

吸込水槽内に発生する空気吸込渦の 臨界没水深さについて

平田勝哉¹・舟木治郎²・中島宣武³

¹工博 同志社大学教授 工学部機械系教室（〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3）

E-mail:khirata@doshisha.ac.jp

²工博 同志社大学助教授 工学部機械系教室（〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3）

³工修 同志社大学大学院（〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3）

ポンプ吸込水槽の設計が不適当であると吸込管内部に空気塊が存在することがあり、それは振動、騒音、さらには揚水不能という事態をもたらす。本研究では、空気吸込渦に関係した臨界没水深さ S_c に着目して系統的な実験が行われている。すなわち、フルード数 Fr 、および、レイノルズ数 Re 、吸込水槽の各種形状寸法（背面間隙 λ 、吸込水槽幅 B 、底面間隙 λ_2 ）の影響が調べられている。ここで、代表長さと代表速度としては、吸込管外径 D と吸込管入口流速が採用されている。その結果、あるパラメーター範囲では、 Re 効果や Z/D 効果が無視できることが示されている。また、ほとんどの形状効果は、局所最大流速を考慮した実質的フルード数を考えることで、 Fr 効果に基づく解釈が可能である。

Key Words : suction sump, open sump, two-phase flow, multi-phase flow, vortices

1. はしがき

ポンプ吸込水槽では、水槽の形状や主水源からの流入形態、ポンプの運転状態が不適当であると、水だけでなく空気も吸水管内に存在する状況がしばしば発生し、ポンプの性能に大きな影響を与える。すなわち、吸込管内部へ至る空気塊の存在は、揚水能力の低下と、振動や騒音の増加などをもたらす。よって、吸込管内部に空気塊を存在しにくくすることが、ポンプ吸込水槽を設計するときの重要な条件になる。なお、この問題は、力学的観点からは土木の水理分野で古くから数多く研究されてきた密度成層流体の選択取水問題を単純化したものに当たり、発電用冷却水取水や、河口／貯水池の水質制御などの環境問題への貢献も期待できる。

これまでの報告（たとえば、文献 1）によると、実際の吸込水槽内で吸込管内部へ至る空気塊が生じるときの形態としては、三種類のものが知られている。三者とも水の旋回運動を伴っているために、それらの形態は、それぞれ、「同心渦」および「空気吸込渦」、「水中渦」に関係した水槽内空気塊の存在形態と呼ばれている。

同心渦は、吸込管入口が水表面のごく近くにある

ときに現れる空気吸込現象を特徴づける水の旋回運動をいう。その旋回運動中心と吸込管中心軸はほぼ一致している。同心渦に関係した空気吸込現象では、吸込管入口のほぼ全周からしばしば多量の空気が大気より吸い込まれる。

空気吸込渦に関係した水槽内空気塊と、水中渦に関係した水槽内空気塊とは、幾何学的には、よく似ている。両者とも、空気塊形状は糸状であって、その空洞部を中心にして水が旋回運動しているようである。両者ともに、糸状空気塊の一端は、吸込管入口に至る。前者では糸状空気塊の他の一端が水表面に至っており、後者では水槽壁面に至っており、この点が両者の違いである。

一方、上のような幾何学的類似性とは対照的に、空気吸込渦に関係して観察される水槽内空気塊は大気に連結しているが、水中渦の空気塊は大気に直接連結していない。言い換えると、同心渦と空気吸込渦とに関係した水槽内空気塊では、自由表面境界が水表面から吸込管入口に連続接続しており、大気中の空気が直接吸い込まれている。力学的観点からは、同心渦と空気吸込渦とに関する水槽内空気塊は、水中渦に関するそれよりも、水表面の動的挙動に対してより敏感であると思われる。よって、空気吸込渦

に関する水槽内空気塊と、水中渦に関する水槽内空気塊とでは、その発生機構や支配パラメーターがかなり異なると予想される。

文献 1)を参考にすると、空気吸込渦に関する空気吸込現象は、吸込管入口水深（没水深さ）の減少とともに、次のように段階（1）から段階（4）へと発達して空気を多量に吸込む形態へと移行していく。最終段階（4）では、同心渦に関する空気吸込現象が現れる。

段階（1）くぼみ渦の発生：水表面にくぼみが現れる。くぼみを中心にして水の旋回運動が観察されるので‘くぼみ渦’とも呼ばれる。空気は吸込管入口に至らず、よって、空気の吸い込みもない。

段階（2）空気吸込の発生：くぼみ渦の中心部がさらに深くなり、自由表面から吸込管までの間で糸状空気塊（ある瞬間は途切れのない、ある瞬間は途中で途切れた）が形成される。限られたある瞬間のみ途切れのない糸状空気塊が形成され空気吸込みを起こす。

段階（3）空気吸込の発達：あるまとまった期間の間中（全ての瞬間というわけではない）、自由表面から吸込管までの間で途切れのない糸状空気塊が形成され、空気が吸込まれる。

