

【整番】FE-22-TM-010	【標題】スチームエジェクタの簡易性能計算法の検討
分類：流れ(エジェクタ)/種別：技術メモ	作成年月：H17.8/改訂：Ver0.0 (H19.5)
	作成者：N.Miyamoto

全 15 枚

1. はじめに

エジェクタはポンプ同様、古くからある流体機器で、性能計算やサイジングの資料は潤沢である。しかし、もともと熱力的な要素が強くて一般の初心者には馴染みにくい所もあり、エンジニアリングのいろんな局面でブレが生じることがある。エジェクタへの認識をもっと深めるため、本 TS では下記の技術資料⁽⁰⁾や化工便覧⁽¹⁾を用いてスチームエジェクタの簡易的な性能計算の方法を洗ってみる。

“A Technical Guide—Vacuum Pressure Producing Machines and Associated Equipment”
Section 7 Ejector Equipment by K. Mangnall (Hick Hargreaves & Co. Ltd)

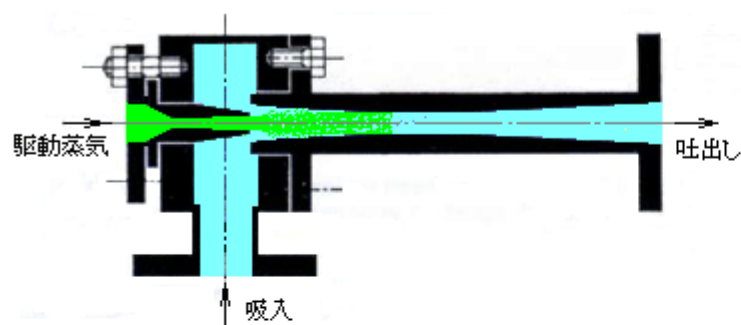
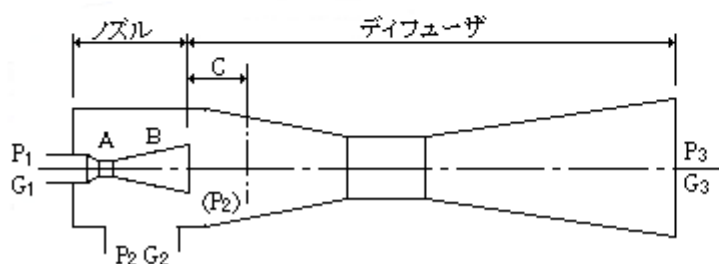


図1 エジェクタ プロフィール



$P_1 \rightarrow (P_2)$: 膨張工程

$(P_2) \rightarrow P_3$: 圧縮工程

A: ノズルのどく(チョーク)して音速発生

B: ノズルディフューザ(等エントロピー膨張 - 超音速化)

C: 混合ゾーン(等圧・不可逆変化/速度の圧力変換)

2. Hick に準じた計算方法

Hick のテキストにでてくるガス単体性能計算(添付 A 参照)の適用条件は下記の通り。

- ① 駆動側/吸引側流体は完全ガスで同種であること。
- ② ノズル入口/吸引/排出の各流速は無視する。
- ③ 混合プロセスは運動量保存則をもつ等圧変化で扱う。

これらの条件では計算プロセスはごく簡単になる。これを計算チャートにして示す。ただ Hick の式は基本概念を示すもので、一部で具体的な定義が欠いているので筆者の方で補っている。Hick 式の導出については、次々項を参照のこと。

エジェクタ性能計算チャート(Hick ベース)

駆動蒸気圧 $P_1(\text{barA})$ 、吸引蒸気圧 $P_2(\text{barA})$ 、吐出蒸気圧 $P_3(\text{barA})$ の設定

駆動蒸気温度 $T_1(\text{K})$ 、吸引蒸気温度 $T_2(\text{K})$ 、吸入蒸気の飽和温度 $T_s(\text{K})$
 重力加速度 g (9.807m/s^2)、熱の仕事当量 $J(427\text{kgfm/kcal})$ 、気体定数 $R(\text{m/K})$
 比熱比 κ 、ノズルの断面積 $F_c(\text{m}^2)$ 、モーメント効率 η ($0.82 \sim 1$)

流量係数: $\phi_c = [g \kappa \{2/(\kappa + 1)\}^{(\kappa + 1)/(\kappa - 1)}]^{0.5}$
 駆動蒸気量: $G_1 = (3600/1000) \phi_c F_c P_1 / (RT_1)^{0.5}$

定圧比熱: $C_p = \{\kappa / (\kappa - 1)\} (R/J)$

ノズル出口流速: $V_n = [2gJC_p T_1 \{1 - (P_2/P_1)^{(\kappa - 1)/\kappa}\}]^{0.5}$ -----(a)

流量比 a^* 設定

混合温度(例): $T_m = (T_s + a^* T_2) / (1 + a^*)$

混合気流速: $V_m = [2gJC_p T_m \{(P_3/P_2)^{(\kappa - 1)/\kappa} - 1\}]^{0.5}$ -----(b)

音速: $C = (\kappa g R T_m)^{0.5}$

Abort ← n $V_m < C$ (*1)

y 流速比: $\phi = V_m / V_n$

流量比: $a = (\eta - \phi) / \phi$ -----(c)

$a \doteq a^*$ n

y $G_2 = a G_1, G = G_1 + G_2$

エンド

a*値変更

記号説明: a = 質量流量比 (= G_2/G_1)、 a^* = 設定質量流量比、

C_p = 理想気体の定圧比熱 (kcal/kgK)、 T_m = 混合気の温度 (K)、 V_m = 混合気の流速 (m/s)

G = 全吐出量 (t/hr)、 G_1 = 駆動蒸気量 (t/hr)、 G_2 = 吸引蒸気量 (t/hr)、

(*1) 本計算は本体ディフューザ部ののどにおけるチョークは考慮していないので音速以上は不可。

3. 化工便覧を基にした計算方法

等エントロピー流れでは、流速 w と熱落差 Δh の関係は 次の通り。

$$w_2 = (2gJ\Delta h + w_1^2)^{0.5}$$

ここで w_2 =状態変化後の流速、 w_1 =状態変化前の流速、

Δh =状態変化前後のエンタルピー差、 J =熱の仕事当量、 g =重力加速度

Δh は、図 2Aa,2b に示すようなエジェクタの $h-s$ 線図から得られる。ただ、図 2a はやや一般化され過ぎており、スチームエジェクタには 図 2b の方がフィットする。そこで、図 2b 即ち化工便覧に準じた $h-s$ 線図に基づく計算チャートを以下に示す。化工便覧については、添付 B 参照のこと。

