

ポンプ水路系で発生した複雑な脈動と振動現象及びその対策 (第2報, 羽根面はく離制御による対策)

岡本 秀伸* 郭 士傑** 神野 秀基**
本田 修一郎*** 佐藤 清典***

Reduction of Complex Pressure Fluctuations and Vibrations in a Pump-water Tunnel System (2nd Report: Countermeasure by Control of Flow Separation on the Impeller)

by Hidenobu OKAMOTO, Shijie GUO, Hideki KANNO, Shuichiro HONDA, & Kiyonori SATO

This paper describes a vibration reduction countermeasure for a drainage pump station in which axial flow pumps were used. Investigations of vibration phenomena in the station showed that an unsteady fluid force occurred and the force locked into acoustic pressure fluctuations of the suction tunnel or vibration of the impeller. Reducing magnitude or changing frequency of fluctuations of fluid force are ways to remove lock-in phenomena. In the case of an axial type pump, one of the main causes of unsteady fluid force is unsteady vortex shedding on the impeller blade when the pump is operated under the off-design condition. Small lugs like tripping wires are mounted on the blade surface to reduce unsteady vortex shedding and to change its frequency. In this paper, we numerically examine the size and the position of a tripping wire on the blade surface using Vortex Method.

Keywords: Pressure fluctuation, Unsteady fluid force, Vortex shedding, Control of flow separation, Peak frequency, Vortex Method, Small lug, Lock-in, Resonance, Acoustic natural frequency

1. ま え が き

排水機場を計画する際には、排水機場の水路の固有値が、排水機場で発生する加振力に対して、共鳴を避けるように設計しなければならない。しかし、排水機場で発生する加振力は様々な原因で起こり（典型的な加振源としては、動静翼干渉、周期的な渦の放出、流体加振力、キャビテーション、逆流などがある）、回転周波数・羽根通過周波数及びその高調波以外の加振力を定量的に予測することは難しい。また、当初予想していなかった加振源により水路共鳴や自励振動が引き起こされる場合もまれにある。

ここでは、実機の排水機場で発生した、複雑な脈動と振動問題を解決した事例を紹介する。ポンプは立軸の軸流可動羽根で、羽根角は主軸に内蔵されたピストンを介

して油圧で制御される。管理点検運転のように、実揚程のない、過大流量で運転したときに、吸込水路で大きな脈動が発生した。第1報では、現象解明と原因究明を目的に、様々な運転条件において、水路脈動、軸振動、地盤振動、羽根角制御機構の油圧変動などを同時計測した。更に、運転中にコンプレッサを用いて吸込水路に空気を送りながらの測定と、水路内に空気袋を設置した場合の測定も行った。これらの測定の結果、以下の考察を得た（詳細は前報¹⁾参照）。

- ・脈動は、水路共鳴が励起されたことが原因である。
- ・脈動の羽根角依存性から判断して、根本的な加振源は羽根面からの渦放出と推定される。
- ・羽根面からの渦放出が羽根振動を介して水路脈動にロックイン（渦の放出周波数が、構造系などの別の振動周波数に引き込まれる現象）した可能性が大きい。
- ・空気の混入等で水路の音速を変え、水路の共鳴固有振動数を変えることにより、脈動の状況を大きく変えることができる。

本報（第2報）では、羽根面はく離の制御により、水路の音響固有値とのロックインを回避して脈動を抑える

* (株)荏原総合研究所 機械研究室
** 同 同 工学博士
*** 風水力事業本部 開発統括
*** 同 同 水力機器開発室
*** 同 システム事業統括 業務管理室 管理部

方法について検討した結果について報告する。流れ解析手法（CFD）の一つである渦法を用いて、オリジナルのポンプ翼形の非定常はく離特性を予測した。その結果脈動問題が起こった運転条件では、羽根面からはく離により周期的な渦放出の発生が予測された。渦放出の周期を実機換算すると、水路の音響固有周波数に近いことが明らかになった。次に、羽根面上に小突起を付けることにより、羽根面からの渦放出を制御し、周期的な渦放出の大きさと周波数を変更することができる予測結果を得た。実機にCFDで効果があった小突起を取り付けることにより、実機の脈動問題を解決した。