段階（4）同心渦に関する空気吸込。

一般に、ポンプ性能に影響を及ぼすのは、水面のくぼみが水中下さらに深くまで達し、ある程度の量の空気吸込みが観察できる段階（3）以降であり、ポンプ効率は致命的に低下する。更に実務的な観点からは、段階（4）に至る前に段階（3）が現れるので、段階（3）の出現予測の重要性が理解されよう。

実務的に段階（3）の始まりが重要である一方で、段階（2）と段階（3）の間の境界にはある曖昧さが存在することは、定義上明白である。更に、曖昧さは、岡本ら²⁾の研究によると、段階（1）と段階（2）の境界にも見られるようである。すなわち、空気吸込が起こらない設計基準下でも空気吸込現象が観察されており、その境界は確率論に基づく考察を必要とするようである。

臨界没水深さ S_c は、空気吸込現象の重要な指標の一つであるが、空気吸込現象の分類法の混乱のため、その定義にも幅があるようである（例えば、文献 1), 3), 4) を参照）。ちなみに、 S_c の定義としては、段階（1）と段階（2）間の境界、すなわち、わずかな瞬間であっても空気吸込みが観察できるかどうかとすることが多いようであるが、いずれにしても、前段落の分類の曖昧さの影響を受けているの

で、その定義には注意が必要である。

本研究では水槽内空気塊の中でも特に、空気吸込渦に関するものに的を絞って実験を行う。すなわち、臨界没水深さ S_c （その定義は次の章でしめす）に対する、フルード数 Fr 、および、レイノルズ数 Re 、形状（吸込管径 D 、背面間隙 X 、水槽幅 B 、底面間隙 Z ）の影響を系統的に明らかにする。

一般に、水表面の力学に關係した現象では、フルード数 Fr が重要な支配パラメーターになる。空気吸込渦に関する空気吸込現象でも、その発生と成長の過程は先に述べたように吸込管付近に生じるくぼみ渦が発達して空気を吸込むようになることからも、 Fr が S_c に大きな影響を及ぼすと期待できる。しかし、 Fr のほかにも、 S_c に影響を及ぼすと考えられる力学相似パラメーターは挙げることができる。空気吸込渦に係わる空気吸込現象に関して、第一に考慮する必要があるのは流体（水）の粘性すなわちレイノルズ数 Re であって、実際の問題において S_c への Fr と Re との影響はともに無視できないとみなすのがごく自然である。

実際、これまでの研究でも Fr だけを唯一の力学相似パラメーターと仮定したのでは満足な結果が得られないで、 Fr にかわる別の経験的なしかも有次元の支配量の提案が行われてきた（たとえば、文献 1) を参照）。一方で、 Fr と Re との影響を同時に厳密に評価した研究は、著者らが知る限り存在しない。研究例が見あたらない理由としては、（1）水槽内空気塊の分類（水中渦に関するものか、空気吸込渦に関するものかなど）が充分行われる以前だったこと、（2）実機への応用の必要性が優先したことなどが考えられる。いずれにしても、もし系統的研究の基礎を欠けば、貴重な実機データーの解釈がしばしば場当たり的になることも事実である。

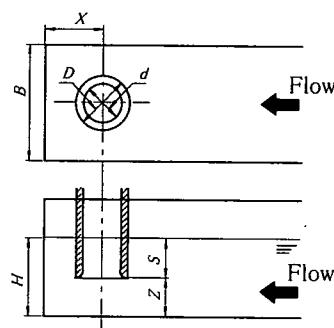


図-1 吸込水槽と吸込管。D、吸込管の外径；d、吸込管の内径；S、吸込管の没水深さ；H、水深；X、背面間隙；B、吸込水槽幅；Z、底面間隙。

形状パラメーター X/D , B/D , Z/D の S_c/D との関係については数々の報告がなされている。例えば、近藤と丸³⁾や五十嵐ら⁴⁾、田籠⁵⁾、窪田⁶⁾の研究に、 S_c に対するポンプ吸込水槽の形状パラメーターの影響についての報告が見られる。しかし、形状パラメーターに関する現在までの報告においても、実機への応用の必要性が優先されたためか、重力加速度や流体粘性の影響の厳密な評価を欠き、その結果の解釈には一貫した態度を貫きにくい。

2. 実験方法

(1) 吸込水槽と吸込管

吸込水槽と吸込管の形状を図-1に示す。 B は吸込水槽の幅、 H は吸込水槽の水深、 D は吸込管の外径、 d は吸込管の内径（0.9D程度）、 S は吸込管の没水深さ、 Z は底面間隙（吸込管入口から吸込水槽底壁までの距離）、 X は背面間隙（吸込管中心軸から吸込水槽後壁までの距離）である。吸込管入口は、吸込水槽の中心軸上に設置されている。

