

CFD を活用した排水機場の性能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平成 15 年度～平 18 年度
担当チーム：技術推進本部（先端技術）
研究担当者：山元 弘、河北憲治

【要旨】

排水機場には主ポンプへ滑らかに水を導くための吸込水槽があり、有害な水流の乱れを生じないように形状および寸法が検討されなければならない。現在、ポンプ単機流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下については『揚排水ポンプ設備設計指針（案）』にて、吸込水槽の標準形状および寸法が示されている。しかし、 $10\text{m}^3/\text{s}$ を超える流量の場合や『揚排水ポンプ設備設計指針（案）』に示されていない形状を採用する場合は、縮小模型実験によりポンプ運転に有害な渦の発生の有無を検証しなければならず、それには多額なコストと期間を要する。一方、コンピュータ性能および解析技術の向上によって、CFD（Computational Fluid Dynamics）解析は高精度化が進んでおり、現在では様々な流体関連機器および施設の設計検討に使用されている。CFD 解析を吸込水槽の形状検討にも活用すれば、模型実験をしなくても吸込水槽の性能をある程度予測することが可能となる。標準外形状の吸込水槽の性能評価が容易になれば、発注者側での検討も可能となるため、既設機場における排水性能の向上程度を予測して、B/C の高い効率的な内水計画に役立てることなどができる。本研究は、排水機場における吸込水槽の、CFD 解析を活用した性能評価手法について検討するものである。

キーワード：排水ポンプ機場、吸込水槽、模型実験、空気吸込渦、CFD

1. はじめに

排水機場は出水時に国民の生命と財産を守るための重要設備である。しかし、予算縮減の要求は社会資本の管理にも及び、建設、更新、維持管理の効率化の検討が必要とされている。

排水機場では、主ポンプを代表として流体関連機器・施設が重要な役割を果たしている。一方、コンピュータ性能および解析技術の向上によって、CFD 解析の高精度化が進んでおり、現在では様々な流体関連機器および施設の設計検討に使用されている。排水機場の能力に影響する流体関連施設の性能を CFD 解析を利用して評価すれば、既設排水機場の能力変更による内水計画の効率化や、CFD 解析を利用した高度な設計による施設性能の向上が期待される。

本研究は、CFD 解析の活用により排水機場の計画、建設、更新を効率的に行えるようにするためのものである。

2. 研究内容

2. 1 研究の対象

排水機場の流体関連施設としては、流入水路、吸込水槽、吐出水槽、樋門・樋管がある。流入水路は、水

流をできるだけ均等に吸込水槽へと導くことが求められるが、一般的な CFD 解析にて検討可能である。吐出水槽および樋門・樋管の水路部における、流体の圧力脈動による振動は堤防に悪影響を与えるが、吐出水槽が開口してサージタンクの役割を果たすためさほど問題にならない。

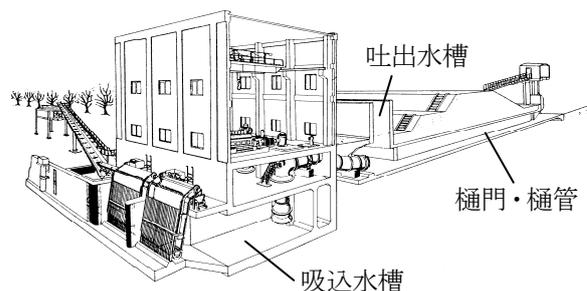


図 1 排水機場透視図

一方、吸込水槽は適切に設計されなければ空気吸込渦や水中渦が発生し、ポンプの運転およびポンプ自体に悪影響を及ぼす。また、吸込水槽を CFD で解析する場合、形状が変化する水面があることや、発生する渦が水槽の大きさに比べて小さいため、高度な解析技術が必要となる。よって、吸込水槽を本研究の対象とする。

2. 2 研究の目的

既設機場を更新する場合、土木施設はそのまま使用することが望まれるが、建設時には周囲が田畑だったものが住宅街になっているなど、背後地の状況が変化し要求される排水機場の能力も変化していることが少なくない。この場合、既存の吸込水槽を使用してどれだけ流量を増加できるか、あるいは運転水位をどれだけ下げることができるかを検討する必要がある。