2. オリジナル翼形の非定常特性

図1は、第1報で報告した計測結果の一部で、当該ポンプの管理運転（過大流量で実揚程が0に近い）時において、羽根角を一定に保ったまま回転速度を変化させた場合の、吸込水路の圧力変動の大きさ及び卓越周波数の計測結果である。図1の横軸は回転速度比を表し、1.0が定格回転速度である。縦軸は、上段が圧力変動の大きさの比（ P_s/P_{s0} が定格回転速度における圧力変動の大きさ）で、下段が卓越周波数を示す。図1から、回転速度比が0.97以上になると、一つの卓越周波数（Peak2）がもう一方の卓越周波数（Peak1）に引き込まれ、同時に圧力変動の比が急激に上昇することが分かる。これは、この領域においてロックイン現象が起こって共鳴が引き起こされたことを示している。著者らは、ほぼ一定値を保っているPeak1が吸込水路の音響固有値であり、Peak2が羽根面からの周期的な渦放出による流体加振力であると推定している。

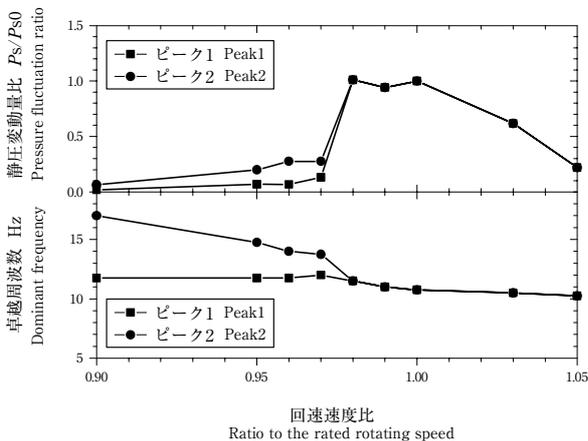


図1 羽根角を一定にした場合の回転速度比による卓越周波数の変化
Fig. 1 Dominant frequencies for different rotating speeds at a constant blade angle

羽根面からの非定常な渦放出の発生について評価するため、渦法による数値解析を行った。渦法は、非定常現象の予測に有効な解析手法として注目されている。ここでは、亀本らによって提案されている、“Level4”と呼ばれる手法^{2, 3)}を用いた2次元解析とした。

実際のポンプ羽根は3次元形状であるが、加振源としての支配的領域はチップ部分周辺であると推定される。計算時間の短縮のため、ここでは3次元流れの影響は無視し、ポンプ羽根のチップ部を展開した2次元翼形（以下オリジナル翼形と呼ぶ）を用いて渦放出の評価を行うこととする。解析に用いた2次元翼形の形状を図2に示す。図2の（b）は無次元化した翼形の全体を示し、0.0, 1.0は前縁/後縁をそれぞれ示す。（a）は前縁近傍の拡大図を示し、次節で検討する、羽根面からの渦放出の制御のために取り付けた小突起も併記している。実際の排水機場で問題が起こった運転条件から換算した迎え角は $-4^\circ \sim -7^\circ$ になり、図2の“下面”から渦が放出されることになる。

CFDによって得られた、オリジナル翼形のフローパターンを図3に示す。図3は流れが安定した後の無次元時間7.5における結果である。（a）が設計仕様に対応する迎え角 0° ，（b）が脈動問題を起こした運転条件に相

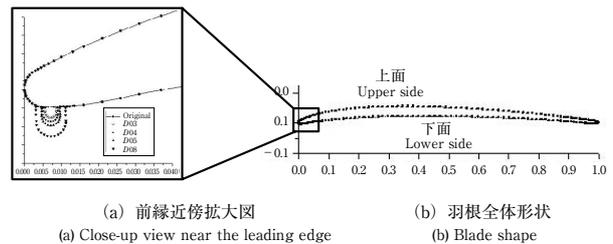


図2 2次元羽根断面形状と小突起
Fig. 2 Shape of the 2D impeller blade and small lug on the blade

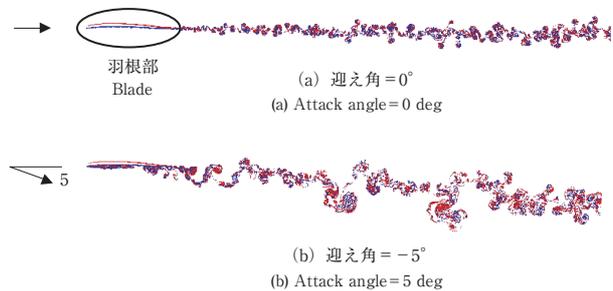


図3 フローパターン（オリジナル翼形，無次元時間 = 7.5）
Fig. 3 Flow Pattern (Original, non-dimensional time = 7.5)