吸込水槽は、透明アクリル製で、長さ 2m、高さ 0.4m であり、幅 B は最大 0.5m まで拡張可能である。また、吸込管外径（0.014–0.048m）は、透明アクリル製で、内側を削ってベルマウス型に加工している。

フルード数 Fr とレイノルズ数 Re は、それぞれ以下のように定義する。

$$Fr = V_b / (g D)^{0.5}, \quad (1)$$

$$Re = V_b D / \nu. \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 ν は動粘度である。 V_b は吸込管入口流速であり、以下のように定義する。

$$V_b = 4 Q / (\pi D^2). \quad (3)$$

ここで、 Q は、吸込流量である。なお、主要な実験パラメーターの値は、表-1 にしめす。参考のため、表-2 には、 $Fr=1.9$ で実験時の模型実寸法と V_b , Re をしめす。表-3 には、吸込管外径 D の具体的な値を明示する。

また、代表速度として、 V_b の代わりに、水槽平均流速 V_s を考えると、

$$V_s = Q / (B H) \quad (4)$$

であり、フルード数 $Fr(V_s)$ とレイノルズ数 $Re(V_s)$ は、

$$Fr(V_s) = V_s / (g D)^{0.5}, \quad (5)$$

$$Re(V_s) = V_s D / \nu \quad (6)$$

と、それぞれ定義できる。ちなみに、

$$V_s = \pi V_b / \{4 B/D (S/D + Z/D)\}$$

であり、本研究では V_b は 0.04–0.4m/s の値をとり、 V_b に比べて一桁程度小さくなる。

(2) 実験装置

図-2 は、実験装置の概略を示している。ポンプ B (図中、②) によって、貯水槽から吸込水槽 (図中、⑨) へ、流体 (水) が供給される。供給量をバルブで調節することにより、水槽の水位を希望の一一定値に保持できる。吸込水槽内の上流では、整流装置 (図中、⑩) により流れを均一にする。整流装置としては、二枚の金網 (線径 0.001m, メッシュ間隔 0.001m) ではさんだ不織布を、水槽後壁から 0.84m 上流に設置している。さらに、吸込管 (図中、⑧) からの流体はバンド型ジェットポンプ (図中、⑦) により三角堰 (図中、⑪) を経て、貯水槽に至る。以上が、システムの概要である。

バンド型ジェットポンプは、貯水槽からポンプ A (図中、①) を経て加圧送水されるノズル (図中、⑥) からの噴流を、一次流れ (駆動源) として、駆動する。ジェットポンプ内では、一次流れとの運動量交換によって、二次流れが駆動される。二次流れを構成するものは、吸込管から吸込まれた吸込水槽の水である。一次流れと二次流れとは、ジェットポンプの下流で、混合流れとなつて三角堰へと流れる。一次流れの流量は電磁流量計 (図中、③) により、混合流れの流量は三角堰により、計測し、従つて、吸込 (体積) 流量 Q は混合流れと一次流れとの流量差として求まる。ここに、三角堰は、JIS B 8302 に基づく 60 度のものを、検定の上、用いていく。吸込流量 Q は、一次流体と二次流体の混合管に設けたバルブによって調整し、本実験では一次流量の能動的制御は行っていない。ちなみに、ポンプ A は、ウエスコポンプで、電動機の出力と回転数はそれぞれ 7.5kW と 3510rpm、吐出流量は $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、定格揚程は 200m である。

表-1 実験パラメーター.

B/D	1.43 - 5.60
X/D	0.79 - 3.21
Z/D	0.26 - 3.21
H/D	0.53 - 6.05
Fr	0.98 - 6.1
Re	9.8×10^3 - 6.6×10^4

表-2 $Fr=1.9$ の実験での実寸法(mm).

B	33 - 100
X	20 - 60
Z	7 - 20
D	14 - 43
V_b (m/s)	0.69 - 1.20
Re	1.0×10^4 - 5.2×10^4

表-3 吸込管外径 D の実寸法(mm).

D	14, 19, 24, 28, 29, 30, 34, 35, 38, 43, 48
-----	--

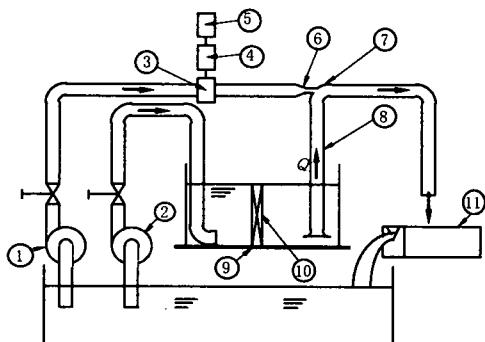


図-2 実験装置の概要. 1, ターボポンプA; 2, ターボポンプB; 3, 電磁流量計; 4, 変換器; 5, デジタルマルチメーター; 6, ノズル; 7, ベンド型ジェットポンプ; 8, 吸込管; 9, 吸込水槽; 10, フィルター; 11, 三角堰.

