

【整番】 FE-11-TM-002	【標題】 水平ノズルにおける気体吸込渦発生の可否判定
分類：流れ(吸込み渦)/種別：技術メモ	作成年月：H19. 10/改訂：Ver0.1(H19.11)
	作成者：N.Miyamoto

補正係数見直しほか

全8枚

1. はじめに

気液界面を持つ槽類では、その界面から発生した気体吸込み渦（流出渦とも云う）が排出ノズル(管台)から配管内にはいって、エアハンマリング/過剰水撃/振動/流量低下などの不具合を生じることがある。この場合、液面(自由界面)から吸込み口までの深さ(被り水深)をどの程度にしたら気体の混入がさげられるか？

本 TS では下図のような水平に付けられた排出ノズルを対象にして、吸込み渦発生の可否判定方法を提案してみる。鉛直下向き/上向き排出ノズルについては次の TS による。

[FE-11-TM-001 鉛直下向きノズルにおける気体吸込渦発生の可否判定]

[FE-11-TM-003 鉛直上向きノズルにおける気体吸込渦発生の可否判定]

なお吸込渦の基本的な事項や用語(例えば断続渦 etc)については、[FE-11-TM-001]の解説を参照のこと。

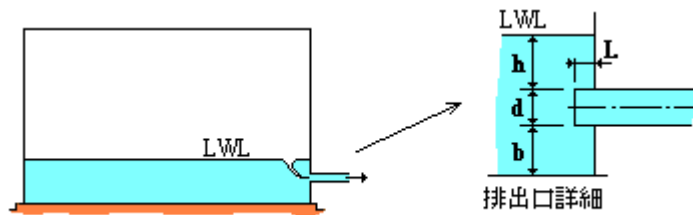


図 1

2. 吸込渦発生の可否判定

(1) 気体吸込渦は被り深さ(h)が限界深さ(h_c)を下回るときに起こる。 h_c は略々次のように見積もられる。

(1)マイルドケース — 槽内流れに旋回や強い偏り/乱れがない場合

$$Re \leq (Re)_{min.} : h_c = 0.44Q^{0.4}$$

$$Re > (Re)_{min.} : h_c = [\alpha_1 \alpha_2 h^* \text{ or } \alpha_2 (h_c)_{max.}] \text{のいずれか小さい方}$$

(2)シビアケース — 槽内流れに旋回や強い偏り/乱れがある場合

$$h_c = \alpha_1 \alpha_2 \beta h^*$$

ここで Q =排出流量(m^3/s)、 h =被り深さ(液面から排出口上端までの深さ)(m)、 h_c =限界深さ(m)、 h^* =実験による限界深さの敷い値(m) → 下記の関係式を満足するもの。

$$Rr > 37100 \text{ のとき} : C_{ir} = 0.011 \quad \text{-----(a)}$$

$$Rr \leq 37100 \text{ のとき} : C_{ir} = -2.768 \times 10^{-7} Rr + 0.0213 \quad \text{-----(b)}$$

$$C_{ir} = \text{循環数(無次元)} = 2.693 \{0.054h^* + 0.0012(b/d) + 0.01\}^3 / \{(h^* + b)^{0.5} Q\}$$

$$Rr = \text{ラジアルレイノルズ数} = Q / (\nu h^*)$$

$(h_c)_{max.}$ =最大限界深さ(m)下記による。

$$Re \leq 2 \times 10^5 \text{ のとき} : (h_c)_{max} = 2.5d$$

$$Re > 2 \times 10^5 \text{ のとき} : (h_c)_{max} = 2.5d \{Re / (2 \times 10^5)\}^{0.4}$$

Re =レイノルズ数= $Vd/\nu=4Q/(\pi d\nu)$ 、 $(Re)_{min.}$ =最小レイノルズ数= $1.6 \times 10^4 f_c$

V =排出口平均流速(m/s)、 ν =流体の動粘度(m^2/s)、 d =排出口の内径(m)、

b =排出口下端から槽底までの距離(m) → $b > 5d$ の時は $b=5d$ とする。

L =ノズル突出長さ(m) → 図1参照。突出しがないときは $L=0$ とする。

f_c =ノズル突出長さによる補正係数(下記)

$$0 \leq L/d < 0.5 \text{ のとき} : f_c = -6.5(L/d) + 5, \quad 0.5 \leq L/d \leq 3 \text{ のとき} : f_c = -0.3(L/d) + 1.9$$

