

2 - 5 無注水型雨水ポンプの追跡調査

施設管理部 施設保全課 佐藤 隆宏

1. 調査概要

先行待機ポンプは、都市型洪水に見られる急激な水位上昇に対応可能なポンプとして認知され多くの納入実績をもつ。従来の注水型先行待機ポンプは水位が上昇する前から運転可能である反面、水中軸受等への冷却水設備が不可欠で、震災等による冷却水設備の故障を想定すると無注水化が望まれるものであった。そこで当局では、平成10年度から平成11年度にかけて、先行待機型雨水ポンプに適用できる無注水軸受の開発をテーマに当局とポンプメーカー3社で共同研究を行い、実用化に成功した。その技術を基に、平成12年度に新川ポンプ所、千住ポンプ所及び砂町水処理センター、平成13年度には桜橋ポンプ所、熊の木ポンプ所及び小松川ポンプ所に設置されている先行待機型雨水ポンプを対象に、無注水化に伴う改良工事を実施し、無注水型雨水ポンプを導入した。

本調査では、これらの導入された無注水型雨水ポンプの耐久性、信頼性を確認するための追跡調査を行うとともに、無注水型雨水ポンプの各無注水システムについて総合的な評価を行った。

2. 調査設備

2.1 ポンプ仕様

平成13年度、平成14年度に調査した対象設備は以下のとおりである。

表1 無注水システム調査対象設備

2.2 無注水システム方式

年 設 度 置	機 場	名 称 ・ 仕 様	無注水 方式	製造 メーカ
平 成 12 年 度	新川ポンプ所	立軸斜流先行待機型雨水ポンプ1号 1500×280m ³ /min×18m×1150kW	ドライ軸受方式 (特殊セラミクス方式)	A
	千住ポンプ所	立軸斜流先行待機型雨水ポンプ1号 1200×210m ³ /min×5.2m×250kW	回転油槽 方式	B
	砂町 水処理センター	立軸斜流先行待機型雨水ポンプ砂系8号 1800×420m ³ /min×20m×1850kW	ポンプ内循環 方式	C
平 成 13 年 度	桜橋ポンプ所	立軸斜流先行待機型雨水ポンプ6号 1350×220m ³ /min×6m×370kW	ドライ軸受方式 (PEEK 軸受方式)	D
	熊の木ポンプ所	立軸斜流先行待機型雨水ポンプ3号 1500×300m ³ /min×17m×1160kW	ドライ軸受方式 (特殊セラミクス方式)	A
	小松川ポンプ所	立軸斜流先行待機型雨水ポンプ5号 1200×185m ³ /min×8m×340kW	回転油槽 方式	B

現在、無注水軸受の方式は3方式あり、各方式の構造は以下のとおりである。

(1) ドライ軸受方式（単体方式）

1) PEEK 軸受方式

ポンプ水中軸受軸受部にカーボン繊維を含んだ特殊樹脂（PEEK 材）、軸受スリーブに特殊合金を使用した構造により、摺動面にカーボンが介在して、その自己潤滑性で低摩擦を実現した方式である。

