非定常流れ解析のポンプ吸込水槽設計への適用検討

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

揚排水機場は設備の機能や信頼性の確保とともに、設備の簡易化、メンテナンスフリー化、低コスト化が求められており、このため小中規模の排水機場については、標準的な構造や寸法が定められ設計コストの縮減が図られている。しかし用地確保難から、標準的な形状の水槽が設けにくい場合もある。吸込水槽形状が不適当であると、水中渦や空気吸込渦が発生し振動・騒音の発生やポンプ性能の低下につながることが考えられる。従来は、主に吸込水槽の模型試験によりこうした渦発生の確認および評価が行われ、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と考えられており、定量的な渦発生の予測・評価には使用せず、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った。渦発生の予測・評価に関する研究が進められており、解像度の不足を伸長渦モデルで補正して得られた渦中心圧力により渦発生予測を行う手法が提案されている[1]。筆者らは渦法[2]による吸込水槽内流れ解析を行い、上記手法を応用して渦要素中心での圧力により定量的な渦発生予測を試みた[3]。

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、吸込水槽設計への適用検討の第１段階として、オープン形吸込水槽において渦法による非定常流れ解析結果をもとに渦発生予測を行い、渦が発生しない限界の水位を求め、その有効性を検討した。

２．渦法の概要と基礎方程式

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。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(1)からなる。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\boldsymbol{u}\cdot grad)\,\omega = (\omega \cdot grad)\,\boldsymbol{u} + \nu\nabla^2\omega \qquad (1)$$

ここで$\boldsymbol{u}$および$\omega\,(\equiv rot\ \boldsymbol{u})$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Bior-Savartの式(2)より得られる。

$$\boldsymbol{u} = \int_V \omega_0 \times \nabla_0 G\,dv + \int_S [(\boldsymbol{n}_0\cdot\boldsymbol{u}_0)\cdot\nabla_0 G - (\boldsymbol{n}_0\times\boldsymbol{u}_0)\times\nabla_0 G]\,ds \qquad (2)$$

ここに、添字"0"は位置$\boldsymbol{x}_0$における変数、微積分を表し、$\boldsymbol{n}_0$は$\boldsymbol{x}_0$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、Nabier-Stokes方程式の発散から得られる圧力ポアソン方程式(3)より得られるベルヌーイ関数に関する積分方程式(4)を解くことにより解析する。

$$\nabla^2 p = -\rho\cdot div\,(\boldsymbol{u}\cdot grad\ \boldsymbol{u}) \qquad (3)$$

$$\beta H + \int_S H\frac{\partial G}{\partial n}ds = -\left[\int_V \nabla G(\boldsymbol{n}\times\omega)\,dv + \int_S G\,\boldsymbol{n}\cdot\frac{d\boldsymbol{=}}{dt}ds + \nu\int_S \boldsymbol{n}\cdot(\nabla G\times\omega)\,ds\right] \qquad (4)$$

ここに、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$H = p/\rho + |\boldsymbol{u}|^2/2$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**に示す様な単純な矩形断面水路の末端に立軸ポンプが設置されたものである。ただし、ポンプ設置位置は両側壁からの距離の比が16:14となるように水路中心から偏っている。また、**表１**に形状パラメータを示す。今回は、ポンプ口径 D=100[mm]の模型水路を解析対象とし、**表１**に示すの３通りの水位にて解析を行った。

3-2 境界条件　吸込水槽入口境界については、流入条件を一様流とした。

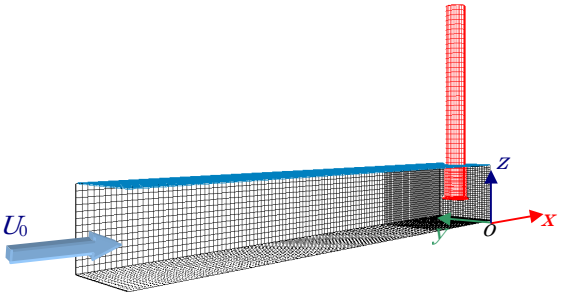


図１　解析吸込水槽形状

キーワード：CFD、吸水槽、渦判定、空気吸込渦、排水機場、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

また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。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るが、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た。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となると考えられる。

