本実験の遂行に当たってご協力いただいた神戸商船大学小牟田廣己技官及び三好直巳、東幸彦両

君に深く感謝致します。

文 献

- 1) 石谷・中西・杉田・長沢, 舶機誌, 12-6(昭52-6), 387.
- 2) 石谷・中西・杉田, 舶機誌, 15-3(昭55-3), 244.
- 3) 杉田, 学位論文(大阪大学), 1980.
- 4) 石谷・中西・杉田, 舶機誌, 15-12(昭55-12), 930 (Bull. of the M.E.S.J., 9-3(1981), 208).
- 5) 杉田・石谷・中西, 舶機誌, 17-7(昭57-7), 527.

〔質 疑 応 答〕

質問者 神戸商船大学 大園俊朗

〔質問〕① Luwaの屈折は滑らかなるにかかわらず特性が通常形と余り変らぬ理由は?

② 実験装置と実用装置ではエリミネータの高さが異なるので、実際には実験よりも同伴ロスが大きくなるのではないか?

〔回答〕① Luwa TLT形は図4の単純化した形状とくらべると滑らかになっておりますが、流路の主流部の形状にはあまり差はありません。したがって同伴液滴が各屈折部で衝突する範囲がほとんど変わらないためと思います。しかし、角の曲率半径が大きくなり、たとえばサインカーブのような形状になると筆者らの理論解析による結果とは異なった分離特性になることが考えられます。

② ご指摘のとおりエリミネータの高さは重要なパラメータだと思います。実際にエリミネータが高くなりますと屈折板で捕集された液滴が流下するにつれて下方の液膜が厚くなり再同伴が激しくなって効率低下を引き起こします。現実には対応策として適当な高さごとに捕集液を装置から排出する工夫がなされています。筆者らはこの問題については以前から興味をもち実験を行っていますが、まだ結果をまとめる段階には到っておりません。

質問者 石谷清幹

〔質問〕図1は平面図か正面図か。

〔回答〕説明不足でした。平面図です。投稿原稿には明示します。