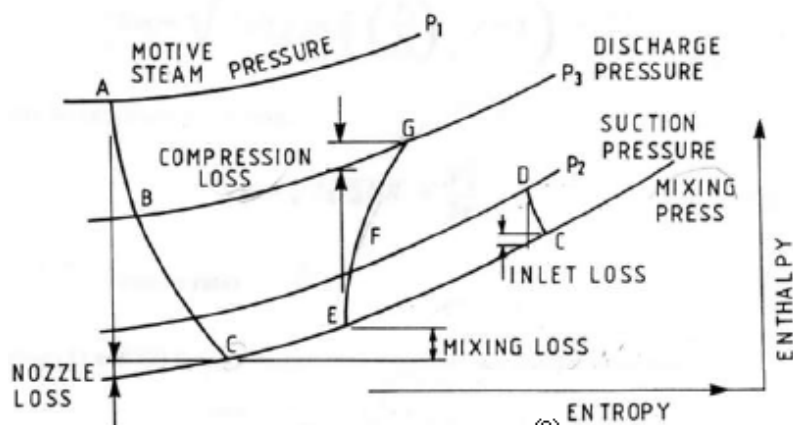


図2a エジェクタの $h-s$ 線図⁽⁰⁾

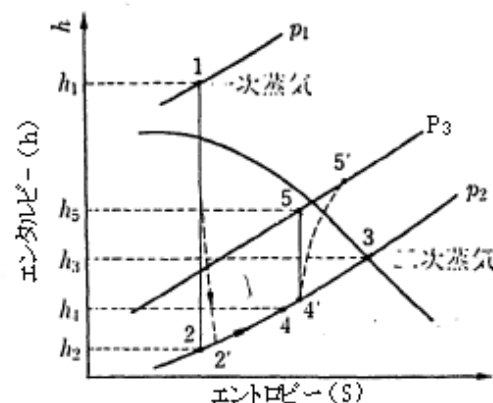


図 2b 水蒸気エジェクタの $h-s$ 線図⁽¹⁾

エジェクタ性能計算チャート(化工便覧ベース)

駆動蒸気圧 P_1 (barA)、吸引蒸気圧 P_2 (barA)、吐出蒸気圧 P_3 (barA)の設定

駆動蒸気温度 T_1 (K)、吸入蒸気温度 T_2 (K)、吸引蒸気飽和温度 T_s (K)、
比熱比 κ 、ノズルの断面積 F_c (m^2)、重力加速度 g (9.807 m/s^2)、
熱の仕事当量 J (427 $kgfm/kcal$)、気体定数 R (m/K)、
ノズル効率 η_n (標準 0.9)、混合効率 η_m (標準 0.8)、ディフューザ効率 η_c (標準 0.9)

$$\text{流量係数: } \phi_c = [g \kappa \{2/(\kappa+1)\}^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}]^{0.5}$$

$$\text{駆動蒸気量: } G_1 = (3600/1000) \phi_c F_c P_1 / (RT_1)^{0.5}$$

$h-s$ 線図から読み取り

ポイント 1 [P_1, T_1]のエンタルピー - h_1

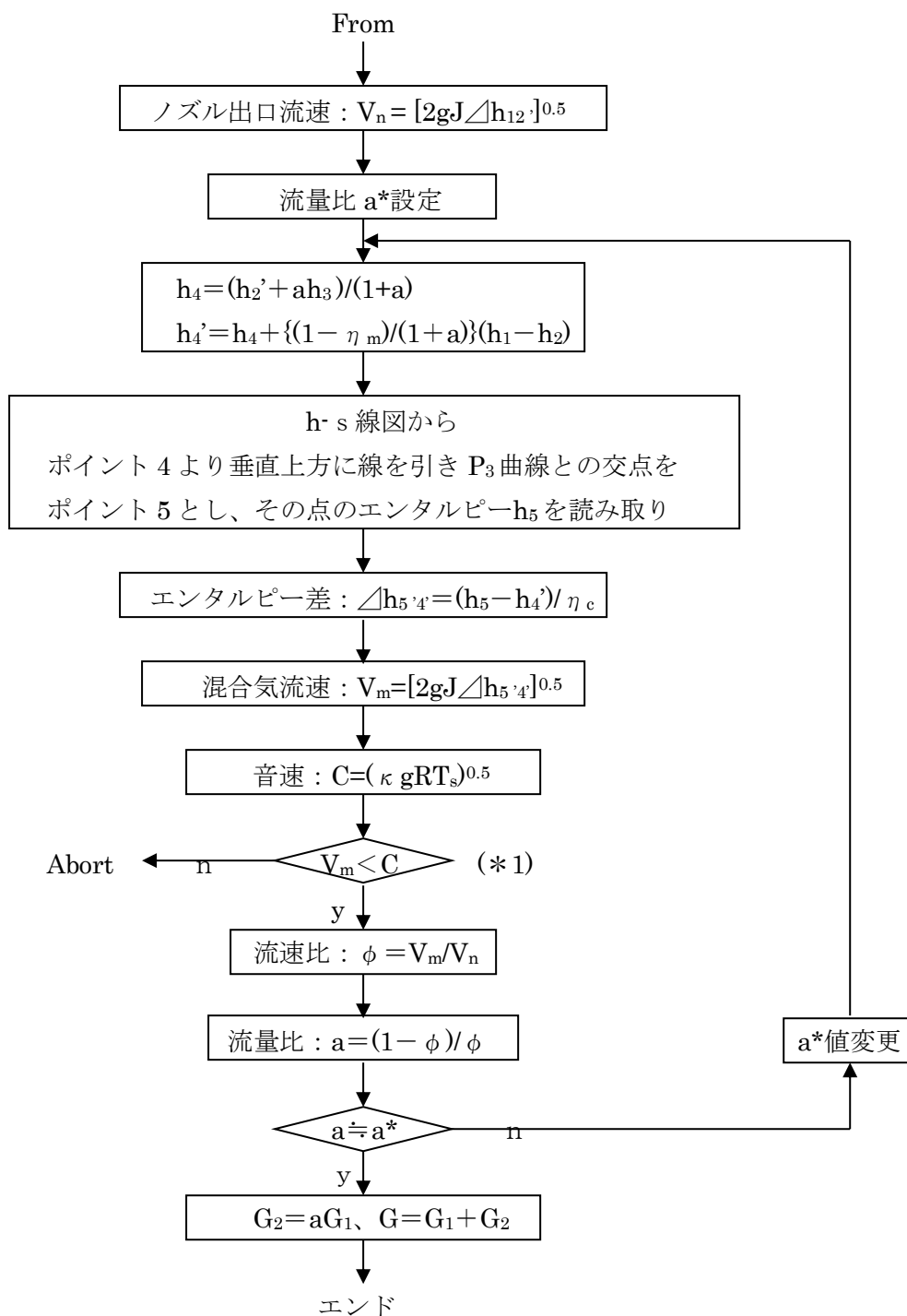
ポイント 2 [P_1 の等エントロピー降下点 P_2]のエンタルピー - h_2