当する迎え角 -5° （図3中の矢印が主流の流れ方向を示す）の場合である。図3の赤及び青の点は羽根面から放出された渦点を表し、時計回り及び反時計回りの渦にそれぞれ対応している。放出された渦点の集積によってフローパターンが描写されている。迎え角 0° では、羽根面からはく離は見られず、粘性により羽根面で生成された渦及び後方に流出した渦はスムーズに下流に流されている。しかし、迎え角が -5° の場合には、“下面”（図2）側で羽根面から流れのはく離が起こり、はく離によって生成された渦がある程度集積して渦塊を生成し、生成された渦塊を間欠的に下流に放出していることが分かる。放出された渦塊は下流で更に巻き上がり、周期的に並んだ大きな渦塊に成長する。図4に、羽根表面の非定常な静圧変動の予測結果を示す。図4はオリジナル翼形の迎え角 -5° の結果である。図4の縦軸は圧力係数 C_p 、斜め軸は無次元時間（0～7.5）を示す。横軸は無次元翼弦長を示し、0.0が前縁、1.0が後縁に対応し、“下面”と“上面”を記載してある。図4から、“上面”では、はく離が起こっていないので、羽根面上の静圧分布が時間的に変動していないが、“下面”では、羽根面からの流れのはく離と周期的な渦放出により、時間の経過と共に非定常に静圧分布が変動していることが分かる。羽根面静圧の時間変動は、変動流体力を引き起こす。図5は、羽根面静圧を積分して得られた、揚力係数 C_l 、抗力係数 C_d 、モーメント係数 C_m の時間変動を示す。モーメント係数の支点は実機可動羽根ポンプの可動軸の回

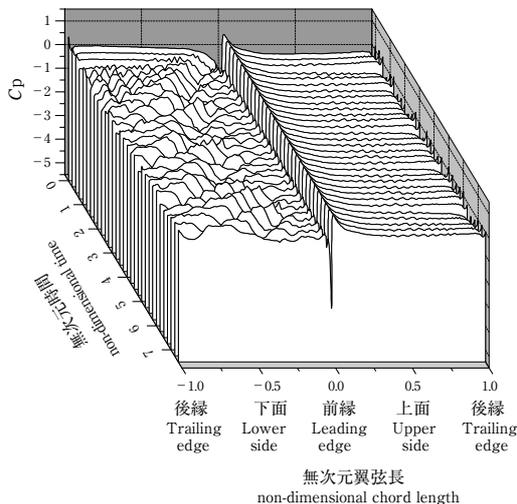
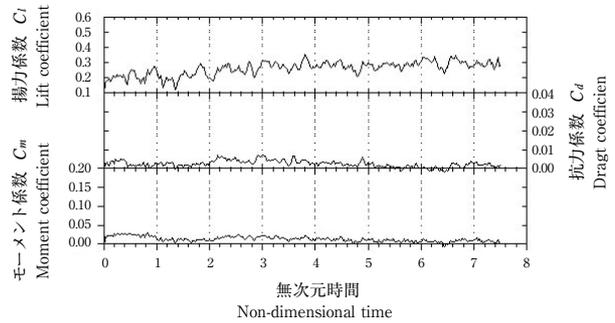
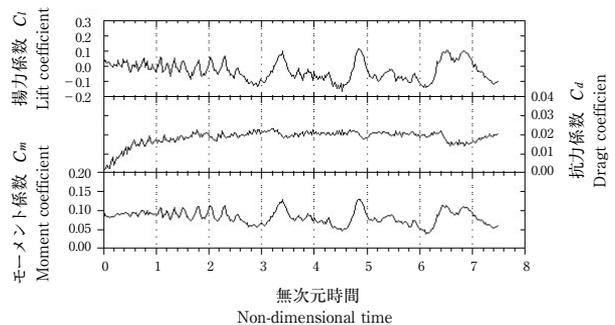


図4 羽根面上の静圧分布の非定常変動

Fig. 4 Unsteady static pressure fluctuations on the blade surface (Original, attack angle = -5°)



(a) 迎え角 0°
(a) Attack angle = 0 deg



(b) 迎え角 -5°
(b) Attack angle = 5 deg

図5 $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ の時間変動（オリジナル翼形）
Fig. 5 Fluctuations of $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ (Original)