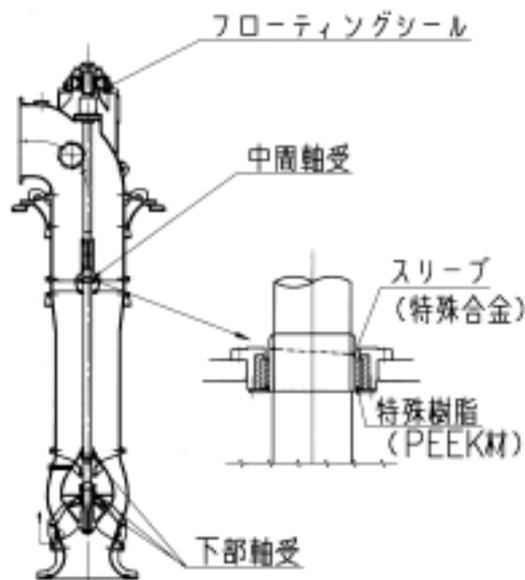


図1 PEEK 軸受方式構造図

2) 特殊セラミクス方式

ポンプ水中軸受軸受部にフッ素ゴムを介して特殊セラミクス（窒化ケイ素）、軸受スリーブに特殊合金を使用した構造により、耐摩耗性、耐熱衝撃性を高めた方式である。

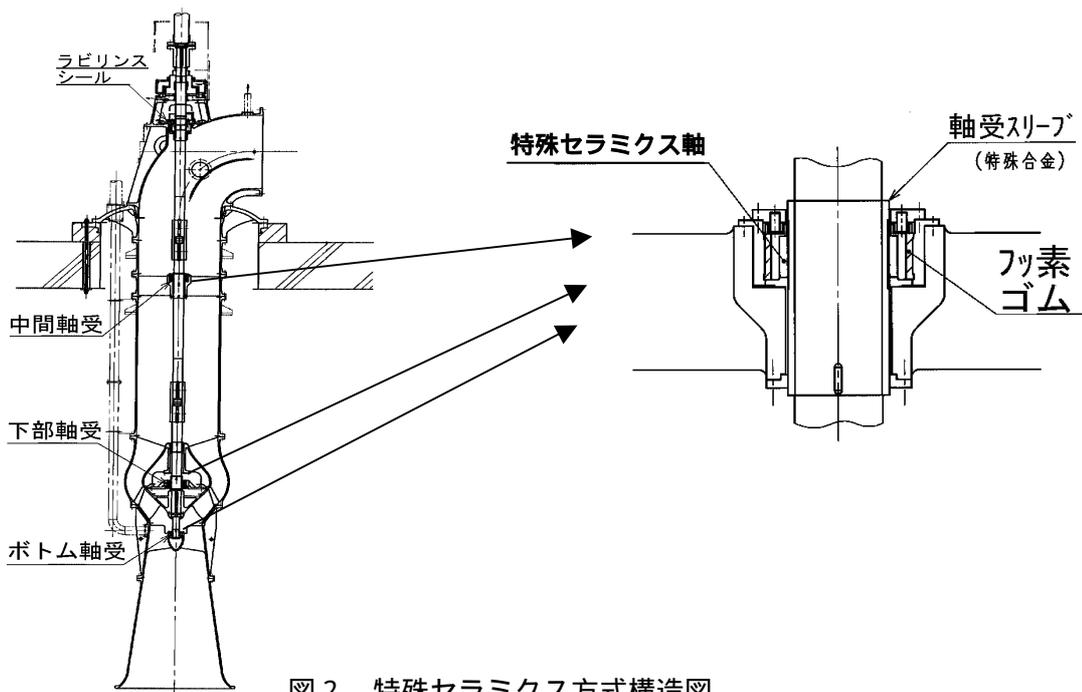


図2 特殊セラミクス方式構造図

(2) 回転油槽方式

ポンプ水中軸受部にセラミックス（炭化ケイ素）、軸受スリーブに超硬合金を使用した構造で、軸受を回転する油槽で囲み、発生熱を油に吸収させる方式である。

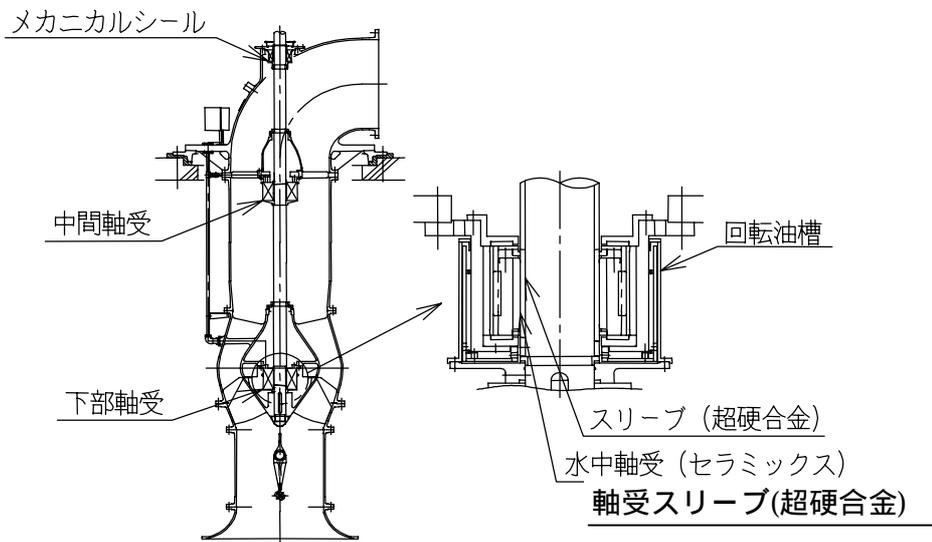


図3 回転油槽方式構造図

(3) ポンプ内循環方式

ポンプ水中軸受部を PTFE（テフロン）又はゴム軸受、伝熱保護管の上部と下部に軸封装置を設け、ポンプに付属する循環装置・自動調圧装置により潤滑液を循環・調圧する方式である。

