| 【整番】FE-22-TM-011 | 【標題】水ジェットエジェクタの簡易性能計算方法の検討 | |
|---|---|---|
| 分類：流れ(エジェクタ)／種別：技術メモ | 作成年月：H19.3／改訂：Ver0.0 (H19.6) | 作成者：N.Miyamoto |

全５枚

## 1.　はじめに

水ジェット(噴流)の噴出し口で低圧状態を作り、水を吸引するエジェクタは、**ジェットポンプ**とも呼ばれ各種設備に使用されている。市場では高性能の製品が出回っているが、比較的構造が簡単で性能計算も容易なのでメーカーに非ずとも、管/管継手/製缶品で製作することも可能である。そこで本 TS では、水ジェットエジェクタの簡易的な性能計算方法を提案する。なお、ここでは流体を水として表現しているが、もちろん通常の低粘度の液体でも適用できる。

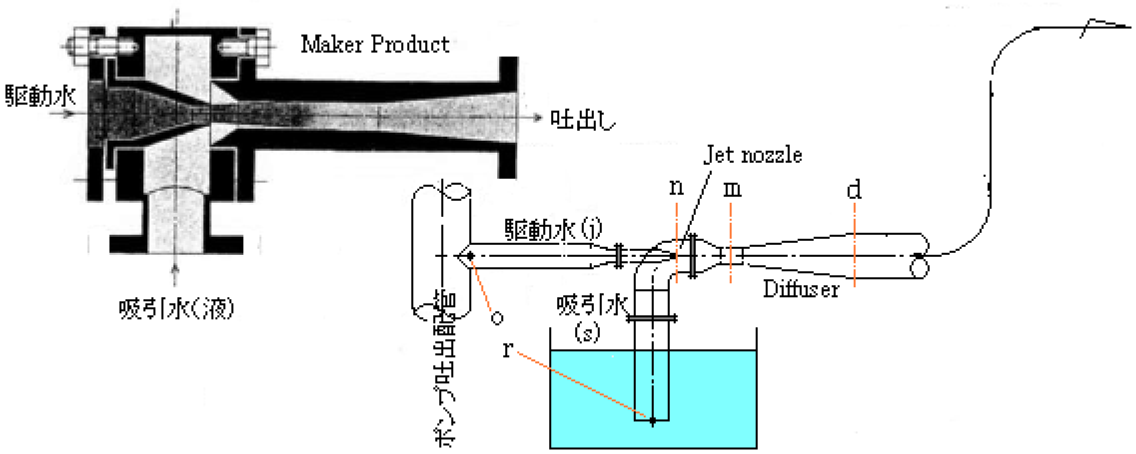



**図1　水ジェットエジェクター構造/設置例**

## 2.　計算式およびその手順

(1)基礎式：エジェクタ性能計算上の代数方程式は次の 5 つである(1)。 **図 1** も参照のこと。

駆動水部( o - n)：$P_o= p_n+0.5\rho(1/a_j^2+k_{on}/a_{on}^2)q_j^2+\gamma\triangle Z_{on}$ ------------------------(1)

吸引水側( r - n)：$P_r= p_n+0.5\rho(1/a_s^2+k_{rn}/a_{rn}^2)q_s^2+\gamma\triangle Z_{rn}$ ------------------------(2)

混合部(n - m)：　$q_j+q_s=q_m$ ------------------------------(3)

$0.5(p_n-p_m)(a_m+a_n)=\rho(q_m^2/a_m-q_j^2/a_j-q_s^2/a_s)$ ----------------------(4)

ディフュ-ザ部(m - d)：$p_d= p_m+0.5\eta\{(1/a_m)^2-(1/a_d)^2\}\rho q_m^2$ ------------------------------(5)

ここで、P＝水源の全圧($kg/m^2G$)(＊1)、p＝静圧($kg/m^2G$)、q＝流量($m^3/s$)、⊿Z=エレベーション差(m)(＊2)