転中心に対応している。図5はオリジナル翼形に対する結果で、横軸は無次元時間である。(a)が迎え角 0° (b)が迎え角 -5° の場合を示す。渦法の解析は無次元時間0から開始するため、無次元時間の初期の結果は出発渦の影響を受けるために周期的な変動評価には加えない。ここでは、 $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ の時間変動の評価には、無次元時間で3.0以上の領域を用いた。(a)では $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ の変動は小さく非定常流体力は認められないが、(b)では C_l と C_m で明らかに周期的で大きな変動が見受けられる。この変動は、図3 (b)の、周期的な渦塊の放出に強く影響を受けている。

これらの結果から、オリジナル翼形では、実際のポンプ排水機場で吸込水路に大きな圧力変動を生じた運転条件に相当する迎え角が -5° になると、“下面”側に非定常に変動する羽根面はく離を起こし、周期的に大きな渦塊を放出して $C_l \cdot C_m$ が周期的に変動する特性をもつことが明らかとなった。なお、ここで得られた変動周期を実機ポンプに換算すると、吸込水路の音響固有周波数に近い値となった。このオリジナル翼形の非定常特性が加振源となり、吸込水路の共鳴固有値と共鳴を起こして大きな脈動が発生したと推定される。

3. 小突起を用いた羽根面からの渦放出の制御

図1は、回転速度比が0.97以上になると、ロックイン現象により二つの卓越周波数の内Peak2がPeak1に引き込まれて圧力変動値が急増することを示しているだけでなく、Peak2の周波数がPeak1の周波数がある程度（このケースでは、Peak1の周波数の20%以上）離れていれば、“ロックイン”が起らないことも示している。もし水路の音響共鳴周波数と共鳴している加振源が羽根面からの流れのはく離による周期的な渦塊の放出であれば、何らかの方法を用いて、放出される渦塊の大きさを減少させて流体力変動の大きさを減少させるか、渦塊の放出周期を大きく変えることができれば、ロックイン現象を回避することができ、水路の共鳴による圧力変動の増加問題も解決できると考えられる。

一方、航空業界では、飛行機の羽根面のはく離制御方法として、トリッピングワイヤと呼ばれる小さな棒状の突起を貼り付ける方法が良く知られている。ここでは、実機のポンプ羽根で発生するはく離の大きさの減少と周期の変更のために、トリッピングワイヤのような小突起を羽根の前縁近傍に貼ることを試みる。小突起の効果は2次元渦法を用いて評価する。

実際の研究では、オリジナル翼形に取り付ける小突起について、大きさ、位置、突起の形状など様々な因子について検討を行ったが、本報告では、円形の小突起を例に、突起の大きさの影響について述べる。図2 (a) に、検討した小突起を表記する。図2内に表示されている突起の名称に関し、例えば、“D05”は小突起の直径が翼形の翼弦長の0.5%であることを意味している。これから分かるように、小突起の大きさは羽根に比べて非常に小さく、オリジナル羽根に対する時間平均した空力特性には大きく影響しないと推定した。小突起がオリジナル翼形の“下面”側の前縁近傍に取り付けられている理由

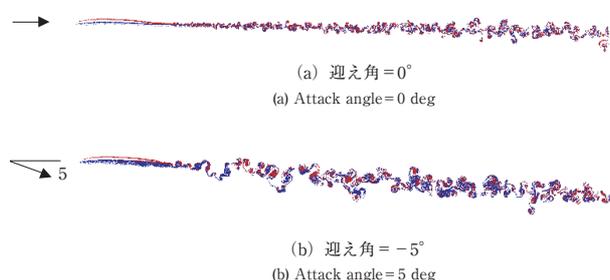
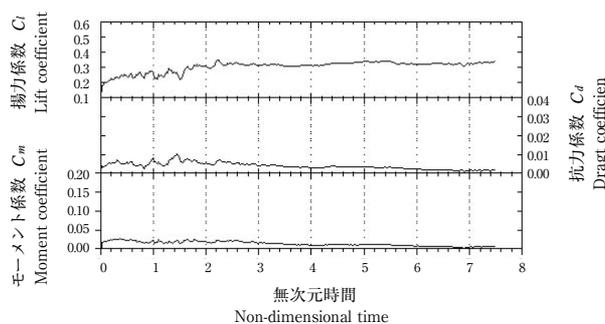


