

【整番】 FE-11-TM-003	【標題】 鉛直上向き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. 11/改訂：Ver0. (H19.11) 作成者：N.Miyamoto

全7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)から配管内にはいつて、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 では下図のような鉛直上向き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。なお鉛直下向き/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-002 水平ノズルにおける気体吸込渦発生の可否判定 ]

また、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。

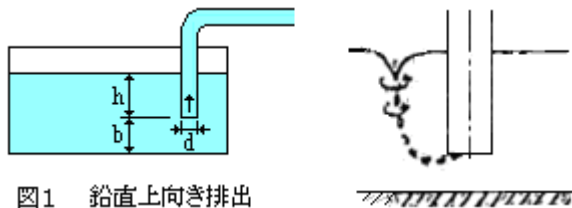


図1 鉛直上向き排出

## 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)、 $h^*$ =実験ベースの限界深さのしきい値(m) → 下記の関係を満足するもの。

$$R_R > 19 \times 10^4 \text{ のとき} : C_{ir} = 0.005 \text{ -----(a)}$$

$$R_R \leq 19 \times 10^4 \text{ のとき} : C_{ir} = -2.105 \times 10^{-8} R_R + 0.009 \text{ -----(b)}$$

$$C_{ir} = \text{循環数(無次元)} = 2.693 \{0.06h^* + 0.00143(b/d) + 0.0089\}^3 / \{(h^* + b)^{0.5} Q\}$$

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

$(h_c)_{max.}$  = 最大限界深さ(m) — 下記による。

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

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

$$S_r = \text{最大限界深さ比} ([FE-11-TM-001] \text{の解説及び図 g 参照})$$

$$0 < d \leq 0.45 \text{ m の時} : S_r = -7.5d + 6.375$$

$$d > 0.45 \text{ m の時} : S_r = 3.0$$

$$Re = \text{レイノルズ数} = Vd / \nu = 4Q / (\pi d \nu), (Re)_{min.} = \text{最小レイノルズ数} = 3 \times 10^4$$

$V$ =排出口平均流速(m/s)、 $\nu$ =流体の動粘度( $m^2/s$ )、 $d$ =排出口内径(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。

$\alpha_1$  = 渦度補正係数 ( 断続渦が認められる時 1、断続渦が認められない時 1.10 )

$\alpha_2$  = 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 )

$\beta$  = 旋回流れ補正係数 ( 程度によって 1.0~4.0 )

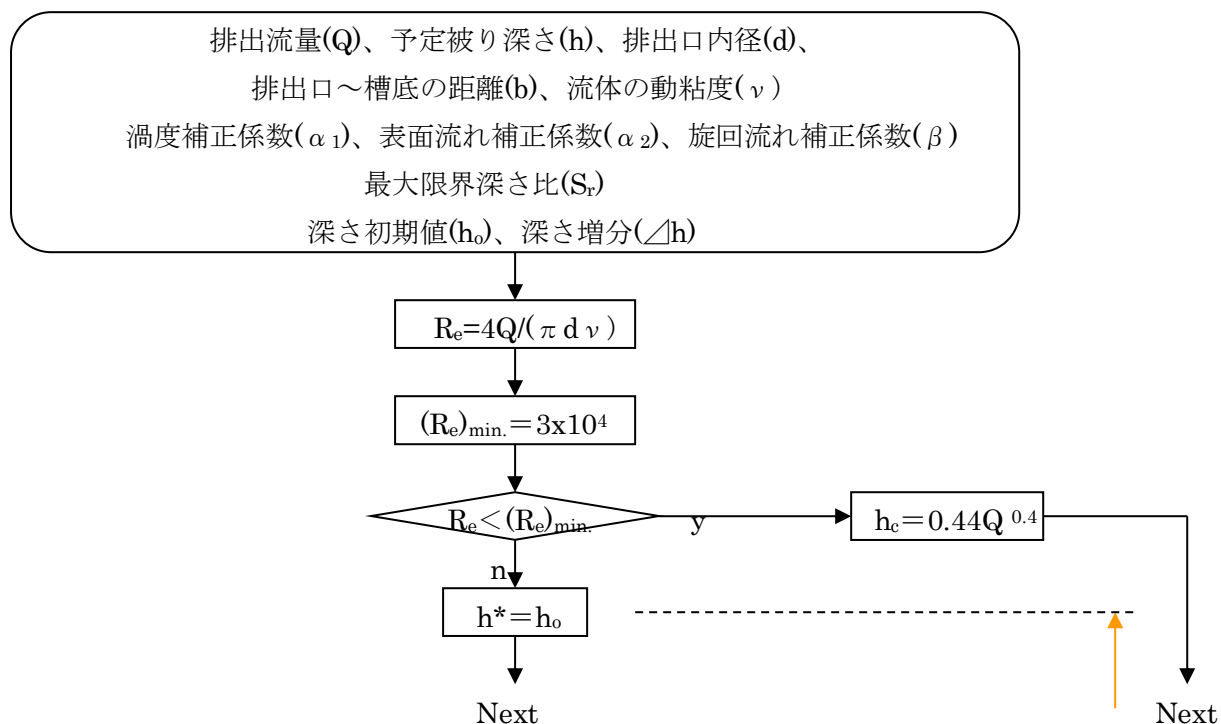
$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta$  については[FE-11-TM-002]の解説を参照のこと。