$\rho$＝流体密度($kg\ s^2/m^4$)＝$\gamma/g$、$\gamma$=流体比重量($kg/m^3$)、g＝重力加速度(9.807$m/s^2$)

k＝圧損係数(-)、$\eta$＝ディフューザ効率(-)＝$C_p/\{1-(a_m/a_d)^2\}$、a＝流路断面積($m^2$)(＊3)、

$C_p$=静圧回復係数＝$1-k_{md}-(a_m/a_d)^2$、

$k_{md}$＝[のど部分＋拡大管部分]の圧損係数　（ 拡大管については**表 1** 参照 ）

サフィックス： o, r, n, m, d ➞ 位置/断面の意、　j, s ➞ 駆動水(噴流)、吸引水の意

(＊1) 水源(貯水槽や主管など)の全圧としては、略々、管への吸込ポイントのヘッド圧を採ればいいと思う(正確ではないが.)。

(＊2) ⊿$Z_{on}$および⊿$Z_{rn}$は　o～n 間、r～n 間のエレベーションの差である。 n の位置が o, r の位置

より低くなるときはマイナス(−)、高くなるときはプラス(+)とする。

(＊3)　$a_n$はノズル出口端での管軸直交断面の全面積である。一方 $a_j$, $a_s$はそれぞれ駆動水、吸引水の通過面積である。$a_n > (a_j + a_s)$ である。$a_n \fallingdotseq (a_j + a_s)$でもよいがノズル先端肉厚が厚いと誤差が大きくなるので念為。

(2)、上記の 5 つの代数方程式をとけば流量/圧力が得られる。簡単な代数式で、構成も単純なので、特に手順を追わなくとも境界条件を与えれば解けるがここでは次の場合についてチャートで示す。

ケース①：　$P_j$, $P_s$, $q_s$ が既知で、駆動水流量 $q_j$ が未知の場合

ケース②：　$P_j$, $P_s$, $q_j$ が既知で、吸引水流量 $q_s$ が未知の場合

＜計算手順チャート＞

$P_o$＝駆動水源の全圧(kg/m$^2$G)、$P_r$＝吸引水源の全圧(kg/m$^2$G)、
$\angle Z_{on}$=駆動水側ヘッド差(m)、$\angle Z_{rn}$=吸引水側ヘッド差(m)
$\rho$＝流体密度(kg s$^2$/m$^4$)＝$\gamma$/g、$\gamma$=流体比重量(kg/m$^3$)、g＝重力加速度(9.807m/s$^2$)
$\eta$＝ディフューザ効率(-)＝$C_p/\{1-(a_m/a_d)^2\}$、$C_p$=静圧回復係数(-)
$k_{on}$＝o−n 間の全圧損係数(-)、$k_{rn}$＝r−n 間の全圧損係数(-)
$a_{on}$＝o−n 間の流路断面積(m$^2$)、$a_{rn}$= r−n 間の流路面積(m$^2$)、
$a_n$＝ノズル先端位置での全流路断面積(m$^2$)、$a_j$=ノズル先端位置での駆動水通過面積(m$^2$)
$a_s$＝ノズル先端位置での吸引水通過面積(m$^2$)、$a_m$＝ディフューザ入口断面積(m$^2$)
$a_d$＝ディフューザ出口断面積(m$^2$)、**計算のケース指定**

ケース？

**ケース①**

吸引水流量 $q_s$(m$^3$/s)

$$p_n = P_r - 0.5\rho\,(1/a_s{}^2 + k_{rn}/a_{rn}{}^2)q_s{}^2 - \gamma\,\angle Z_{rn}$$

$$q_j = [1/\{0.5\rho\,(1/a_j{}^2 + k_{on}/a_{on}{}^2)\}]^{0.5}\{(P_o - P_r) + 0.5\rho\,(1/a_s{}^2 + k_{rn}/a_{rn}{}^2)q_s{}^2 - \gamma\,(\angle Z_{on} - \angle Z_{rn})\}^{0.5}$$