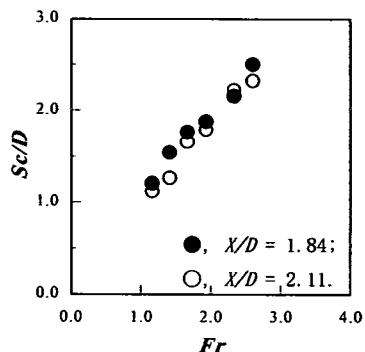


図-3 臨界没水深さ S_c へのフルード数 Fr の効果.
 $B/D = 3.57$, $Z/D = 0.71$ かつ $Re = 3.8 \times 10^4$.

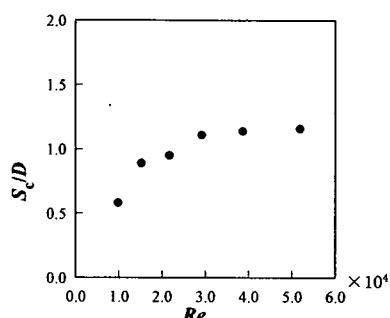


図-4 臨界没水深さ S_c へのレイノルズ数 Re の効果.
 $X/D = 2.14$, $B/D = 3.57$, $Z/D = 0.71$ かつ $Fr = 1.9$.

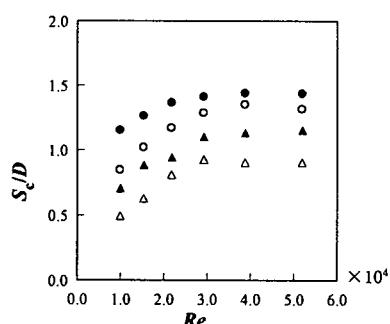


図-5 臨界没水深さ S_c へのレイノルズ数 Re の効果.
 $Z/D = 0.71$ かつ $Fr = 1.9$.

- , $X/D = 2.14$ かつ $B/D = 1.43$;
- , $X/D = 2.14$ かつ $B/D = 2.50$;
- ▲, $X/D = 2.14$ かつ $B/D = 3.57$;
- △, $X/D = 1.43$ かつ $B/D = 3.57$.

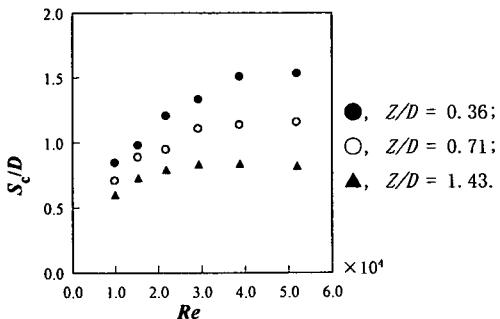


図-6 臨界没水深さ S_c へのレイノルズ数 Re の効果.
 $X/D = 2.14, B/D = 3.57$ かつ $Fr = 1.9$.

(3) 臨界没水深さ S_c

前章で述べたとおり、臨界没水深さ S_c の定義は、現象の性質に由来する定義の曖昧さのため、研究者により厳密には異なる。本研究で、著者らは S_c を次のように定義する。この定義は、理論的根拠は欠くが、観察者にとってより客観的判断が容易であったとのと、今回実験した多くの場合について 2~3 回の予備実験を行い再現性が良好であったために、採用した。(実際、サンプリングタイムを以下に明記した値よりも長くしても、その結果は、今回示した結果とほとんど変わらず、結論には影響を与えないことを確認した。) そして、空気吸込の程度を示す指標としては、この定義は適当なもの一つであると思われる。

S_c の計測手順は、以下の通りである。最初に、没水深さ S を充分大きく取り、空気吸込みが無い流れを作る。次に、 S を段階的に(0.005m 刻みで)ゆっくりと小さくしていく。このとき、各段階につき 5 分間(すなわち、無次元時間 $t V_s / D \approx 850$)、目視により観察を行う。くぼみ渦の先端が吸込管入口に到達して連続空気塊の形成が、初めて観察されるようになったときの S の値を S_c とする。ここで、連続空気塊の意味は、空気塊が水表面から吸込管入口まで空間的に途切れないことであって、吸込管内部への空気吸込が実際に起こっているかどうかとは直接関係がない。ここで注意すると、 S が S_c よりも小さな場合であっても、観察期間(5 分)内に、ある瞬間に連続空気塊が存在するものの、別の瞬間は空間的に途切れた空気塊が存在したり、くぼみ渦が存在したり、それらのいずれも観察されないことがあります。