$$L/d > 3 \text{ のとき} : f_c = 1$$

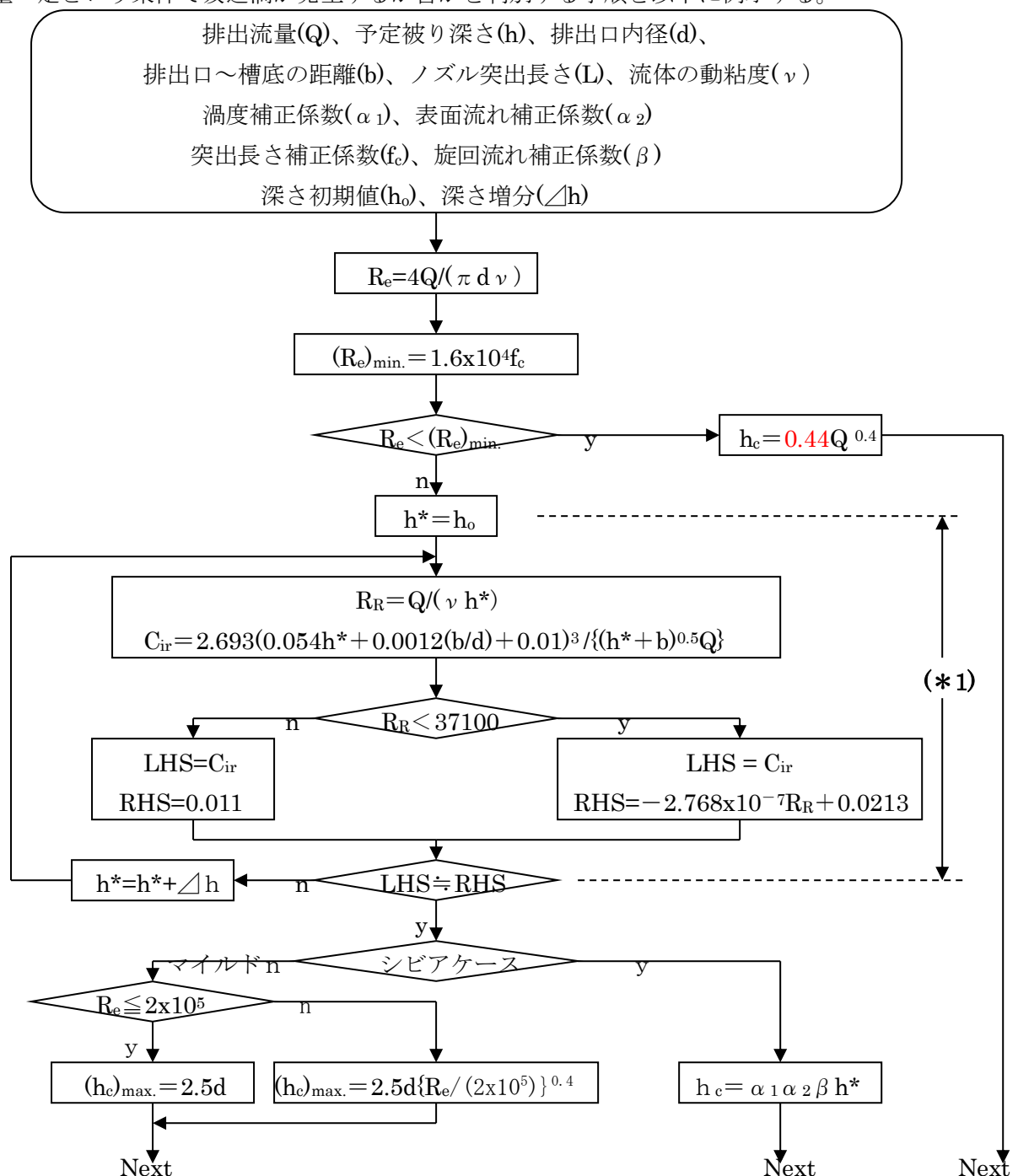
α_1 = 渦度補正係数(断続渦が認められる場合 1、断続渦が認められない場合 1.10)
 α_2 = 表面流れ補正係数(液表面に目立った流れや乱れがない時 1.0、ある時 1.15)
 β = 旋回流れ補正係数(程度によって 1.0~4.0)—— α_1 、 α_2 、 β については解説を参照のこと。

