うず巻噴射弁の微粒化特性

(第 2 報補遺 うず巻室の寸法が流量係数、噴霧角および粒径に及ぼす影響)⁽¹⁾小林 清 志⁽²⁾

Atomizing Characteristics of Swirl Injection Nozzle

(Supplement of 2nd Report, The Effect of the Dimensions of the Swirl Chamber on the Coefficient of Discharge, the Spray Angle and the Size of Drop)

by Kiyosi KOBAYASI

In the 2nd Report, the effect of the dimensions of swirl chamber on the size of drop was investigated and an attempt was made to search for the condition of the optimum form of nozzle. Besides the size of drop, the characters of the swirl nozzle can be represented by the discharge coefficient and the spray angle. These two can be obtained from the potential flow theory but they agree with the experiments only in the narrow range. In the present paper, the author made the empirical formulas of the discharge coefficient and the spray angle which were applicable to wide range of the dimensions of swirl chamber for the non-viscous liquids, and obtained the more accurate empirical formula than that of the second report for the mean diameter of drop taking into account the effect of ratio between the length and diameter of orifice.

1. 序 言

第 2 報⁽³⁾において噴射圧やうず巻室の寸法が噴霧粒径にどのような影響を与えるかを論じ、良い噴霧を得る条件を求めようと試みた。この外に噴射弁の重要な特性として流量係数と噴霧角がある。この二つは理論から求めることができるが⁽⁴⁾、多くの種類について実験してみると理論と一致する範囲にはある制限がある。そこで本報告では、水のような粘性を無視できる液体について広範囲に適用でき、設計にも役立つ実験式を求めようと試みた。さらに噴孔の平行部が粒径に及ぼす影響を調べ、第 2 報での不備な点を補い、一層精度のよい粒径の実験式を得た。

2. 流 量 係 数

噴射圧を次第に上げていくと、うず巻噴射弁の微粒化模様はチューリップ状からラッパ状に移る。このとき流量係数は次第に小さくなるが、ラッパ状に移って噴霧の状態がよくなればほとんど一定になる。水のような粘性の小さい流体では数気圧から 10 気圧程度でこの一定値に達する。うず巻室の寸法による流量係数の変化を調べるため、これから問題にする流量係数とは、この一定になった値を示すことにする。

一般にうず巻噴射弁の流量係数は 0.1 以下の小さい値から普通のオリフィス程度まで広範囲にとることができるが、それを決める主要要素は、うず巻室の特性

値 K と (d_0/r_i) である。 (d_0/r_i) が 0.50~0.55 の範囲から出ると次第にポテンシャル流理論の結果からはなれていくので⁽⁴⁾、実際使用するときあるいは特に設計上不便が多い。

このようなポテンシャル流理論の結果を利用できない範囲にも広く適用できる実験式を求めるため、まず薄刃噴孔について流量係数を測定した。実験装置は第 2 報と同じで、メスシリンダとストップウォッチにより流量 $q \text{ cm}^3/\text{s}$ を求め、うず巻室直径は 82~2 mm の範囲で実験した。使用液は水である。実験結果は (d_0/r_i) をパラメータとして第 1 図のように整理することができる。したがってこの結果を使い次のような実験式を導いた。

第 1 図 流量係数と特性値との関係 (薄刃噴孔)

$$c_s = 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left\{ 2 \cdot 13 \frac{(K+1 \cdot 2)}{(K+1)^2 - 1} e^{-0 \cdot 27 \left(\frac{r_i}{d_0} \right)} \right\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに

$c_s = q / \pi r e^2 \sqrt{2 g p} / \gamma$ = 流量係数 ($l/d_e = 0$)

$K = (S_i / \pi r e^2) (r_e / r_i)$ = うず巻室の特性値

S_i = うず巻室への流入

口総断面積

r_i = うず巻室半径

$r_e = d_0 / 2$ = 噴孔半径

$d_0 = 2 \sqrt{S_i / \pi}$

であって、うず巻室の寸法は第2図に示すようなものである。

第2図 うず巻室の諸寸法

薄刃噴孔は摩耗のおそれ大きいばかりでなく、噴孔の肉厚が薄くなるので、噴射圧が大きくなると外側に曲げられることがある。したがって噴孔に長さ l の平行部をつけるのが普通である。 l と噴孔径 d_e との比 (l/d_e) は、流量係数、噴霧角、粒径などに影響してくるが、余り大きくすることはエネルギーの損失上好ましくない。この影響を調べるために第3図のような噴孔を交換できる弁を作り ($l/d_e = 0 \sim 5$ の範囲で実験した。測定値と(1)式で示される ($l/d_e = 0$) の場合との比 c/c_s を示すと第4図のようになる。すなわち (l/d_e) が流量係数に与える影響はそれほど鋭敏なものではない。この結果は

第3図 (l/d_e) の実験用うず巻噴射弁

第4図 噴孔の (l/d_e) が流量係数に及ぼす影響

$$c/c_s = e^{-0 \cdot 018 (l/d_e)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