3. 結果と考察

今、臨界没水深さ S_c に影響を与える物理量として、代表速度、吸込管外径 D 、背面間隙 X 、水槽幅 B 、底面間隙 Z 、重力加速度 g 、流体密度 ρ 、流体粘度 μ を挙げるならば、次元解析により、

$$S_c/D = \phi(Fr, Re, X/D, B/D, Z/D) \quad (7)$$

を得る。ここで、 ϕ は任意関数である。また、代表速度としては V_s を、代表長さとしては D を考えている。本研究では、式(7)に基づき、 S_c/D への $Fr, Re, X/D, B/D, Z/D$ による影響を、それぞれ明らかにする。

ところで、田籠⁵⁾は水路内平均流速 V_s も空気吸込渦の発生に重要な因子であると報告しているけれども、吸込管近傍の流れ場の重要性や非常に広い吸込水槽の場合を考えて、著者らは V_s の方が第一位に重要であって代表流速にはよりふさわしいと判断した。すなわち、上流からの水路内流れがより重要ななる狭いパラメーター範囲を除くと、 V_s の代わりに V_b を、代表速度とした方が、より広い範囲でデーターをうまくまとめられると著者らは考えている。

(1) 力学相似パラメーターの影響

ここでは、 S_c/D に影響を及ぼす Fr, Re 、三つの形状パラメーター($X/D, B/D, Z/D$)のうち、 Fr や Re の影響力について考える。すなわち、三つの形状パラメーターは一定に保ったまま、 Fr あるいは Re のどちらか一方を固定して、それぞれの影響について調べる。

図-3 は、 Re と三つの形状パラメーターを一定に保った条件下での、 Fr の S_c への影響を示す。 Fr の増加につれ S_c もほぼ線形的に増加しており、かつ、その傾きもかなり大きい。前者は、 Fr が大きいほど、空気吸込渦に関係した空気吸込が発生しやすくなることを、後者は、 Fr が重要な支配パラメーターの一つであることを、それぞれ示している。前者に関しては、 Fr^2 が慣性力と重力(～復元力)との比を代表すること、すなわち、流れによる(重力)波の起り易さの目安であることを考えると当然である。後者に関しては、空気吸込渦に関する空気吸込現象が、水表面の力学に深く関係していることを、あらためて確認することができる。(ここで、図-3 が 2 次曲線にはあまりよくフィットしていないことから、 D の代わりに S_c を代表長さとする別のフルード数を用いても、現象をうまくまとめられないであ

らうことも伺えよう。ただし、吸込水槽内流速が極めて小さいときは、密度二成層水域からの選択取水⁷⁾の類推から、 S_c を代表長さとすることはより適当な選択になると思われる。) まとめると、 Fr は、空気吸込渦による空気吸込現象を理解する上で基本となる支配パラメーターと言えそうである。

一方、図-4 は、 Fr と三つの形状パラメーターを一定に保った条件下での、 Re の S_c への影響を示す。興味深い点は、 $Re > 3 \times 10^4$ では、 S_c は Re に依らずほぼ一定値となることである。すなわち、 Re がある程度大きいとき、 S_c は Re の影響を受けない。

Re 効果を無視してよい範囲が特定できれば、模型実験の精度向上に寄与大である。しかし、この Re の範囲は、一般に、 Fr および形状パラメーター(X/D , B/D , Z/D)に依存するので、全てを調べ尽くすことは難しい。図-5 と図-6 には、支配パラメーター Fr , X/D , B/D , Z/D のいくつかの組み合わせでの、 Re の S_c への影響を示す。やはり、 Re がある敷居値より大きくなると、 S_c は Re に依らずほぼ一定値となる。ただし、その敷居値は支配パラメーターに若干依存していることも事実である。詳しく述べると、 Z/D が小さくなるほど、 Re 変化が S_c へ影響を及ぼしやすくなる。他の形状パラメーター X/D , B/D については、明白な傾向が読みとれない。また、 Fr については、今回は調べていない。

まとめると、実験した場合は限られているけれども、楽天的期待としては、その敷居値は Fr , X/D , B/D , Z/D にある程度は依存するものの、 Re がある敷居値(約 3×10^4 程度)より大きいとき Re 依存性は無視してよくなると思われる。結局、式(7)は、以下のように近似することができそうである。

$$S_c/D = \phi_1(Fr, X/D, B/D, Z/D). \quad (8)$$

ただし、 $Re > 3 \times 10^4$ 。ここに、 ϕ_1 は任意関数である。

なお、この結果は、たとえ代表速度を V_s の代わりに V_b を用いたとしても、変わらない。なぜならば、

$$V_b = 4 V_s B/D (Z/D + S/D) / \pi. \quad (9)$$

より、

$$Fr(V_s) = \pi Fr / (4 B/D (Z/D + S/D)), \quad (10)$$

$$Re(V_s) = \pi Re / (4 B/D (Z/D + S/D)) \quad (11)$$

を得る。 S/D を S_c/D に置き換えて、一定とすれば、固定した $Fr(V_s)$ のもとでの $Re(V_s)$ の変化に依存しない S_c/D の存在を確認できる。