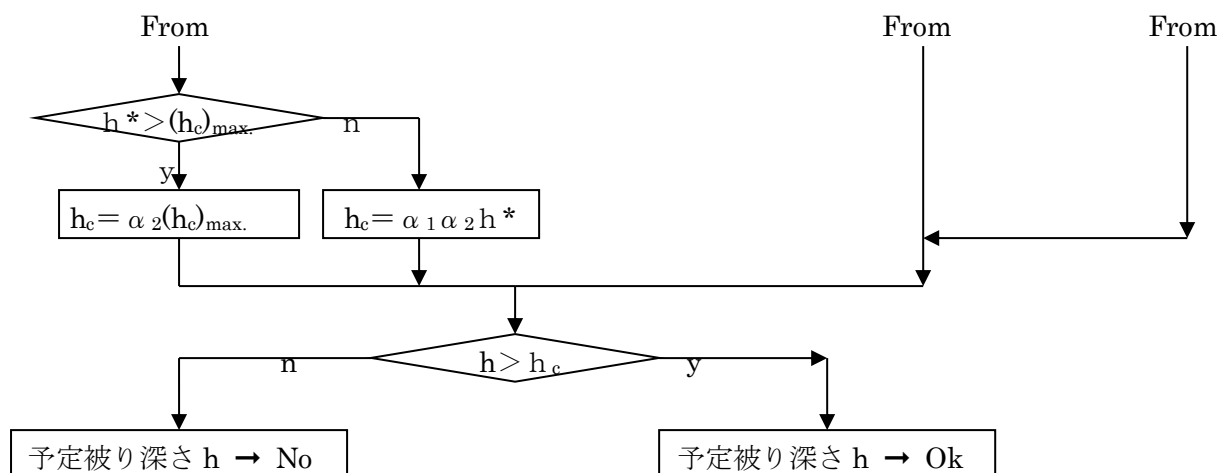
- (2) 上記では側面/底面の壁面の影響を考慮していない。これについては今後、補正係数を検討する。
 (概して壁に近いノズルでは、渦の動きが拘束されて吸込渦がでにくくなると思われる。)

なお上記の限界深さの式はいろんなパラメータ(特に外乱的なもの)をクリアにしたものではなく不確かさが多い。渦の発生を促進するような流況が予想されるなら、それなりに裕度を見込んで判定すべきである。また設備の都合で十分な裕度が確保できないならば渦防止装置/構造を採用すべきである。

3. 可否判定の手順

流量一定という条件で吸込渦が発生するか否かを判別する手順を以下に例示する。



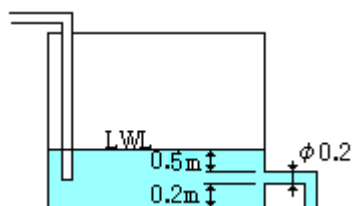


脚注：

- (*1) ここでは反復によって、実験による限界深さ(断続渦における被り深さ) h^* を求める。即ち初期値 h_0 からステップ Δh ごとに境界深さを仮定して、(a)ないし(b)式の左辺(LHS)と右辺(RHS)を計算して $LHS \approx RHS$ になる h^* [即ち(a) (b)式を満たす h^*] を求める。

3. 例題

貯水槽から $67.86\text{m}^3/\text{hr}$ の水を吸引する下図のようなノズルがある。最低液位時の被り深さ 0.5m で問題はないか？ なお 動粘度は $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ とする。



$$\text{レイノルズ数 } Re = 4Q / (\pi d \nu) = 4 \times (67.86 / 3600) / (3.14 \times 0.2 \times 1 \times 10^{-6}) = 1.2 \times 10^5$$

$$\text{最小レイノルズ数 } (Re)_{\min} = 16000 \quad f_c = 16000 \times 5 = 8 \times 10^4$$

$$\text{補正係数 } f_c = -6.5 \times 10^5 + 5 = 5$$

$Re > (Re)_{\min}$ なので h^* を求める。反復計算の結果では $h^* = 0.56\text{m}$

極端な旋回流などは考えられないのでマイルドケースとする。

$$[Re = 120000] \leq 200000 \text{ なので } (hc)_{\max} = 2.5d = 2.5 \times 0.2 = 0.5\text{m}$$

また、渦度補正係数 α_1 は断続渦が認められないだろうから $\alpha_1 = 1.10$ 、また

表面流れ補正係数 α_2 は槽が狭く表面乱れが考えられるので $\alpha_2 = 1.15$

$h^* > (hc)_{\max}$ なので、限界深さは $hc = \alpha_2 (hc)_{\max} = 1.15 \times 0.56 = 0.644\text{m}$ 、