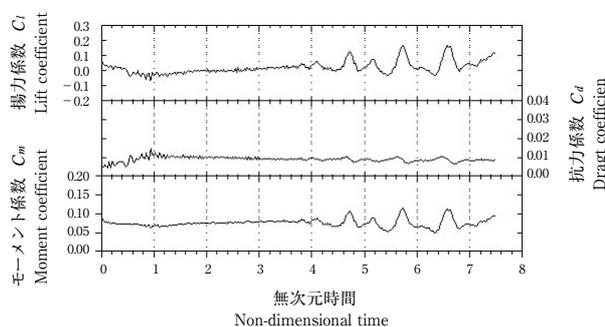
図6 フローパターン (“D04”, 無次元時間 = 7.5)
Fig. 6 Flow Pattern (“D04”, non-dimensional time = 7.5)

は、問題となっている羽根面からの流れのはく離がこの場所から始まっているからである。なお、小突起の取り付け位置について、図2 (a) の位置から上下流方向に振った検討も行ったが、取り付け位置の影響は小さかった。

図6に、小突起“D04”を取り付けた場合のフローパターンを示す。図3と比較すると、迎え角 0° ではフローパターンがオリジナル翼形と大きな相違はないが、迎え角が -5° では、“D04”の方が放出された渦塊の大きさが小さくなり、渦塊の放出周期（渦塊同士の間隔）も小さくなるのが明らかとなった。図7に、“D04”の場合の $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ の時間変動を示す。図6のように放出する渦塊の大きさと周期が変化したことに伴って、図5と比較して、“D04”の $C_l \cdot C_m$ の時間変動は小さくなり、周波数も速く（オリジナル翼形の周波数に対して約50%増加）なっている。この結果から、“D04”のケースは、流体力の変動量の減少と変動周期の変更に効果があると考えられる。なお、ここでは詳細は省略するが、“D03”の場合には多少の効果はあるものの、オリジナル翼形の結果と大差がなく、小突起の大きさはある程度ないと効果が小さいことが分かっている。



(a) 迎え角 0°
(a) Attack angle = 0 deg



(b) 迎え角 -5°
(b) Attack angle = 5 deg

図7 $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ の時間変動 (“D04”)
Fig. 7 Fluctuations of $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ (“D04”)

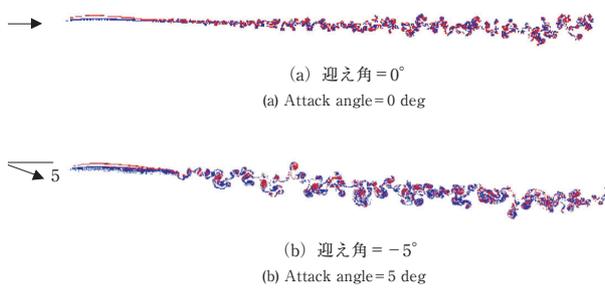


図8 フローパターン（“D05”，無次元時間 = 7.5）
Fig. 8 Flow Pattern (“D05”，non-dimensional time = 7.5）

“D05”の場合のフローパターン及び $C_l \cdot C_m$ の時間変動の結果を図8, 9にそれぞれ示す。小突起の効果はおおむね“D04”と同程度だが、 $C_l \cdot C_m$ の変動周波数が“D04”の場合より更に速くなっていることが分かる。以上から、翼弦長の0.4%以上の大きさの小突起を前縁近傍に取り付けば、オリジナル翼形と比較して、羽根面から放出される渦塊による流体力の変動量を減少させ、周期も50%以上変更できる予測結果が得られた。