また、図-3-図-6において、 Fr あるいは Re のどちらか一方だけが異なるデータは唯一の曲線にほぼ沿っている。従って、力学相似パラメーターとして Fr と Re の2つだけを考えたとしても、ほぼ充分な妥当性を持ちそうである。ちなみに、本研究では、ウェーバー数 $We = 10-30$ 、ボンド数 $Bo = 26-310$ 程度であって、模型は小さいが、表面張力の影響は、まだ充分に小さいことが予想できる。

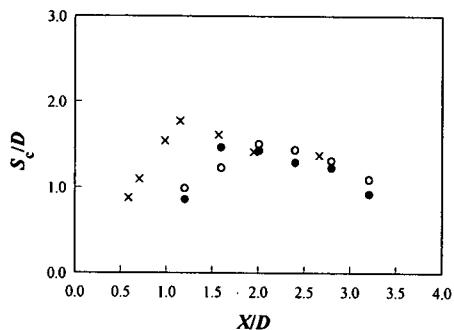


図-7 臨界没水深さ S_c への背面間隙 X の効果。

$Z/D = 0.71$ かつ $Fr = 1.2$.
 ●, $B/D = 2.80$ ($Re = 3.0 \times 10^4$);
 ○, $B/D = 3.20$ ($Re = 3.0 \times 10^4$);
 ×, $B/D = 2.3$, $Z/D = 0.58$ かつ $Fr = 0.68$
 ($Re = 1.0 \times 10^5$) (田籠 1976).

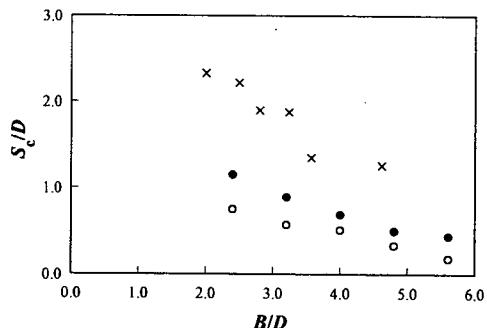


図-8 臨界没水深さ S_c への水槽幅 B の効果。

$Z/D = 0.71$ かつ $Fr = 1.2$.
 ●, $X/D = 1.20$ ($Re = 3.0 \times 10^4$);
 ○, $X/D = 2.00$ ($Re = 3.0 \times 10^4$);
 ×, $X/D = 0.70$, $Z/D = 0.50$ かつ $Fr = 1.7$
 (Dicmas 1967).

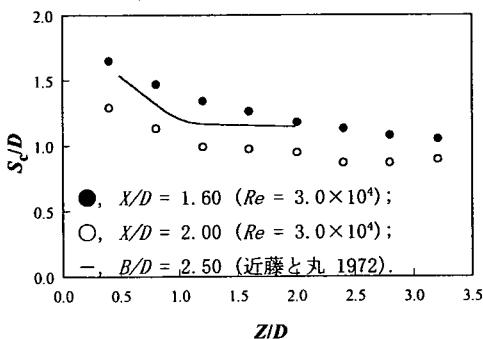


図-9 臨界没水深さ S_c への底面間隙 Z の効果. $B/D = 3.20$ かつ $Fr = 1.2$.

(2) 形状パラメーターの影響

ここでは、形状パラメーターの影響力について考える。すなわち、 Fr 、 Re および三つの形状パラメーター X/D 、 B/D 、 Z/D のうちの二つは一定に保って、一つの形状パラメーターの影響についてそれぞれ調べた結果を、図-7-図-9 に示す。

図-7 は、 Fr と Re 、 B/D 、 Z/D を一定に保った条件下での、 X/D の S_c への影響を示す。 X/D を零から増やしていくとき、 S_c/D は最初に増加し、 $X/D \approx 2$ で最大値に達した後、減少する。図には、田籠⁵⁾の結果も同時に示しているが、 X/D 変化につれて S_c/D が極大値をとる傾向は一致している。なお、この傾向は、水槽の形状は若干異なるが、五十畠ら⁴⁾にも、現れている。実務的な観点からポンプの設計に関しては、 S_c/D は小さい方が好ましいので、極大値の近くは避けた方がよいが、 X/D が小さすぎるとポンプ効率が悪くなる。

前節での Fr と S_c/D との関係に基づくならば、 X/D が小さいときの X/D 増加とともに S_c/D の増加傾向は、解釈が容易である。すなわち、 X/D がより大きい方が、下流側水槽壁の存在の影響を受けにくくなり、吸込管入口近くでの流速はより大きくなりがちであろう。このことは、実質的 Fr が大きくなることを意味しているので、 S_c/D が大きくなることは矛盾しない。