**ケース②**

駆動水流量 $q_j$(m$^3$/s)

$$p_n = P_o - 0.5\rho\,(1/a_j{}^2 + k_{on}/a_{on}{}^2)q_j{}^2 - \gamma\,\angle Z_{on}$$

$$q_s = [1/\{0.5\rho\,(1/a_s{}^2 + k_{rn}/a_{rn}{}^2)\}]^{0.5}\{-(P_o - P_r) + 0.5\rho\,(1/a_j{}^2 + k_{on}/a_{on}{}^2)q_j{}^2 + \gamma\,(\angle Z_{on} - \angle Z_{rn})\}^{0.5}$$

$$q_m = q_s + q_j$$

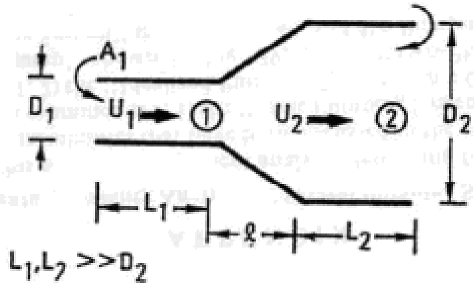
$$p_m = p_n - \{2\rho/(a_m + a_n)\}\{(q_m{}^2/a_m) - (q_j{}^2/a_j) - (q_s{}^2/a_s)\}$$

$$p_d = p_m + 0.5\eta\rho\,(1/a_m{}^2 - 1/a_d{}^2)q_m{}^2$$

エンド

表1　拡大管の圧損係数　（R. D. Blevins「Applied　Fluid　Dynamics　Handbook」のTable 6-7より抜粋）

**18. Gradual Expansion**




$L_1, L_2 >> D_2$

$$\frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2}\rho U_1^2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1 + k + \frac{fL_2}{D_2}$$

| $\frac{A_2}{A_1}$ | k | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $2\ell/D_1$ | | | | | | | |
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 |
| 1.2 | 0.06 | – | – | – | – | – | – | – |
| 1.4 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | – | – | – |
| 1.6 | 0.17 | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.08 | 0.06 | – | – |
| 2.0 | 0.25 | 0.25 | 0.23 | 0.20 | 0.15 | 0.08 | 0.06 | – |
| 2.5 | 0.35 | 0.35 | 0.32 | 0.35 | 0.25 | 0.10 | 0.08 | 0.06 |
| 3.0 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.37 | 0.22 | 0.15 | 0.10 |
| 4.0 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.55 | 0.42 | 0.40 | 0.30 |

$U_2 = (A_1/A_2)U_1$. Ref. 6-4. See Chapter 7 for a diffuser with free discharge.

$A_1, A_2$ are cross-sectional areas.

## ３．例　題

以下の条件でエジェクタの吐出流量と吐出圧を求める。

吸引水：水源全圧 0 kg/cm²G で、エジェクタまでのレベル差－1m、吸引水量 80 l/s

駆動水：水源全圧 2 kg/cm²G でエジェクターまでのレベル差無し、駆動水量は未知

水源からエジェクタまでの流路：ごく近いので圧損は全て無視

流路断面積：ノズル噴出し側 20cm²、吸引水側 200cm²　(ノズル先端厚み無視)、

ディフューザ入口 220cm²、デフューザ出口 440cm²

ディフューザ効率　$\eta$ ＝0.7

**********************************

ケース①（$P_j$, $P_s$, $q_s$ が既知で、駆動水流量 $q_j$ が未知の場合)に該当する。

$p_n = P_r - 0.5\rho(1/a_s^2 + K_{rn}/a_{rn}^2)q_s^2 - \gamma \triangle Z_{rn} = 0 - 0.5x(1000/9.807)x(1/0.02^2+0)x0.08^2 - 1000x1$

$= -$**1815** kg/m²G

$q_j = [1/\{0.5\rho(1/a_j^2 + k_{on}/a_{on}^2)\}]^{0.5}\{(P_o - P_r) + 0.5\rho(1/a_s^2 + k_{rn}/a_{rn}^2)q_s^2 - \gamma(\triangle Z_{on} - \triangle Z_{rn})\}^{0.5}$

$= [1/\{0.5x102x(1/0.002^2+0)\}]^{0.5}\{(20000-0) + 0.5x102x(1/0.02^2+0)x0.08^2 - 1000x(0-1)\}^{0.5}$

$= 2.8x10^{-4}x147.7 = 0.04136$ m³/s = **41.36** l/s

$q_m = q_s + q_i$=80 +41.4=**121.4** l/s

$p_m = p_n - \{2\rho/(a_m+a_n)\}\{(q_m^2/a_m) - (q_j^2/a_j) - (q_s^2/a_s)\}$

$= -1815 - \{2x102/(0.022+0.022)\}\{(0.12141^2/0.022) - (0.04136^2/0.002) - (0.08^2/0.02)\}$

