

## On the Occurrence of Air Entrainment in a Suction Sump

Katsuya HIRATA\*, Jiro FUNAKI\*, Yoshihiro KUBOTA\*, Katsuhisa INAGAKI\* and Miki TAOKA\*

(Received October 19, 2010)

In the present study, we consider the air entrainment into a suction pipe which is vertically inserted down into a suction sump across a mean free-water surface. This configuration is often referred to as the “vertical wet-pit pump”, and has many practical advantages in construction, maintenance and operation. In particular, we focus our concern upon the critical submergence depth  $S_c$ , which is one of the prime and conventional indicators for the air-entrainment occurrence. By a systematic approach, we experimentally investigate the influences of kinetic and geometric parameters upon  $S_c$ . As the kinetic parameters, we consider the Reynolds number  $Re$  and the Weber number  $We$ , in addition to the Froude number  $Fr$ , on such a basis as  $Fr$  is not much larger than unity in many actual cases. As the geometric parameters, we consider back clearance  $X$ , sump breadth  $B$  and bottom clearance  $Z$ . Here, all parameters are non-dimensionalized by the outside diameter  $D$  and the intake velocity  $V_i$  of the suction pipe. As a result, we reveal the effects of such six parameters upon  $S_c$ . The  $We$  effect, namely, the surface-tension effect can be ignored at  $We > 12$ . And, the  $Re$  effect, namely, the viscous effect becomes negligibly small at  $Re > 3 \times 10^4$ . Under such conditions for  $We$  and  $Re$ , we could consider only the  $Fr$  effect, namely, the gravitational effect. Concerning the  $X/D$  and  $B/D$  effects,  $S_c/D$  attains the maximum at a certain  $X/D$  or  $B/D$ . On the other hand, the  $Z/D$  effect is monotonous, and becomes small at  $Z/D > 2.5$ . Some aspects of these geometric effects can be evaluated by a local-Froude-number effect on the basis of the global relation between  $S_c/D$  and  $Fr$ . And, the other aspects is necessarily considered to be related with the flow structure in the suction sump.

**Key words:** pumps, air entrainment, vortices, open sump, water intake, two-phase flow

**キーワード:** ポンプ, 空気吸込, 渦, 吸込水槽, 取水口, 二相流

### 取水槽内の空気吸込の発生について

平田 勝哉・舟木 治郎・久保田 義啓・稲垣 勝久・田岡 未樹

#### 1. はじめに

発電プラントや灌漑設備, 排水施設などでは, イニシャルコストの削減や小型化, 高効率化, 高性能化の実現のため, 吸込水槽の最適設計が必要とされる. 近年, それらの要求を満たすためのより高水準な解決策が求められている. そのような状況下では, 吸込管入口への空気吸込が起りやすくなる. 空気吸

込は, 振動や騒音, 揚水効率低下, そして最悪の場合はポンプ崩壊を引き起こす. よって, 空気吸込を防ぐよう, 入念な吸込水槽と吸込管の設計が求められる.

吸込水槽では空気吸込が実用的局面での最重要事項の一つであるので, これまでに空気吸込に関する多くの研究がなされてきた.

\*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto 610-0321, Japan  
Telephone: +81-774-65-6461, Fax: +81-774-65-6830, E-mail: khirata@mail.doshisha.ac.jp

Iversen (1953)<sup>1)</sup>は, “vertical wet-pit pump”あるいは“vertical suspended pump in a wet well”と呼ばれる形状を持つ単純なモデルを考えた. そこでは, 吸込管が自由表面を貫いて垂直に吸込水槽に挿入される. この形状は, 構造や維持管理, 操作において, 多くの実用的な利点がある. ここで, 吸水管は円形断面を有する直線状パイプであり, 吸込水槽は開水路である. この開水路は, 吸込管の下流で, 垂直な背面を有する (Fig. 1参照). そのような簡単な形状にも関わらず, この吸込水槽内の流れは, 非常に複雑である. 例えば, 空気吸込の基礎研究の為によく調べられてきた水平オリフィス内流れ (後述) と比較しても, ずっと複雑である. Iversenは, 既存の吸込水槽内の流れを, “局所渦”や“柱状渦”などのいくつかのタイプに分類した. 彼の研究は, 先駆的なものであるが, 首尾一貫した次元解析を欠いており, また, 定性的なものであった. 一方で, 彼は, フルード数 $Fr$ を唯一の運動パラメータとして考えるだけでは空気吸込を規定するのに不十分であること, つまり, 別の力学パラメータがこの現象を規定するのに更に必要であることを, 結論づけている. Fraser & Harrison (1953)<sup>2)</sup>は, 複雑形状を有するいくつかの吸込水槽に生じる空気吸込を報告した. Denny (1956)<sup>3)</sup>は, 簡単な幾何形状と複雑な幾何形状の吸込水槽の両者について, 様々な形状効果を調査した. 彼は, 実務的観点から, 空気吸込のスケール効果に最も重要なパラメータとして,  $Fr$ などの無次元量の代わりに, 吸込管入口の有次元流速を提案した. ここで, スケール効果とは, すべての力学パラメータ効果を包括したものを指す.

Stevens & Kolf (1957)<sup>4)</sup>は, 最も簡単な問題の一つである“水平オリフィス” (あるいは“horizontal orifice”, “circular-drain basin”) を対象にして, 重力および粘性, 接近流の循環, 幾何形状に関する4つの無次元パラメータについて考えた. Hattersley (1965)<sup>5)</sup>は, 修正vertical-wet-pit-pump形状を含むいくつかの複雑形状を持った吸込水槽の実際の運転状況下での諸特性を報告した. 更に, 彼は, いくつかの実用的な空気吸込の防止方法を提案した. また, Iversen と同様に, 彼は, 空気吸込現象を規定する

為に,  $Fr$ に加えて, 他の運動パラメータが必要であると指摘した.

Granger (1966)<sup>6)</sup>とAnwar (1966)<sup>7)</sup>, Maris (1967)<sup>8)</sup>, Zielinski & Villemonte (1968)<sup>9)</sup>は, Stevens & Kolfと同様に, 水平オリフィスを研究対象とした. Grangerは定常かつ軸対称の仮定の下, 微小擾乱を考え粘性解析解を導き, 実験と比較した. 一方, Marisは非粘性の仮定下, 粘性一次近似のもとで解析解を求め, 渦度の時間発展を調べた. AnwarとZielinski & Villemonteは, 流量係数への粘性および接近流の循環, 幾何形状の影響を示した. Anwarによると半径レイノルズ数 $Re_S (\equiv \pi Q/(\nu S)) \geq 10^3$ の時, Zielinski & Villemonteによるとレイノルズ数 $Re_{ii} (\equiv \pi D V_{ii}/\nu) \geq 1.0 \times 10^4$ の時, 粘性効果は無視できる. ここに,  $Q$ および $\nu$ ,  $S$ ,  $D$ ,  $V_{ii}$ は, それぞれ, 吸込口での流量および動粘度, 水深, 吸込口直径, 理論平均流速である.

Anwar (1968)<sup>10)</sup>とDomm et al. (1971)<sup>11)</sup>も, Hattersleyと同様, “vertical-wet-pit-pump”形状を含む様々な吸込水槽を調査して, いくつかの空気吸込の防止方法を提案した. 彼らの研究は, 次元解析上の一貫性を如いているのだが, 吸込口没水深さ $S$ と接近流の循環の両方が旋回流れに大きな影響を及ぼす点を強調している. 一方, Kondo & Maru (1972)<sup>12)</sup>は, 単純な“vertical-wet-pit-pump”形状を対象にして, 縮尺モデル試験のための折衷規範を提

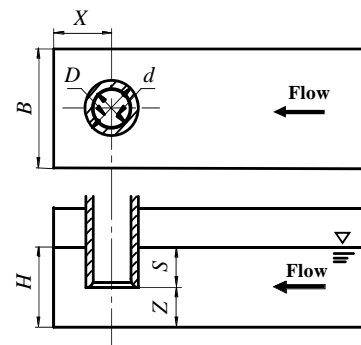


Fig. 1. Suction sump and suction pipe, with the vertical-wet-pit-pump configuration.  $D$ , Outside diameter of a suction pipe;  $d$ , inside diameter of a suction pipe;  $B$ , sump breadth;  $X$ , back clearance;  $H$ , water level;  $S$ , submergence depth;  $Z$ , bottom clearance.

案した。彼らの折衷規範は、 $Fr$ 相似則と吸込管入口の有次元速度一致則の中間則である。もちろん、この折衷評価は、レイノルズ数 $Re$ 相似則から、はるかに懸け離れている。

Reddy & Pickford (1972)<sup>13)</sup>は、吸込水槽背面に水平吸込口を持つ“垂直オリフィス”（あるいは“vertical orifice”）を調査した。“垂直オリフィス”とは水平な吸込口を持つ吸込水槽である。彼らは、 $Fr$ 相似則を前提として、 $S_c/D = Fr$ なる経験則を提案した。また、より実用的規範として $S_c/D = Fr + 1$ も提案した。

Levi (1972)<sup>14)</sup>は、さまざまな水平オリフィスを実験的に調べ、その流れの、竜巻など気象現象への応用を提案した。Dagget & Keulegan (1974)<sup>15)</sup>は、グリセリン水溶液や種々の混合油など数種類の作動流体を使用することで、水平オリフィスで包括的な実験を行った。彼らの実験では、定常状態にある空気系が自由表面から吸込口まで存在する。なお、以前行われた水平オリフィスの基礎研究の多くは、空気吸込を伴わない条件下での調査であった。彼らは、ウェーバー数 $We$ （定義は後述）の効果、さらに、 $Fr$ と $Re$ 、接近流循環係数 $N_F$ 、二つの幾何形状パラメータの効果について、調べた。 $We$ 効果（または、表面張力効果）に関する詳述を欠いているが、彼らは、流量係数への $We$ 効果は無視できると指摘した。また、彼らは、 $Re$ 効果（または、粘性効果）が、 $Re$  ( $\equiv V_1 D / \nu$ )  $\geq 3.2 \times 10^4$ のとき、無視できると結論付けた。ここで、 $V_1$ の定義は後で示す。彼らと同様、 $We$ 効果および $Fr$ 効果（または、重力効果）、 $Re$ 効果、 $N_F$ 効果、いくつかの幾何形状効果が、Baum (1974)<sup>16)</sup>やBaum & Cook (1974)<sup>17)</sup>、Anwar et al. (1978)<sup>18)</sup>、Jain et al. (1978)<sup>19)</sup>によって議論された。BaumとBaum & Cookはさまざまな流体（sodium, 水, white spirit, Freon 113）を用いた実験を行った。Baum & Cookは、 $Re$ 効果は無視して $S_c/D_1 = 700 (Fr^{0.5} - 4.4Fr/We)$ を提案した。ここに、 $D_1$ は円柱水槽直径である。Anwar et al.は、“水平オリフィス”の代わりに、吸込水槽側面に吸込口を持つ“垂直オリフィス”を調査した。彼らの結論では、 $We$ 効果と $Re$ 効果の両方が、 $We_S$  ( $\equiv \rho Q^2 S / (A \sigma)$ )  $\geq 10^4$ かつ $Re_S$  ( $\equiv Q / \nu S$ )  $\geq 3.0 \times 10^4$ のときに