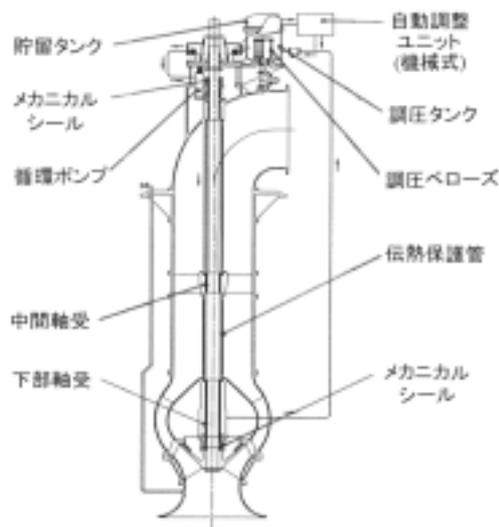


図4 ポンプ内循環方式構造図

3. 調査内容

- (1) 各無注水システム3方式について、各ポンプ所局職員による運転データ記録の収集と各ポンプメーカーによる先行待機型雨水ポンプの特徴である気中運転及び実際の排水運転時におけるデータ測定を実施した。
- (2) ポンプ水中軸受を対象に効果的な導入を図るため、無注水システム3方式（ドライ軸受方式、内部循環方式、回転油槽方式）について、機能性、経済性等の項目評価及び追跡調査結果を基に無注水システム総合評価を行った。

3.1 調査項目

(1) 無注水システム追跡調査

下記項目について、ポンプ所の日報、月報等からの運転・保守データ及び各メーカーによる実機運転でのデータの収集を行った。

1) 一般調査

実施日時、天候、気温、運転パターン（気中、気水混合、排水、エアロック）、揚水量、日常運転状況、日常点検状況

2) 実機運転調査

運転状態、電流、電圧、吐出圧、ポンプ井水位、回転速度、吐出弁開度、電動機軸受温度、室温、ポンプスラスト軸受、ポンプ上部・下部軸受温度、ポンプ振動、軸封装置表面温度・漏水状況

(2) 無注水システム総合評価

操作性、信頼性、保守性、故障要因、環境負荷、運転実績、適用範囲、改良範囲、コスト、省エネルギー、省スペースを比較評価項目とし、追跡調査結果を基に総合評価を行った。