ポイント 3 [P_2, T_2]のエンタルピー - h_3

$$h_1 - h_2' = \eta_n(h_1 - h_2), \quad h_2' = h_1 - \eta_n(h_1 - h_2)$$

$$\text{エントロピー落差: } \Delta h_{12}' = h_1 - h_2'$$

Next



記号説明 : h = エンタルピー (kcal/kg) サフィックス 1~5 = 各位置を示す (図 2b 参照)

a = 質量流量比 (= G_2/G_1)、 a^* = 設定流量比、

G = 全吐出量 (t/hr)、 G_1 = 駆動蒸気量 (t/hr)、 G_2 = 吸引蒸気量 (t/hr)、

(*1) 本計算は本体ディフューザ部ののどにおけるチョークは考慮していないので音速以上は不可。

4. 計算チャートの検討

(1) エジェクタはポンプ機能を有する流体機器で、図 1 のようにノズル部とディフューザ部から構成されて

ノズル部 : 高圧の駆動蒸気を減圧膨張させて超音速とし低圧蒸気を吸引する。

ディフューザ部 : 膨張した駆動蒸気と吸引蒸気を混合させディフューザ効果で昇圧圧縮する。

ノズルとディフューザは形状的によく似ており丁度、大きなラバルノズル(ディフューザ)に小さなラバルノズルを接続した形になっている。ただ、大きいラバルノズルはのど部分で縮流することがなく専らディフューザとして機能する。一方小さなノズルは完全なラバルノズルとして作用しまずのど部分で音速に次いで末広部分で膨張して超音速になり、高圧の駆動蒸気はドラスチックに低压/低温の蒸気に変換される。吸引側の低压蒸気は変換蒸気よりわずかに高いので、変換蒸気にひきずり込まれることになる。

- (2) エジェクター流れは総じて高速で等エントロピー流れで扱って差し支えない。ノズル部は図 1 に示すように駆動蒸気圧 P_1 からノズル出口端圧力 P_2' まで急降下する。 P_2' は吸引蒸気圧 P_2 に漸近しており P_2 と扱っても殆ど差し支えない。この $[P_1 - P_2]$ の圧力降下 $[dP]$ によって運動エネルギー $[w^2/2g]$ は増加しエンタルピー $[h]$ は減少する。この辺り、テキストを引用すれば

$$\begin{aligned} \downarrow \quad & AvdP = Ad(w^2/2g) = -dh \quad (A = \text{仕事の熱当量、} v = \text{比容積、} w = \text{流速}) \\ & A(w_2^2 - w_1^2)/2g = -(h_2 - h_1) \\ & w_2 = \{2g(h_1 - h_2)/A + w_1^2\}^{0.5} = \{2g \angle h_{12}/A + w_1^2\}^{0.5} \end{aligned}$$

ここで、ノズル入口流速 w_1 は超音速のノズル出口流速 w_2 に比べればはるかに小さいので、十分無視できる。従って、上式は次のようになる。なお w_2 を V_n に表示変更している。

$$V_n = \{2g(h_1 - h_2)/A\}^{0.5} = (2g \angle h_{12}/A)^{0.5}$$

更に、 $(h_1 - h_2) = C_p(T_1 - T_2)$ であるから、

$$V_n = \{2gJC_pT_1(1 - T_2/T_1)\}^{0.5} \quad (\text{なお } J = 1/A)$$

また、等エントロピー関係 $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa}$ を用いて

$$V_n = [2gJC_pT_1\{1 - (P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa}\}]^{0.5}$$

これが、**Hick 計算チャートの(a)式**になる。

以上はノズル部である。ディフューザ部でも類似の処理ができる。ディフューザの出入口を考え、

$$A(w_2^2 - w_1^2)/(2g) = -(h_2 - h_1) \rightarrow w_1 = \{2g(h_2 - h_1)/A - w_2^2\}^{0.5}$$

ノズル部のディフューザでは、のど部分で音速化して流れは超音速に加速されたが、この本体側のディフューザでは、通常のど部分で音速になることはなく流れはそのまま減速してゆくので、出口流速 w_2 は相当に減少する(その反面、静圧回復が起きる)。従って w_2 は殆ど無視できる。故に

$$w_1 = \{2g(h_2 - h_1)/A\}^{0.5}$$

更に、 $(h_2 - h_1) = C_p(T_2 - T_1)$ であるから、

$$w_1 = \{2gJC_pT_1(T_2/T_1 - 1)\}^{0.5} \quad (\text{なお } J = 1/A)$$

また、等エントロピー関係 $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa}$ を用いて

$$w_1 = [2gJC_pT_1\{(P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1\}]^{0.5}$$

入口側のサフィックスは m、出口側は 3 になるので、 $w_1 = V_m$ 、 $T_1 = T_m$ 、 $P_1 = P_m$ 、 $P_2 = P_3$ とすれば

$$V_m = [2gJC_pT_m\{(P_3/P_2)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1\}]^{0.5}$$

これが、**Hick 計算チャートの(b)式**となる。

しかし、この式で困るのは混合温度 T_m の定義がないことである。そこで、混合後の全エンタルピーが混合前の 2 つの蒸気のそれぞれの全エンタルピーに等しいとすれば、

$$(G_1 + G_2)C_pT_m = G_1C_pT_2' + G_2C_pT_2$$

ここで、 T_2' は駆動蒸気側の温度であるが、通常ノズルの減圧は大きくノズル出口圧力 P_2' はかなり飽和蒸気圧を下回って湿り蒸気域にあるので、 T_2' は飽和蒸気温度 T_s とみなせる。従って

$$T_m = (T_s + G_2 T_2) / (G_1 + G_2) = (T_s + a T_2) / (1 + a) \quad \text{ここで } a = G_2 / G_1$$

無論、この設定はきわめて近似的なものである。

次に G_1 と G_2 の設定について。駆動蒸気の質量流量 G_1 はラバルノズルの公式より

$$G_1 = \phi_c F_c P_0 / (RT_0)^{0.5}$$

ここで、全圧 P_0 及び全温度 T_0 は低流速のときの P_1, T_1 に等しいので、この式は

$$G_1 = \phi_c F_c P_1 / (RT_1)^{0.5}$$

になる。計算チャートでは、 G_1 を t/hr 単位とするため(3600/1000)を乗じている。この駆動蒸気流量 G_1 に対して吸引に対して吸引蒸気流量 G_2 がどの程度になるか？

ノズル部とディフューザ部は連続しているため、次の運動量保存則が成立しなければならない。

$$\eta (G_1 V_n + G_2 V_v) = (G_1 + G_2) V_m$$

ここで η はモーメント効率であって、ノズル/吸引側の運動エネルギーが混合工程で失われる分をカウントしている。また V_v は吸引側の流速を示している。この吸引流速は通常 V_n に比べて格段に小さいので、仮に G_2 が G_1 の 2 倍程度になっても、左辺()内の $G_2 V_v$ はほぼ無視できる。従って

$$\eta G_1 V_n \doteq (G_1 + G_2) V_m$$

ここで $a = G_2 / G_1$ 、 $\phi = V_m / V_n$ と置けば、次の流量比 a が求まる。

$$a = (\eta - \phi) / \phi$$

これが、**Hick 計算チャートの(c)式**となる。

以上を手順化したものが【Hick ベースのエジェクタ性能計算チャート】である。まず V_n 次いで V_m を計算して速度比 ϕ を求め、これから流量比 a を求めて、予め求めた流量 G_1 に $[a]$ 及び $[1+a]$ を乗じて、 G_2 および G を求める。なお、計算条件 P_2, P_3 の設定については後述する。