無視できる。前者と後者の条件は、それぞれ、 $We \geq 41 - 71$ と $Re \geq 2.3 \times 10^4 - 3.8 \times 10^4$ に対応する。ここで、 $We$ と $Re$ の換算値は一定ではなく、 $Fr$ の値に伴い変わることには注意すべきである。なぜならば、彼らの実験装置では、いくつかの形状パラメータが一定値に固定されており、また、一種類の作動流体、つまり、水だけが使用されている。一方、Jain et al.は、二つのサイズの吸込水槽と三種類の作動流体（水、セルロース水溶液、アルコール水溶液）を使用して、整合性のある水平オリフィス実験を行った。彼らは、接近流の循環が大きくなるにつれて、臨界没水深さ $S_c$ （定義は後述）が大きくなる、すなわち、空気吸込がより起こり易くなると考えた。この概念のもとに解析された実験データは、その仮定の正当性を示した。彼らの結果によると、 $We \geq 11$ で $We$ 効果を、 $Re/Fr^2 \geq 5.0 \times 10^4$ で $Re$ 効果を、それぞれ、無視できる。Hecker (1981)<sup>20)</sup>は、様々なモデルと原型との比較により、以前の研究における寸法効果を要約した。Farell & Cuomo (1984)<sup>21)</sup>とPadmanabhan & Hecker (1984)<sup>22)</sup>は、 $Re$ 効果は高 $Re$ で無視できることを確認した。もともと、両研究では、 $We$ 効果は考察対象外であった。Odgaard (1986)<sup>23)</sup>は、軸対称の層流を想定し、 $S_c$ と $Fr$ や $N_F$ 、 $Re$ 、 $We$ とを関連付ける寸法効果規範を提案した。

Gulliver & Rindels (1987)<sup>24)</sup>やTakahashi et al. (1988a, 1988b)<sup>25, 26)</sup>はvertical-downward flowing intakeについて、空気吸込を実験的に調べ、空気吸込の発生条件を $Fr$ や $N_F$ （あるいは、回転フルード数）の関数とする経験則を提案している。Hite Jr & Mih (1994)<sup>27)</sup>も吸込水槽側壁に吸込口を持つ vertical orificeについて、高 $Re$ かつ高 $We$ において、 $Re$ 効果と $We$ 効果は無視し、 $Fr$ と $N_F$ の影響を明らかにした。Yildirim & Kocabas (1995, 1998)<sup>28, 29)</sup>はvertical-downward flowing intakeについて考え、 $We$ 、 $Fr$ 、 $Re$ 、 $N_F$ 効果は無視し、流速比と形状パラメータについてのみ明らかにしている。

最近、Werth & Frizell (2009)<sup>30)</sup>はvertical-wet-pit-pump水槽について、Gulliver & Rindels (1987)の経験則を修正し $S_c / D = 2.1 + 4Fr^{2/3}/3$ を提案した。これは、ANSIのThe 1998 HI

Standard ( $S_c/D = 1 + 2.3Fr$ , 後述) よりも, よい近似を与える.

上述の研究の内, 整合性のある次元解析は, 水平オリフィスなどの最も簡単な形状でのみ取り扱われている. なぜならば, 形状パラメータの少ないそのような単純流れに対してのみ, 整合的な取り組みが適用可能なためである. しかしながら, 実際の吸込水槽 (例えば, Iversen (1953) や Fraser & Harrison (1953) に見られる) は, しばしば, 実用上の広範囲の制限や要求のため, 複雑な形状を有する. 残念ながら, 現状では単純な vertical-wet-pit-pump 形状のような, わずかに複雑な形状の吸込水槽についてさえ我々の知識は充分でない. その様なわずかに複雑な形状の吸込水槽に水平オリフィスの知識を適応することも考えられるが, 一般的に単純ではない. なぜなら, 水平オリフィスで想定した  $N_r$  の値を, 複雑形状の吸込水槽で見積もることは容易ではない. つまり, 複雑形状の吸込水槽内で流れは, 完全に三次元的であり, かつ, 非常に弱い周期性を伴う強非定常性を示す. この様な状況下で,  $N_r$  は通常, 力学パラメータと幾何学パラメータの両方の関数として与えねばならないからである.

本研究では, 吸込管が自由表面を貫通して垂直下方に吸込水槽に挿入される, いわゆる, vertical-wet-pit-pump 形状での空気吸込を考える. 特に, 没水深  $S_c$  に注目する. ここで,  $S_c$  は, 空気吸込発生のための重要かつ慣例的に使用される尺度である.

vertical-wet-pit-pump の形状は, 実用的な利点が多い. よって, これまでに理論と実務の双方の視点から, 多くの研究がなされてきた. それらには, Iversen (1953), Denny (1956), Fujita & Oya (1962)<sup>31)</sup>, Hattersley (1965), Kyogoku (1965)<sup>32)</sup>, Anwar (1968), Kitamura & Kida (1971)<sup>33)</sup>, Kondo & Maru (1972), Isohata et al. (1975)<sup>34)</sup>, Tagomori (1976)<sup>35)</sup>, Kubota (1978)<sup>36)</sup>, Shinham et al. (1983)<sup>37)</sup>, Okamoto et al. (1991)<sup>38)</sup>, Tagomori & Ueda (1991)<sup>39)</sup>, Arboleda & El-Fadel (1996)<sup>40)</sup>, Constantinescu & Patel (1998)<sup>41)</sup>, Werth & Frizell (2009) や最近の著者らの研究 (Funaki et al. (2008)<sup>42)</sup> と Hirata et al. (2009)<sup>43)</sup> などがある. な

お, Funaki et al. では, 空気吸込メカニズムを明らかにするために, 超音波ドップラー法を使用して, 吸込水槽内の典型的な三次元時間平均流れ場, すなわち, 時間平均速度分布や温度分布を示した. 更に, Hirata et al. では, 単純なコンダクタンスタイプの気泡センサーを製作し, 空気吸込の正確な計測を行い, 従来法での結果と比較した. これまでの成果の一部は, BHRA<sup>44)</sup> や JSME<sup>45)</sup>, ANSI<sup>46)</sup> などの様々な基準に反映されている.

これまでの vertical-wet-pit-pump 形状に関する研究では, いくつかの形状効果について議論しているが, それらの結果は, 様々な力学パラメータ効果, すなわち, 寸法効果を包含しており, その徹底的な議論の欠如のため, 一般性に乏しい. 事際, 過去のいくつかの研究では, スケールモデル試験の結果を矛盾なく説明するためには,  $Fr$  に加えて他の力学パラメータが必要であると結論付けている. そこで, 本研究では, 整合性を保証した一連の実験により, 6 個の無次元パラメータが  $S_c$  へ及ぼす効果の解明を試みる. 6 個の内の 3 個のパラメータは力学効果, すなわち, 重力効果および粘性効果, 表面張力効果に関するものであり, 他の三つのパラメータは形状効果に関するものである.

## 2. 実験方法

### 2.1 吸込水槽と吸込管

Fig. 1 は, 今回対象とするモデルを示す. すなわち, 単純な vertical-wet-pit-pump 形状を持った吸込水槽/吸込管系である. ここに,  $D$  と  $d$  とは, それぞれ, 吸込口の外径および内径である. 前者は, 本論では代表長さスケールとする. 後者は,  $0.9D$  に固定する. 吸込管の吸込口形状は, ベルマウス型である. 吸込管は吸込水槽の中心軸上に, 上方から垂直に挿入する. ここに,  $B$  および  $X$ ,  $Z$  は, それぞれ, 吸込水槽幅および吸込管中心から吸込水槽後壁までの間隙, 吸込管入口と吸込水槽底壁との間隙を示す. また,  $H$  は, 水位, すなわち, 平均自由水面の高さである. よって, パイプの没水深  $S$  は,  $(H-Z)$  に等しい. 代表速度スケールを吸込管入口の平均流速  $V_1$  とする.  $V_1$  は, 以下のように定義する.

Table 1. Experimental parameters.

