

非定常流れ解析のポンプ吸込水槽設計への応用 - 渦法を用いた吸込水槽内流れ解析 -

独立行政法人土木研究所 ○正会員 山本 幸広
同 上 正会員 吉田 正

1. はじめに

建設費の低減や用地確保難の観点から、機場のコンパクト化が求められ、ポンプ吸込水槽についても、省スペースで高流速化が可能な水路形状の開発が強く望まれている。しかし、高流速化に伴って吸込水槽内部にて渦が発生し、振動・騒音の発生やポンプ性能の低下につながる事が考えられる。従来、こうした渦発生の確認および評価は、主に吸込水槽の模型試験により行われ、吸込水槽の設計が行われてきた。

一方、近年のCFD(数値流体力学)の進歩に伴い、CFDを利用した渦予測が利用されるようになってきた。現在、実用計算で用いられる汎用の流れ解析ツールの多くは、流れ場に計算格子を設けて解析する領域型の解法であり、RANSモデルが多く用いられている。領域型解析手法では、渦径に対して十分に解析格子の空間解像度を確保できず、また、定常解析では断続的な渦の発生・消滅といった非定常な渦の挙動を再現することが困難であることから、渦の発生を定量的に予測・評価することができず、模型試験前の予備的検討などに使われているのが実状である。

ここでは定量的な渦予測を行うための解析手法として、渦法⁽¹⁾に着目した。渦法は、微小渦の挙動を直接追従する解析手法であり、解析格子を必要としないため吸込水槽内における非定常な渦の挙動を予測する解析手法に適していると考えられる。本研究では、渦法を利用して、ポンプ吸込水槽の非定常流れ解析を行い、渦発生予測を定量的に行うための手法を試行し、その有効性を検討した。

2. 渦法の概要と基礎方程式

2-1 渦法の概要

渦法(Vortex method)は流れ場の連続的な渦度の分布を多数の微小渦要素によって離散的に表し、渦度輸送方程式を数値的に解いて各渦要素の渦度変化を時々刻々捉えながら流れに乗った渦要素の移動を追従することにより非定常解析するものである。

2-2 渦法の基礎方程式

非圧縮流れを対象とする渦法の基礎方程式はNabier-Stokes方程式の回転から得られる渦度輸送方程式および発散から得られる圧力ポアソン方程式からなっている。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \omega = (\omega \cdot \text{grad}) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \omega \quad (1)$$

$$\nabla^2 p = -\rho \cdot \text{div}(\mathbf{u} \cdot \text{grad} \mathbf{u}) \quad (2)$$

ここで $\mathbf{u}$ および ω ($\equiv \text{rot } \mathbf{u}$)は、それぞれ速度ベクトルおよび渦度ベクトルを表す。

渦度の定義式より任意の位置における速度は、次に示すBiot-Savartの式より得られる。

$$\mathbf{u} = \int_V \omega_0 \times \nabla_0 G dV + \int_S [(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_0) \cdot \nabla_0 G - (\mathbf{n} \times \mathbf{u}_0) \times \nabla_0 G] ds \quad (3)$$

ここに、添字'0'は位置 $\mathbf{r}_0$ における変数、微積分を表し、 $\mathbf{n}$ は $\mathbf{r}_0$ を含む境界面 S 上における法線方向ベクトルである。また G はスカラー・ラプラス方程式の基本解である。

圧力場は、式(2)より得られるベルヌーイ関数に関する積分方程式を解くことにより解析する。

$$\beta H + \int_S H \frac{\partial G}{\partial n} ds = - \left[\int_V \nabla G (\mathbf{n} \times \omega) dV + \int_S G \mathbf{n} \frac{d\mathbf{n}}{dt} ds + \nu \int_S \mathbf{n} (\nabla G \times \omega) ds \right] \quad (4)$$

ここに、 β は領域内で1であり、境界面上では1/2である。 H はベルヌーイ関数であり $H = p/\rho + |\mathbf{u}|^2/2$ で定義される。