(3) この Hick の計算式には、幾つかの問題がある。例えば

① 定圧比熱 C_p が理想気体の $\{ \kappa / (\kappa - 1) \} (R/J)$ に固定されている。蒸気の場合

$$C_p = \{ \kappa / (\kappa - 1) \} (R/J) = (1.3/0.3)(47.06/427) = 0.48$$

程度になる。通常のスチームエジェクタでは駆動蒸気や吸引蒸気は $[1 \sim 24 \text{ ata}] \times [120 \sim 250^\circ \text{C}]$ の範囲にあり実際の比熱は 0.48～0.7 程度でバラつくので

$$\text{速度の誤差} = (0.48/0.48)^{0.5} \sim (0.7/0.48)^{0.5} = 1 \sim 1.2$$

程度になる。この速度の誤差が曖昧になっている。

② 図 2b から判るように V_n, V_m 速度計算のもとになる等エンタルピー落差 $(h_1 - h_2), (h_5 - h_4)$ は摩擦損失で湾曲して $(h_1 - h_2)', (h_5' - h_4')$ に変わるが、この変化が式の中で考慮されていない。

③ ここでは T_m を取って定義しているが。固定された C_p と相まって(b)式の $C_p T_m$ は便宜的なものになっている。

蒸気は理想気体からの逸脱が大きい流体であるから、理想気体に準じた(a)(b)式は本来、スチームエジェクタには不向きである。そこで蒸気 $h-s$ 線図から等エントロピー落差 $\angle h_{12}'$ や $\angle h_{4'5}'$ を求めて、速度を計算する方がより正確と思われる。化工便覧ベースの計算チャートはこの趣旨で作成される。

さて[化工便覧 4.3 エジェクタ]の記述によれば、

ノズル部の等エントロピー落差： $(h_1-h_2)=\eta_n(h_1-h_2)$

混合蒸気のエントルピー： $h_4=h_4+\{(1-\eta_m)/(1+a)\}(h_1-h_2)$

$$h_4=(h_2'+ah_3)/(1+a)$$

ディフューザ部の等エントロピー落差： $h_5-h_4=(h_5-h_4)/\eta_c$

太字は読み取り値

ノズル部の等エントロピー落差は、前述のごとくノズル流速の超音速化によってエンタルピーが運動エネルギーに変換することによって生じる。この場合、摩擦によってエネルギーの一部が運動エネルギーに変換し実際の流速にブレーキをかける。ノズル部の流れ(膨張流れ)では、

$$w_2^2-w_1^2=2gJ(h_1-h_2) \quad \text{但し} \quad (h_1-h_2)>0$$

実際には w_2 が減速するので $(w_2^2-w_1^2)$ は小さくなり、実際の (h_1-h_2) も小さくなる。故に

$$\eta_n=(h_1-h_2')/(h_1-h_2) < 1$$

図 2b をみれば判るように、実際の落差 (h_1-h_2') は、垂直落差 (h_1-h_2) より小さくなっている。摩擦のある場合の流速とない場合の流速の比を ϕ とし、入口流速 w_1 を無視すれば

$$\eta_n=(h_1-h_2')/(h_1-h_2)=(\phi^2 w_2^2)/w_2^2=\phi^2$$

減速比 ϕ は Min.0.95 程度⁽²⁾ なので、 η_n は 0.9 程度になる。

一方、ディフューザ部の流れ(圧縮流れ)については、

$$w_4^2-w_5^2=2gJ(h_5-h_4) \quad \text{但し} \quad (h_5-h_4)>0$$

実際には w_5 が減速するので $(w_4^2-w_5^2)$ は大きくなり、実際の (h_5-h_4') も大きくなる。故に、効率は

$$\eta_c=(h_5-h_4')/(h_5-h_4) < 1$$

図 2b をみれば判るように、実際の落差 (h_5-h_4') は、垂直落差 (h_5-h_4) より大きくなっている。これはノズル部の流れと違う。 η_c も通常 0.9 程度に採られているようである。

なお、ディフューザ部の熱落差 (h_5-h_4') は h_4' の値に依存している(何故なら h_5 は h_4' の位置で決まる)。そこで、混合蒸気のエントルピー h_4' の導入について考えてみる。

まず、混合蒸気的全エンタルピーは、混合前の 2 つの流体のもつ全エンタルピーの和であるから

$$(G_1+G_2)h_4=(G_1h_2'+G_2h_3)$$

$G_1/G_2=a$ とすれば、混合後のエンタルピーは、

$$h_4=(h_2'+ah_3)/(1+a)$$

となる。しかし、混合に際して、その運動エネルギーの一部が渦損失となってエンタルピーを増加させる。故に、実際の混合後のエンタルピー h_4' は、駆動蒸気の落差 (h_1-h_2) を指標とし次のように増加する。

$$h_4'=h_4+\{(1-\eta_m)/(1+a)\}(h_1-h_2)$$

ここで、混合効率は $\eta_m=h_4/h_4'$ である。通常 η_m は 0.8 程度。 h_4' が等エントロピー落差の基点になる。

以上で得られた等エンタルピー落差によって、ノズル出口速度 V_n 、混合気流速 V_m は計算される。この V_n, V_m を Hick の(a)(b)式に置き換えたものが、化工便覧ベースの計算チャートである。

化工便覧ベースの計算チャートは、実際の蒸気表に基づいているので、理想気体をベースにした Hick ベースの計算チャートより確度が高いと思われる。但し、 $h-s$ 線図読み取りなので反復計算に相当、手間がかかる。

(4) Hick ベースであれ、化工便覧ベースであれ、駆動蒸気圧 P_1 、吸引蒸気圧 P_2 及び吐出圧 P_3 の設定には

ルールがある。当然ながら、 P_1 は P_2, P_3 より大きい。また通常 P_3 は P_2 より大きいので、まず

$$P_1 > P_3 > P_2$$

であることが前提になる。また P_1 と P_2 の関係は、通常 P_1 が減圧された後のノズル出口圧を P_2 と等しいと仮定しているので、ラバルノズルの挙動と直結する。ラバルノズルの挙動には

- | | |
|------------------|---------------------------|
| $P \ll P_b$ のとき： | 衝撃膨張(仮称)。末広ノズル内に垂直衝撃波 |
| $P < P_b$ のとき： | 過膨張。末広ノズル出口以降で斜め衝撃波発生 |
| $P = P_b$ のとき： | 適正膨張。 |
| $P > P_b$ のとき： | 不足膨張。末広ノズル出口以降でも膨張(膨張波発生) |

ここで P = ノズル出口圧力、 P_b = 背後圧(ここでは P_2 に該当)。上記については図3を参照。

所定通り即ち設計通りの吸引能力を得るには適正膨張させる。衝撃膨張や過膨張では流れの不連続を償うために衝撃波がでて不安定になる。また、不足膨張では混合域にいても加速するが不十分で吸引能力は低下すると思われる。したがって P と P_2 が一致するように設計する。この場合、出口圧 $P(=P_2)$ は比熱比 κ , 全圧 $P_0(=P_1)$ 及び[ノズル出口とノズルのどの面積比]から決まってくる。例えば[入口圧力 $P_1=14\text{ata}$ 、比熱比 $\kappa=1.3$ 、面積比1.404]の場合、機工便覧第11編第46表(次頁)から、 $P_0/P=5$ 即ち $P_2/P_1=5$ であるから背圧(吸引圧力)は $P_2=P_1/5=14/5=2.8\text{ata}$ になる。以上の事実を踏まえて、実際の計算チャートの運用は次のように行う。