$B$ [m]	33–150
$X$ [m]	20–215
$Z$ [m]	7–23
$D$ [m]	14–48
$V_i$ [m/s]	0.45–1.20
$B/D$	1.43–5.30
$X/D$	0.79–5.0
$Z/D$	0.26–3.21
$H/D$	0.53–6.05
$Fr$	0.66–2.8
$Re$	$8.3 \times 10^3$ – $4.6 \times 10^4$
$We$	8.6–27
$Re/Fr^2$	$2.3 \times 10^3$ – $4.9 \times 10^4$
$Bo$	20–500

$$V_i = 4Q/(\pi D^2). \quad (1)$$

ここに、 $Q$ は流出係数，すなわち，吸込管内の流量である．また，フルード数 $Fr$ およびレイノルズ数 $Re$ ，ウェーバー数 $We$ を，以下のように定義する．

$$Fr = V_i/(gD)^{0.5}. \quad (2)$$

$$Re = V_i D/\nu. \quad (3)$$

$$We = V_i(\rho D/\sigma)^{0.5}. \quad (4)$$

ここに、 $g$ および $\nu$ 、 $\rho$ 、 $\sigma$ は、それぞれ、重力加速度、流体の動粘度、流体の密度、水と空気との表面張力を示す．また、補助パラメータとして、Bond数 $Bo$ を考える． $Bo$ は以下のように定義する．

$$Bo = \rho g D^2/\sigma. \quad (5)$$

Table 1は、本研究における実験パラメータとそれらの範囲を、無次元形状パラメータおよび無次元運動パラメータと共に示す．

Fig. 2は、本実験装置の概略を示す．ターボポンプA(図中、No.2)は、作動流体(水)を貯水槽(No.1)から吸込水槽(No.3)に送る．制御弁により、ポンプAの流量を調節して、吸込水槽の水位 $H$ を定める．吸込水槽の上流、すなわち、吸込水槽後壁から0.84m上流に、整流装置(No.4)を設ける．整流装置は直径0.001mかつ隙間0.001mのワイヤーメッシュ2枚によって挟まれた、不織布から成る．バンド・タイプ・

ジェット・ポンプ(No.6)により、吸込水槽から吸込口(No.5)に水を吸い上げる．このジェット・ポンプは、ターボポンプB(No.7)により、駆動する．ここで、ジェット・ポンプは、通常の軸流ポンプなどと比較して、旋回流成分が小さい特徴を有する．電磁流量計(No.8)により、ジェット・ポンプの一次流量を測定する．また、三角堰(No.9)により、ジェット・ポンプの一次流量と二次流量の総和を測定する．ここで、二次流量は、吸込管内の流量に等しい．最後に、三角堰からの水は、貯水槽に戻され、水の循環系が閉じる．

## 2.2 自由表面形状の分類

Iversen (1953)やDenny (1956)、Prosser (1977)<sup>44)</sup>、Toyokura et al. (1984)<sup>45)</sup>、Padmanabham & Hecker (1984)を参考にしつつ、予備観測を実施し、吸込水槽内に特有の自由表面パターンを、五つのタイプ(a)–(e)に分類する (Fig. 3を参照)．

この分類法は、特に吸込管への空気吸込に注目したものである．考察の容易性と確実性を重視した結果、本分類は、BHRA<sup>44)</sup>やJSME<sup>45)</sup>の分類法に近く、染料などによる流れの可視化を伴うANSI<sup>46)</sup>の分類法とは、若干異なる．

以下に、五つのタイプ(a)–(e)を説明する．

タイプ(a): Fig. 3(a)に示すように、吸込管付近の平均自由表面に浅いへこみ、すなわち、くぼみを観測できる．くぼみの多くは、吸込管の下流に発生する．ここで、くぼみからの空気吸込はないことに注意すべき

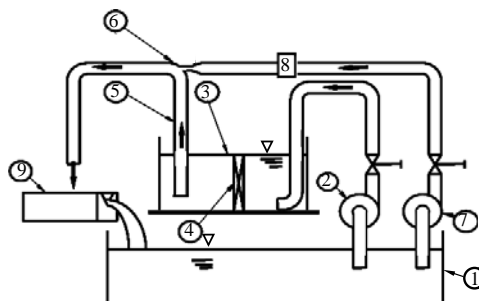
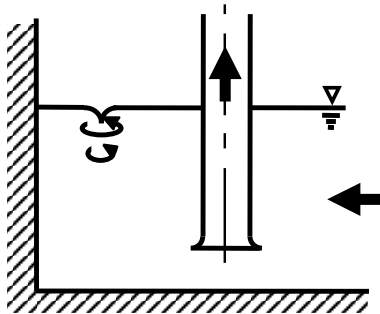


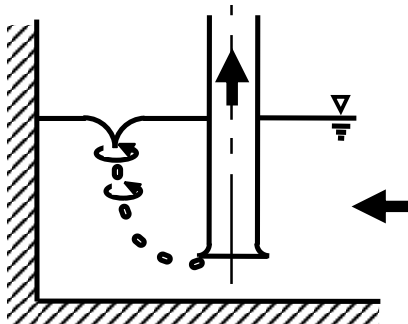
Fig. 2. Experimental apparatus1. 1, Reservoir; 2, turbo pump A; 3, suction sump; 4, strainer; 5, suction pipe; 6, bend-type jet pump; 7, turbo pump B; 8, eletro-magnetic flow meter; 9, triangle weir.

である。

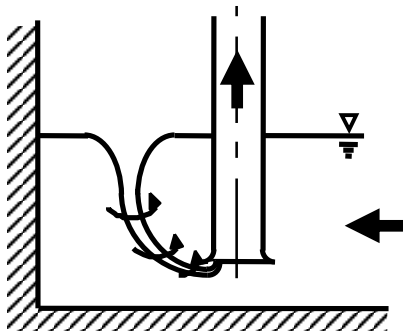
タイプ(b): Fig. 3(b)とFig. 4(a)とに示すように、空間的に断続した空気糸、すなわち、ある線上に一系列に連なった一連の気泡を、観測できる。空気糸の一端は、平均自由表面の空気糸は吸込管下流に発生し、空気糸を中心軸として、その周囲の流体が旋回する。このタイプでは、吸込管への空気吸込は起こりえるが、吸込まれる空気は、微量である。



(a) A free-surface dimple near a suction pipe.

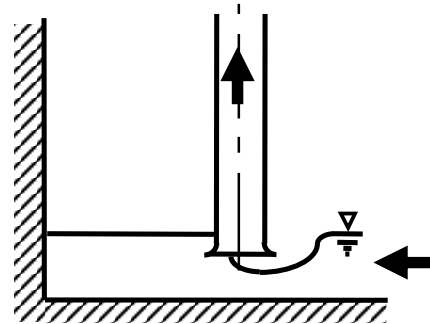


(b) A spatially-intermittent air string near a suction pipe

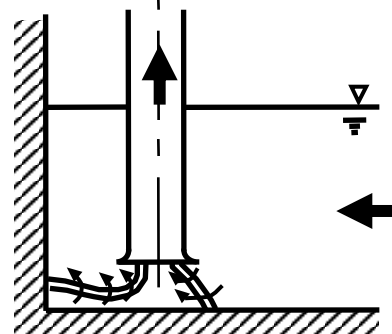


(c) A spatially-continuous air string near a suction pipe

タイプ(c): Fig. 3(c)とFig. 4(b)とに示すように、空間的に連続した空気糸、すなわち、平均自由表面から吸込管入口へ至る自由表面上の深くぼみを、観測できる。タイプ(a)やタイプ(b)と同様、空気糸は、一般に吸込管下流に発生し、流体旋回を中心軸となる。このタイプでは、吸込まれる空気量は大きく、通常、ポンプ性能への影響を無視できない。



(d) A free-surface hollow exposed to the peripheral wall of a suction pipe



(e) Submerging air strings

Fig. 3. Types of distinctive free-surface patterns in suction sumps.

タイプ(d): Fig. 3(d)に示すように, 吸込管外周壁に接する平均自由表面に大きくくぼみを観測できる. くぼみは, 吸込管の一部あるいは全部を取り囲む. 流体は, 時に, 吸込管周囲を回転することがある. 空気は, 吸込管周囲の任意の場所から, 不規則に吸込まれ, ポンプ性能に致命的な影響を与える.

タイプ(e): Fig. 3(e)に示すように, 水中空気糸が観測できる. この自由表面境界は平均自由表面に連結していない. さらに述べると, 空気糸の一端は, 吸込管入口に達しており, もう一端は, 吸込管の底壁あるいは側壁, 後壁に達する. 他のタイプと同様に, 空気糸は流体旋回を中心軸となる.

吸込水槽内では, 自由表面パターンは, ポンプ没水深 $S$ の減少とともに, 通常, タイプ(a)からタイプ(d)へと移行する. 一方, タイプ(e)は平均自由表面の存在とは, 直接, 関係がない. 換言すれば, たとえ $S$ が大きい時でも, タイプ(e)は出現し得る. 以上の分類法は, 空気と水との間の自由表面の目視観測に基づいた慣例的なものであることに注意すべきである. よって, どのタイプも, 空気吸込の発生にも吸込空気量にも直接関係づけることはできない

### 2.3 臨界没水深 $S_c$

多くの研究者と同様, 本研究では, 空気吸込の第一の指標を, 臨界没水深 $S_c$ とする.  $S_c$ の定義は, 以下の通りである. 没水深 $S$ (Fig. 1を参照)が充分大きい値から零まで減少するとき, まず,  $S = S_c$ において空間的に連続した空気糸(タイプ(c))が最初に観察できる. 本実験では,  $S$ を0.005m間隔で段階的に減少させる. 各段階では, 各々5分間, タイプ(c)を探索する. なお, 予備試験により, タイプ(c)発生の周期性は非常に弱い, 5分間の観測は, タイプ(c)を確認するのに充分であることも確認できる. タイプ(c)の発生は, 吸込管への空気吸込の発生を直接意味しないが, 空気吸込発生の充分な指標にはなり得る(Hirata et al. (2009)を参照).

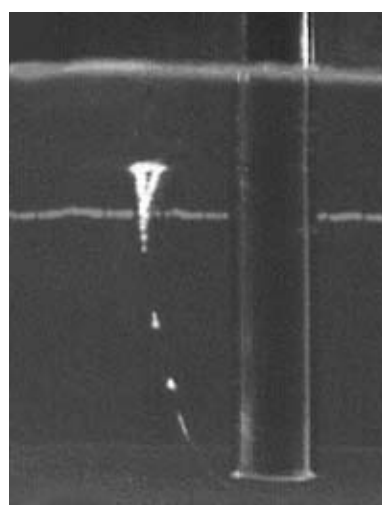
## 3. 結果と考察

### 3.1 支配パラメータ

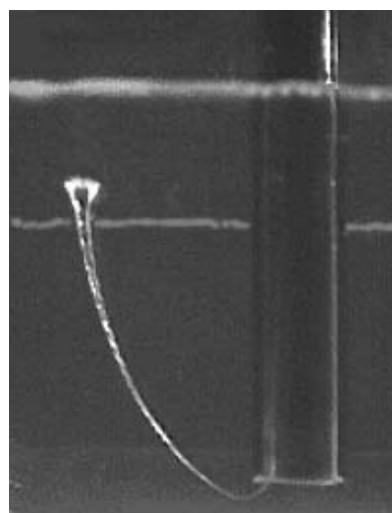
臨界没水深 $S_c$ に影響を及ぼす有次元量9個を考える. すなわち, 吸込管入口速度 $V_i$ および吸込管外径 $D$ , 吸込水槽幅 $B$ , 後壁間隙 $X$ , 底壁間隙 $Z$ , 重力加速度 $g$ , 表面張力 $\sigma$ , 流体密度 $\rho$ , 流体粘性係数 $\mu$ である. 次元解析より, 次式を得る.

$$S_c/D = \Phi_1(Fr, Re, We, B/D, X/D, Z/D). \quad (6)$$

ここに,  $\Phi_i$ は任意関数(整数 $i = 1, 2, 3, \dots$ )である.