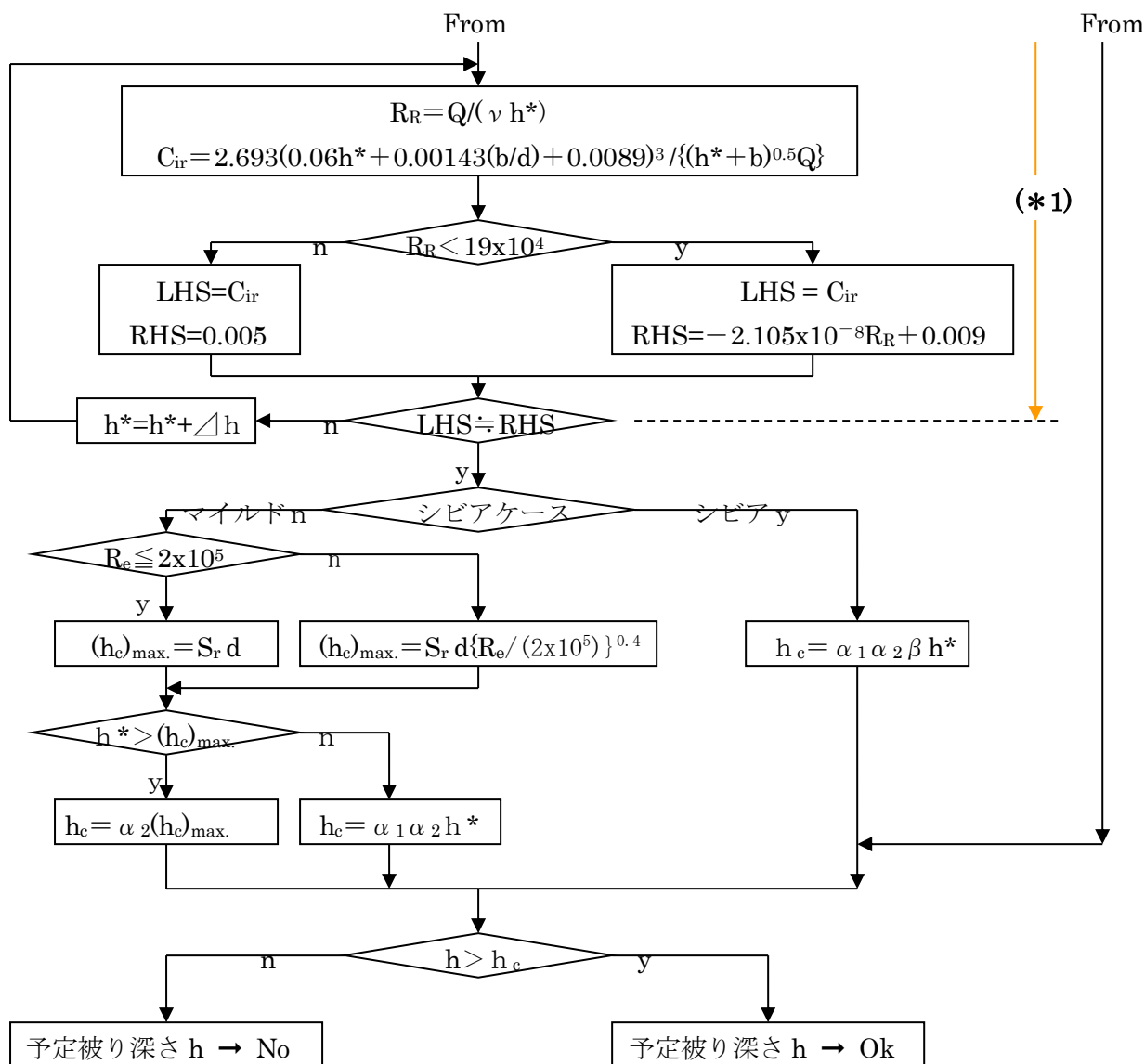
(2) 上記の判定方法では側面/底面の壁面の影響は考慮していない。これについては今後、補正係数を検討する。因みに壁に近いノズルでは、渦の動きが拘束されると思われる。