一方、被り深さは $h = 0.5\text{m}$ 。 $h < hc$ の故に吸込渦の懸念がある。 $h = 0.65\text{m}$ 以上にしたい。

【 解 説 】

1. 本 TS は Anwar らの論文(1)(2)によっている。これら文献は吸込渦発生 の相似性を実験によって模索するもの。無次元パラメータの相関を表わす幾つかのグラフが与えられているが、その中に下図のようなグラフがある。このグラフは循環数 (Circulation Number Γ_{ro}/Q) とラジアルレイノルズ数 (Radial Reynolds Number $Q/(\nu h)$) という 2 つの無次元数によって吸込渦 (断続渦) が発生する境界ラインを示すもので、吸込渦発生に関する特性曲線として設計的に活用できると思われる。

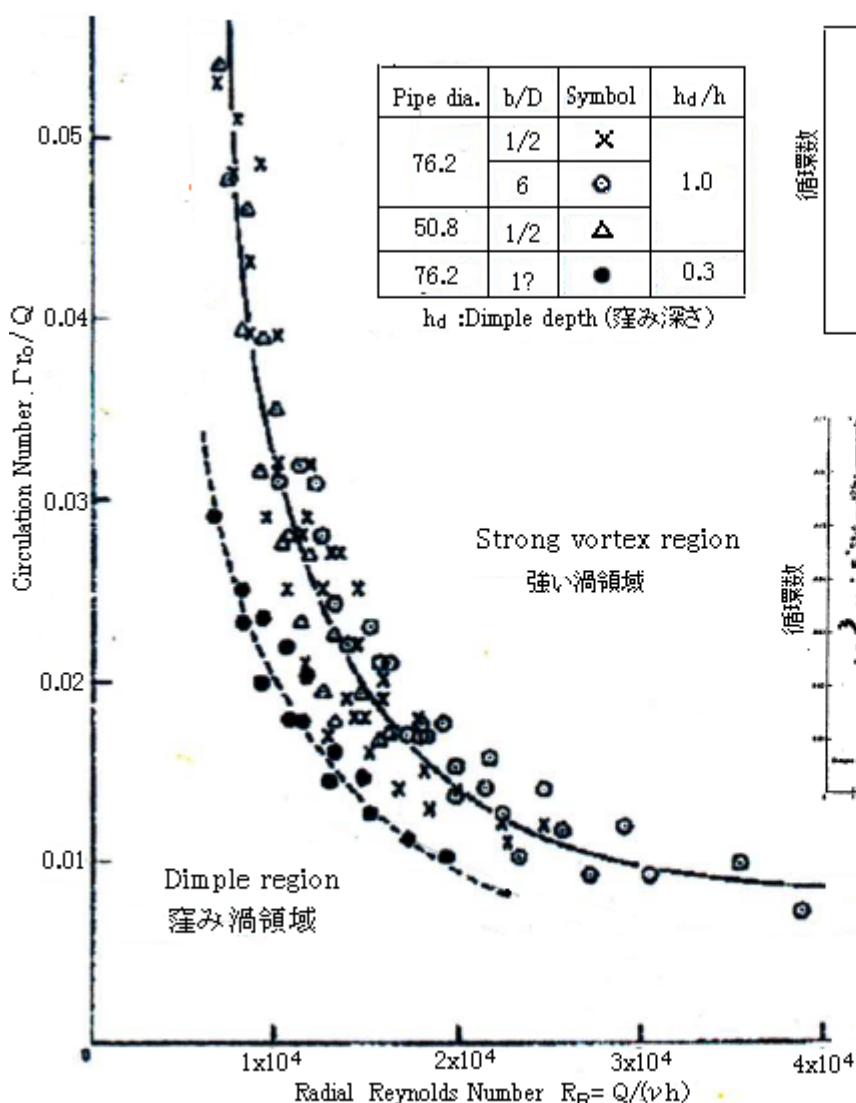
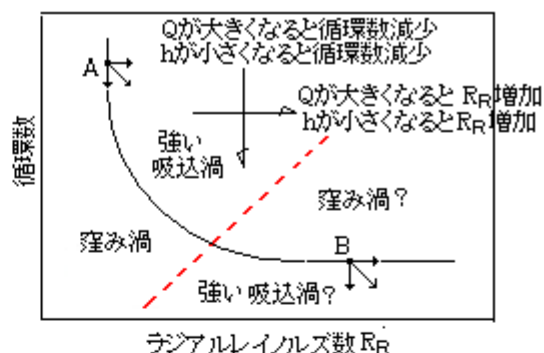
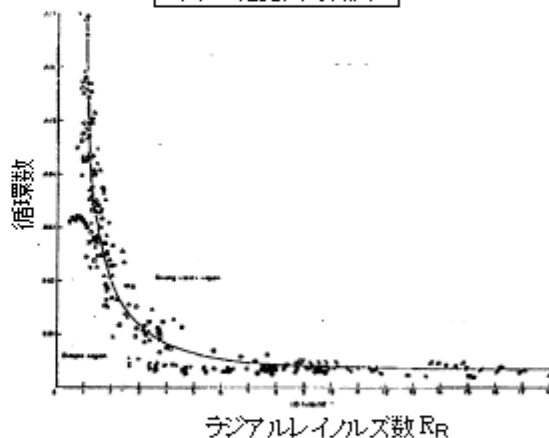