$= -1815 - 4636.4\{0.67 - 0.8554 - 0.32\} = -1815 + 2343 =$ **528** kg/m²G

$p_d = p_m + 0.5\eta\rho(1/a_m^2 - 1/a_d^2)q_m^2 = 528 + 0.5x0.7x102x(1/0.022^2 - 1/0.088^2)x0.12141^2$

$= 528 + 1019 =$ **1547** kg/m²G(0.156 kg/cm²G)

以上より　エジェクタの吐出流量は **121.4 l/s**、吐出圧は **0.155 atg** になる。

ここで、逆に $q_j$＝41.36 l/s を既知として、$p_n$ と $q_s$ を求めてみる。

$p_n = P_o - 0.5\rho(1/a_j^2 + K_{on}/a_{on}^2)q_j^2 - \gamma \triangle Z_{on}$

$= 20000 - 0.5x(1000/9.807)x(1/0.002^2+0)x0.04136^2 - 1000x0 = 20000 - 21815 = -$**1815** kg/m²G

$q_s = [1/\{0.5\rho(1/a_s^2 + k_{rn}^2/a_{rn}^2)\}]^{0.5}\{-(P_o - P_r) + 0.5\rho(1/a_j^2 + k_{on}/a_{on}^2)q_j^2 + \gamma(\triangle Z_{on} - \triangle Z_{rn})\}^{0.5}$

$=[1/\{0.5x102x(1/0.02^2+0)\}]^{0.5}\{-(20000-0)+0.5x102x(1/0.002^2+0)x0.04136^2+1000x(0-1)\}^{0.5}$

$=2.8x10^{-3}x28.474=0.0798m^3/s=$**80** l/s

従って、$p_n$ および $q_s$ とも、前計算と一致する。

## 【 解 説 】

1. 水ジェットエジェクタは、高圧の水を高速の噴流に換えてノズルから噴出させ、同軸方向に低圧の水を吸引しディフューザで速度圧を静圧に換え後工程にフィードするもの。噴流が高速になるほど、吸引量がアップする。この場合、水力上の均衡は次のようである。

① ノズル噴出口直後の噴流(駆動水)の静圧と、噴流のど廻り(吸引水)の静圧が同じであるところから、

噴流自体の静圧：$p_j=P_j-\rho u_j^2/2$、　噴流廻りの静圧：$p_s=P_s-\rho u_s^2/2$

とおいて、$p_j=p_s$ になる。$p_j$ と $p_s$ を $p_n$ と表現するとともに全圧 $P_j,P_s$ をもっと前流側の元圧 $P_o,P_r$ にとれば、次のエネルギ式が得られる。

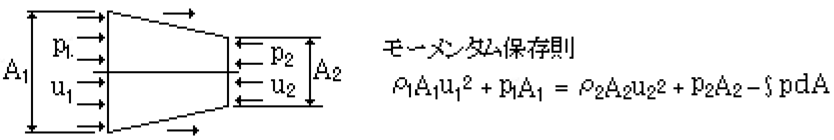
駆動水側：$P_o= p_n+0.5\rho u_j^2+0.5\,k_{on}\,\rho\,u_{on}^2+\gamma\,\triangle Z_{on}$

吸引水側：$P_r = p_n+0.5\rho u_s^2+0.5\,k_{rn}\,\rho\,u_{rn}^2+\gamma\,\triangle Z_{rn}$

流速(u)表示を、流量(q)表示に換えれば、2 項(1)の(1)(2)式が得られる。

② 駆動水流量と吸引流量の和は当然、混合流量になるので 2 項(1)の(3)式が得られる。

③ またこの混合工程では、質量保存則とともに運動量保存則が成立しなければならない。下図の縮流モデルを考える。




$\int pdA \fallingdotseq 0.5(p_1+p_2)(A_2-A_1)$ であるから、上式は、

$0.5(p_1-p_2)(A_1+A_2)=\rho A_2u_2^2-\rho A_1u_1^2$

になる。(n−m)区間即ちノズル出口からディフューザ入口までの形状はこの縮流モデルに類似する。そこで、これを本ケースに適用すると、運動量保存則による(4)式が得られる。