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、積極的に渦防止装置/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。



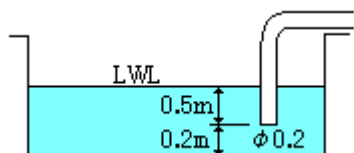


脚注：

(\*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<sub>0</sub>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 ≐ 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 67.86m<sup>3</sup>/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 で問題ないか？ なお 動粘度は ν=1x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s とする。



\*\*\*\*\*

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

最小レイノルズ数  $(Re)_{min.} = 3 \times 10^4$

$Re > (Re)_{min.}$ なので  $h^*$ を求める。反復計算の結果では  $h^* = 0.42m$ (解説の4. 参照)

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。

$[Re = 120000] \leq 200000$ なので  $(h_c)_{max.} = S_r d = (-7.5 \times 0.2 + 6.375) \times 0.2 = 0.98$

また、渦度補正係数  $\alpha_1$ は断続渦が認められないだろうから  $\alpha_1 = 1.1$  また

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

$h^* < (h_c)_{max.}$ なので、限界深さは  $h_c = \alpha_1 \alpha_2 h^* = 1.1 \times 1.15 \times 0.42 = 0.53m$ 、

一方、被り深さは  $h = 0.5m$ 。  $h > h_c$ の故に、吸込渦発生の不安がある。

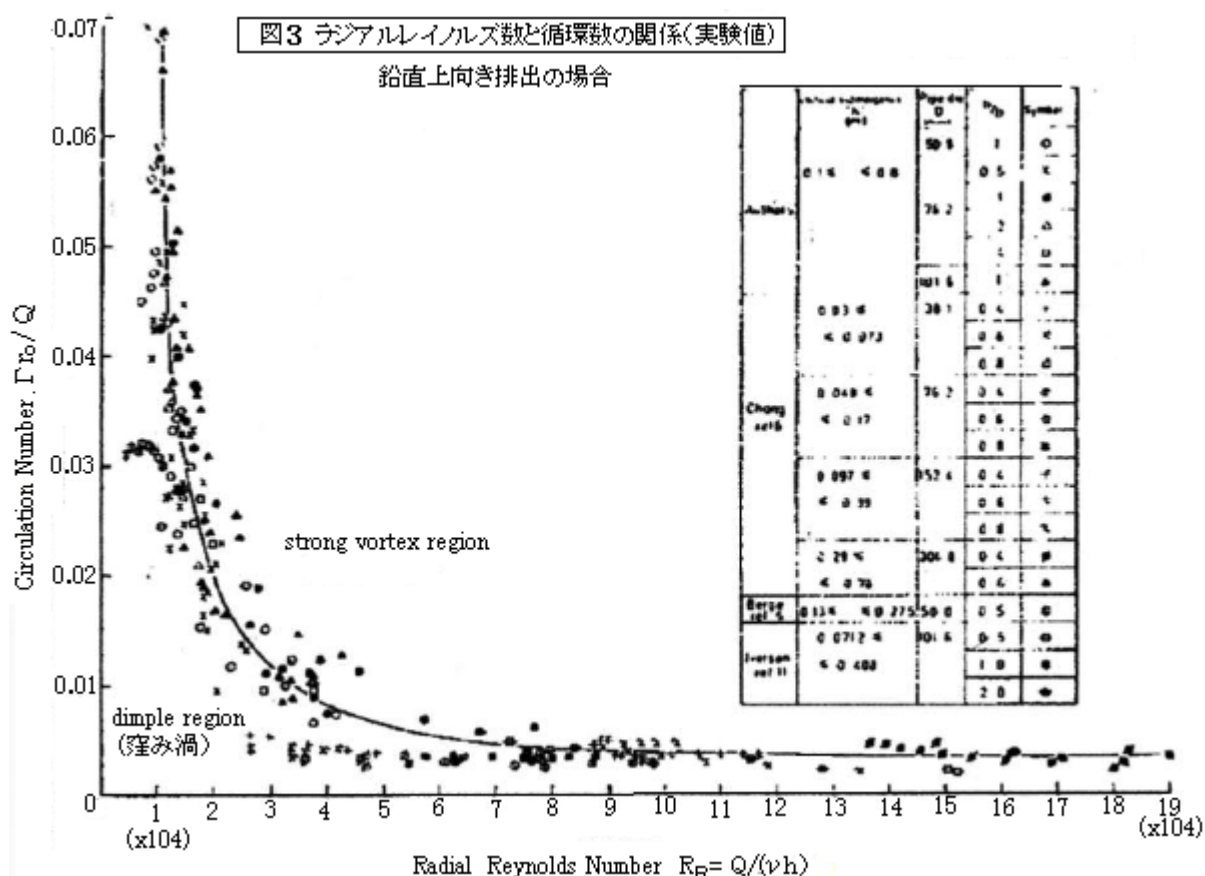
### 【 解 説 】

1. 本 TS は **Anwar** らの論文<sup>(1)</sup>によっている。この論文の中で、鉛直上向き排出と水平排出について循環数(Circulation Number)とラジアルレイノルズ数(Radial Reynolds Number)という2つの無次元数によって吸込渦(断続渦)の発生する境界ラインを示すグラフが与えられている。これらのグラフのうち水平排出については、

[ FE-11-TM-002 水平ノズルにおける気体吸込渦発生の可否判定 ]

で検討を行い **Anwar** グラフの結果を設計基準に利用することを提案した。鉛直上向き排出の場合も水平排出の場合と同じ考えでグラフが作られているので、本 TS も [FE-11-TM-002] と同じようなアプローチを用いて作成している(アプローチ内容の説明は [FE-11-TM-002] と重複するので割愛する)。

2. 鉛直上方排出の場合の **Anwar** のグラフ<sup>(1)</sup>は下記のようなものである。



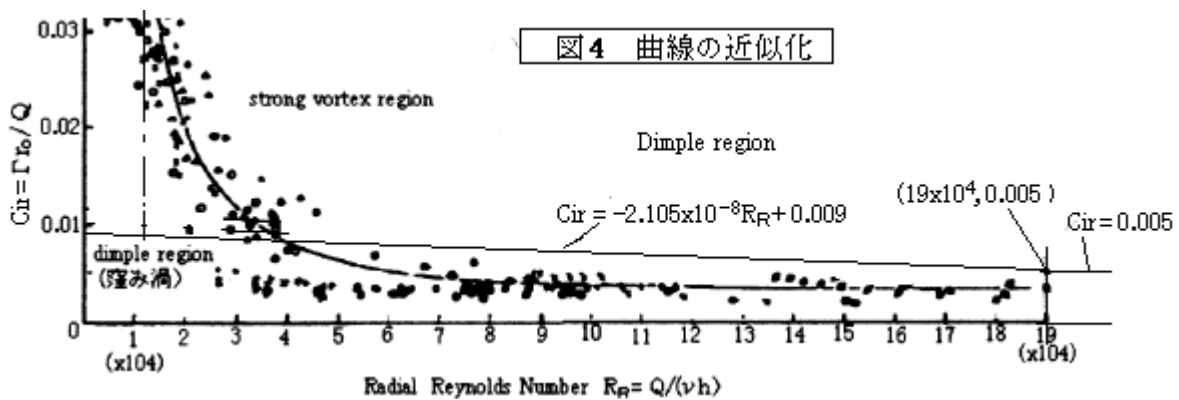


図4は、TS作成者の方で図2のAnwar曲線を包絡的にかさ上げして1次式で近似化したものである。

$$R_R \leq 19 \times 10^4 \text{ のとき : } Cir = -2.105 \times 10^{-8} R_R + 0.009$$