吸込水槽は、ポンプ単機流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下については、『揚排水ポンプ設備設計指針(案)』(以下 指針案)に標準形状および寸法が示されている。指針案は S49 年に作成され、改定が行われる度に水槽の形状・寸法等も多少変更されてきた。現在最新の H13 年度版では新しい水槽形状も追加されている。その一つである渦流防止板付オープン形吸水槽は、直前の指針案による吸込水槽を改修して流量を増加することも考慮されている。しかし、現在更新が検討されている機場は 30~40 年前に建設されたものであり、水槽形状が異なるため、渦流防止板を付けたときの限界流量や限界運転水位などの水槽性能を予測することは難しい。その場合、縮小模型実験によりポンプ運転に有害な渦の発生の有無を検証しなければならず、それには多額なコストと期間を要する。そのため、最終的な模型実験は必要としつつも、可能な限り模型実験を省略できる手法が必要とされている。

よって本研究では、発注者側で吸込水槽の性能評価を可能とするための CFD を活用した吸込水槽の性能評価手法について検討する。内水排除計画の見直し時点で、ポンプ更新時に既設の吸込水槽をそのまま利用した場合に、どの程度容量や運転水位の能力を上げられるか、模型実験をしないで、ある程度予測することができれば、効率的な内水計画を実施することができ、B/C の向上に役立てることができる。また、新設機場においても設計の自由度を上げることができるため、今後の性能発注に向け、一定の事前評価可能な手法へのベースとなると考えている。

2. 3 研究方針

本研究では、CFD 解析方法および CFD 解析結果による有害渦の判定手法について検討する。そして、CFD 解析および模型実験を行い、両者による有害渦の判定結果を比較することにより、CFD 解析結果による有害渦の判定手法の妥当性について判断する。

3. CFD解析について

3. 1 CFD解析コード

CFD 解析コードには、オイラ的手法で空間に格子を切って計算する有限体積法を基礎とするものや、ラグランジュ的手法で渦要素を追跡する渦法などの解析コードがある。市販されている汎用の CFD 解析ソフトウェアでは一般的に有限体積法が用いられている。

CFD では、基礎方程式となる Navier-Stokes 方程式(式(1))、連続の式(式(2))、圧力ポアソン方程式(式(3))によって流れ場を解く。

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

$$\text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla^2 p = -\rho \text{div}(\mathbf{u} \cdot \text{grad } \mathbf{u}) \quad (3)$$

ここで、

\mathbf{u} : 速度ベクトル

p : 圧力

ρ : 密度

ν : 動粘性係数

これらの解き方は、CFD 解析コードにより様々である。

3. 2 有限体積法

有限体積法の場合、解析空間に 4 面体(三角錐)や 6 面体(直方体)などの立体格子を作成し、基礎方程式を空間的に離散化して計算を行う。

解法には、Navier-Stokes 方程式を直接解く DNS (Direct Numerical Simulation) や、RANS (レイノルズ平均 Navier-Stokes) 方程式に基づく乱流モデル ($k-\epsilon$ 、SST $k-\omega$ など) を使って解くもの、格子サイズより大きい渦は DNS、格子サイズより小さい渦は SGS モデルを使って解く LES (Large Eddy Simulation) などがある。

全領域を DNS により解析するためには非常に細かい格子を作成しなければならず、計算負荷が大きい。LES にしても、複雑な流れ場を計算するためには、DNS ほどではないにしても細かい格子が必要となる。RANS による乱流モデルを使うものは比較的大きな格子で計算することができる。

3. 3 渦法

渦法は流れ場における連続的な渦度分布を、多数の微小渦要素によって離散的に表し、Navier-Stokes 方程

式の回転 (rot)

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad (4)$$

から得られる渦度輸送方程式を数值的に解くことで各渦要素の渦度変化を求め、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。渦法の場合、境界表面には二次元格子が必要であるものの、流れ場には格子は一切必要がない。流れの変化が激しい部分には自動的に渦要素が集中するため、計算の解像度は自動的に調整される。