3. 解析条件

3-1 水槽形状

解析を行った水槽形状は図1に示す様なオープン形およびセミクローズ形の2種類の形状である。これらは国土交通省において排水ポンプ設備の高流速化された吸込水槽の標準形状としてとりまとめられた⁽²⁾ものである。

また、表1に形状パラメータを示す。今回は、ポンプ口径 $D=1.5[\text{m}]$ 、ポンプ吐出量は $5.0, 15.0[\text{m}^3/\text{s}]$ の2通りで解析した。

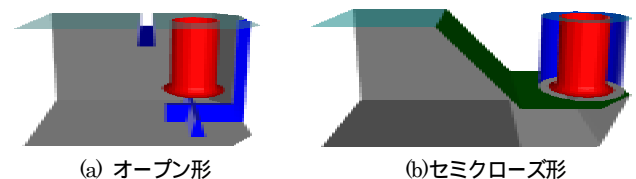


図1 解析吸込水槽形状

	オープン形	セミクローズ形
水路幅 W	2.7D (=4000mm)	
ボトム傾斜 C	0.75D (=1100mm)	
没水深さ S	1.5D (=2250mm)	
背面間隔 F	1.1D	0.85D
パネル要素数	3296	4042

表1 水槽形状パラメータ (D=ポンプ口径)

3-2 流入および流出条件

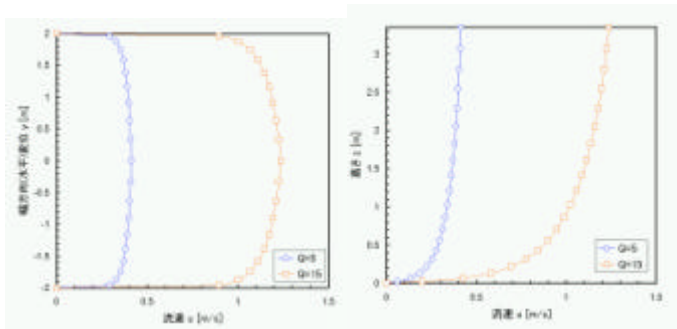
吸込水槽入口境界については、流入条件を一様流とすると壁

キーワード：CFD、数値解析、渦法、吸込水槽、排水機場、排水ポンプ

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 Tel 029-879-6757 Fax:029-879-6732 E-mail:yamamoto@pwri.go.jp

面近傍の渦がポンプに到達するまでに十分に発達せず、自由表面からの空気吸込渦が現実の流れと同様に現れない懸念があるため、鉛直(z)方向については等流開水路における流速分布の理論解^③を元に、水平(y)方向については管内流れの流速分布の理論解に基づいて、流速分布を設定した。図2に水面上($z=3.35$)における水平方向速度分布および、水路中央($y=0$)における高さ方向速度分布をそれぞれ示す。

ポンプ吐出管出口境界には、それぞれの境界を通過する流れの平均流速に相当する吹き出しを配した。



(a) 水面上($z=3.35$) (b) 水路中央($y=0$)
図2 吸水水槽入口における速度分布

3-3 境界条件

物体壁面では、粘着条件($u=v=w=0$)を満足するものとする。

水面においては、水面に垂直な渦度成分を持つ渦要素を流れ場に導入する手法を用いることにより、自由表面からの渦発生予測を試みた。この渦要素導入法は、水面を含む2層間(気/液)の境界面に速度差は生じないものと考え、水面内の速度分布に伴い生じる、水面に垂直な渦度成分を考慮し、渦要素として流れ場に導入するものである。この手法により水面より生じる空気吸込渦を再現することが可能になると考えられる。

4. 解析結果と渦の予測

4-1 渦発生限界

渦の発生を定量的に予測する手法について検討する。一般に空間中の任意の位置における圧力値から判定するのが妥当であると考えられる。領域型の解析による渦判定において渦伸長モデルが提案されている^④が、本報では伸長渦モデルより渦中心圧力を算出する手順により、渦要素中心での圧力を簡易的に算出する方法を試みた。