3.2 現場調査期間

(1) 平成13年度調査委託：平成13年6月から平成13年11月

(2) 平成14年度調査委託：平成14年6月から平成14年12月

3.3 測定項目及び測定位置

(1) 実機運転調査時の各運転データの測定は、下記の方法で収集した。

なお、運転データの測定については、実排水運転及び当初開発目標である60分間の気中運転が可能であるかの実証を中心に行った。

1) ポンプ振動

スラスト軸受部に振動計を設置し、X、Y、Z方向の振動を測定した。

2) ポンプ軸受温度

ポンプ上部・下部に埋め込んだ熱電対によって、運転による温度上昇を計測した。

3) ポンプ回転数

ポンプ軸の1か所に反射テープを貼り付け、光学式センサにて、回転数を計測した。

4) 軸封装置表面温度

軸封装置表面に温度計を設置し、運転による温度上昇を計測した。

5) ポンプ吐出圧

排水運転時に現地設置の圧力計によりポンプ吐出圧を測定した。

6) 軸封装置漏水状況

排水運転時に漏水状況を目視確認した。

7) 電動機電圧・電流

運転管理用計器により電圧・電流を測定した。

8) 電動機軸受温度

運転管理用計器により電動機上部・下部の軸受温度を測定した。

9) 室温

電動機室に温度計を設置し、室温を測定した。

(2) 各運転データ測定位置

1) ドライ軸受方式

ア PEEK軸受方式

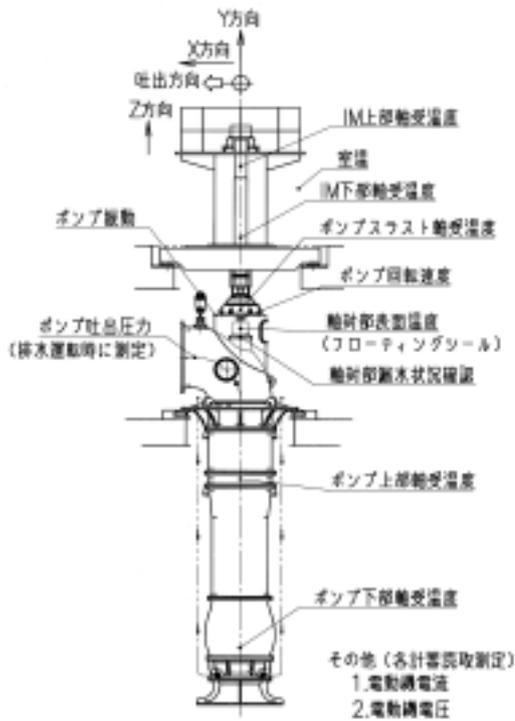


図5 測定位置(桜橋ポンプ所)

イ 特殊セラミクス方式

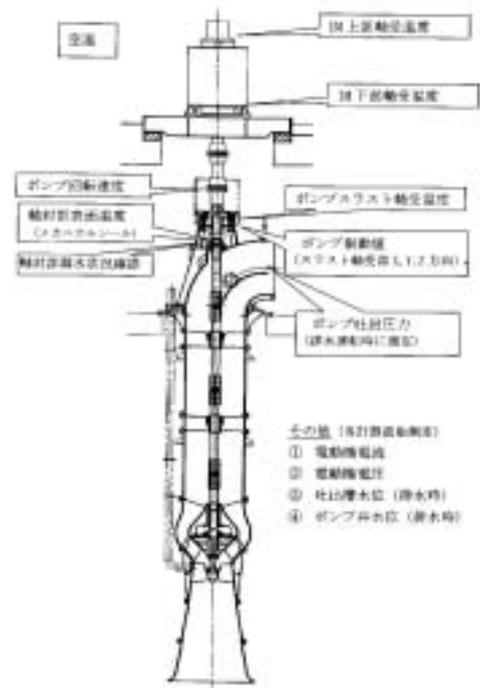


図6 測定位置(新川、熊の木ポンプ所)

2) 回転油槽方式

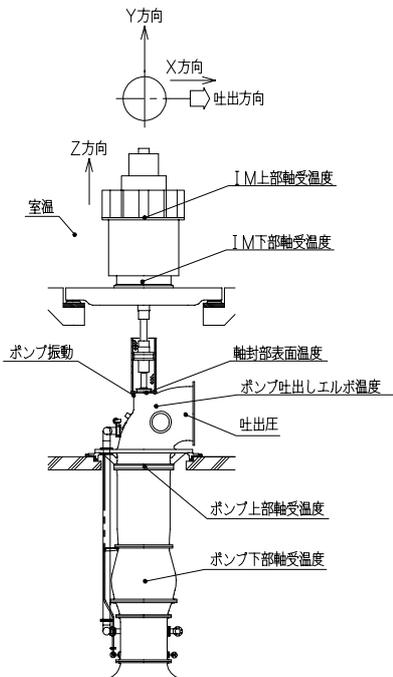


図7 測定位置(千住、小松川ポンプ所)

3) 内部循環方式

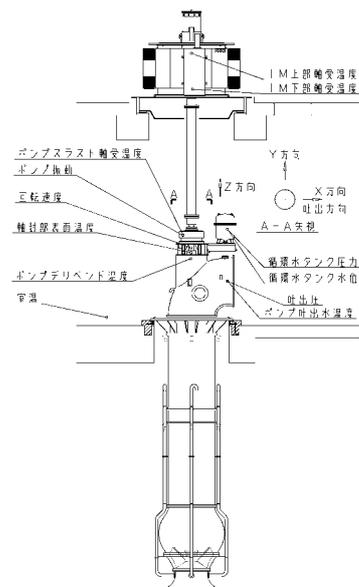


図8 測定位置(砂町水処理センター)