3. 4 吸込水槽におけるCFD解析コード

吸込水槽では渦はどこに発生するかわからず、発生しても強さや位置が変化する非定常性があるため非定常解析が望ましい。また、水中渦の場合は渦径が非常に小さいため、十分な解像度が必要となる。空気吸込渦の場合は、水面の波立ちの影響や空気巻き込みが問題となることもあるため、自由表面の計算ができることが望ましい。

有限体積法の場合、十分な精度で計算を行うためには、全体的に細かい格子を作成しなければならず、計算負荷が大きい。そのため、必要な部分だけ格子を自動的に細かくする解適合格子法 (Adaptive Mesh Refinement Method) があるが、それでも非定常計算をするには計算負荷が大きい。自由表面の計算はすでに確立されているが、さらに計算負荷が大きくなる。

渦法の場合、計算の解像度は自動的に調整され、非定常解析も実用的な計算時間で可能である。ただし、自由表面の計算は技術的には可能であるものの、市販ソフトではまだ確立されていない。

自由表面の計算については、有限体積法にしても渦法にしても、吸込水槽の計算に実用上使用できる状態ではない。その他の点では有限体積法より渦法の方が吸込水槽の計算に適しているといえる。よって、本研究では渦法により CFD 解析を行うこととする。

4. 模型実験の実施

4. 1 実験条件

CFD 解析結果による渦判定との比較のため、水槽幅 300mm の小模型による実験を行った。ポンプを擬した吸上げ管の内径は 100mm である。試験装置を図 2 に示す。



図 2 試験装置

水槽形状は H13 年版指針案で新しく加えられた渦流防止板付吸込水槽とした (図 3)。ただし、渦が発生しやすいように、吸上げ管と底面十字板、背面整流板は流れの上流方向に向かって左側に 10mm 偏心させている。

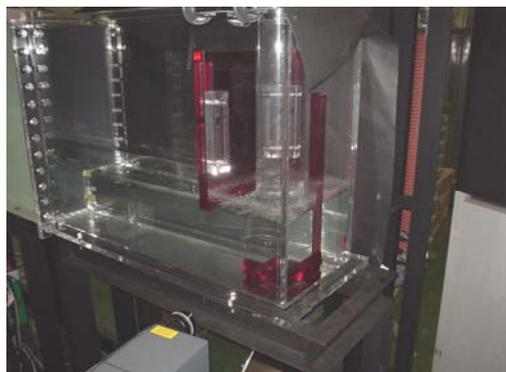


図 3 吸込水槽形状

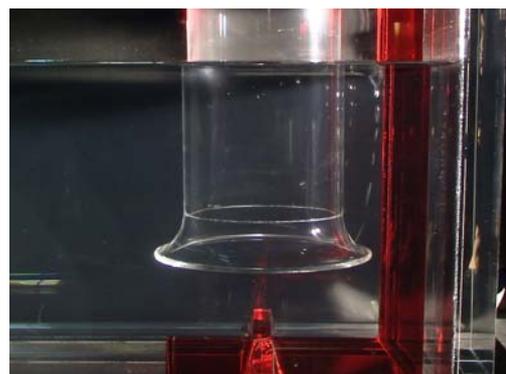


図 4 空気吸込渦発生の様子 (水位 230mm、流量 0.5m³/min)

4. 2 試験結果

水位を 150~300mm の間で変更し、流量を 0.2~2.0m³/min 程度まで変化させ、渦発生限界を求めるとともに、渦の発生状況を観察した。空気吸込渦発生の様子を図 4 に、渦発生の有無の確認結果を図 5 に示す。図中の%は観察時間中の渦の発生時間の割合である。