- ① エジェクタ仕様未定の場合：プロセス上の要求に合わせて設定。但し $P_1 > P_3 > P_2$ とする。なお (P_1/P_2) はエジェクタ仕様上、可能な範囲で設定。
- ② エジェクタ仕様既定の場合：上記のように第46表から (P_1/P_2) を設定。

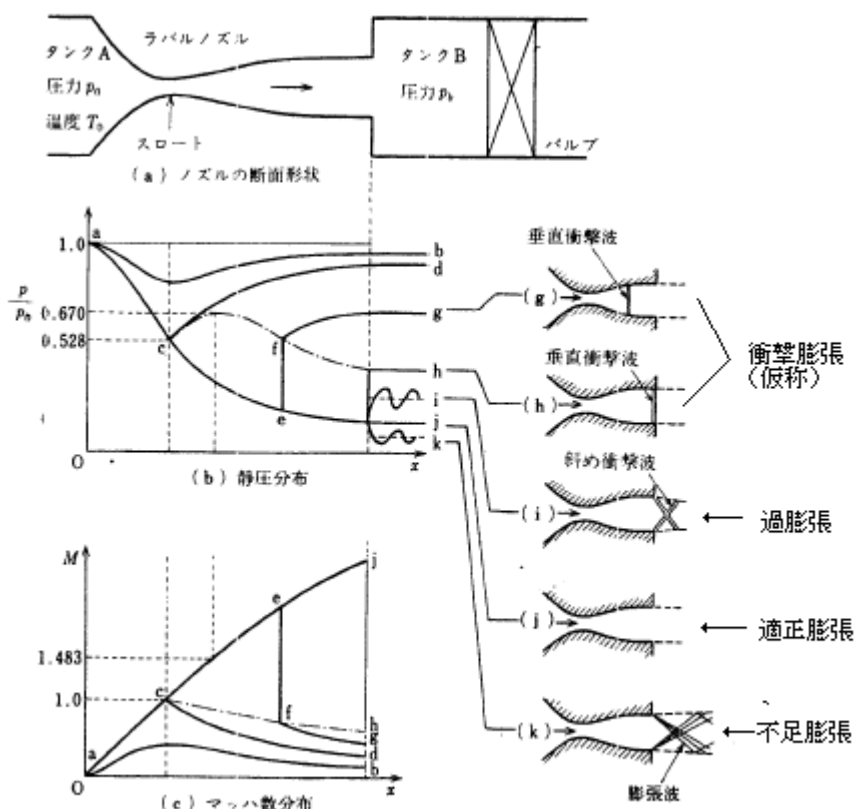


図3 ラバルノズルの流れ－文献(3)より引用

第 46 表 末広ノズルの $a/a_c, \phi, Mc=w/w_c$

圧力比 P_0/P	末広比 $a/a_c = \phi_c/\phi$					
	$\kappa = 1.135$	$\kappa = 1.276$	$\kappa = 1.30$	$\kappa = 1.373$	$\kappa = 1.40$	$\kappa = 1.66$
2	1.015	1.006	1.005	1.002	1.002	1.000
3	1.166	1.121	1.115	1.098	1.093	1.054
5	1.533	1.419	1.404	1.360	1.346	1.240
7	1.893	1.709	1.684	1.614	1.591	1.423
10	2.408	2.115	2.076	1.967	1.931	1.671
15	3.210	2.734	2.670	2.497	2.441	2.035
25	4.684	3.836	3.724	3.424	3.327	2.646
50	7.977	6.190	5.960	5.353	5.160	3.843
100	13.80	10.14	9.682	8.492	8.119	5.655

文献(3)より引用

5. 例題

運転変更して、既存のエジェクタを駆動蒸気 $18 \text{ kg/cm}^2\text{A}/235^\circ\text{C}(508\text{K})$ 、吐出圧 $3 \text{ kg/cm}^2\text{A}$ で動かしたい。この場合の吐出流量は如何？ なおエジェクタの[ノズルのど面積]は $0.008334 \text{ m}^2(103\text{mm 径})$ 、[ノズル出口/ノズルのどの面積比]は 1.54 である。また比熱比 1.3、気体定数 47.06 m/K とする。

第 46 表より、面積比 1.54 のときの圧力比(P_0/P)は 6、従って、吸引圧力は $P_2=P_1/6=18/6=3 \text{ ata}$ になる。その場合、過熱度からみて蒸気温度 T_2 を約 $141^\circ\text{C}(414\text{K})$ とする。飽和温度は $132.9^\circ\text{C}(406\text{K})$ 。

はじめに、Hick ベースの計算チャートを用いる。

$$\text{流量係数: } \phi_c = [g \kappa \{2/(\kappa+1)\}^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}]^{0.5} = [9.807 \times 1.3 \times (2/2.3)^{2.3/0.3}]^{0.5} = 2.09$$

$$\text{駆動蒸気量: } G_1 = (3600/1000) \times 2.09 \times 0.008334 \times 180000 / (47.06 \times 508)^{0.5} = 73 \text{ t/hr}$$

$$\text{定圧比熱: } C_p = \{\kappa/(\kappa-1)\}(R/J) = (1.3/0.3) \times (47.06/427) = 0.478$$

$$\begin{aligned} \text{ノズル出口流速: } V_n &= [2gJC_p T_1 \{1 - (P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa}\}]^{0.5} \\ &= [2 \times 9.807 \times 427 \times 0.478 \times 508 \times \{1 - (3/18)^{0.23077}\}]^{0.5} = 830 \text{ m/s} \end{aligned}$$

モーメント効率 $\eta = 1.0$ の場合、繰り返し計算は $a^* = 1.47$ で収束したので、これを確認する。

$$\text{混合温度: } T_m = (T_s + a^* T_2) / (1 + a^*) = (406 + 1.47 \times 414) / (1 + 1.47) = 410.8 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \text{混合気流速: } V_m &= [2gJC_p T_m \{(P_3/P_2)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1\}]^{0.5} \\ &= [2 \times 9.807 \times 427 \times 0.478 \times 410.8 \times \{(4/3)^{0.23077} - 1\}]^{0.5} = 335.9 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、音速 } C = (\kappa g R T_m)^{0.5} = (1.3 \times 9.807 \times 47.06 \times 410.8)^{0.5} = 496.5 \text{ m/s}$$