与えられるから、(1)式と組合せて次の実験式を得る。

$$c = \left[1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left\{ 2 \cdot 13 \frac{(K+1 \cdot 2)}{(K+1)^2 - 1} \times e^{-0 \cdot 27 \left(\frac{r_i}{d_0} \right)} \right\} \right] \cdot e^{-0 \cdot 018 \left(\frac{l}{d_e} \right)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

弁の諸寸法が与えられれば、粘性の小さい液体に対してこの式で流量係数 c を知ることができる。

3. 噴霧角

噴射圧を次第に上げていって、噴霧がチューリップ状からラッパ状に移ると、間もなく噴霧角も一定の大きさになる。この状態は流量係数と同様にうず巻室のレイノルズ数 $Re = u r_i / \nu$ ⁽⁵⁾ で定まるものであるが、水の場合には、やはり数気圧で一定値に達するのが普通である。弁の寸法によってどのように噴霧角が定まるかを調べるため、以下噴霧角とはこの一定になった角度をさすことにする。測定は投光器と写真器を使い、大部分は撮影せずにビントガラス上の像で計った。

噴霧角も薄刃噴孔の場合には K と (d_0/r_i) によって決まり、(d_0/r_i) = 0.50 ~ 0.55 でポテンシャル流理論の結果に近くなるが、流量係数ほどよく一致しない⁽⁴⁾。これは前記の理論では噴孔面における軸方向の速度のうち、 $r = r_e$ における速度が噴霧角を決定するとしていることによると考えられる。測定結果は第5図のようになり、これによって薄刃噴孔に対する噴霧角 α_s の実験式を作ると次のようになる。

第5図 噴霧角と特性値との関係(薄刃噴孔)

$$\alpha_s = 180^\circ - 2 \tan^{-1} \left\{ K (1 \cdot 37 + 26 \cdot 9 e^{-4 \cdot 92 \left(\frac{d_0}{r_i} \right)}) \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

第5図からわかるように K が小さくなると急に噴霧角が大きくなり 180° に向う。しかし極端に K を小さくすると、うず巻室内の摩擦損失が大きな割合となり速度を失うから、噴孔を出たばかりは広い角度でも表面張力がきいて来て、チューリップ状の液膜となり粒径も大きくなる。第6図(a)は小噴霧角に(b)は広噴霧角に設計されたもの、(c)は極端に K を小さくして 180° 近い広角噴霧を目標としたものであるが、うず巻室内の損失のためうずがおとろえ、みかけの角度

(a) $\alpha = 24^\circ$ (b) $\alpha = 130^\circ$ (c) 180° 近い広噴霧角を目標としたが K が小さすぎてうずが衰えたもの第 6 図 噴霧角の二三の例 ($p = 10 \text{ kg/cm}^2$)

はかえて小さくなった例である。(a) (b) (c) いずれも噴射圧は等しい。

第 7 図 噴孔の (l/de) が噴霧角に与える影響

噴孔の (l/de) が噴霧角に与える影響は第 7 図のようになる。すなわち導孔噴孔の場合との噴霧角の比 (α/α_s) は K にかかわらず (l/de) のみによって変化し、この関係は

$$\frac{\alpha}{\alpha_s} = 0.232 e^{-0.94\left(\frac{l}{de}\right)} + 0.768 e^{-0.0185\left(\frac{l}{de}\right)} \quad (5)$$

で与えられるから、結局粘性の小さい流体に対する噴霧角の実験式として

$$\alpha = [180^\circ - 2 \tan^{-1} \{K(1.37 + 26.9 e^{-0.94\left(\frac{a_0}{r_i}\right)})\}] \times [0.232 e^{-0.94\left(\frac{l}{de}\right)} + 0.768 e^{-0.0185\left(\frac{l}{de}\right)}] \quad (6)$$

が得られる。

4. 再びうず巻室の寸法が粒径に及ぼす影響

噴霧粒径がうず巻室の寸法によって、どのように左右されるかは第 2 報⁽³⁾で述べた。その中で導いた実験式は噴孔の (l/de) の影響を考えに入れなかったため、実験点の (l/de) はみなまちまちで、かなり式からはなれた点も少なくない。そのため、その後 (l/de) が粒径に与える影響についてさらに実験を行った。測定法や平

均粒径の定義は第 2 報と同じである。第 8 図はその一例であって (l/de) によって粒径の大きくなる状態がわかる。平均粒径の算出には、水平方向に数ヶ所で顕微写真をとるが、その中最も平均粒径に近い写真を 1 枚づつとってならべたものである。このような測定結果は第 9 図のようになり平均粒径 $\bar{d}$ はほぼ

$$\bar{d} \propto (1 + 0.37 \sqrt{l/de}) \quad (7)$$

の関係で (l/de) と共に大きくなる。

この関係を使って今までの測定値を全部薄刃噴孔に換算し、比較条件を揃えてみた。 $\bar{d}$ は $t_0(p/t_0)^{-1/4}$ に比例することがわかっているから⁽³⁾噴射圧 $p = \text{const.}$ とすれば $t_0^{3/4}$ に比例する。ただし $t_0 = r_e(1-k)$ で第 2 図に示すように噴孔面における液膜の理論的厚さである。さらにいま

$$T_0 = 4 \sqrt{t_0^3} \left(1 + 0.37 \sqrt{\frac{l}{de}}\right) \sqrt{\left(\frac{t_0}{r_e}\right)^3}$$