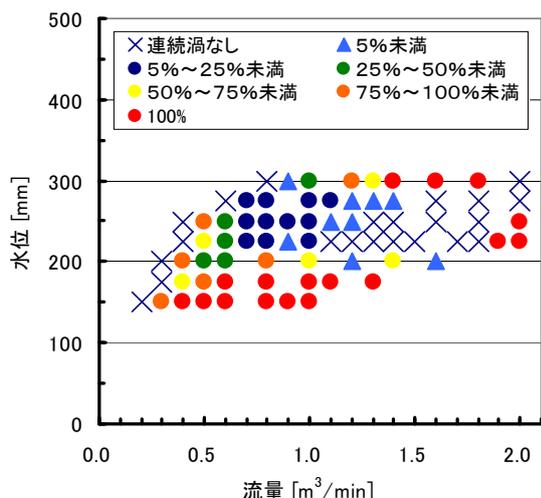


図5 空気吸込渦発生特性

5. 吸込水槽のCFD解析

5.1 解析条件

模型実験と同形状の吸込水槽について、渦法によりCFD解析を実施した。解析水槽形状を図6に示す。

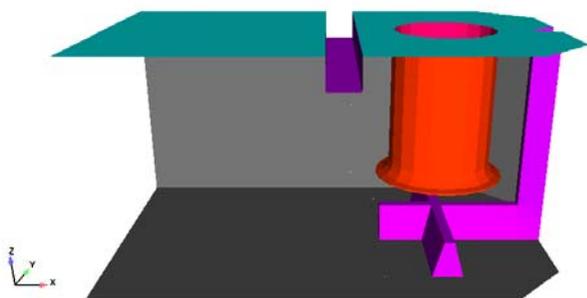


図6 解析水槽形状

解析における条件は以下のように設定した。

① 流入条件

一様流入としたが、流れを十分に発達させ、実際と同等の速度分布となるように、吸上げ管内径の20倍以上の助走区間を設けた。

② 流出条件

自由流出とした。この時、出口面に垂直な方向に速度および圧力の勾配はなくなる。ただし、流出条件が解析結果に影響しないように、吸上げ管の入口のベルマウスから吸上げ管内径の5倍以上の区間を設けた。

③ 壁面条件

ノンスリップ条件とし、壁面で速度0となるようにした。

④ 水面条件

スリップ条件とし、速度が水面の形状にのみ影響さ

れるようにした。

⑤ 水位

150mm および 250mm について解析した。

⑥ 流量

それぞれの水位で渦発生限界付近の流量について4点計算した。

5.2 解析結果

実験で空気吸込渦が発生している水位250mm、流量0.55m³/minの条件を計算した結果を図7,8,9に示す。速度は流路断面の平均流速である接近流速Uで無次元化している。

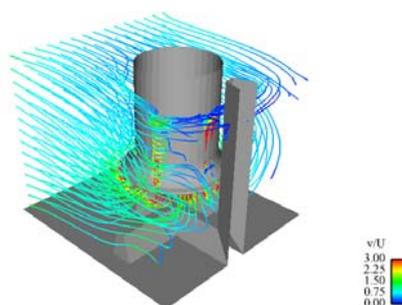


図7 流線透視図

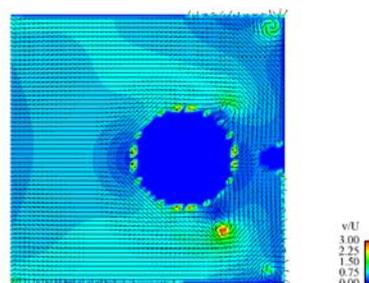


図8 速度分布 (水面とベルマウスの間水位)

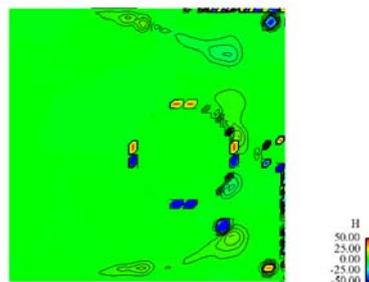


図9 ヘリシティ分布 (水面とベルマウスの間水位)

模型実験結果と同じ、流入方向に向かって左側(図の下側)に渦が発生しているのがわかる。CFD解析により渦の発生状況が定性的によく捉えられているといえる。

6. 吸込水槽の性能評価

6. 1 CFD解析による渦発生の判定

渦法による CFD 解析では、模型実験と定性的によく合った結果が得られた。しかし、CFD 解析の精度は、大まかな流れの状態については、解析コードによらず定性的によく予測されているものの、渦中心圧力や渦度など定量的な値はコードによる差異が非常に大きい¹⁾ため、渦の発生限界を CFD 解析により定量的に正確に求めることは、一般的手法として確立されているとは言えない。現状の CFD 解析の精度を踏まえつつ、CFD 解析の結果を利用した渦判定の評価手法について検討する必要がある。