図2 ラジアルレイノルズ数と循環数の関係(実験値)



ラジアルレイノルズ数 R_R

図3 相関図の傾向



ラジアルレイノルズ数 R_R

図4 垂直上方排出の場合

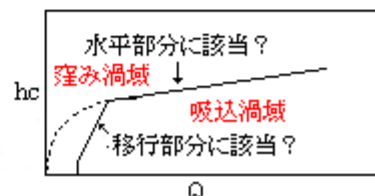


図5 荻原の特性式の模式

図2のしきい曲線の傾向を少し考察してみる。図3は図2を模式的にみたものであり循環数 Γ_{ro}/Q は

$$\Gamma_{ro}/Q = 0.86g^{0.5}\{0.054h + 0.0012(b/d) + 0.01\}^3 / \{(h+b)^{0.5}Q\}$$

であって、次のように変化する傾向がある。

流量 Q が大きくなると循環数減少 / 深さ h が小さくなると循環数減少

また、ラジアルレイノルズ数 R_R は $Q/(\nu h)$ であって、

流量 Q が大きくなるとレイノルズ数増加 / 深さ h が小さくなるとレイノルズ数増加

従って、図3のポイントAでは深さ h の減少に対して右下側に移動傾向になる。これは流量 Q の

増加についても同じ右下シフトになる。深さの減少と流量の増加によって吸込渦は発生しやすくなるのでポイント A の右下は強い渦(連続渦)ゾーンになる筈である。この見込みは、図 2 の立下がり部分の右側で **Strong Vortex Region** になっている事実とおおむね合致する。曲線を挟んでこれと反対側は渦度の弱い **Dimple Region** である。

然るに、ポイント B を考えると同じように右下が **Strong Vortex Region** になる筈であるが、図 2 では **Dimple Region** になっており合致していない。

結論的に **Anwar** のグラフ(図 2)は不完全である。図 3 のように点線を境にして捨れが起きるので **Strong Vortex Region** と **Dimple Region** を入れ替えて記載すべきと思われる。

2. 図 4 に文献(2)に記載される鉛直上方排出の場合のグラフを引用する。曲線は立下りから水平へ移行して長い水平部分を持っているが、これは図 2 の傾向をグロスに表現するものであろう。図 2 の立下りから水平への移行区間は高々、レイノルズ数(R_R)範囲 8000~30000 でしかなく、通常の排出運転域は 30000 を越える場合が多いので、緩慢な水平移行部分および移行後の水平部分(図 3 の点線の右側)に着目すべきである。

ここで図 3 の限界深さ曲線が完全に水平に移行すると

$$\Gamma_{r_0}/Q = 0.86g^{0.5}(0.054h + 0.0012(b/d) + 0.01)^3 / \{(h+b)^{0.5}Q\} = \text{約 } 0.01 \text{ (一定)}$$

$b=0$ として、式を変形すると

$$269.3(0.054h + 0.01)^3 / h^{0.5} = Q$$

$0.054h + 0.01 \rightarrow 0.054 \beta h$ とおくと

$$0.0424 \beta^3 h^{2.5} = Q \rightarrow h = (3.54 / \beta^{1.2}) Q^{0.4}$$

一方、鉛直下方排出の場合は、[FE-11-TM-001]より

$$\eta_c = 6.5 f_r^{0.4} \quad (\text{ただし } \alpha = 1)$$

$\eta_c = h_c/d$, $f_r = 4Q/(g^{0.5} \pi d^{2.5})$ であるから

$$h_c = 2.265 Q^{0.4}$$

h_c と h は、ここでは同じなので

$$\text{水平排出のとき} \quad : h_c = (3.54 / \beta^{1.2}) Q^{0.4} \quad \text{-----Anwar 論文}$$

$$\text{鉛直下方排出のとき} : h_c = 2.265 Q^{0.4} \quad \text{-----荻原 論文}$$

これらは、同じフォームをとっている。自由渦の形成から言えば、たとえ排出の向きが違っても基本的に特性式は変わらない筈であるから、これらが同じフォームになることは

Anwar と荻原の、それぞれの特性式は根っこの部分で同じ

であることを暗示している。

更に、荻原の限界曲線(図 5)は **Anwar** の限界曲線(図 2)に対応していると思われる。即ち、

荻原の急な傾斜部分 → **Anwar** の急激な移行部分(湾曲部分)