(a) Spatially-intermittent air string from the atmosphere to a suction-pipe intake



(b) Spatially-continuous air string from the atmosphere to a suction-pipe intake

Fig. 4. Photographs of air strings.

式(6)において、 $V_i$ と $D$ とを、それぞれ、代表速度スケールと代表長さスケールとして、選ぶ。もし、本現象で最も重要な力を、慣性力の代わりに重力と見なすならば、式(6)に代わり、次式を得る。

$$S_c/D = \Phi_2(Fr, Re/Fr^2, Bo, B/D, X/D, Z/D). \quad (7)$$

以下の節では、式(6)または式(7)を想定して、 $S_c/D$ への6個の無次元支配パラメータ $Fr$ と $Re$ 、 $We$ 、 $B/D$ 、 $X/D$ 、 $Z/D$ 、または、 $Fr$ と $Re/Fr^2$ 、 $Bo$ 、 $B/D$ 、 $X/D$ 、 $Z/D$ の効果の解明を試みる。

式(6)と式(7)のどちらを考えるか、すなわち、第一に支配的な力が慣性力か重力かは、自由表面の現象を考える上で最も重要な力学パラメータである $Fr$ の値に依存する。(Iversen (1953)とHattersley (1956)を参照)。明確に述べると、 $Fr \ll 1$ においては式(6)を、 $Fr \gg 1$ においては式(7)を用いるべきである。 $Fr^2$ は、慣性力の重力に対する全体的なバランスを表している。そして、それら二つの力は、自由表面現象を支配する主要な力である。それら二つの主要な力のバランスを変更する補助的な力として、粘性力と表面張力とを考慮することができる。よって、慣性力が重力よりも小さくなりがちな $Fr \ll 1$ のとき、それら二つの補助的な力は、重力ではなく慣性力の大きさに近づく。そして、それら二補助力と慣性力

との関係は、二補助力と重力との関係よりも、より流れに影響を及ぼしやすくなる。そして、 $Fr \gg 1$ では、その逆となる。

実用的な観点からすると、 $Fr$ は多くの場合1よりもずっと大きくなることはないので、式(7)よりも式(6)の方が有用であろう。この考えに基づくと、力学パラメータとして、 $Fr$ に加えて、 $Re/Fr^2$ や $Bo$ ではなく、 $Re$ や $We$ を考えるべきであろう。

また、代表速度スケールとして、 $V_i$ の代わりに別の量を使用する。例えば、代表速度スケールとして、吸込水槽の平均水路速度 $V_s$ を選ぶことは、他の一選択肢になりえる。しかし、 $V_i$ は、 $V_s$ よりも有効であると思われる。なぜならば、吸込管入口付近の局所流れは、より空気吸込に影響を与え得る。さらに、 $V_i$ の使用は $V_s$ と比べて、広範囲な実験データをよりうまくまとめ得る。言い換えると、非常に幅の広い水槽、つまり $B/D$ が大きい時、 $V_s$ は非常に小さい値をとる。一方で、 $V_s$ の使用は接近流がより効果的になる様な狭いパラメータ範囲内では有効と思われる。代表速度スケールと同様、代表長さスケールとして、 $D$ の代わりに別の量を使用できる。例えば、代表長さスケールとして $B$ を選ぶことは、他の一選択肢であろう。しかし、代表速度スケールでの議論と同様、 $D$ は $B$ よりも有効であると思われる。

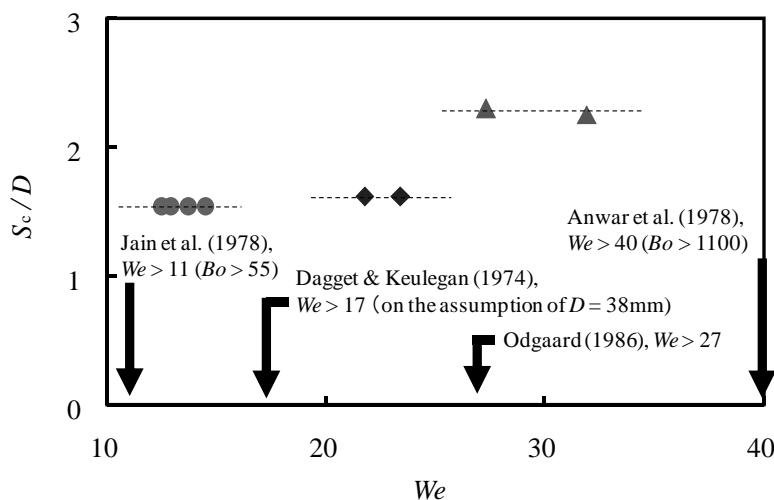


Fig. 5. Critical submergence  $S_c/D$  versus Weber number  $We$ : ●,  $B/D = 3.13$ ,  $X/D = 5.0$ ,  $Z/D = 0.48$ ,  $Fr = 0.67$  and  $Re = 2.2 \times 10^4$  ( $Re/Fr^2 = 4.9 \times 10^4$ ,  $Bo = 380, 420, 440, 470$ ); ◆,  $B/D = 3.16$ ,  $X/D = 1.71$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.35$  and  $Re = 3.8 \times 10^4$  ( $Re/Fr^2 = 2.1 \times 10^4$ ,  $Bo = 260, 300$ ); ▲,  $B/D = 3.16$ ,  $X/D = 1.71$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 2.8$  and  $Re = 3.8 \times 10^4$  ( $Re/Fr^2 = 4.8 \times 10^3$ ,  $Bo = 95, 130$ ).



### 3.2 力学パラメータの影響

今、式(6)中の三つの力学パラメータ $Fr$ と $Re$ ,  $We$ , および、式(7)中の三つの力学パラメータ $Fr$ と $Re/Fr^2$ ,  $Bo$ の,  $S_c/D$ への影響を考える。もし、複数の力学パラメータの複合効果の代わりに、一つの力学パラメータだけの純粋な効果を知りたいければ、一連の試験を通して、他の力学パラメータとすべての形状パラメータとを一定の値に保つ様に実験状況を制御しなければならない。

Fig. 5は、 $We$ と $S_c/D$ との関係を示す。すなわち、Fig. 5では三つの場合についての結果が、円形と菱形、三角形で表わされている。それぞれの場合において、 $We$ と $Bo$ 以外のすべての支配パラメータが一定に保たれている。どの場合においても $S_c/D$ の値がほぼ同じになることがわかる。この結果は、 $S_c/D$ への $We$ 効果が調査された $We$ 範囲内で無視できること、または、 $S_c/D$ への $Bo$ 効果が調査された $Bo$ 範囲内で無視できることを示す。よって、 $We > 12$ において、式(6)は次式となる。

$$S_c/D = \Phi_3 (Fr, Re, B/D, X/D, Z/D). \quad (8)$$

または、 $Bo > 95$ において、式(7)は次式となる。

$$S_c/D = \Phi_4 (Fr, Re/Fr^2, B/D, X/D, Z/D). \quad (9)$$

厳密に述べると、以下に述べる二つの観点から、以上の二つの規範 $We > 12$ と $Bo > 95$ は過剰である。

第一に、すべての実験が $We > 12$ かつ $Bo > 95$ で行われているため、 $We$ や $Bo$ がより小さい時の知識を欠いている。第二に、本実験では、 $Fr$ が $10^0$ のオーダーである。もし、 $Fr \ll 1$ でさらに実験を行えば、より正確な $We$ 規範を見出し得るだろう。また、 $Fr \gg 1$ でさらに実験を行えば、より正確な $Bo$ 規範を見出し得るだろう。

同様に厳密に述べると、たとえ、より正確な規範を見出したとしても、式(8)に対する $We$ 規範の閾値が、理論的に $Fr$ や $Re$ ,  $B/D$ ,  $X/D$ ,  $Z/D$ のような他の支配パラメータに依存することや、式(9)に対する $Bo$ 規範の閾値が理論的に $Fr$ や $Re/Fr^2$ ,  $B/D$ ,  $X/D$ ,  $Z/D$ のような他の支配パラメータに依存することに注意しなければならない。以上は、本研究では対象範囲外であるが、式(10)で関連した話題について議論する。

ちなみに、Fig. 5で、 $We$ 効果は無視できる様な $We$ 範囲の下限界に関して、他の研究者の規範の閾値も示している。これらの規範は、“vertical orifice”や“horizontal orifice”のような簡単な流れ場に関するものであるが、それらは $We > 12$ という規範とさほど異ならない。 $Bo$ に関しては、他の研究者の規範のいくつかは、論文に明記されていない為、記述されていない。Anwar et al. (1978) では $Bo > 1100$ であ

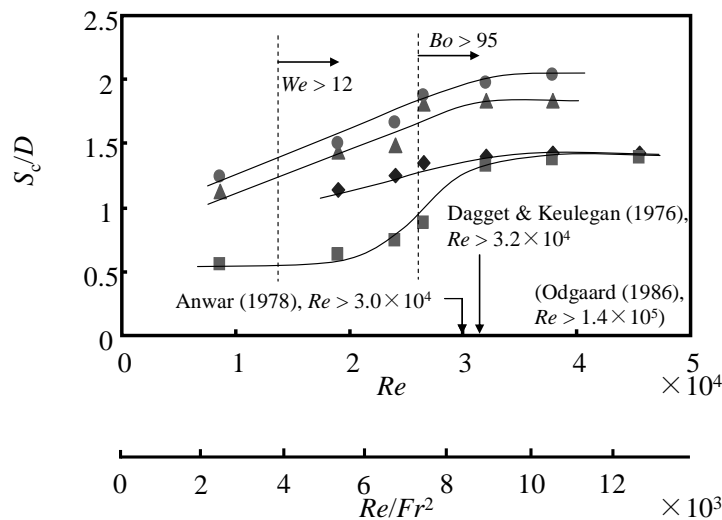


Fig. 6. Critical submergence  $S_c/D$  versus Reynolds number  $Re$ , for several value of suction-sump breadth  $B$ : ◆,  $B/D = 1.43$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 15-27$  ( $Bo = 62-198$ ); ■,  $B/D = 2.11$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-27$  ( $Bo = 20-198$ ); ▲,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-24$  ( $Bo = 20-155$ ); ●,  $B/D = 4.21$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-24$  ( $Bo = 20-155$ ).