これに対して、定常流れの状況から得られる渦情報に基づき、伸張渦モデルを付加して渦が空洞となるか否かを評価する手法²⁾は、実際に近い渦が予測されており、現時点では CFD 適用による実用的な予測法として高いレベルにあると考えている^{1, 3)}。

伸張渦モデルでは、渦の引き伸ばし効果と粘性拡散の効果がつりあった定常軸対称渦を考えた場合の Navier-Stokes 方程式の厳密解

$$v(r) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \right] \quad (5)$$

ここで、

- Γ : 循環
- ν : 動粘性係数
- r_0 : 粘性コア半径

$$r_0 = 2\sqrt{\frac{\nu}{\alpha}}$$

- α : 渦軸方向の速度勾配

$$\alpha = \frac{\partial w}{\partial z}$$

および、軸対称な定常流における半径方向の運動方程式

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (6)$$

を使い、式(6)を半径方向に積分し、式(5)を導入することにより、渦の中心圧力を以下の式で表すことができる。

$$p_c = p_\infty - \rho \int_0^\infty \frac{v(r)^2}{r} dr = p_\infty - \rho \left(\ln 2 \right) \left(\frac{\Gamma}{2\pi r_0} \right)^2 \quad (7)$$

渦法では、流れ場を表す離散要素として上記の伸張渦モデルと類似の渦要素モデル (図 10) を利用しているので、渦要素断面における循環量を式(5)の Γ 、および粘性コア半径を式(5)における r_0 と見なして渦要素中心における圧力を簡易的に算出する。渦法では各渦要素について上記の方法によって渦中心の圧力を求めることができるので、適切な検査領域について渦中心圧力の最低値を見ることで渦の発生の有無を判定することとした。

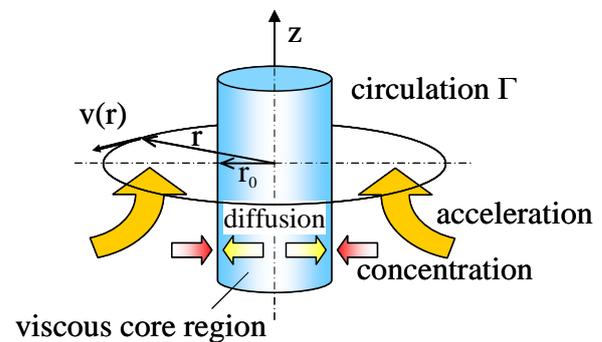


図 10 伸張渦要素モデル

渦の判定はそれぞれ以下のように行った。

① 空気吸込渦の判定

$$\frac{p_\infty - p_c}{p_h} > 1$$

② 水中渦の判定

$$\frac{p_\infty - p_c + p_h}{p_\infty - p_{cr}} > 1$$

ここで、

p_∞ : 渦の無限遠方の圧力

p_h : 渦中心のヘッド圧

である。空気吸込渦では渦中心圧力がヘッド圧より小さくなる場合、水中渦では渦中心圧力が飽和蒸気圧より小さくなる場合に 1 より大きな値となる。

6. 2 判定手法の結果と模型実験との比較

5章において行った CFD 解析の結果を使い、6章の判定手法により吸込渦発生の判定を行った。検査領域は水面および水面とベルマウスの間の水位とし、両方の領域で判定値が 1 を超える状態が頻繁にあるものについて空気吸込渦が発生していると判定した。水位 250mm の場合の判定値の時間変動を図 11,12 に示す。

水位 150mm についても同様にして空気吸込渦が発生しているかどうかを判定した。判定結果と模型実験との比較を図 13 に示す。図 13 において、データが重なるため、計算結果は 10mm 水位を上げた位置に表示している。

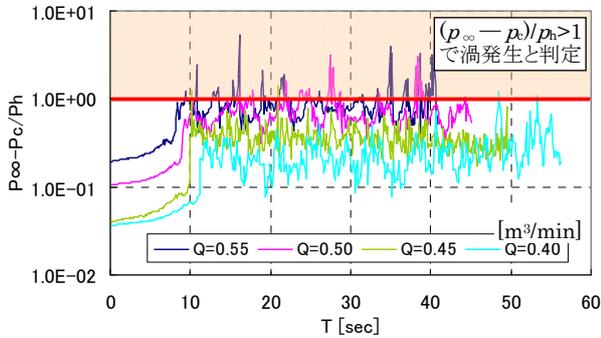


図 11 水面付近の判定値 (水位 250mm)

