

論文の内容の要旨

論文題目 Suction vortices in a pump sump ~ their origin, formation and dynamics ~
(ポンプ吸込水槽における吸込渦の起源、形成およびダイナミクス)

氏名 山出吉伸

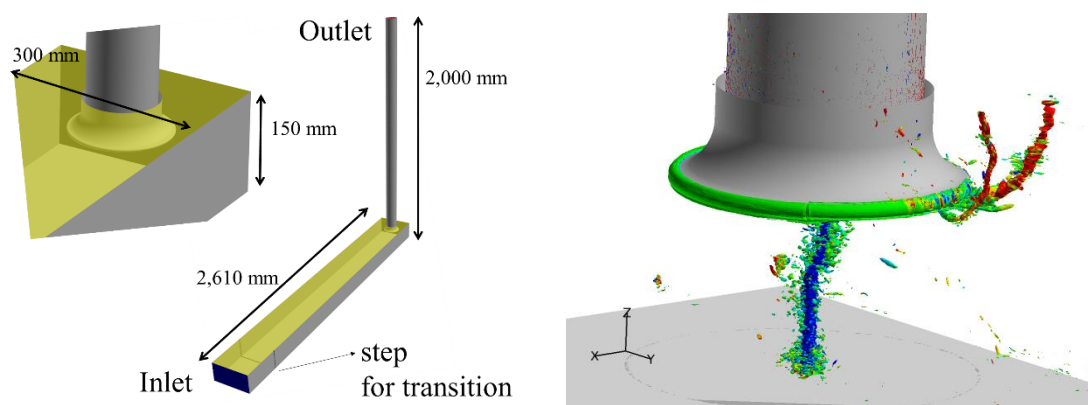
ポンプ吸込水槽に発生する水中渦 (submerged vortices) や空気吸込渦 (air-entrained vortices), 本論文ではこれらの渦をまとめて吸込渦 (suction vortices) と称する, はポンプシステムの騒音・振動や損傷の原因となることがある. このため, ポンプ吸込水槽の設計の段階で吸込渦発生条件を把握しておく必要がある. 本研究では吸込渦の起源, 形成およびダイナミクスを解明するため, 二つの計算モデルに対して流れ解析を実施した. 一つ目の計算モデルはモデルポンプ水槽の内部流れである. これにより, 水中渦の起源および形成プロセス, ならびに空気吸込渦の起源を解明することができたが, 格子解像度不足のため, 吸込渦の渦コアを過小評価する課題を残した. この課題を解決するため, 二つ目の計算モデルとして, ポンプ配管直下の領域に着目した簡易計算モデルにおける内部流れ解析を実施した. 以下に各計算モデルに対して実施した研究の概要とそれらの結論を示す.

(1) モデル水槽内部流れの流れ解析

モデルポンプ水槽に生じる水中渦および空気吸込渦の起源と形成プロセスを明らかにするために, 水槽内部流れの流れ解析を実施した. モデル水槽は, 流路方向長さ 2500 mm, 流路幅 300 mm であり, 直径 100 mm のポンプ配管が底面からの高さ 100 mm の位置の流路端に設置されている. 本モデル水槽を対象に, 流入速度および水面高さを変更し, 水中渦および空気吸込渦の発生の有無を計測した研究結果が報告されている. 本研究では, 上記の研究において, 水中渦および空気吸込渦の発生が確認されている流入速度 0.37 m/s, 水面高さ 150 mm の条件で流れ解析を実施した. モデル水槽の計算モデルおよび吸込渦の可視化結果を図 1 に示す. 本研究で実施した LES 解析では水面はスリップ条件として扱い, 自由表面の影響は考慮していない. また, 流れは单相とし, キャビテーションの影響も考慮していない. まず, 流入境界層の状態を 3 種類に変更した計算を実施することにより, 水中渦の起源を調べた. 次に, チャネル長さおよび主流平均速度で規格化した無次元時間で約 60 に相当する 16 秒間にわたる長時間計算により, 水中渦や空気吸込渦が発生したり, 消滅したりする事象を複数回再現し, このような事象に関する流れ場の渦度分布や速度勾配などを詳細に分析した. これにより, 空気吸込渦の起源や発生するメカニズム, および, 水中渦が発生したり, 消滅したりするメカニズムを明らかにした. 最後に, これらのメカニズムを検証する目的で, 水槽のベルマウス下端から底面までの距離や水面高さを変更した計算を実