り,  $Bo > 95$ なる本評価基準とはかなり異なるが, Jain et al. (1978) による  $Bo > 55$  なる規範は本規範に充分近い.

Fig. 6~Fig. 8は,  $Re$ または $Re/Fr^2$ に対する $S_c/D$ を示す. 明確に述べると, Fig. 6およびFig. 7, Fig. 8は, それぞれ, 値の異なる四つの $B/D$ , および, 二つの $X/D$ , 三つの $Z/D$ に関するものである. もちろん, 各々の場合で,  $We$ と $Bo$ を除き,  $Fr$  とすべての形状パラメータを一定の値に固定している. よって, 各図で

は,  $We$ と $Bo$ は, 一定に保たれておらず,  $Re$ あるいは $Re/Fr^2$ の値に応じて, それらの値を変える. しかしながら, 結果の大部分が $We > 12$ であり, 結果の大半が $Bo > 95$ である. なお, 図中の破線が, これらの閾値を示す. 従って, 以下の議論では,  $We$ 効果または $Bo$ 効果を見捨てる. なぜならば, 以下の議論では,  $We > 12$  または  $Bo > 95$ の結果だけを考察対象にして, それぞれ,  $Re$ 効果または $Re/Fr^2$ 効果のみを専ら考える為である.

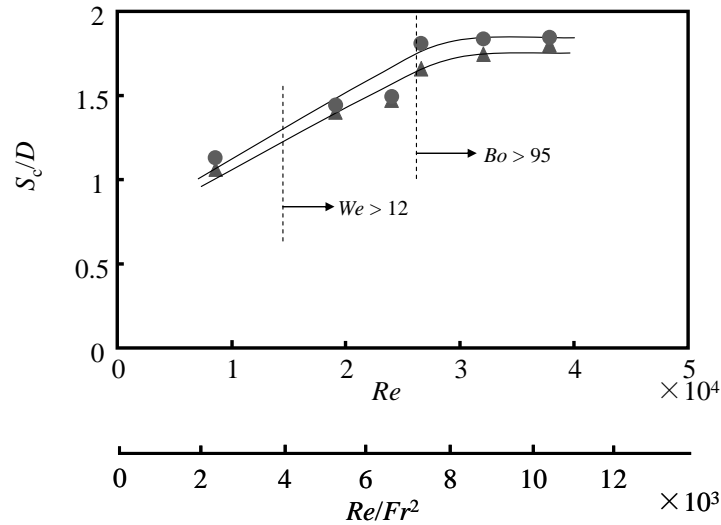


Fig. 7. Critical submergence  $S_c/D$  versus Reynolds number  $Re$ , for several value of back clearance  $X$ : ●,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-27$  ( $Bo = 20-198$ ); ▲,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.52$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-27$  ( $Bo = 20-198$ ).

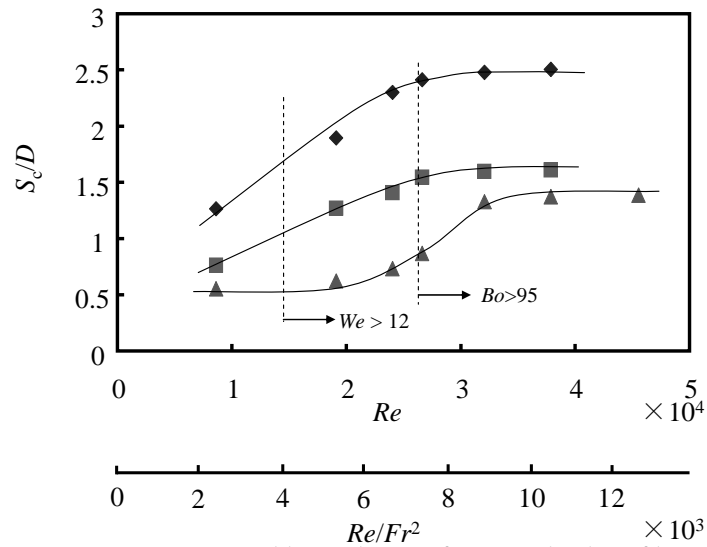


Fig. 8. Critical submergence  $S_c/D$  versus Reynolds number  $Re$ , for several value of bottom clearance  $Z$ : ◆,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.26$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-21$  ( $Bo = 20-124$ ); ■,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-21$  ( $Bo = 20-124$ ); ▲,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 1.43$ ,  $Fr = 1.9$  and  $We = 8.7-24$  ( $Bo = 20-155$ ).

まず、Fig. 6を見る。  $Re$ が零から約 $3 \times 10^4$ まで増加する時、 $S_c/D$ は単調増加し、 $Re > 3 \times 10^4$ の範囲では、 $S_c/D$ は一定値を保つ。また、 $Re/Fr^2$ がゼロから約 $8 \times 10^3$ まで増加する時、 $S_c/D$ が単調増加し、 $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ の範囲では、 $S_c/D$ は一定値を保つ。よって、 $S_c/D$ への $Re$ 効果が、 $Re > 3 \times 10^4$ の範囲で無視できることがわかる。または、 $S_c/D$ への $Re/Fr^2$ 効果が、 $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ の範囲で無視できることが分かる。

$Re$ に関する規範は、実験範囲が $Re > 1.4 \times 10^5$ に対するOdgaard (1986)による $Re > 1.4 \times 10^5$ なる規範を除くと、Anwar et al (1978)による $Re > 3.0 \times 10^4$ なる規範やDagget & Keulegan (1974)による $Re > 3.2 \times 10^4$ なる規範に、よく一致する。Fig. 7とFig. 8とは、Fig. 6と異なる形状パラメータに注目した結果である。Fig. 7とFig. 8とは、Fig. 6と同様な傾向および同じ規範を確認できる。従って、式(8)と式(9)とは、 $Re > 3 \times 10^4$ あるいは $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ の条件下で、次式と見なせる。

$$S_c/D = \Phi_3(Fr, B/D, X/D, Z/D). \quad (10)$$

厳密に述べると、 $We$ と $Bo$ に関する規範と同様に、 $Re > 3 \times 10^4$ と $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ のような2つの規範は過剰である。なぜならば、Fig. 6～Fig. 8のすべての実験は $Fr = 1.9$ であり、 $10^0$ のオーダーである。もし、

$Fr \ll 1$ で追加実験を行えば、 $Re$ に関して、より正確な規範を見出し得るだろう。もし、 $Fr \gg 1$ 、で追加実験を行えば、 $Re/Fr^2$ に関して、より正確な規範を見出し得るだろう。

同様に、厳密に述べると、たとえ式(10)における $Re$ や $Re/Fr^2$ の規範の正確な閾値が分かっても、それらの閾値は理論的に他の支配パラメータに依存することに注意すべきである。事実、Fig. 8では $Z/D$ の増加に従い、 $Re$ と $Re/Fr^2$ との両閾値がわずかに増加することを確認できる。ただし、Fig. 6とFig. 7とにおける閾値がそれぞれ $B/D$ と $X/D$ との明確な影響を受けているとは、認め難い。そして、式(8)と式(9)とについての以前の議論と同様、 $Fr$ が両閾値に及ぼす影響は、 $B/D$ や $X/D$ 、 $Z/D$ が両閾値に及ぼす影響と共に、本論の考察範囲外である。一般に、 $Fr$ の増加に伴い、 $Re$ の閾値は増加すると考えられる。なぜならば、 $Fr$ の増加は、一定の $Re$ での粘性力に対する重力の相対的減少を引き起こすからである。対照的に、 $Fr$ の増加に伴い、 $Re/Fr^2$ の閾値は減少すると考えられる。なぜならば、 $Fr$ の増加は、一定の $Re/Fr^2$ での粘性力に対する慣性力の相対的増大を引き起こすからである。

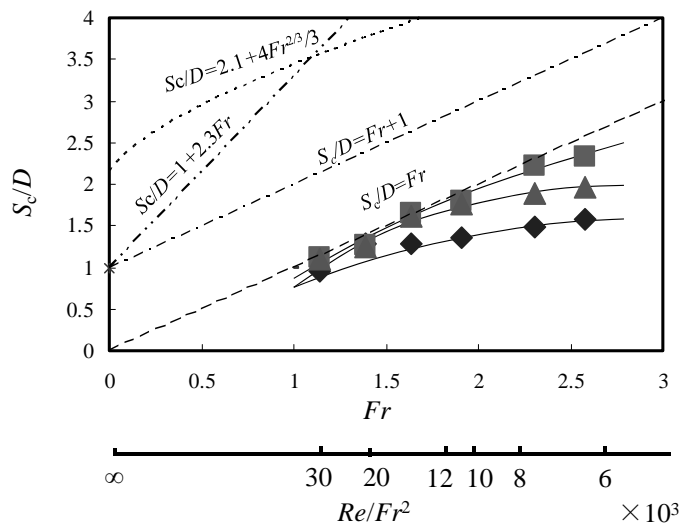


Fig. 9. Critical submergence  $S_c/D$  versus Froude number  $Fr$ , for several value of suction-sump breadth  $B$ :  $\blacklozenge$ ,  $B/D = 2.11$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 20-26$  ( $Bo = 105-309$ );  $\blacksquare$ ,  $B/D = 3.57$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 20-26$  ( $Bo = 105-309$ );  $\blacktriangle$ ,  $B/D = 4.21$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 20-26$  ( $Bo = 105-309$ ). — — — and — · — · —, Reddy & Pickford (1972); — · — · —, the 1998 HI Standard; ···, Werth & Frizell (2009).