$$R_R > 19 \times 10^4 \text{ のとき : } Cir = 0.005$$

$$Cir = \Gamma r_o / Q = 2.693 \{ 0.06h + 0.00143(b/d) + 0.0089 \}^3 / \{ (h+b)^{0.5} Q \}$$

$$R_R = Q / (v h)$$

----- Cir、RRの定義式は文献(1)の通り。

実験ベースの限界深さ  $h^*$  はこの Cir-RR 関係を満足する深さ  $h$  である。

3. レイノルズ数  $Re \leq$  最小レイノルズ数  $(Re)_{min}$  のときは、吸い込み渦は発生せずに陥没渦がおきる。鉛直下向き排出、水平排出の場合、荻原文献(2)では  $(Re)_{min}$  はそれぞれ  $3 \times 10^4$ 、 $2 \times 10^4$  になっているが、鉛直上向き排出については記載がない。鉛直上向き/水平排出のAnwarの曲線を比較すると

$$\text{鉛直上向き : } R_R = 11000, \text{ 水平 : } R_R = 7500$$

となっており約 3 : 2 になる。Re と  $R_R$  は定義が異なるが、 $h$  が同じなら  $Re$  もまた 3 : 2 になる。そこで鉛直上向きの際の  $(Re)_{min}$  も、鉛直下向きの際のそれと同じ  $3 \times 10^4$  とする。

限界深さ  $h_c$  には最大値があり、計算から得た  $h^*$  がこれを越えても頭打ちとなって吸込渦は発生しない。この最大限界深さ  $(h_c)_{max}$  も鉛直下向きの際のそれに近いと思われるので、これに倣うものとする。

( [FE-11-TM-001] 参照のこと )

補正係数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta$  の考え方は、[FE-11-TM-002] に同じとする。

4. ここで 管内径  $d = 0.2\text{m}$ 、底スペース  $b = 0.2\text{m}$  の鉛直上方排出管について、本 TS 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 <sup>3</sup> /s)	$h^*$ (m)	Cir	RR	LHS	RHS	DIF
0.09424	0.8700	0.006754	108322	0.006754	0.00672	3.4E-05
0.07856	0.8100	0.006980	96988	0.00698	0.00696	2.2E-05
0.06285	0.7400	0.007245	84932	0.007245	0.00721	3.3E-05
0.04714	0.6500	0.007438	72523	0.007438	0.00747	-4E-05
0.03142	0.5400	0.007773	58185	0.007773	0.00778	-2E-06
0.02513	0.4800	0.007786	52354	0.007786	0.0079	-0.0001
0.01885	0.4200	0.008138	44881	0.008138	0.00806	8.3E-05
0.01256	0.3350	0.008260	37493	0.00826	0.00821	4.9E-05
0.00628	0.2140	0.008290	29346	0.00829	0.00838	-9E-05
0.00314	0.1300	0.008897	24154	0.008897	0.00849	0.00041

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)。

5. Cir の定義式には排出口～槽底までの距離(b)が含まれている。この底部スペースが限界深さに与える影響を調べるため、ノズル径 d と流量 Q を一定とし b のみを変えて計算すると、下記のような結果が得られる。

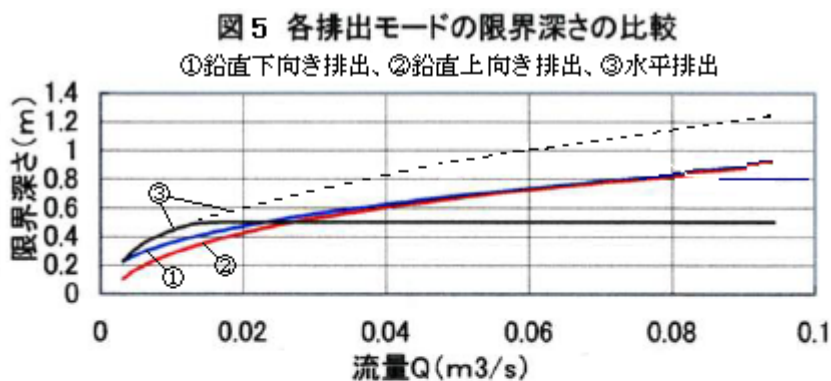
排出口から底までの距離(b)の影響 排出ノズル径d=0.2m							
b/d	Q (m <sup>3</sup> /s)	h* (m)	Cir	R <sub>R</sub>	LHS	RHS	LHS-RHS
0.5	0.09424	0.86	0.006690	109581	0.00669	0.006693	-3.1E-06
1	0.09424	0.8700	0.006754	108322	0.006754	0.00672	3.44E-05
2	0.09424	0.8700	0.006635	108322	0.006635	0.00672	-8.5E-05
3	0.09424	0.8800	0.006750	107091	0.00675	0.006746	4.28E-06
4	0.09424	0.8800	0.006756	107091	0.006756	0.006746	1.06E-05
5	0.09424	0.8800	0.006802	107091	0.006802	0.006746	5.62E-05
6	0.09424	0.8700	0.006720	108322	0.00672	0.00672	-2.7E-07