故に、 V_m は亜音速であり OK

$$\text{流速比: } \phi = V_m / V_n = 335.9 / 830 = 0.4048$$

$$\text{流量比: } a = (1 - \phi) / \phi = (1 - 0.4048) / 0.4048 = 1.47 \rightarrow a^* \text{ に等しいので OK}$$

$$\text{吸引流量: } G_2 = a G_1 = 107.3 \text{ t/hr}$$

$$\text{吐出流量: } G = G_1 + G_2 = 107.3 + 73 = 180.3 \text{ t/hr}$$

モーメント効率 $\eta = 0.82$ の場合、繰り返し計算は $a^* = 1.0275$ で収束したのでこれを確認する。

混合温度 : $T_m = 410.7\text{K}$ 、 混合気流速 : $V_m = 335.7\text{m/s}$
 流速比 : $\phi = 0.4044$ 、 流量比 : $a = 1.0275$
 吸引流量 : $G_2 = 75\text{t/hr}$ 、 吐出流量 : $G = 148\text{t/hr}$

次に化工便覧ベースの計算チャートを用いて計算する。図 4 を参照のこと。

$G_1 = 73\text{ t/hr}$ ----- Hick ベースに同じ。

蒸気の $h-s$ 線図から読み取ると

$$h_1 = 688\text{ kcal/kg}, h_2 = 608\text{ kcal/kg}, h_3 = 655\text{ kcal/kg}$$

熱落差($h_1 - h_2$)は $688 - 608 = 80\text{ kcal/kg}$ 。実際の熱落差 ($h_1 - h_2$)及びエンタルピ(h_2)は

$$\Delta h_{12'} = (h_1 - h_2) = \eta_n (h_1 - h_2) = 0.9 \times 80 = 72\text{ kcal/kg}$$

$$h_{2'} = h_1 - \eta_n (h_1 - h_2) = 688 - 72 = 616\text{ kcal/kg}$$

ノズル出口流速 V_m は

$$\text{ノズル出口流速 : } V_m = [2gJ\Delta h_{12'}]^{0.5} = (2 \times 9.807 \times 427 \times 72)^{0.5} = 776.5\text{ m/s}$$

繰り返し計算は $a^* = 1.278$ で収束したので、これを確認する。

$$h_4 = (h_{2'} + ah_3)/(1+a) = (616 + 1.278 \times 655)/(1+1.278) = 637.9\text{ kcal/kg}$$

$$h_{4'} = h_4 + \{(1 - \eta_m)/(1+a)\}(h_1 - h_2) = 637.9 + (0.2/2.278) \times 80 = 644.9\text{ kcal/kg}$$

$$h_5 = 657.4\text{ kcal/kg} \text{ , } h_5 - h_{4'} = 12.5\text{ kcal/kg}$$

$$\Delta h_{5'4'} = (h_5 - h_{4'})/\eta_c = 12.5/0.9 = 13.875\text{ kcal/kg}$$

$$\text{混合気流速 : } V_m = [2gJ\Delta h_{5'4'}]^{0.5} = (2 \times 9.807 \times 427 \times 13.875)^{0.5} = 340.9\text{ m/s}$$

$$\text{ここで、音速 } C = (\kappa gRT_s)^{0.5} = (1.3 \times 9.807 \times 47.06 \times 406)^{0.5} = 494\text{ m/s}$$

故に、 V_m は亜音速であり OK

$$\text{流速比 : } \phi = V_m/V_n = 340.9/776.5 = 0.439$$

$$\text{流量比 : } a = (1 - \phi)/\phi = (1 - 0.439)/0.439 = 1.278 \rightarrow a^* \text{ に等しいので OK}$$

$$\text{吸引流量 : } G_2 = aG_1 = 1.278 \times 73 = 93.3\text{ t/hr}$$

$$\text{吐出流量 : } G = G_1 + G_2 = 73 + 93.3 = 166.3\text{ t/hr}$$

以上要約すると

Hick ベース : 180.3 t/hr (モーメント効率 1 のとき)
 148 t/hr (モーメント効率 0.82 のとき)
 化工便覧ベース : 166.3 t/hr

モーメント効率についての Hick の説明はあいまいだが、効率 0.82の方が化工便覧ベースに近いと思われる。148 t/hr と 166.3 t/hr は 12% 程度のずれがあるが近いといえば近い。化工便覧ベースの値の方が実際に近いと思われるので、この試算だけみれば Hick 計算は安全側といえる(傾向的にも然り)。

この計算の経過を図 4 (a)に示す。図 4 (b)にこれをモデル的に示すが本ケースでは P_2 曲線と P_3 曲線の間隔 B が、 $h_{4'}$ が動く範囲(着色部)でほぼ一定になっている。そのため 熱落差 $\Delta h_{5'4'}$ が、 $h_{4'}$ の位置に殆ど関係なく一定になっている。従って実質、反復計算は不要で、 $P_1 \sim P_2 \sim P_3$ の関係から一義的に流速 V_m, V_n が決まり流速比 ϕ から、流量比 $a = (1 - \phi)/\phi$ が $h_{4'}$ の位置に関係なしに求められる。この傾向は通常の低圧蒸気(2~6ata 程度)の範囲で然りであり、故に $P_2 \sim P_3$ 曲線の間隔 B のみで混合気の流速 V_m を

粗々見積もることができる。これに関連して、吐出圧 P_3 が一定で、吸引圧 P_2 が変化するとき、図4の熱落差 A の増加率は小さく熱落差 B の増加率は大きいので、結局、吸引圧 P_2 が高くなる程すなわち吐出圧 P_3 に近づく程、速度比 ϕ は小さくなり流量比 a は大きくなる。これは文献類に示されるエジェクタの性能線図(例えば 図5)の傾向と一致する。