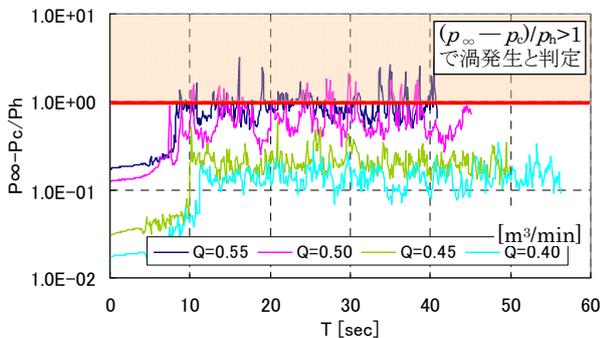


図 12 水面とベルマウスの中間水位の判定値 (水位 250mm)

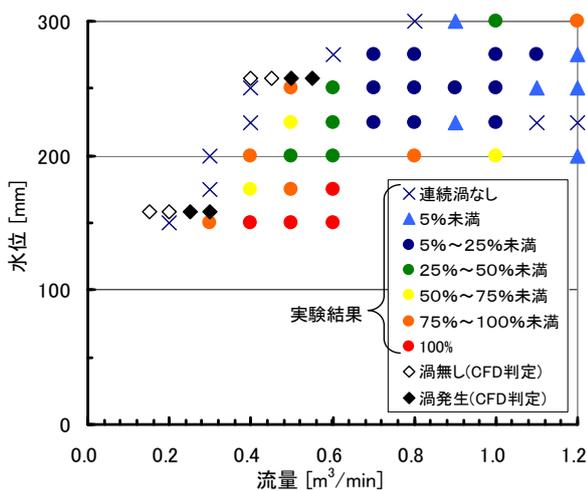


図 13 CFD による渦判定と模型実験との比較

比較の結果、CFD による渦発生の有無の判定は模型実験とよく合致した。これにより、本判定手法で空気吸込渦については十分渦発生限界を求めうるということがわかった。

ただし、水中渦については、底面十字板の効果によ

り今回の実験では発生せず、まだ確認ができていないので、今後検証が必要である。

6. 3 CFDによる吸込水槽の性能評価

CFD により渦発生の判定が可能であることがわかった。これにより、水位および流量の条件を変えて解析することで、吸込水槽の限界運転水位および限界接近流量 (流速) がわかり、吸込水槽の性能を評価することができると思う。

7. おわりに

CFD による渦発生の判定と模型実験との比較を行い、通常の渦流防止板付オープン形吸込水槽では精度良く渦発生限界を予測できることがわかった。これにより、CFD を活用した吸込水槽の性能評価がある程度可能となった。今後、現在の検証が通常の水槽形状のものであることから、他形状や水中渦について実際の試行等を通じて更に検証していくことが必要である。

この結果に基づき、発注者側で CFD を活用した検討が行えるように、ポンプ流量 10m³/s 以下のオープン形吸込水槽を対象とした『CFD 解析によるポンプ吸込水槽の性能評価手順書』(以下 手順書) を作成した。『手順書』では適用範囲、検討の流れおよび留意事項、CFD 解析実施および渦の判定における注意点などを示している。これにより CFD が活用されれば、既設排水機場の能力変更による内水計画の効率化や、CFD 解析を利用した高度な設計による施設性能の向上が期待される。

今後は、実際の更新検討現場で CFD を用いた水槽性能の検討を行い、その有効性を示した上で CFD の活用を促進して行きたいと考える。

参考文献

- 1) ターボ機械協会、「ポンプ吸込水槽の模型試験方法」、ターボ機械協会基準、TSJS 002、2005.3
- 2) Burgers, J. M., "A mathematical model illustrating the theory of turbulence", *Advances in Applied Mechanics*, 1 (1948), pp.171-199, 1948.1.
- 3) 山元弘、山本幸広、「CFD を活用したポンプ吸込水槽の性能評価手法に関する研究」、*土木技術資料*、Vol.47 No.6、pp.58-63、2005.6