荻原の緩い右上がり部分 → **Anwar** の水平部分

また **Anwar** の曲線と荻原の曲線は、低レイノルズ数部分に吸込渦の発生しない **dead zone** がある。即ち

Anwar の曲線 → $R_R \leq 8000$ のとき

荻原の曲線 → $Re \leq 20000$ のとき (水平流出に対し)

[荻原論文では、この限界のレイノルズ数を最小レイノルズ数 (Re_{\min}) と呼んでいる。]

R_R と R_e は定義が異なるが、 $R_R/R_e=0.785d/h$ の関係があり、通常 $h=(0.5\sim 2)d$ になるので

$$R_R/R_e=0.3925\sim 1.57 \rightarrow R_R=(0.3925\sim 1.57)R_e$$

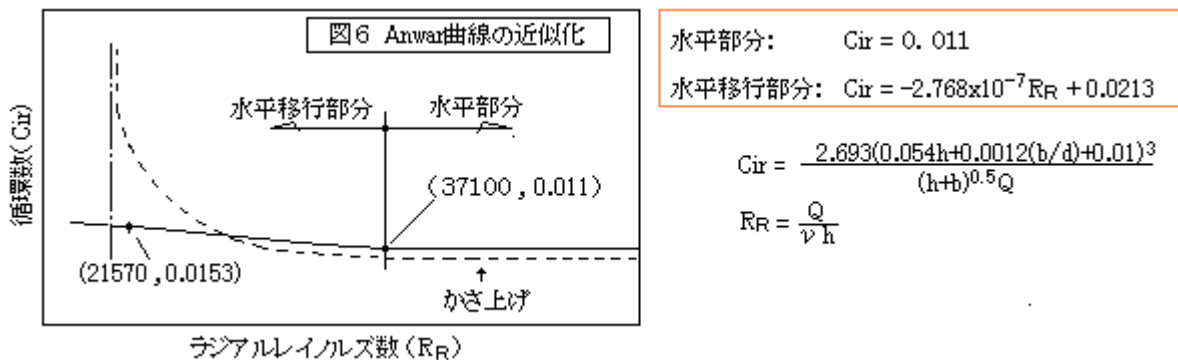
$R_e=20000$ に対し、 $R_R=7850\sim 31400$ になる。これは Anwar のグラフで $R_R<8000$ をカットしていることと符合する。

以上の如く Anwar の提案したラジアルレイノルズ数-循環数の関係と荻原の提案したフルード数-限界深さ比の関係はかなりの類似性がある。

3. 以上の考察によれば、Anwar の提案は荻原の提案よりも普遍性がある。荻原の特性式 $h_c=2.265Q^{0.4}$ は Anwar のグラフの水平部分 ($\Gamma r_o/Q=一定$) をとったものに相当する。その場合、水平移行部分は無視される(水平部分を延ばした形で処理される)。この措置は、荻原のグラフをみればわかるように安全側である。[なお因みに水平部分では粘性の影響を全く受けないことに気付くべきである。]

Anwar の曲線を多項近似か何かで数式表現し、これを解くことで任意流量に対する限界深さは得られる。

しかし、そこまでして限界深さを得ても液表面に乱れがあればたちまち仮説は崩れてしまう。ならば荻原の特性式のように、Anwar の水平部分と水平部分に漸近する部分を直線近似して1次式に置き換えればよい。簡単な数値計算で任意流量に対する限界深さが安全側に得られる筈である。そこで Anwar 曲線を下図のように単純な1次式で扱う。なお下図の点線は Anwar の曲線を表しているが本来これは包絡的ではないので、これを約20%増しにかさ上げして1次式を作っている。



ここで 管内径 $d=0.2\text{m}$ 、底スペース $b=0.2\text{m}$ の水平排出管について、上記の方法を用いて排出流量と限界深さの関係を計算すると次のようになる。