施した。これらの計算と分析により以下の結論を得た。

- ✓ 水中渦の起源は水槽底面に発達する境界層の平均的なシア（速度勾配）であり、乱流境界層中の縦渦は水中渦の発生に直接的な寄与はしない。境界層の平均的な速度勾配がもつ渦度が、主流の偏りにより鉛直方向の渦度に転換され、そこに強い鉛直方向の加速流れが存在すると、渦の伸長が起こることにより、水中渦が発生する詳細な過程を明らかにした。
- ✓ 反対方向の渦度をもつ二つの水中渦の合体により水中渦が消滅することがある。
- ✓ 自由表面の影響を考慮していない本 LES 解析によっても、水面に渦端を有しベルマウスに吸込まれる空気吸込渦と同様な渦が再現された。この渦端はポンプ吸込配管の背後に形成されるはく離流れとつながっているため、ポンプ吸込配管の背後に形成されるはく離流れの中の渦度が、空気吸込渦の起源になることがあることが示唆された。



(a) 計算モデル

(b) 吸込渦の可視化結果

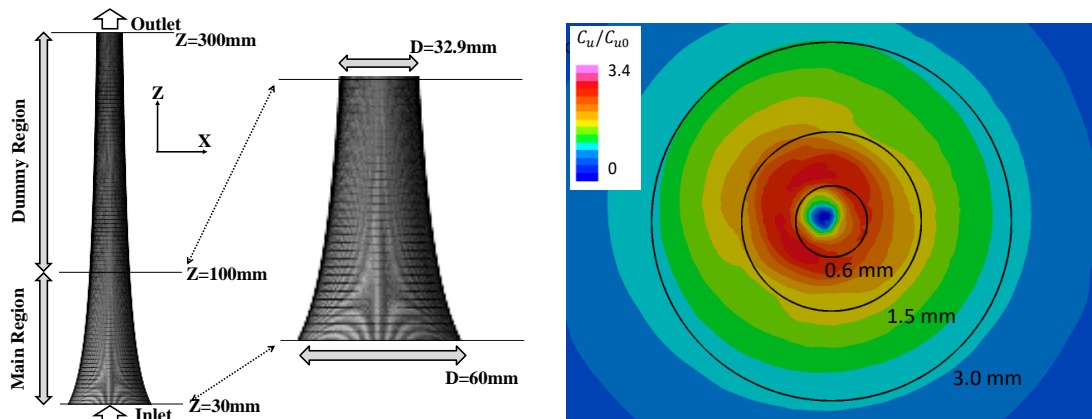
図1 モデル水槽内部流れにおける計算モデルと吸込渦の可視化結果

(2) 簡易計算モデル内部流れの流れ解析

モデル水槽に発生する水中渦に関して、渦のコア領域における静圧低下量も含めて定量的な予測を実現することを目的とし、モデル水槽におけるポンプ配管下の加速流れを模擬した簡易形状の解析モデル内の流れを対象に解析格子の解像度、解析の時間刻み、および流入境界において与えた旋回の強さや軸方向の速度を種々変化させた LES 解析を実施した。図2に簡易モデル内部流れ解析の計算モデルおよびこれにより計算された水中渦の可視化結果（高さ60mm断面における周方向速度分布）を示す。本研究により以下の結論を得た。

- ✓ モデル水槽で発生した水中渦の速度分布から、渦コア半径3.0 mm、最大周方向速度2.94 m/s、軸方向速度0.6 m/sを流入境界条件として与えた、格子解像度15 μ mのLES解析を実施したところ、渦中心の静圧は常温における飽和水蒸気圧以下に低下し、キャビテーションが発生する条件を再現できることを確認した。

- ✓ 流入境界における旋回強さを強くしていくと、スワール数約 1.0, レイノルズ数約 3,500 を臨界値として、水中渦は振れ回りを始め、渦は乱流遷移する。さらに旋回を強くしていくと、スワール数約 1.6 から 2.4 の範囲で遠心力による渦コアの拡大と渦の伸長による渦コアの縮小が均衡し、周方向速度分布が変化しなくなる。さらに旋回を強くしていくと、渦が拡大しようとする効果が卓越し、渦の中心における、流入境界で与えた周方向速度の最大値で無次元化された静圧降下量は逆に小さくなる。水中渦の非定常性が強くなり、渦コアの静圧が大きく降下するスワール数の範囲はおよそ 1.25 から 3 程度であり、このような条件が成立したときに限って、強い水中渦が発生する。
- ✓ 渦が拡大しようとする効果が卓越するスワール数の範囲において、渦コアは振れ回り運動に加えて、渦の軸方向に伸び縮みするようになり、この現象を捉えるのに十分小さな時間刻みで数値解析を行う必要がある。



(a) 計算モデル

(b) 吸込渦の可視化結果

(高さ 60mm 断面における周方向速度)

図 2 簡易計算モデル内部流れ解析の計算モデルと吸込渦の可視化結果