4-2 渦発生予測

渦要素中心圧力を簡易的に算出する手法を利用して空気吸込渦の非定常な発生の予測を試みた。空気吸込渦は水面近傍に生じる渦における中心圧力の低下に起因して生じるものと考えられる。そこで水面に近接する領域に存在する渦要素の圧力低下量の卓越値および該当する渦要素位置の時間的な変化を算出することにより、空気吸込渦の発生を定量的に予測することが可能であると考えられる。解析水槽において水面から200mmの領域に存在する渦要素を対象に計算を行った。

4-3 計算結果

上記のうちオープン形水槽の計算結果を図3および図4に示す。また水面近傍のフローパターンを図5に示した。

$Q=5\text{ m}^3/\text{s}$ では圧力低下を伴う渦要素は突込整流板へ流れが衝突する箇所の側壁寄りに集中している。 $Q=15\text{ m}^3/\text{s}$ では両側壁近傍に限らず流路全体に及んでおり、図5のフローパターンにおける旋回流についても同様の状況が伺える。圧力低下量卓越値の時間変化から、渦の発生頻度が求められそうである。

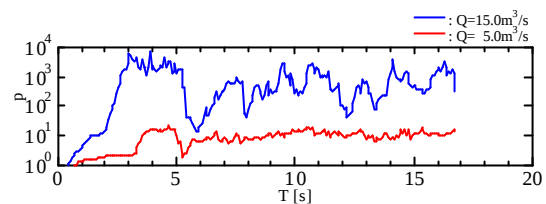


図3 圧力低下量の卓越値の時間変化(オープン水槽)

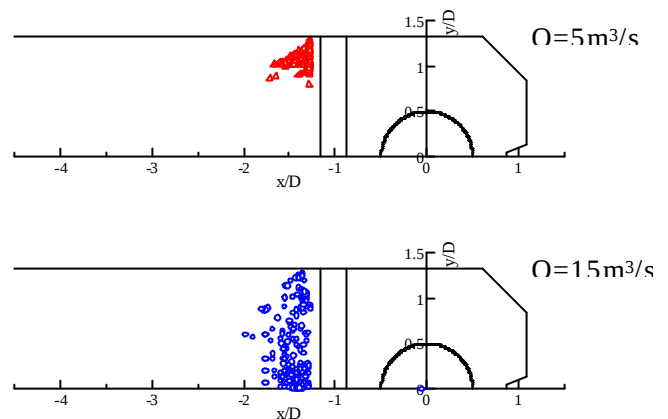
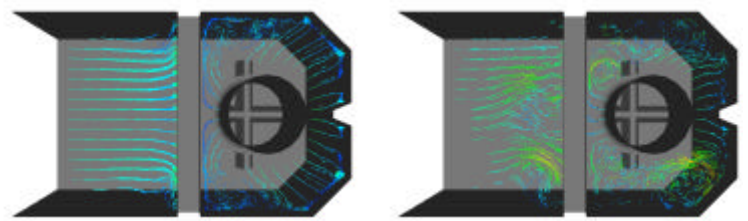


図4 圧力低下を伴う渦要素位置(オープン水槽)



$Q=5.0\text{ m}^3/\text{s}$ $Q=15.0\text{ m}^3/\text{s}$
図5 水平断面内の渦要素分布(オープン水槽 $z=3250\text{ mm}$)

5. まとめ

渦法による吸水水槽内の非定常流れ解析を行い、渦発生の予測を試みた。伸長渦モデルより簡易的に求めた圧力低下量の卓越値の時間変化を計算することにより、定量的な評価ができる見通しをつけた。

謝辞

本研究の遂行に当たってはカレッジマスターハンズの小島殿に、多大なるご協力を頂いた。ここに深い謝意を表します。

参考文献

- (1) 小島・亀本, 渦法による水平軸風車周りの非定常流れ解析, ターボ機械, 29-5(2001.5), p55-63
- (2) 河川ポンプ施設技術協会, 揚排水ポンプ設備設計指針(案)同解説
- (3) 佐藤, 技術者のための水理学, (1973), p193-, 森北出版
- (4) 長原ほか3名, ポンプ吸水水路の空気吸込渦発生予測シミュレーション, 機械学会関東茨城講演会論文集, (1996), p97