Q (m ³ /s)	h (m)	Cir	R_R	LHS	RHS(A)	RHS(B)	DIF
0.09424	1.21	0.010791	77884	0.010791	0.0108	↑ 水平移行部分	-9E-06
0.07856	1.11	0.010783	70775	0.010783	0.0108		-2E-05
0.06285	1.00	0.010841	62850	0.010841	0.0108		4.1E-05
0.04714	0.87	0.010801	54371	0.010801	0.0108		7.2E-07
0.03142	0.71	0.010776	44567	0.010776	0.0108		-2E-05
0.02513	0.63	0.010877	39889	0.010877	0.0108	↑ 水平部分	7.7E-05
0.01885	0.56	0.011662	33661	0.011662	0.01175		-9E-05
0.01256	0.48	0.013299	26167	0.013299	0.01392		-0.0006
0.00628	0.36	0.016483	17444	0.016483	0.01645		3.7E-05
0.00314	0.23	0.017235	13652	0.017235	0.01754		-0.0003
0.0015	0.13	0.018903	11538	0.018903	0.01816	0.00075	

なお、図6の式と少し異なる $Cir=0.0108$ 、 $Cir=-2.897\times 10^{-7}R_R+0.02155$ で計算している。

流量が増加すると限界深さは比例的に増加している(それだけ渦ができやすくなっている)。

4. 通常、排出流量が減少してゆくと限界深さはダウンしてゆき、吸込渦は起きなくなる。これを荻原論文

では最小レイノルズ数(Re)_{min}と呼んでいる。前2.項で述べたように Anwar のグラフ(図2)の左部分にも、(Re)_{min}に符合する(R_R)_{min}.が存在している。ただ、鉛直下方排出の場合と違って水平排出の場合は、壁面の影響を受け、壁面からのノズルの突出し加減によって(Re)_{min}が変化する。そこで

$$Re < f_c(Re)_{\min} \rightarrow \text{吸込渦(断続渦/連続渦)発生なし}$$

とする。突出しに対する補正係数 f_c は、荻原論文より引用する(下図参照)。また(Re)_{min}も荻原論文から引用する(下表参照)。しかし水平排出に対する 2×10^4 には若干不安が残るので 1.6×10^4 (20%ダウン)をとる。従って

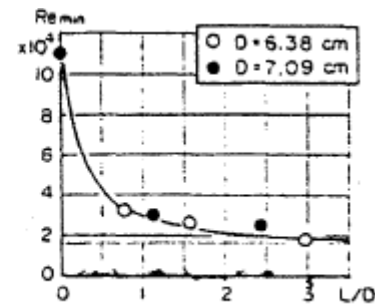
$$Re < 16000 f_c \rightarrow \text{吸込渦(断続渦/連続渦)発生なし}$$

とする。

$Re < f_c(Re)_{\min}$ では吸込渦の発生はないが、被り深さがないので陥没状の渦になる。陥没渦の発生深さは Lubin の解より $\eta = 1.253 fr^{0.4} \rightarrow h_c = 0.437Q^{0.4}$ 。これは垂直下方排出の場合であって水平排出では幾分緩和するだろうからマージンはとらず $h_c = 0.44Q^{0.4}$ をとる。

最小レイノルズ数と最大限界深さ比
($Re < 2000000$ のとき)

		(Re) _{min}	(η) _{max}
鉛直流出渦	直管	3×10^4	6~12
	ベルマウス	2×10^4	6~12
水平流出渦		2×10^4	4



最小レイノルズ数への突出長さの影響

5. 排出流量が増加してゆくと限界深さは大きくなるが、ある深さに達すると流量が増えても吸込渦は発生しなくなり限界深さに上限が存在している。荻原論文によれば水平流出の場合、上記の表のごとく [$Re < 2 \times 10^5$ のとき (η)_{min} = 4 即ち $h_c = 2d$] である。ただ、これは径の小さい排出ノズルをベースにしており、不安が残るので今後調査する必要がある。ここでは暫定として $h_c = 2.5d$ を採っておく。更に本文では $Re > 2 \times 10^5$ 側を外挿してセットしている。

6. 図2の Anwar の曲線は、窪み渦から連続渦に移行する渦パターン(恐らく断続渦)をとらえ、これをプロットして最適化したものと思われる。短期的に運転されるラインでは断続渦によって多少の気体が混入しても許されるかもしれないが、長期運転では混入空気の累積による影響も考えられるので窪み渦レベルにとどめるのが妥当と考えられる。そこで渦度による補正係数 α_1 を次のように設定する。

$$\text{断続渦レベル} \rightarrow \alpha_1 = 1.0, \text{ 窪み渦レベル} \rightarrow \alpha_1 = 1.10$$