しかし、 X/D が大きくなるにつれて、 S_c/D 方が単調増加しある値に漸近するわけではない。実際は、 S_c/D は前述のように極大値を示す。極大値をとる原因は、田籠⁵⁾によると、吸込管後流と吸込水槽壁に沿って吸込管下流に回り込む流れとの干渉であって、彼は更に、干渉の程度を X/B に関して分類することを提案している。すなわち、 $X/B < 0.5$ 、 $0.5 \leq$

$X/B \leq 0.8$ 、 $0.8 < X/B$ の三分類である。著者らの結果においても、 $B/D = 2.80$ と 3.20 での S_c/D のピークは、それぞれ、 $X/B = 0.57$ ($X/D = 1.59$) と 0.63 ($X/D = 2.01$) であり、彼の分類に合致している。しかし一方で、 X/B の代わりに X/D を分類の指標に用いることも、悪くなさそうである。図-10 と図-11 とには、その比較を行っている。 S_c/D を支配するパラメーターとして X/B を用いるとよいというのが田籠の提案であるので、式(8) は次の式で置き換えられる。

$$S_c/D = \phi_2 (Fr, X/B, B/D, Z/D). \quad (12)$$

ここに、 ϕ_2 は任意関数である。図-10 には、彼の提案に従って、 X/B に対する S_c/D の変化をまとめている。図には、田籠⁵⁾の実験結果も一緒に示している。 S_c/D の極大値は、おむね $X/B = 0.5 - 0.7$ の範囲にあるが、 S_c/D が極大値となる X/B の値は、ばらついている。一方、図-11 には、従来の式(8)に基づいて、 X/D に対する S_c/D の変化をまとめている。図-10 と比較すると、 S_c/D がピークを示す X/D のばらつきはずっと小さい。従って、 S_c/D の支配パラメーターとしては X/B よりも X/D の方が適当なようである。

図-8 は、 Fr と Re 、 X/D 、 Z/D を一定に保った条件下での、 B/D の S_c への影響を示す。 B/D を増やしていくとき、 S_c/D は単調に減少する。図には、Dicmas³⁾の結果も同時に示しているが、 B/D につれて単調減少する傾向は一致している。また、田籠⁵⁾による、水槽幅を大きくすると臨界没水深さが小さくなる傾向にあるとの報告にも、矛盾しない。

B/D にともなう S_c/D の減少傾向も、前節での Fr と S_c/D との関係に基づく解釈が可能である。すなわち、 B/D がより大きい方が、水槽内の近寄り流速は閉塞率が低下するので小さくなりがちである。このことは、実質的 Fr が小さくなることを意味しているので、 S_c/D も小さくなる。

一方、五十畠ら⁴⁾によると、 B/D をさらに増やしていくとき、 S_c/D は逆に増加し、よって S_c/D は極小値をもつ。 S_c/D の極小値の存在は今回観測されなかったのだけれども、次のような理由で著者らは X/D が小さいときに極小値が現れやすいと考えている。

この予想も、前節での Fr と S_c/D との関係に関する解釈に基づいている。すなわち、もしも X/D が小さいときには、吸込水槽下流側の壁に沿う流速は B/D が大きい方がより大きくなりがちであろう。こ

のことは、実質的 Fr が大きくなることを意味しているので、 S_c/D も大きくなる。

図-9 は、 Fr と Re , X/D , B/D を一定に保った条件下での、 Z/D の S_c への影響を示す。 Z/D を零から増やしていくとき、最初、 S_c/D は単調に減少する。さらに Z/D が約 2.5 程度以上のとき、 S_c/D は一定値を採り、 Z/D に依存しなくなる。(ただし、一定値の値自体は Fr や形状パラメーター B/D , X/D により、若干異なる。) 図には、近藤と丸³⁾の結果も同時に示している。彼らの結果は、 Z/D が約 1 程度以上のとき S_c/D は一定値をしめし、我々の結果と定量的に異なる。この違いは、彼らの報告に実験条件が詳しく明記されていないため、充分に考察できないが、少なくとも定性的にはよく一致している。また、田籠⁵⁾と窪田⁶⁾による、底面間隙を小さくするほど S_c が大きくなるとの報告とも一致している。

Z/D とともに S_c/D の減少傾向も、前節での Fr と S_c/D との関係に基づく解釈が可能である。すなわち、 Z/D がより大きい方が、吸込管入口への流れは水槽底壁の閉塞による加速の影響を受けにくくなる。このことは、実質的 Fr が小さくなることを意味しているので、 S_c/D も小さくなる。