よって、以降に示す全ての結果は $Re > 3 \times 10^4$ のものである。つまり、 $Re$ 効果の議論を避ける為、 $3 \times 10^4$ より充分大きな $Re$ を考える。同様に、以降に示す全ての結果は $Re/Fr^2$ 効果の議論を避ける為、Fig. 9を除き、 $Re/Fr^2 \gg 8 \times 10^3$ のものである。

補足すると、Fig. 6およびFig. 7, Fig. 8では、それぞれ、 $B/D$ および $X/D$ ,  $Z/D$ の $S_j/D$ への効果を確認できる。次の節では、そのような形状効果を詳細に議論する。Fig. 6～Fig. 8中の $Re > 3 \times 10^4$ あるいは $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ で、 $S_j/D$ が取り得る値の範囲を比較すると、 $B/D$ 効果と $Z/D$ 効果は、 $X/D$ 効果より一見して強そうである。そして、三つの効果とも、一見して複雑ではなさそうである。なぜならば、 $B/D$ の増加につれても(Fig. 6を参照)、あるいは、 $X/D$ の減少につれても(Fig. 7を参照)、 $Z/D$ の減少につれても(Fig. 8を参照)、 $S_j/D$ は単調増加する。しかしながら、以上の結論は、 $B/D$ や $X/D$ ,  $Z/D$ などのパラメータの試験範囲に依存する(同様に次の節を参照)。

$Re < 3 \times 10^4$ あるいは $Re/Fr^2 < 8 \times 10^3$ の結果を考慮するときは、粘性効果の為に、他に別の注意が必要になる。すなわち、 $Re$ や $Re/Fr^2$ の値に依存する様な結果は、一般性が乏しい。例えば、Fig. 6において、 $3 \times 10^4$ 以下のある一定の $Re$ で、または、 $8 \times 10^3$ 以下のある一定の $Re/Fr^2$ で、 $S_j/D$ は $B/D = 2.11$ で極小値を示す。対照的に、(後に示されるが)粘性効果を見捨てるくらい大きい $Re/Fr^2$ あるいは $Re$ においては、ある $B/D$ の値で $S_j/D$ は極大値を示す。

上の段落を補足すると、極小さい値の $Re$ または $Re/Fr^2$ では、それらの値が減少するにつれて、 $S_j/D$ は、単調減少傾向を示すのではなく、むしろ、約0.5の一定値を保つ傾向を示す(Fig. 6とFig. 8とを参照)。この $S_j/D$ が一定値をとる傾向は、タイプ(d)の空気吸込の発生に関係づけられることを確認した。

Fig. 9は、異なる $B/D$ の三つのケースにおける、 $Fr$ と $S_j/D$ との関係を示す。もちろん、各ケース毎に、 $Re/Fr^2$ および $We$ ,  $Bo$ を除き、他の支配パラメータ( $Re$ や $B/D$ ,  $X/D$ ,  $Z/D$ )は一定値に保つ。全ての結果は、 $We > 12$ かつ $Bo > 95$ であるので、 $We$ 効果と $Bo$ 効果は共に無視できる。しかしながら、いくつかの結果は $Re/Fr^2 < 8 \times 10^3$ であり、 $Re/Fr^2$ 効果は常に無視出来る

訳ではない。従って、 $Re/Fr^2 < 8 \times 10^3$ に対応する $Fr > 2$ では、純粋な $Fr$ 効果が現れておらず、粘性効果に影響を受けた $Fr$ 効果が現れている可能性がある。実際、Fig. 9では、 $Fr > 2$ で、 $Fr$ の増加に伴う $S_j/D$ の増加率が減少しているが、この傾向は、 $Re/Fr^2$ 効果に関係づけられるかもしれない。

一般に、 $Fr$ は、自由表面を有する様々な流体運動現象において、最も重要な力学パラメータの1つである(Iversen (1953)とFarell & Cuomo (1984)を参照)。 $Fr < 2$ では、 $Fr$ が $S_j/D$ に及ぼす純粋な効果を確認できる。つまり、 $Fr$ が増加するにつれて、 $S_j/D$ は単調増加する。しかしながら、 $Fr > 2$ では、純粋な $Fr$ 効果が観測できていないとは限らず、 $Fr$ 効果と $Re/Fr^2$ 効果の複合効果を観測しているかもしれない。そして、この複合効果は、多くの実際のモデル試験で、容易に起こり得る。

なお、Fig. 9には、他の研究者による、 $Fr$ と $S_j/D$ との関係式も示している。その中で、Reddy & Pickford (1972)による $S_j/D = Fr$ なる経験式は、本実験とのよい近似を示す。他の三つの経験式、特にHI Standard (1998)と、Werth & Frizell (2009)は、過剰な $S_j/D$ を示す。なお、Werth & Frizellの経験式にも、本研究と同様に、 $Fr$ の増加に伴う $S_j/D$ 増加率の減少傾向が見られるが、彼らの減少傾向は、 $Re/Fr^2$ 効果ではなく、用いたGulliver & Rindels (1987)による実験結果のばらつきを反映していると思われる。

ところで、Fig. 9では、 $B/D$ が $S_j/D$ へ及ぼす効果を確認することができる。次の節では、そのような形状効果について詳しく議論する。一見して、 $B/D$ 効果は複雑ではなさそうである。実際、Fig. 9では、 $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ に注目すると、 $B/D$ の増加につれて $S_j/D$ が単調増加する。しかしながら、この単調さは、テストされた範囲の $B/D$ に依存することを後に示す。(次の節を参照)。

### 3.3 形状パラメータの影響

次に、三つの形状パラメータ $B/D$ および $X/D$ ,  $Z/D$ の $S_j/D$ への効果を考える。

Fig. 10は、 $B/D$ と $S_j/D$ との関係を示す。ここでは、異なる $X/D$ の二つのケースを調べ、それらを図中の

中実菱形と中実正方形とで示す. もちろん, それぞれのケースで,  $B/D$ 以外の全ての支配パラメータは一定に保つ. 両ケースで, 四つの規範, すなわち,  $We > 12$ と $Bo > 95$ ,  $Re > 3 \times 10^4$ ,  $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ を全て満足していることに注意すべきである. よって, 本結果は, 一般性が保障されている. すなわち,  $We >$

12かつ $Bo > 95$ ,  $Re > 3 \times 10^4$ ,  $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ での, 得られる結果は全て同じになると考えられる. ちなみに, 図10中の中空菱形と中空正方形は, それぞれ, Kitamura & Kida (1971) とTagomori (1976) など他の研究者の実験結果を示す.

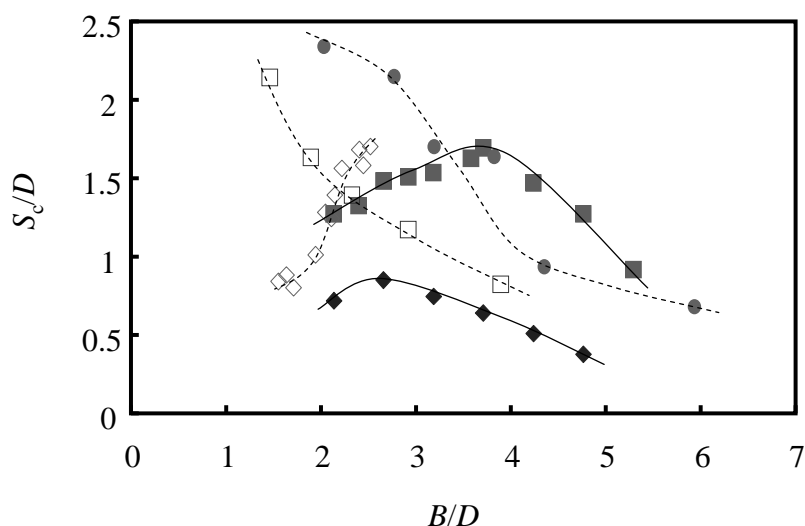


Fig. 10. Critical submergence  $S_c/D$  versus suction-sump breadth  $B$ , for several value of back clearance  $X$ : ◆,  $X/D = 0.79$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.6$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 22.4$  ( $Re/Fr^2 = 1.5 \times 10^4$ ,  $Bo = 197$ ); ■,  $X/D = 1.32$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.6$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 22.4$  ( $Re/Fr^2 = 1.5 \times 10^4$ ,  $Bo = 197$ ); ◇, Kitamura & Kida (1971),  $X/D = 0.95$ ,  $Z/D = 0.48$ ,  $Fr = 0.68-0.75$  and  $Re = 1.3 \times 10^5$ ; □, Tagomori (1976),  $X/D = 0.92$ ,  $Z/D = 0.58$ ,  $Fr = 0.68$  and  $Re = 1.0 \times 10^5$ .

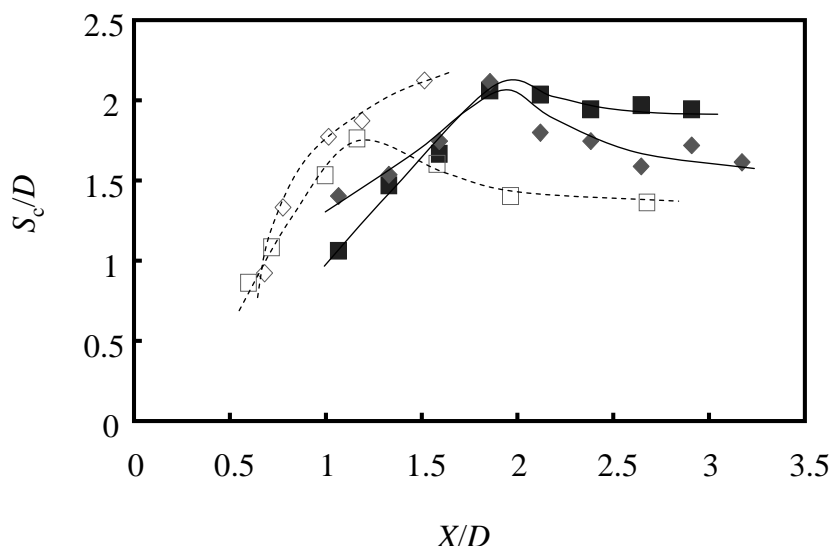


Fig. 11. Critical submergence  $S_c/D$  versus back clearance  $X$ , for several value of sump breadth  $B$ : ◆,  $B/D = 3.16$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.6$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 22.4$  ( $Re/Fr^2 = 1.5 \times 10^4$ ,  $Bo = 197$ ); ■,  $B/D = 4.21$ ,  $Z/D = 0.71$ ,  $Fr = 1.6$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 22.4$  ( $Re/Fr^2 = 1.5 \times 10^4$ ,  $Bo = 197$ ); ◇, Isohata et al. (1975),  $B/D = 2.5$ ,  $Z/D = 0.60$ ,  $Fr = 0.68$  and  $Re = \text{unknown}$ ; □, Tagomori (1976),  $B/D = 2.3$ ,  $Z/D = 0.58$ ,  $Fr = 0.68$  and  $Re = 1.0 \times 10^5$ .