以上の判定ベースは、槽内流れに旋回や強い偏り/乱れがなくまた表面に目立った流れや乱れがなく一様な近寄り流速である場合に成立する。しかし速い表面流れや乱れがあり近寄り速度が必ずしも一様でない場合は限界深さが上がってくる傾向があるので全般に補正する必要がある。即ち

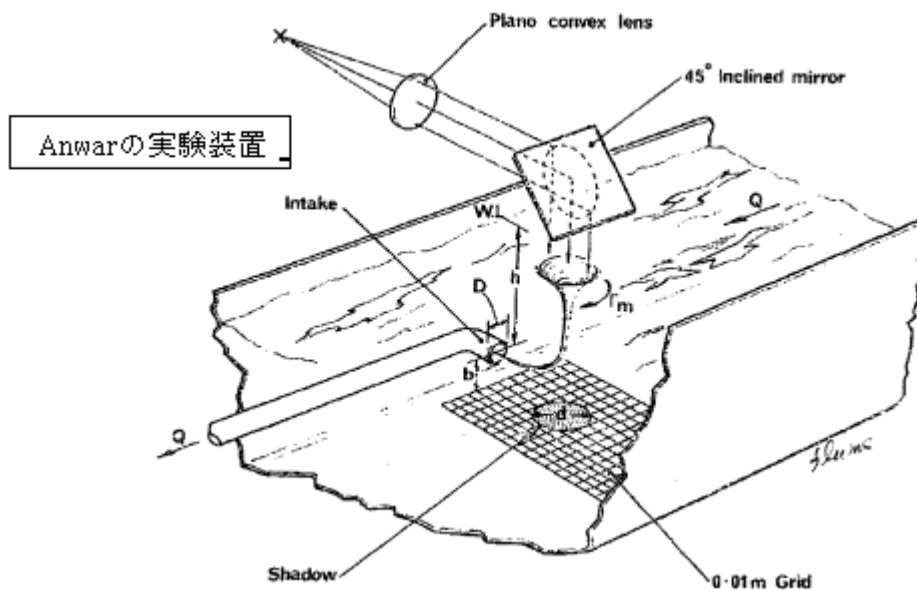
$$\text{液表面に目立った流れ/乱れない時} \rightarrow \alpha_2 = 1.0, \text{ 表面流れ/乱れがある時} \rightarrow \alpha_2 = 1.15$$

槽内流れに旋回や強い偏り/乱れがある場合は強制渦の傾向が加わってかなり吸込渦が発生しやすくなるのでもっと限界深さを引き上げる必要があると思われる。Denny の文献⁽⁴⁾のデータなどからみて

旋回流れ無しの時： $\beta = 1.0$ 、マイルドなケース： $\beta = 2.0$ 程度、シビアなケース： $\beta = 4.0$ 程度 の補正係数を乗じる必要があると思う。本件は今後も調査してゆきたい。

7. 例題では、計算から得られた h^* は $(h_c)_{\max}$ を越えており、 $h_c = (h_c)_{\max}$ になる。この場合、流量を下げれば、 $h^* < (h_c)_{\max}$ になり $h_c = h^*$ にできるが、その前に $Re < (Re)_{\min}$ になって渦発生なし/計算不要という結論になってしまう。この傾向はこの例題に限ったものではなく全般的な傾向のようだ。従って、突出しなしの通常のノズルでは、何も計算しなくて $(h_c)_{\max} = 2.5d$ (あるいは $2d$) をとれば十分なのかも知れない。ただ突出し有りのときは、 $Re > (Re)_{\min}$ 、 $h^* < (h_c)_{\max}$ となって h^* で限界深さが決まる可能性もある。

[この事態は、Anwar 曲線の移行部分を 1 次式によって安全側に近似したことにより起きている。移行部分を正確に多項近似すれば h^* が $2.5d$ をオーバーすることはないだろう。追って]



<引用文献>

- (1) 「Similarity of Free-vortex at Horizontal Intake」 H. O. Anwar et. al
(Journal of Hydraulic Research 16 (1978) No.2 p95-105)
- (2) 「Vortices at Vertically Inverted Intake」 H. O. Anwar and M. B. Amphlett
(Journal of Hydraulic Research 18 (1980) No.2 p123-134)
- (3) 「空気吸い込み渦に関する研究」萩原 (土木学会論文集 No.215(1973年7月))
- (4) 「An Experimental Study of Air-Entraining Vortices in Pump Sumps」 D. F. Denny