④ ディフューザ部分では、高流速で入って低流速ででてゆくので出口静圧がアップする。圧力損失を

考えないと、　$p_m+0.5\rho u_m^2=p_d+0.5\rho u_d^2$

変形して、　$p_d-p_m=0.5\rho u_m^2-0.5\rho u_d^2=0.5\{1-(a_m/a_d)^2\}\rho u_m^2$ ----------------------(a)

圧力損失を考えると、　$p_m+0.5\rho u_m^2=p_d^*+0.5\rho u_d^2+0.5k\rho u_m^2$

変形して　$p_d^*-p_m=(1-k)x0.5\rho u_m^2-0.5\rho u_d^2=0.5\{(1-k)-(a_m/a_d)^2\}\rho u_m^2$--------(b)

(b)を(a)で除して　$(p_d^*-p_m)/(p_d-p_m)=\{(1-k)-(a_m/a_d)^2\}/\{1-(a_m/a_d)^2\}$ ----------------------(c)

この式は、理想流体の静圧回復に対する実際流体の静圧回復の比であり、通常ディフューザ効率 $\eta$ と呼ばれる。(c)式を変形すると、

$p_d^*-p_m=[\{(1-k)-(a_m/a_d)^2\}/\{1-(a_m/a_d)^2\}](p_d-p_m)=\eta(p_d-p_m)$

これに(a) を代入して、

$$p_d{}^* - p_m = 0.5\eta\{1-(a_m/a_d)^2\}\rho u_m{}^2 = 0.5\eta\{1-(a_m/a_d)^2\}\rho (q_m/a_m)^2$$

従って $\boxed{p_d{}^* = p_m + 0.5\eta\{1/a_m{}^2 - 1/a_d{}^2\}\rho q_m{}^2 \quad (\text{但し}, \eta = \{(1-k)-(a_m/a_d)^2\}/\{1-(a_m/a_d)^2\})}$

$\eta$ の分子はいわゆる静圧回復係数 $C_p$ に該当するので、 $\boldsymbol{\eta = C_p/\{1-(a_m/a_d)^2\}}$ とも書ける。なお圧損係数 k はのど部分の摩擦圧損分も含む。拡大管部分については表 1 による。

2. (1)～(5)式はエジェクタ性能上の諸パラメータを含んでおりこれを連立して解けば、性能(例えば流量－吐出圧の関係など) がわかる。連立式ではエジェクタ寸法(断面積 a)、諸係数( k , $\eta$ )を一定とすれば、未知数は $P_o$, $P_r$, $p_n$, $p_m$, $p_d$, $q_j$, $q_s$, $q_m$ の 7 つである。このうち $p_n$, $p_m$, $p_d$, $q_m$ の 4 つは本来が従属的パラメータで
既知数にはならないので、残りの $P_o$,$P_r$,$q_j$,$q_s$ のうち、一つを未知数とし、残りの 3 つを既知数にすれば解ける。ここでは、流量 $\mathbf{q_j}$ または $\mathbf{q_s}$ のいずれかを未知数とした場合をチャートにしている。なお、$P_o$ か $P_r$ のいずれかを未知数にする場合は、次のステップをとればよい。

ステップ 1. (1)(2)式を連立して $P_o$ または $P_r$ を求める。
ステップ 2. (1)(2)式のいずれからか $p_n$ を求める。
ステップ 3. 上記で得られた $p_n$ を用いて $q_m$、$p_m$、$p_d$ が得られる。

$p_n$, $q_m$, $p_m$, $p_d$ の計算式には、チャートと同じ式が使える。

3. ここでは、性能計算のみを取り上げている。実際はエジェクタの内部構造が性能に影響する。手作りのエジェクタを念頭に、構造上の設計ポイントを挙げれば、

・ノズル噴出部のストレート長さ、ノズル先端とディフューザ入口の距離( 適度な離隔 )
・ディフューザのど長さ、拡がり角度( 出来るだけなだらかに )
・高速部分(ノズル噴出部のストレート部分/ディフューザのど部分)のエロ&/or キャビ

などになるのではないかと思う。メーカー製品形状を十分考察すべきだろう。

引用文献：

(1) j.M.ケイ「流れ学－基礎と応用」井上/山口訳（倍風館）4.3