4. 結果及び考察

4.1 ドライ軸受方式（単体方式）

(1) PEEK 軸受方式・・・桜橋ポンプ所

気中運転を 60 分間行った各実運転調査時のポンプ上部・下部水中軸受温度特性を図 9 に、ポンプ振動各 3 方向の振動値測定結果を表 2 に示す。

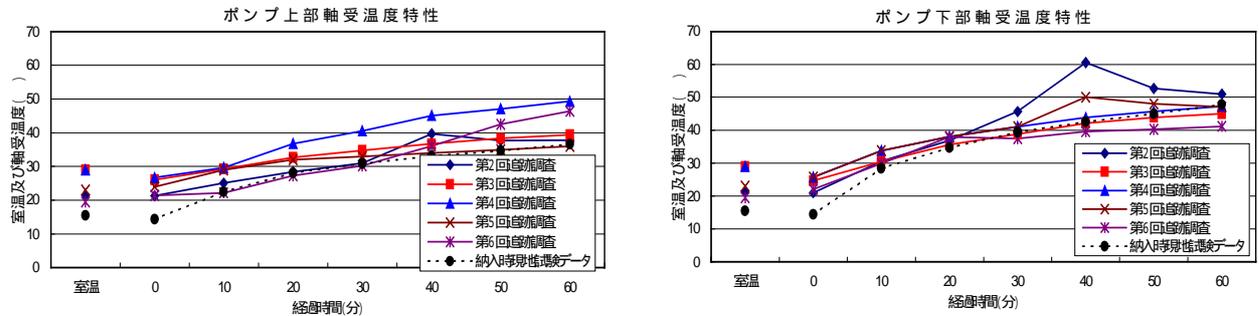


図 9 ポンプ上部・下部軸受温度特性（桜橋ポンプ所雨水ポンプ 6 号）

表 2 振動値測定結果(桜橋ポンプ所雨水ポンプ 6 号)

単位：μm

	測定場所	第 1 回 追跡調査	第 2 回 追跡調査	第 3 回 追跡調査	第 4 回 追跡調査	第 5 回 追跡調査	第 6 回 追跡調査
気中 運転	X-X 方向	ポンプ 総合診断 (異常なし)	1.5～2.5	1.5～2.0	2.8～4.5	2.0～2.5	1.5～3.0
	Y-Y 方向		2.0～3.5	2.5～3.5	2.5～5.0	3.0～4.0	2.0～3.5
	Z-Z 方向		0.7～1.5	1.0～2.5	4.4～5.5	2.0～2.0	1.0～1.5

気中運転 60 分後のポンプ水中軸受部温度は、上部軸受においては 49.3、下部軸受においては 51.0 となり、いずれも許容値 100 以下であった。

各水中軸受温度は、時間の経過とともに上昇していき、徐々に上昇度が鈍くなる傾向が見られ、この傾向から各水中軸受温度は時間の経過とともに許容値内で温度が一定となり安定すると推定される。

ポンプ振動値については、X-X 方向（吐出し方向）1.5～4.5 μm、Y-Y 方向（吐出し直角方向）2.0～5.0 μm、Z-Z 方向（垂直方向）0.7～5.5 μm となり、いずれも許容値の 80 μm 以下であった。

また、軸受温度、振動値以外の各計測データは、すべて許容値内であり、故障等の不具合を発生することはなかった。

以上の結果から、1 時間程度の気中運転は可能と判断できる。

PEEK 方式の軸受材質、構造は、軸受部に緩衝ゴムを介し特殊樹脂（PEEK 材）、軸受スリーブに特殊合金を採用しており、異物混入による衝撃荷重や気中運転から排水運移行時の急激な温度変化（急冷）に対して優れている。また、軸受構成部品についても汚水ポンプ等で使用してきた材質を基本ベースとしており、これまでの実績から耐久性、信頼性の問題はないと判断できる。

(2) 特殊セラミクス方式・・・新川ポンプ所、熊の木ポンプ所

平成13年度実施の新川ポンプ所追跡調査で得られた各軸受部温度特性を図10、平成14年度実施の熊の木ポンプ所追跡調査で得られた各軸受部温度特性を図11、ポンプ振動各3方向の振動値測定結果を表3に示す。