として、縦軸に $\bar{d}/T_0$ 、横軸にうず巻室の寸法を代表するものとして理論流量係数 c_t ⁽⁴⁾をとると、第 10 図のようになって一本の曲線にかなりよくのせることができる。 $c_t = 1$ は単孔無気噴射弁に相当し図中の点はその測定点である。この結果と第 2 報の噴射圧の影響とを組合せて精度のよい次の実験式を作った。

すなわち大気中に水を噴射した場合の平均粒径は

$$\bar{d} = 0.740 t_0 \sqrt{\frac{1}{p t_0}} \sqrt{\left(\frac{t_0}{r_e}\right)^3} \left[1 + 0.37 \sqrt{\frac{l}{de}}\right] \times \left[1 + 1.41 \times 10^5 e^{-\frac{4.27}{(1-c_t)}}\right] \quad (8)$$

ここに $\bar{d}$ = 平均粒径

$t_0(\text{cm}) = r_e(1-k)$ = 噴孔面における液膜の理論的

厚さ、 $p(\text{kg/cm}^2)$ = 噴射圧と外気圧との差

l = 噴孔の平行部の長さ、 $k = r_e/r_e = \text{空どう係数}$

c_t = 理論流量係数、 $e = 2.71828 \dots$

(8) 式の定数 0.740 は $(\text{kg/cm})^{1/4}$ の次元を持っているが、式中の四乗根の中に表面張力を入れれば無次元となり一般的な意味をもつようになる⁽⁵⁾。 c_t 、 k はうず巻室の寸法が与えられれば図表から簡単に求めることができる⁽⁴⁾。

c_t の代りに K を使って整理すると第 11 図のようになり、 c_t の場合と同様一本の曲線によく乗せることができる。これから次の実験式を得るが、設計の場合

第 8 図 噴孔の (l/d_e) による粒径の変化 (水, $p=50 \text{ kg/cm}^2$) 第 9 図 噴孔の (l/d_e) が粒径に及ぼす影響

にはこの方が便利な式である。

$$\begin{aligned} \bar{d} &= 0.740 t_0 \sqrt[4]{\frac{1}{p t_0} \sqrt{(1-k)^3}} \\ &\times \left[1 + 0.37 \sqrt{\frac{l}{d_e}} \right] \\ &\times [1 + 19.7 e^{-4.13K}] \dots (9) \end{aligned}$$

5. 結 語

水について実験した以上の結果をまとめると

(1) 流量係数, および噴霧角の実験式(3), (6)を得た。これですず巻室の寸法および噴孔の (l/d_e) が与えられれば, 流量係数, 噴霧角などの値を知ることができる。また任意の流量係数, 噴霧角を得よううず巻噴射弁を設計することも可能である。

(2) 噴孔の (l/d_e) が噴霧粒径に与える影響を調べ

て, 第2報の実験式より一層精度のよい粒径の実験式(8), (9)を作った。うず巻室の寸法は粒径に鋭敏に影響するものではなく, 第2報第9図に示したように K の相当広い範囲で良い噴霧が得られるものである。しかしその中でも大略, $K=0.7 \sim 1.1$, $c=0.40 \sim 0.55$, 薄刃噴孔の噴霧角にして $\alpha=60^\circ \sim 80^\circ$ の範囲が, 要求された流量に対して最も細かい噴霧になることが上記の実験式よりわかる。

終りに臨み, 実験に際して終始多大の便宜を与えられ, 懇切な指導と, 有益な助言を惜しまれなかった東北大学棚沢泰教授に厚く感謝の意を表す。なお, 研究費の一部は文部省科学研究費の援助によることを附記して謝意を表す。

第 10 図 うず巻室の寸法が噴霧粒径に及ぼす影響(その 1)

第 11 図 うず巻室の寸法が噴霧粒径に及ぼす影響(その 2)

注: —

- (1) 昭和 26 年 11 月 10 日 仙台地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 27 年 5 月 14 日。
- (2) 正員, 東北大学工学部。
- (3) 小林清志, 機械学会論文集, 17 卷 58 号, ガスタービン特集号 114 ページ (昭 26)。
- (4) 棚沢泰, 小林清志, 同上, 107 ページ (昭 26)。
- (5) 詳細は第 3 報, 本論文集 60 ページ参照。
- (6) 詳細は第 4 報, 本論文集 64 ページ参照。