h\*は、殆ど変化しない。底スペースの影響は少ないようだ。ただ、この結果がポンプピットの事例とあっているかどうかは今後検討する必要がある。

6. 3つの排出管モード(鉛直下向、水平、鉛直上向)について、[FE-11-TM-001]、[FE-11-TM-002]および[FE-11-TM-003]の方法を用いて流量－限界深さの関係を計算すると、図5+付表のような結果になる。なお、管内径 d=0.2m、底スペース b=0.2m とする。

この図では、鉛直下向き排出と鉛直上向き排出は大きな差がないが、多少、鉛直上向き排出の方が限界深さが小さく(即ち吸込渦ができにくく)なっている。また少流量域でやや差が開く傾向が見られる。この傾向は Denny の文献<sup>③</sup>のデータとよく似ている。鉛直下向き排出に比べ、上向き排出の方が流動抵抗(管壁の影響や排出口での 180° ターン)があって自由渦の排出を阻害するためと思われる。

一方、水平排出は鉛直排出に比べ限界深さが大きく(即ち吸込渦ができやすく)なっている。しかし最大限界深さが小さいので、高い流量域では低い限界深さで済む。この事象については更に調査の要有り。



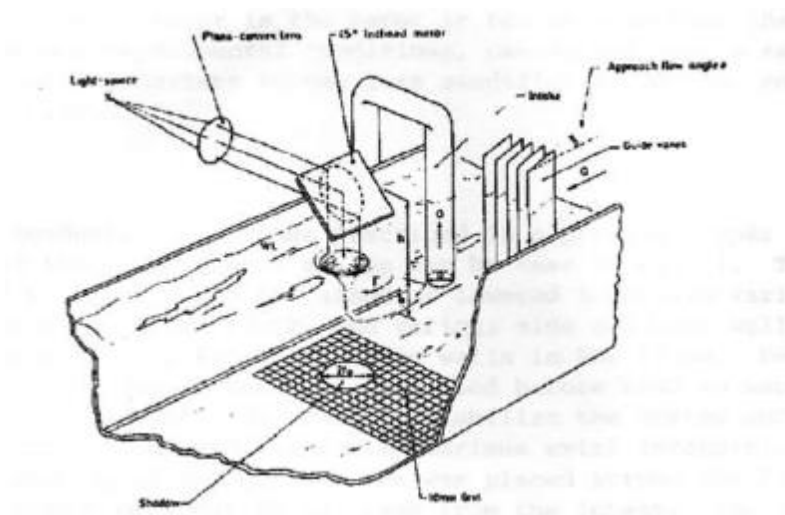
流量(m <sup>3</sup> /s)	鉛直下向き排出	鉛直上向き排出	水平排出
0.09424	0.88 m	0.87 m	0.5(1.21)m
0.07856	0.82	0.81	0.5(1.11)
0.06285	0.75	0.74	0.5(1.00)
0.04717	0.67	0.65	0.5(0.867)
0.03142	0.57	0.54	0.5(0.705)
0.02513	0.52	0.48	0.5(0.63)
0.01885	0.46	0.42	0.5(0.56)
0.01256	0.39	0.335	0.48
0.00628	0.30	0.214	0.36
0.00314	0.23	0.130	0.23

限界深さ比較 ( )外の0.5は(hc)max値



## &lt;引用文献&gt;

- (1) 「Vortices at Vertically Inverted Intake」 H. O. Anwar and M. B. Amphlett  
( Journal of Hydraulic Research 18 (1980) No.2 p123-134)
- (2) 「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))
- (3) 「An Experimental Study of Air-Entraining Vortices in Pump Sumps」 D. F. Denny



Anwar の実験装置