本実験の両ケースとも、 $B/D$ が零から増えるにつれて、 $S_c/D$ は増加する。その後、ある $B/D$ で、 $S_c/D$ は最大値に達する。さらに、 $B/D$ が増すと、逆に、 $B/D$ の増加につれて $S_c/D$ は減少する。この様な $B/D$ 効果は、複雑である。例えば、Tagomoriによると、 $B/D$ の増加につれて、 $S_c/D$ は単調減少する。一方、Kitamura & Kidaによると、逆に、 $B/D$ の増加につれて $S_c/D$ は単調増加する。今回の結果と彼らの結果との不一致は、支配パラメータの不一致に加え、彼らの $B/D$ 範囲が限られた狭さであることにより生じたと考えられる。

$B/D$ の増加に伴う $S_c/D$ の増加傾向を、直接説明することは難しそうである。この傾向は、吸込管下流近傍での渦形成への吸込水槽側壁の干渉が関係していることも考えられ (Funaki et al. (2008) を参照)、今後のより詳細な研究が必要であろう。一方、 $B/D$ の更なる増加に伴う、 $S_c/D$ の減少傾向については、もしFig. 9で見られる $S_c/D$ に対する(全体的) $Fr$ 効果を想定するならば、その理解は容易そうである。すなわち、 $B/D$ の増加に伴い、吸込管入口近くの局所流速が減少することはありがちであろう。局所流速の減少は対応する局所フルード数の減少を引き起こす。もし適当な位置での局所フルード数が $S_c/D$ に及ぼす効果も(全体)フルード数が $S_c/D$ に及ぼす効果と同傾向であると仮定するなら、 $B/D$ 増加に伴う $S_c/D$ の減少傾向は容認されよう。なぜなら、

空気吸込には、全体的フルード数よりも吸込管入口近くの局所的フルード数のほうが、より決定的かつ効果的であると考えられるからである。

Fig. 11は、 $X/D$ と $S_c/D$ との関係を示す。ここでは、異なる $B/D$ の二つのケースを調べ、それらを図中の中実菱形と中実正方形とで示す。もちろん、それぞれのケースで、 $X/D$ 以外の全ての支配パラメータは一定に保つ。より広い適用可能性を保障するため、両ケースで、四つの規範、すなわち $We > 12$ と $Bo > 95$ 、 $Re > 3 \times 10^4$ 、 $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ を全て満足していることに注意すべきである。ちなみに、Fig. 11中の中空菱形と中空正方形とは、それぞれ、Isohata et al. (1975) とTagomori (1976) など他の研究者の実験結果を示す。

それぞれのケースで、 $X/D$ が零から増すにつれて、 $S_c/D$ は増加する。そして、ある $X/D$ で、 $S_c/D$ は最大値に達する。 $X/D$ がさらに増加するとき、 $X/D$ の増加につれて $S_c/D$ は一定値に近づきながら減少する。この様な $X/D$ 効果は、Tagomori (1976) と定性的に同様であり、Isohata et al. (1975) よりも複雑である。つまり、Isohata et al.では、 $X/D$ の増加につれて $S_c/D$ が単調増加する。今回の結果と彼らの結果との不一致は、支配パラメータの不一致に加え、彼らの $X/D$ 範囲が限られた狭さであることにより生じたと考えられる。

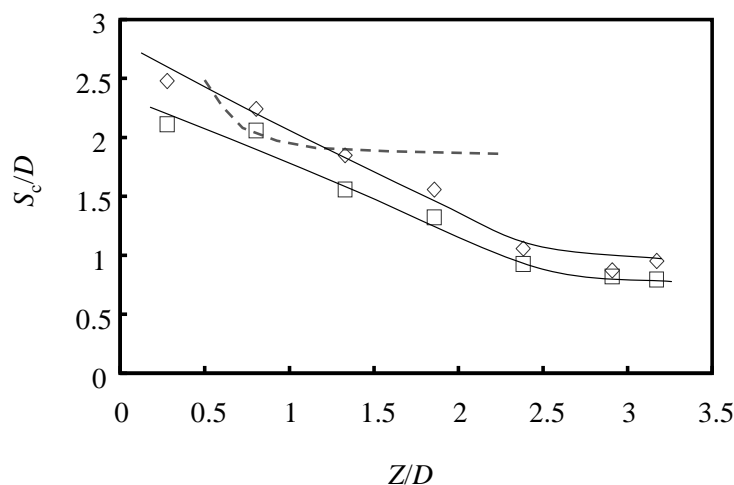


Fig. 12. Critical submergence  $S_c/D$  versus bottom clearance  $Z$ : ◇,  $B/D = 3.16$ ,  $X/D = 2.11$ ,  $Fr = 1.6$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 22.4$  ( $Re/Fr^2 = 1.5 \times 10^4$ ,  $Bo = 197$ ); □,  $B/D = 3.16$ ,  $X/D = 2.52$ ,  $Fr = 1.6$ ,  $Re = 3.8 \times 10^4$  and  $We = 22.4$  ( $Re/Fr^2 = 1.5 \times 10^4$ ,  $Bo = 197$ ); ---, Kondo & Maru (1972),  $B/D = 2.50$ ,  $X/D = 1.40$ ,  $Fr = 1.3$  and  $Re = 2.4 \times 10^5$ .

$B/D$ が零からある値まで増加するにつれて、 $S_c/D$ が増加する傾向 (Fig. 10を、参照) と同様に、上述の複雑な $X/D$ 効果を直接説明することは難しそうである。この複雑な効果を理解するためには、吸込管下流近傍での渦形成への吸込水槽背壁との干渉、あるいは、渦形成の背壁による増幅に関する更なる詳細な調査が必要であろう。(Funaki et al. (2008) を、参照)。

Fig. 12は、 $Z/D$ と $S_c/D$ との関係を示す。ここでは、異なる $X/D$ の二つケースを調べ、それらを図中の中空菱形と中空正方形とで示す。もちろん、それぞれのケースで、 $Z/D$ 以外の全ての支配パラメータは一定に保つ。より広い適用可能性を保障するため、両ケースで、四つの規範、すなわち $We > 12$ と $Bo > 95$ 、 $Re > 3 \times 10^4$ 、 $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ を全て満足していることに注意すべきである。ちなみに、Fig. 12中の破線は、他の研究者、すなわち、Kondo & Maru (1972)の実験結果を示す。

$B/D$ がある値を超えてさらに増加するにつれて $S_c/D$ が減少する傾向と同様 (Fig. 10を、参照)、 $Z/D$ の増加につれて $S_c/D$ が減少する傾向を理解することは、もしFig. 9で見られる $S_c/D$ に対する (全体的)  $Fr$ 効果を想定するならば、その理解は容易そうである。なぜならば、吸込管入口と吸込水槽底壁との間隙が広がるほど、局所流速は低下しがちになるからである。局所流速の低下は、対応する局所フルード数の減少を引き起こす。よって同様に、もし適切な位置での局所フルード数が $S_c/D$ に及ぼす効果も、(全体)フルード数が $S_c/D$ に及ぼす効果と同傾向であると仮定するならば、 $Z/D$ 増加に伴う $S_c/D$ の減少傾向は容認されよう。

更に述べると、 $Z/D > 2.5$ で、 $S_c/D$ は、小さな値を示す傾向がある。そして、その値は、 $Z/D$ によらずほぼ一定である。このことは、ある程度大きな $Z/D$ では、吸込水槽底壁の存在の影響を無視できることを示唆している。

#### 4. おわりに

vertical wet-pit pump形状を持つ吸込水槽/吸込管系での吸込管への空気吸込を考えた。空気吸込発生

についての最重要かつ慣例的指標である臨界没水深 $S_c$ に関して、多くの実験を実施して、主要な力学および幾何学パラメータが $S_c$ へ及ぼす影響を明らかにした。結果は以下のとおりである。

(1)  $S_c/D$ への $Fr$ 、 $Re$ 、 $We$ の三つの力学パラメータ効果を考えるとき、 $Re$ 効果は $Re > 3 \times 10^4$ で無視でき、 $We$ 効果は $We > 12$ で無視できる。一方、 $Re/Fr^2$ 効果は $Re/Fr^2 > 8 \times 10^3$ で無視でき、 $Bo$ 効果は $Bo > 95$ で無視できる。前者は、 $Fr \ll 1$ で、適当と考えられる。後者は、 $Fr \gg 1$ で、適当と考えられる。実用的な観点からすると、 $Fr$ は多くの場合1よりもずっと大きくなることはないので、前者のみを考えればよいであろう。よって、通常、 $Re > 3 \times 10^4$ かつ $We > 12$ なる二つの規範の下で、ただ一つの力学パラメータ $Fr$ のみを考えればよい。

(2) 幾何学パラメータ $X/D$ 、 $B/D$ 、 $Z/D$ の $S_c/D$ への効果を考えるとき、 $X/D$ 効果と $B/D$ 効果に関しては、ある $X/D$ またはある $B/D$ で、 $S_c/D$ は最大値を示す。一方、 $Z/D$ 効果は単調であるが、 $Z/D > 2.5$ のとき $S_c/D$ は $Z/D$ に依存しない一定の小さな値をとる。

これらの形状効果のいくつかの局面は、 $S_c/D$ に対する (全体的)  $Fr$ 効果を想定すると、容易に説明できる。一方、他のいくつかの局面は、直接説明することが現段階では難しそうである。これらの局面を理解するためには、吸込水槽内の複雑な流れ構造についての解明とその為の更なる詳細な調査が必要である。

本論文の編集には、同志社大学、山口達郎氏と加治大伸氏の援助を受けた。ここに記して、感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) Iversen, H. W., "Studies of Submergence Requirement of High Specific Speed Pumps," *Trans. of ASME*, Vol. 75, pp. 635-641 (1953).
- 2) Fraser, W. H. and Harrison, N. J., "Hydraulic Problems Encountered in Intake Structures of Vertical Wet-Pit Pumps and Methods Leading to Their Solution," *Trans. of ASME*, Vol. 75, No. 4, pp. 643-652 (1953).
- 3) Denny, D. F., "An Experimental Study of Airentraining Vortices at Pump Sumps," *Proc. of IMechE*, Vol. 170, No. 2, pp. 106-116 (1956).