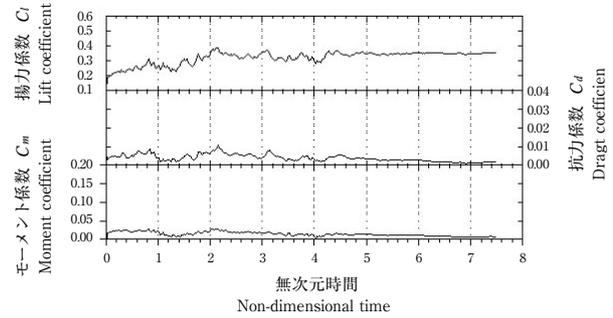
4. 模型試験による小突起の効果の確認と実機への適用

前節の結果を基に、図10に示すように実機を相似縮小した模型ポンプ羽根のチップ近傍にトリッピングワイヤ状の丸棒を貼り付けた。図10のように丸棒を断続的に千鳥配列にしたのは、羽根高さ方向にも不連続な変化をつけて、（3次元羽根のために）シート状にはく離した放出渦をスパン方向に分断して、渦放出の位相を一致させないように配慮したためである。実機を模擬した模型試験装置を用いて、3次元羽根に対する小突起のはく離状態の変化への効果とポンプ性能（水力性能及び吸込性能）に及ぼす影響について実験的に検証した。誌面の関係で、ここでは実験結果に関する詳細は省略するが、タフトと高速ビデオカメラを用いた可視化により、羽根面はく離の改善効果が確認され、小突起の装着による水力性能及び吸込性能への悪影響も見られなかった。

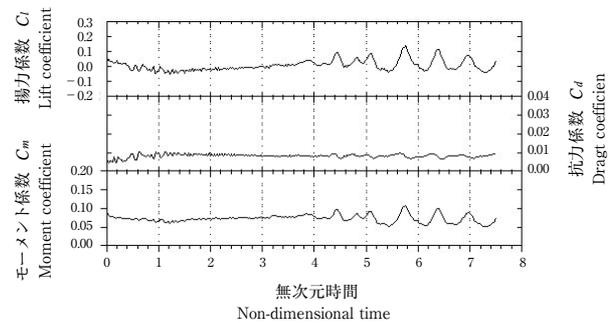
模型試験結果で効果が確認されたので、圧力脈動・振動問題の対策として、模型と同様の小突起を実機の羽根面に取り付ける工事を行った。小突起の設置後、脈動問題は発生しなくなった。

5. あとがき

本稿では、大容量排水機場で発生した圧力脈動・振動



(a) 迎え角 = 0°
(a) Attack angle = 0 deg



(b) 迎え角 = -5°
(b) Attack angle = 5 deg

図9 $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ の時間変動（“D05”）
Fig. 9 Fluctuations of $C_l \cdot C_d \cdot C_m$ (“D05”)

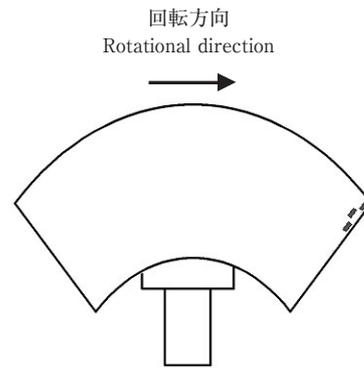


図10 3次元羽根に設置した小突起配置
Fig. 10 Setting position of small wires on the impeller

問題の解決のために、2次元渦法を用いてオリジナル翼形の非定常はく離特性の把握と、小突起を用いたはく離特性の改善の検討を行い、以下の結果を得た。

(1) オリジナル翼形の渦法解析結果から、実機で問題が起きる運転条件に対応する迎え角では、はく離による羽根面からの周期的な渦塊の放出により、実機換算で吸込水路の音響固有値と近い周波数の変動流体力を発生する可能性が明らかとなった。

(2) 渦法による解析結果から，オリジナル翼形の前縁近傍に小突起を取り付けることにより，渦の放出形態を変えて，変動流体力の変動量及び周波数を大幅に変更できることが明らかとなった。

以上の結果を基に，模型試験により，3次元羽根でも小突起の取り付けにより非定常はく離特性が改善されること，ポンプ性能には影響しないことを確認し，実機ポンプ羽根に小突起を取り付ける対策により，排水機場の振動問題は解決した。

6. 謝 辞

本問題の解決に当たり，横浜国立大学の亀本喬司教授，祝宝山助手（当時）には，脈動発生メカニズムの原因と

対策に関する多大なるご助言を頂き，また，渦法に関するご指導と多大なご支援を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 郭ほか，ポンプ水路系で発生した複雑な脈動と振動現象及びその対策（第1報，現地計測による現象の把握），エバラ時報，第206号，2005
- 2) Kamemoto, K. and Miyasaka, T., 1999, "Development of a Vortex and Heat Elements Method and its Application to Analysis of Unsteady Heat Transfer around a Circular Cylinder in as Uniform Flow", The 1st International Conference on Vortex Methods, Kobe, Japan
- 3) 江藤文宣，亀本喬司，渦法による一定の振幅角で回転振動する羽根回りの流れ数値シミュレーション，第11回数値流体力学シンポジウム講演論文集，1997，385-386