なお、図4から判るように、エジェクタの混合プロセスの大半が、湿り蒸気域で起きていることがわかる。この傾向はスチームエジェクタに共通している。

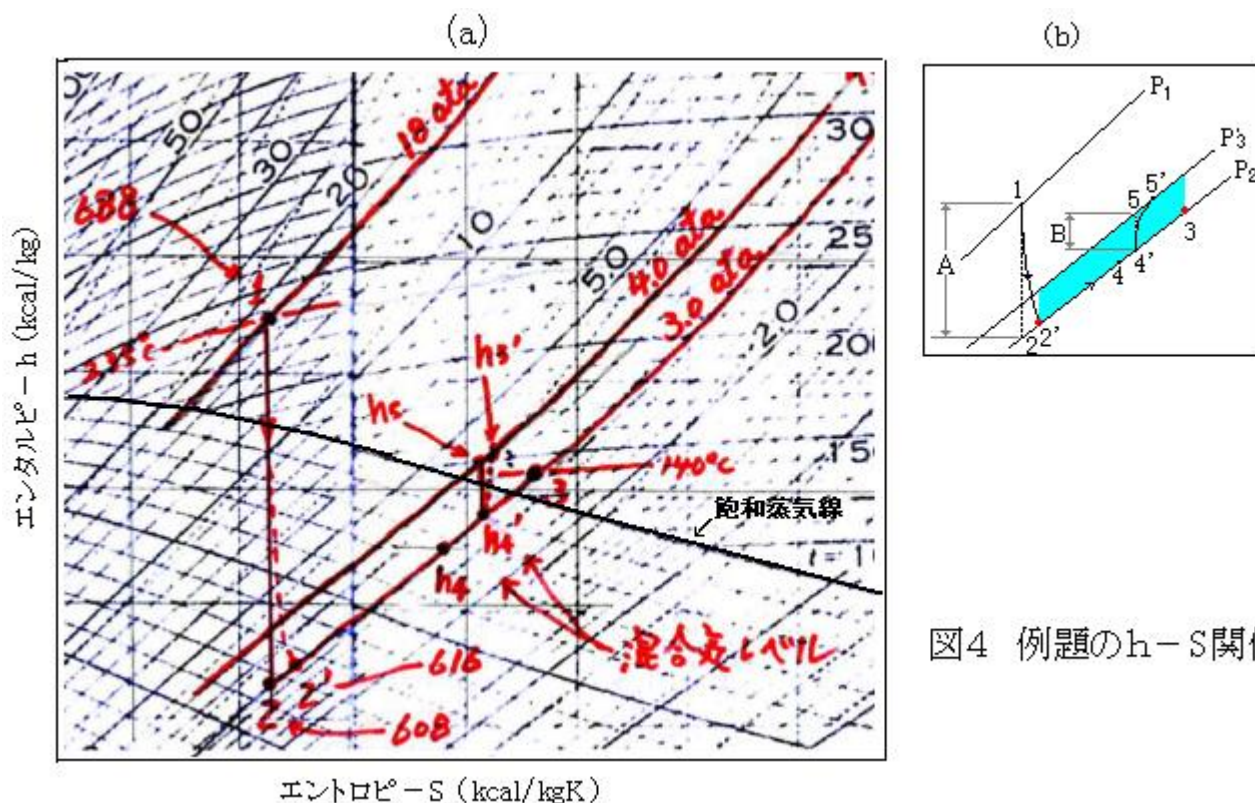
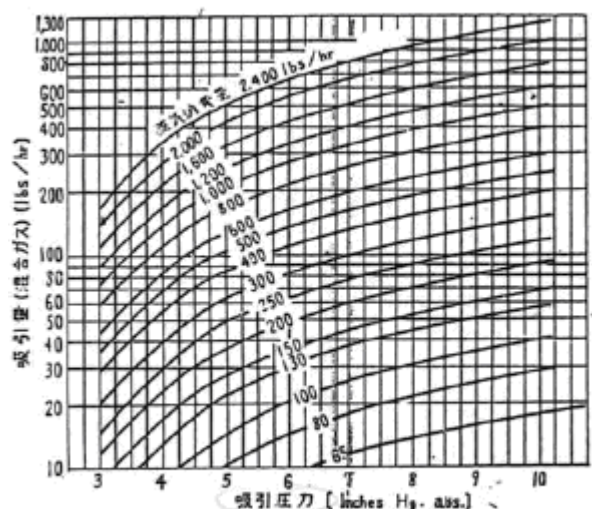


図4 例題のh-S関係

図5 エジェクタの吸引能力の例(文献(4)より引用)



第25A図 単段エジェクタの蒸気消費量(作動蒸気圧力90psig)

6. 結 論

- (1) 以上、スチームエジェクタの性能について種々検討したが、結論的に Hick の計算方法は、線図を用いないので計算は容易であるが、スチームエジェクタには不向きで誤差がでる。ただざっとしたプレ計算や、理想気体からのプレの少ないガス(H_2 , N など)には使用できると思う。一方、

化工便覧ベースは実際の $h-s$ 線図を使うので Hick の計算方法より精度はよくなる。ただ残念ながら線図読み取りが含まれるので不便である。しかし $h-s$ 線図の読み取りを計算に換えることは可能である。今後、その方向で TS 化してみたい。

- (2) なお、エジェクタは流れ系の 1 構成要素である。例えば Flow-master などの管路解析で管路モデルの中にこれを組み込んで解析することが、極めて重要ではないかと思われる。今後の検討の課題とする。
- (3) 今回は、スチームコンデンサ性能の一般的な傾向には余り触れていないが、性能計算の方途が開けたので、次の Ver.up ではこれを追加したい。

引用文献：

- (0) “A Technical Guide—Vacuum Pressure Producing Machines and Associated Equipment”
Section 7 Ejector Equipment by K. Mangnall (Hick Hargreaves & Co. Ltd)
- (1) 化学工学便覧 4. 流動の熱力学 4.3 エゼクター
- (2) 機械工学便覧(改訂第 6 版) 第 11 編 2.7.6 摩擦損失を伴うノズルよりの噴流
- (3) 「エゼクタの設計(2)」尾花 プラント工学 1968 年 9 月号

次頁以下に添付 A,B を

添付A

**STEAM CONSUMPTION RATIO ($\sigma = W_s/W_v$) FOR EJECTORS
DEALING WITH VAPOUR.**

The theoretical nozzle discharge velocity is given by the isentropic equation,

$$V_n = \sqrt{2gJ C_p T_1 \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) + \frac{V_1^2}{2g}} \quad ?$$

which may be expressed in the form

$$V_n = \sqrt{2gJ\Delta Hd} + \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{.....(1)}$$

Similarly the velocity of the mixture is given by the isentropic equation

$$V_m = \sqrt{2gJ C_p T_m \left(\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) + \frac{V_3^2}{2g}} \quad ?$$

which may be expressed in the form

$$V_m = \sqrt{2gJ\Delta HR} + \frac{V_3^2}{2g} \quad \text{.....(2)}$$

$$\text{Let } \phi = \frac{V_m}{V_n} = \text{Velocity ratio} \quad \text{.....(3)}$$

Substituting (1) and (2) in (3) and ignoring approach and leaving velocities

$$\phi = \frac{V_m}{V_n} = \sqrt{\frac{\Delta HR}{\Delta Hd}}$$

Where ΔHR and ΔHd equal Isentropic Enthalpy change from Mollier diagram in b.t.u./lb. (see pages 151-154).

By law of conservation of momentum, when η_m = momentum efficiency

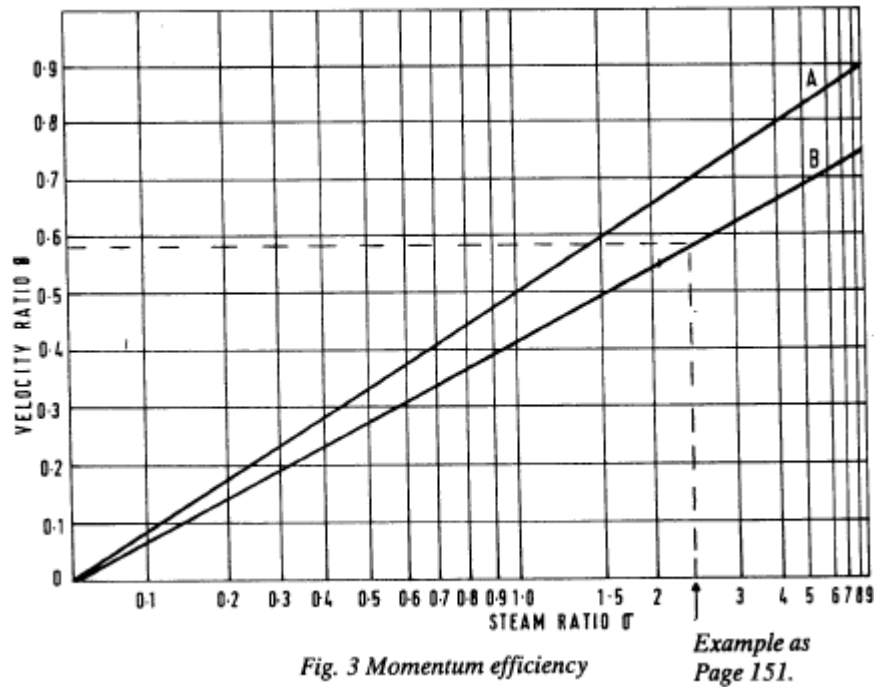
$$\eta_m W_s V_n = (W_s + W_v) V_m \quad \therefore \frac{V_m}{V_n} = \phi = \frac{\eta_m W_s}{W_s + W_v}$$