- 4) Stevens, J. C. and Kolf, R. C., "Vortex Flow through "horizontal Orifices," *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proc. of ASCE*, Vol. 83, No. SA6, pp. 1-22 (1957).
- 5) Hattersley, R. T., "Hydraulic Design of Pump Intakes," *Journals of the Hydraulics Division, Proc. of ASCE*, Vol. 91, No. HY2, pp. 223-248 (1965).
- 6) Granger, R., "Steady Three-Dimensional Vortex Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, No. 3, pp. 557-576 (1966).
- 7) Anwar, H. O., "Formation of a Weak Vortex," *Journal of Hydraulics Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-16 (1966).
- 8) Marris, A. W., "Theory of the Bathtub Vortex," *Journal of Applied Mechanics*, March, pp. 11-15 (1967)
- 9) Zielinski, P. B., and Villemonte, J. R., "Effect of Viscosity on Vortex-Orifice Flow," *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of ASCE*, Vol. 94, No. HY3, pp. 745-752 (1968).
- 10) Anwar, H. O., "Prevention of Vortices at Intakes," *Water Power*, October, pp. 393-401 (1968).
- 11) Domm, U., Rosemann, P. and Siekmann, H., "Modelluntersuchung der Einlaufströmung einer groben Kuhlwasserpumpe," *Z. Flugwiss.*, 19, Heft 8/9, pp. 374-379 (1971).
- 12) Kondo, M. and Maru, S., "Submergence Requirements of Pumps in Rectangular Open Sumps," *Hitachi Hyoron*, Vol. 54, No. 6, pp. 511-515 (1972). (in Japanese)
- 13) Reddy, Y. R. and Pickford, J.A., "Vortices at Intakes in Conventional Sumps," *Water Power*, March, pp. 108-109 (1972).
- 14) Levi, E., "Experiments on Unstable Vortices," *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of ASCE*, Vol. 98, No. EM3, pp. 539-559 (1972).
- 15) Dagget, L. L., and Keulegan, G. H., "Similitude in Free-Surface Vortex Formation," *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of ASCE*, Vol. 100, No. HY11, pp. 1565-1581 (1974).
- 16) Baum, M.R., "Gas Entrainment at the Free Surface of a Liquid: Entrainment Inception at a Laminar Vortex," *Journal of British Nuclear Engineering System*, Vol. 13, pp. 203-209 (1974).
- 17) Baum, M. R. and Cook, M. E., "Gas Entrainment at the Free Surface of a Liquid: Entrainment Inception at a Vortex with an Unstable Gas Core," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 32, pp 239-245 (1975).
- 18) Anwar, H. O., Weller, J. A. and Amphlett, M. B., "Similarity of Free-Vortex at Horizontal Intakes," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 95-105 (1978).
- 19) Jain, A. K., Ranga Raju, K. G. and Garde, R. J., "Vortex Formation at Pipe Intakes," *Journal of the Hydraulic Division, Proc. of ASCE*, Vol. 104, No. HY10, pp. 1429-1445 (1978).
- 20) Hecker, G. E., "Model/Prototype Comparison of Free Surface Vortices," *Journal of the Hydraulic Division, Proc. of ASCE*, Vol. 107, No. HY10, pp. 1243-1259 (1981).
- 21) Farrell, C. and Cuomo, A. R., "Characteristics and Modeling of Intake Vortices," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 5, pp. 723-742 (1984).
- 22) Padmanabhan, M. and Hecker, G. E., "Scale Effect in Pump Sump Models," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 11, pp. 1540-1556 (1984).
- 23) Odgaard, A. J., "Free Surface Air Core Vortex," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.112, No.7, pp. 610-620 (1986).
- 24) Gulliver, J. S. and Rindels, A. J., "Weak Vortices at Vertical Intakes," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 9, pp. 1101-1116 (1987).
- 25) Takahashi, M., Inoue, A. and Aritomi, M., "Gas Entrainment at Free Surface of Liquid ( I )," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 131-142 (1988).
- 26) Takahashi, M., Inoue, A. and Aritomi, M., "Gas Entrainment at Free Surface of Liquid ( II )" *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 245-253 (1988).
- 27) Hite Jr., J. E. and Mih, W. C., "Verocity of Air-Core Vortics at Hydraulic Intakes," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 3, pp. 284-297 (1994).
- 28) Yildirim, N. and Kocabas, F., "Critical Submergence for Intakes in Open Channel Flow," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 12, pp. 900-905 (1995).
- 29) Yildirim, N. and Kocabas, F., "Critical Submergence for Intakes in Still-Water Reservoir," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 1, pp.103-104 (1998).
- 30) Werth, D. and Frizzell, C., "Minimum Pump Submergence to Prevent Surface Vortex Formation," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 142-144 (2009).
- 31) Fujita, K. and Oya, K., "Suction Water Tank of the Pump," *Hitachi Hyoron*, Vol. 45, Suppl., pp. 41-46 (1962). (in Japanese)
- 32) Kyogoku, T., "Suction Sump of Diagonal Pump with Vertical Axis – Part 2," *Pump Kougaku*, Vol. 1, No. 3, pp. 160-165 (1965). (in Japanese)
- 33) Kitamura, N. and Kida, K., "Problems in Planning of Pump Suction Sump," *Journal of JSME*, Vol. 74, No. 630, pp.



- 814-820 (1971). (in Japanese)
- 34) Isohata, E., Morigaki, S., Munemi, S. and Sawada, K., "Problems and Their Solutions in Designing a Pump Intake," *Mitsubishi-Ju-Ko Giho*, Vol. 12, No. 1, pp. 33-40 (1975). (in Japanese)
- 35) Tagomori, M., "Flow Patterns and Airentaining Vortices in Suction Sumps (the Effects of Bell-Mouth Diameter and Sump's Dimensions)," *Turbo Kikai*, Vol. 7, No. 8, pp. 451-460 (1957). (in Japanese)
- 36) Kubota, N., "Influence of Sump Profile on Mixed Flow Pump Characteristics (Concerning Characteristics at Partial Capacities)," *Dengyosha Kikai*, Vol. 2, No. 2, pp. 30-35 (1978). (in Japanese)
- 37) Shinhama, H., Tsunoda, T. and Yamamoto, Y., "An Experimental Study of Open Channel Pump Sumps," *Kubota Technical Report*, No. 15, pp. 1-7 (1983)
- 38) Okamoto, H., Kamemoto, K. and Nakaguchi, I., "Intermittence of the AiRentraining Vortex and the Submerged Vortex in a Suction Sump," *Trans. of JSME (Series B)*, Vol. 57, No. 536, pp. 1210-1213 (1991). (in Japanese)
- 39) Tagomori, M. and Ueda, H., "An Experimental Study on Submerged Vortices and Flow Pattern in the Pump Sump," *Trans. of JSME (Series B)*, Vol. 57, No. 543, pp. 3641-3646 (1991). (in Japanese)
- 40) Arboleda, G. and El-Fadel, M., "Effects of Approach Flow Conditions on Pump Sump Design," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 9, pp. 489-494 (1996).
- 41) Costantinescu, G. S. and Patel, V. C., "Numerical Model for Simulation of Pump-Intake Flow and Vortices," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 2, pp. 123-134 (1998).
- 42) Funaki, J., Neya, M., Hattori, M., Tanigawa, H. and Hirata, K., "Flow Measurements in a Suction Sump by UVP," *Journal of Fluid Science and Technology, JSME*, Vol. 3, No. 1, pp. 68-79 (2008).
- 43) Hirata, K., Saito, K., Hattori, M., Nakatani, Y. and Funaki, J., "Occurrence-Time-Ratio Measurements on Airentainment in a Suction Sump," *Journal of Fluid Science and Technology, JSME*, Vol. 4, No. 1, pp. 47-61 (2009).
- 44) Prosser, M. J., *The Hydraulic Design of Pump Sumps and Intakes*, BHRA, Canfield, Bedford, UK (1977).
- 45) Toyokura, T. et al., "Standard Method for Model Testing the Performance of a Pump Sump," JSME Standard JSME S 004, Tokyo, Japan (1984).
- 46) Claxton, J. et al., *American National Standard for Pump Intake Design (the 1988 HI Standard)*, ANSI/HI 9.8-1998,

Hydraulic Institute, Parsippany, New Jersey, USA (1998).

### 主な記号

$B$	:吸込管幅	[m]
$Bo$	:ボンド数	$(= \rho g D^2 / \sigma)$
$D$	:吸込管の外径	[m]
$d$	:吸込管の内径	[m]
$Fr$	:フルード数	$(= V_i / (gD)^{0.5})$
$g$	:重力加速度	$[m/s^2]$
$H$	:水位	[m]
$Q$	:流量	$[m^3/s]$
$Re$	:レイノルズ数	$(= V_i D / \nu)$
$S$	:没水深さ	[m]
$S_c$	:臨界没界深さ	[m]
$V_i$	:吸込管入口の流速	[m/s]
$We$	:ウェーバー数	$(= V_i (\rho D / \sigma)^{0.5})$
$X$	:背面間隙	[m]
$Z$	:底面間隙	[m]
$\nu$	:動粘度	$[m^2/s]$
$\rho$	:粘度	$[1/m^3]$
$\sigma$	:表面張力	[N/m]