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。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。渦法による流れ解析では渦要素中心での圧力を簡易的に算出することにより渦中心圧力が比較的容易に得られる。渦要素中心圧力をもとに空気吸込渦発生条件は以下の通りとした。

渦要素中心での圧力低下をp_c、渦要素位置におけるヘッド圧をp_hとし、渦流が空気を巻込む条件は、

$$\frac{p_c}{p_h} > 1 \qquad (7)$$

また、空気吸込渦の先端から気泡が巻込まれる条件は、Stokes近似にもとづき得られる空気吸込渦先端の単位長さあたりに作用する下降流に伴う抗力f_dおよび浮力f_bの関係より、次式で与えられる。

$$\frac{f_d}{f_b} = \frac{\mathrm{Fr}}{4}\frac{24}{\mathrm{Re}} > 1 \qquad (8)$$

ここに、Fr はフルード数、Re はレイノルズ数を表し、それぞれ下降流速 w および渦コア径σ を代表値として無次元化した値であり次式により定義される。

$$Fr = \frac{w^2}{g\sigma} \qquad (9)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{w\sigma}{\nu} \qquad (10)$$

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。

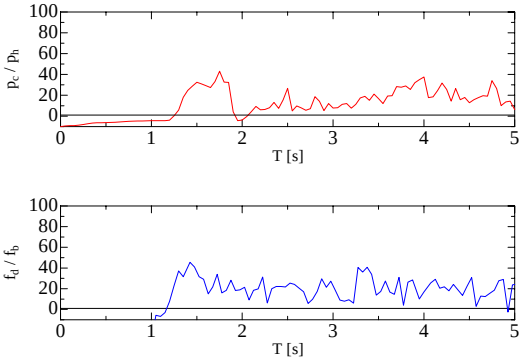
4-2 計算結果　解析を行った３水位におけるp_c/p_h ならびにf_d/f_bの時間変化を**図２**に示した。これらの結果から水位が高くなるほど渦発生頻度が低くなり、渦発生限界水位が存在することがわかる。

５．まとめ

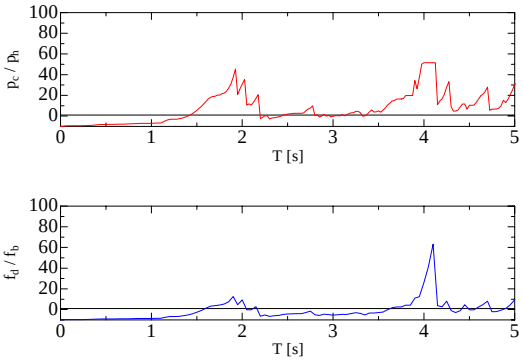
渦法による吸込水槽内の非定常流れ解析結果から渦発生の予測を行い、吸込水槽設計への適用検討として流量一定のもとで水位を変化させ解析を実施することにより、空気吸込渦の発生限界水位が存在することを調査した。

表１　水槽形状パラメータ（単位:mm）

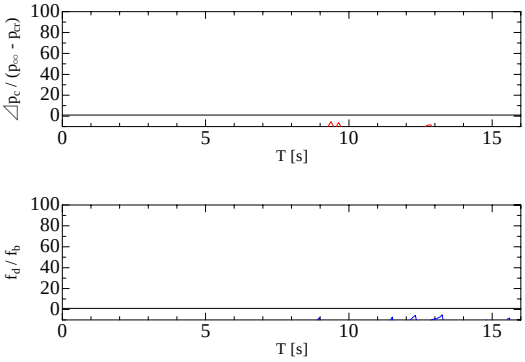
	数値
ポンプ口径 D	100
水路幅 W	300
水位 H	260,295,360
ﾎﾞﾄﾑｸﾘｱﾗﾝｽ C	100
背面間隔 F	110
ポンプ位置の偏り	16： 14
流量 Q [m³/min]	1.10



(a) H=260mm



(b) H=295mm



(c) H=360mm

図２　圧力低下量の卓越値の時間変化

参考文献

(1) 長原ほか３名，ポンプ吸込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

(2) 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

(3) 山本・吉田，渦法によるポンプ吸込水槽内流れの非定常解析．日本機械学会流体工学部門講演会, (2003.9)