$$\text{but } \sigma = \frac{W_s}{W_v} \quad \therefore \phi = \frac{\eta_m \sigma}{\sigma + 1} \quad \text{or } \sigma = \frac{\phi}{\eta_m - \phi} \quad \text{.....(4)}$$

The momentum efficiency η_m varies with the value of the velocity ratio ϕ and the shape factors for multi-nozzle and single nozzle ejector units, usually it has maximum values at velocity ratios of 0.35 to 0.55 giving steam consumption ratio ($\sigma = W_s/W_v$) values as shown in Fig. 3.

The line *OA* on Fig. 3 represents 100% momentum efficiency obtained by substitution in Formula (4) the base scale has been modified in order to obtain a straight line. The line *OB* represents the momentum efficiency line which can be used in practice with correct design of ejector profiles.

次頁へ



なお、Hick にはエジェクター内部の混合プロセスに関連して次の記述があるので記しておく。

.....

混合プロセスを等圧プロセスであるとする仮定については、吸引混合プロセスの正確な特性がわかっていないため、特に異論も多い。混合プロセスは、いろんな理由から純粋な等圧プロセスとやや異なっている。例えば、

(a) ノズルは通常、より低い吸引圧力で安定した挙動を得るため **Over-expansion** で設計される。

それで通常運転である種の **shock-loss** があるだろう。

(b) ノズル排出側にての[過飽和]の影響でプロセスが複雑になっている(筆者注記)。

(c) 吸引チャンバと吸引チャンバ手前の入口の間である圧力差がなければ蒸気を吸い込めない。

(d) エジェクタ形状や表面特性による境界層の存在で局部的な **shock-loss** を引き起こす。この状態での熱力的挙動は予測できない。ある人はこの要素プロセスは **constant area process** として

解析すべきだと云っている。

(e) 衝撃波による圧縮はユニット(エジェクタを含む全体システム)の全圧縮/運転特性によってかなり変わってくる。

完全混合/一様な速度分布(V_m ?)は低流量でかなり長いエジェクタでも起こり得ないことを研究者は示している。

(筆者注記) ノズルの出口温度は例えば 18 ata の駆動蒸気を 3ata まで減圧するとき、等エントロピー関係 $P_1/T_1^{\kappa/(\kappa-1)} = P_2/T_2^{\kappa/(\kappa-1)}$ より

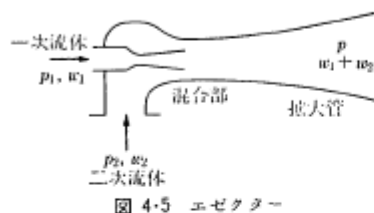
$$T_2 = (P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa} = (3/18)^{0.2308} = 336K \quad (63^\circ C)$$

$$T_2 = (P_2/P_1)^{(\kappa-1)/\kappa} = (3/18)^{0.2308} = 336K \quad (63^\circ C)$$

となり、凝縮してしまう筈であるが、**過飽和**によって蒸気のまま混合室に噴出する。

添付 B 4.3 エゼクター

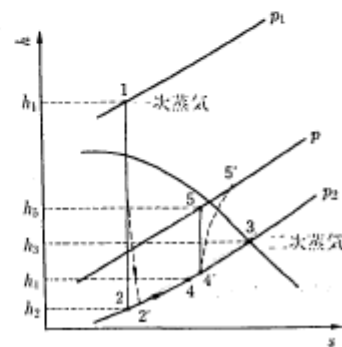
エゼクター (ejector) は図 4.5 に概略を示すように、ノズルから噴出させる高速流体（水蒸気を用いることが多い）の運動エネルギーを利用して第 2 の流



体を流動させたり圧縮させる装置である。実験室における水流ポンプをはじめ工業的には真空蒸留などに応用されている。図に示されているようにエゼクター

は一次流体の高圧ノズル、二次流体の導入口、混合部および拡大管などから構成されている。一次流体と二次流体が同種類の場合には、熱力学的解析が容易になる。一例として一次、二次流体とし

て水蒸気を用いた場合を考察する。簡単のため両流体の導入口および拡大管端の速度を無視することにして、図 4.6 に示す水蒸気の h - s 線図より解析することにする。いま 1 で示される状態の一次過熱水蒸気がノズルから噴出して、二次蒸気の圧力 p_2 まで断熱的に膨張して 2 なる状態になったとする。実際のノズルでは膨張が不可逆現象であるため、図に点線で表されているよう



に 2' の状態となる。その状態でのエンタルピー h_2' は式 (4.21) のノズル効率 η_n を用い

$$\eta_n = \frac{h_1 - h_2'}{h_1 - h_2} \quad (4.22)$$

この蒸気が 3 なる状態で示される飽和水蒸気と混合して状態 4 となる。混合物のエンタルピーは加成性が成り立つことにより次のようになる。

$$h_4 = \frac{w_1 h_2' + w_2 h_3}{w_1 + w_2} \quad (4.23)$$

ただし、混合に際し一次蒸気の運動エネルギー ($h_1 - h_2$) は摩擦損失として一部失われて 4' の状態になる。その状態でのエンタルピー h_4' は混合部での効率を η_m とすれば、次式より求められる。

$$(1 - \eta_m)(h_1 - h_2) = \frac{w_1 + w_2}{w_1} (h_4' - h_3) \quad (4.24)$$

ここで η_m は一般に 0.8 程度の値をとることが知られている。混合蒸気は拡大管において運動エネルギーを失い、それを圧力にかえて 5 の状態へと圧縮される。実際は不可逆性のために点線で示されているように 4' より 5' へと変化する。圧縮に際しての効率を η_c とすれば 5' の状態におけるエンタルピー h_5' は

$$(h_5' - h_4')\eta_c = h_5 - h_4' \quad (4.25)$$

効率 η_c の値は 0.9 程度である。エゼクター全体についてのエネルギー収支は、周囲との熱および仕事のやりとりがないので次のようになる。

$$w_1 h_1 + w_2 h_3 = (w_1 + w_2) h_5' \quad (4.26)$$

以上に述べた方法により、エゼクターの操作条件を決めることができるが、その一例を次の例題にて示す。