図-9 の結果を用いると、式(8)を、更に以下のように近似することができる。

$$S_c/D = \phi_3 (Fr, X/D, B/D). \quad (13)$$

ただし、 $Z/D > 2.5$ 。ここに、 ϕ_3 は任意関数である。

4. まとめ

吸込水槽内に発生する空気吸込渦に関する空気塊について実験を行った。臨界没水深さ S_c に注目して、系統的な調査を実施した。

最初、 S_c と支配パラメーターとの関係について、

$$S_c/D = \phi (Fr, Re, X/D, B/D, Z/D)$$

と仮定したが、

$$S_c/D = \phi (Fr, X/D, B/D, Z/D)$$

との近似が可能である。ただし、 $Re > 3 \times 10^4$ 、更に、

$$S_c/D = \phi (Fr, X/D, B/D)$$

との近似も可能である。ただし、 $Z/D > 2.5$ 。

あらかたの形状パラメーター依存性は、 Fr と S_c/D との関係に基づいて解釈が可能である。すなわち、局所的最大流速に基づく実質的 Fr を考えればよい。例外として、 X/D 変化に伴い S_c/D が極大を示す現象が挙げられる。この現象に、先の解釈を単純に適用することは難しそうであって、流れ場の詳細な検討が必要であろう。この現象は、形状パラメーターの他に、 Fr にも影響を受けやすのではないかと思われる。

謝辞：本論をまとめるにあたり同志社大学大学院久保田義啓君の援助に感謝する。

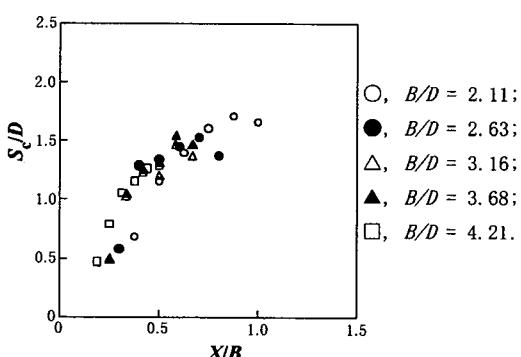


図-10 X/B 対する S_c の変化。 $Z/D = 0.53$ かつ $Fr = 2.1$ ($Re = 4.9 \times 10^4$)。

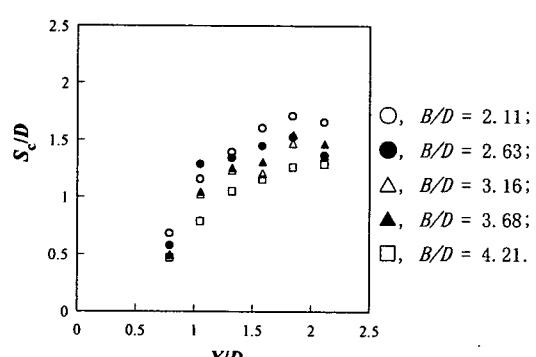


図-11 X/D 対する S_c の変化。 $Z/D = 0.53$ かつ $Fr = 2.1$ ($Re = 4.9 \times 10^4$)。

参考文献

- 1) 豊倉富太郎ほか：日本機械学会基準ポンプの吸込水槽の模型試験法JSMES004, ポンプの吸込水槽の模型試験法検討分科会, 日本機械学会, pp. 1 - 35, 1984.
- 2) 岡本秀伸, 亀本喬司, 中口郁雄：吸込水槽に発生する空気吸込渦・水中渦の間欠性, 日本機械学会論文集(B編), Vol. 57, No. 536, pp. 1210 - 1213, 1991.
- 3) 近藤正道, 丸三郎：ポンプ吸込管の長方形水槽における最小没水深さ, 日立評論, Vol. 54, No. 6, pp. 511 - 515, 1972.
- 4) 五十畠悦郎, 森垣誠太郎, 宗実茂樹, 沢田一由：ポンプ取水槽設計上の問題点と対策, 三菱重工技報, Vol. 12, No. 1, pp. 33 - 40, 1975.
- 5) 田籠雅：吸込水槽内のフローパターンと空気吸込渦, ターボ機械, Vol. 7, No. 8, pp. 3 - 12, 1976.
- 6) 窪田直和：ポンプ吸込水槽の模型試験, ターボ機械, Vol. 9, No. 9, pp. 29 - 36, 1981.
- 7) 室田明ほか：水理公式集, 土木学会, pp. 358 - 362, 1985.
- 8) Dicmas, J. L.: Development of an Optimum Sump Design for Propeller and Mixed-Flow Pumps, ASME Paper 67-FE-26, 1967.

(2002. 05. 28 受付)

ON THE CRITICAL SUBMERGENCE FOR AIR-ENTRAINING VORTICES IN A SUCTION SUMP

Katsuya HIRATA, Jiro FUNAKI and Nobutake NAKAJIMA

Regarding air-entraining vortices in a suction sump, critical submergence S_c were specified concerning five parameters, such as the Froude number Fr , the Reynolds number Re , back clearance X , sump breadth B , and bottom clearance Z . Here, all parameters are non-dimensionalized by suction-pipe outer diameter D and Bell-mouth-entrance velocity. Consequently, the authors confirmed that Re effect is rather small, while Fr effect is large. X/D effect is also small. Most of X/D , B/D and Z/D effects can be explained on the basis of $Fr - S_c/D$ relation, except for the X/D effect by which S_c/D attains the maximum value.