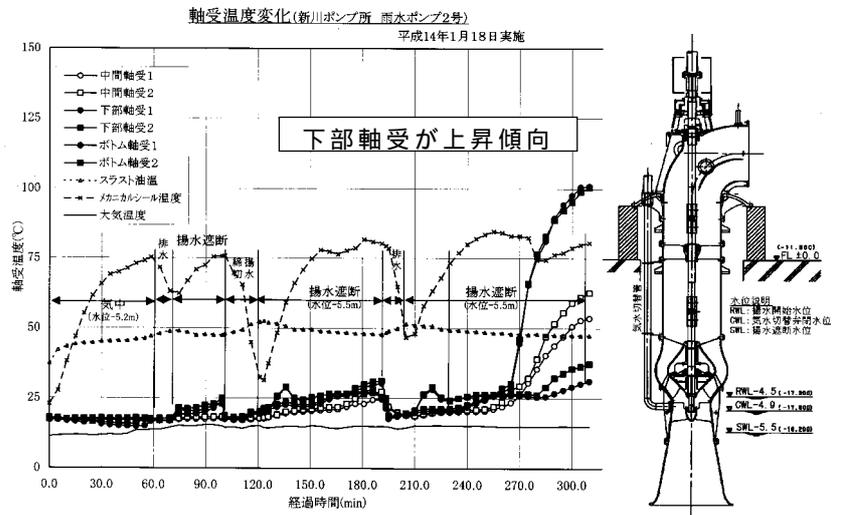


図10 無注水ポンプ各軸受部温度特性

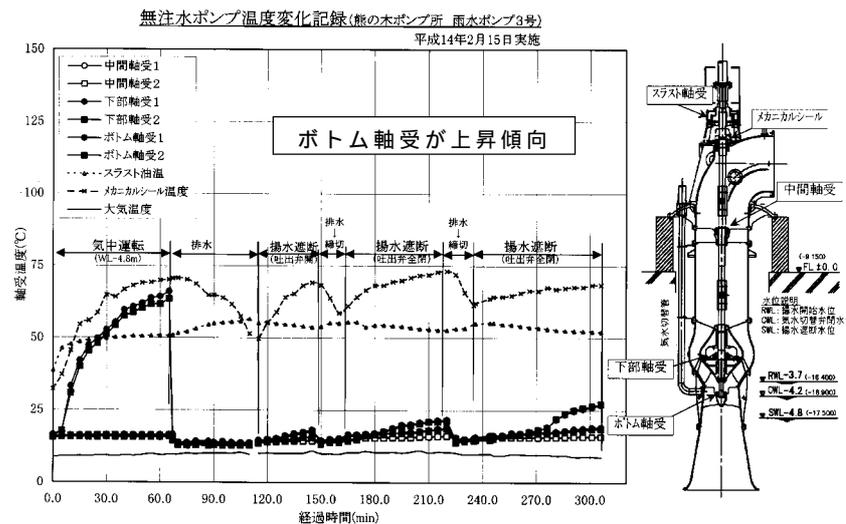


図11 無注水ポンプ各軸受部温度特性

表3 振動値測定結果(熊の木ポンプ所雨水ポンプ3号) 単位: μm

条件	項目	工場試験	追跡調査1 (総合診断)	追跡調査2	追跡調査3	追跡調査4	追跡調査5	追跡調査6
	場所	工場	現地	現地	現地	現地	現地	現地
気中 運転	X-X 方向	-	-	1~4	-	7~13	3~4	2~5
	Y-Y 方向	-	-	1~3	-	7~10	3~5	2~5
	Z-Z 方向	-	-	1~2	-	1~3	1	1
排水 運転	X-X 方向	20~100	ポンプ 総合診断	-	8~10	-	-	-
	Y-Y 方向	30~170	排水運転 (異常なし)	-	16~19	-	-	-
	Z-Z 方向	30~40		-	7~10	-	-	-

気中運転中の軸受温度の上昇については、潤滑剤を用いない完全ドライの滑り軸受のため、摺動面に付着した水滴・水膜が完全に乾燥するためだと考えられる。

各水中軸受温度の上昇するポイントは、両ポンプの測定データより、明らかに運転ごとに異なり、特定の水中軸受部が温度上昇する傾向を示さない。これは、気中運転、排水運転を繰り返すことで、各軸受部の摺動面に付着した水滴・水膜が、排水運転時の運転水位、水温、気温、湿度等の摺動条件が異なるために、運転ごとに各軸受部の乾燥する時間に差が生じて、気中運転ごとに温度上昇する軸受部が異なると考えられる。

温度上昇の範囲は各軸受部とも許容値である 150 以内であり、故障等の不具合を発生することはなかった。

ポンプ振動値については、X-X 方向(吐出し方向)1~13 μm 、Y-Y 方向(吐出し直角方向)1~10 μm 、Z-Z 方向(垂直方向)1~3 μm となり、いずれも許容値の 80 μm 以下であった。

また、軸受温度、振動値以外の各計測データは、すべて許容値内であり、故障等の不具合を発生することはなかった。

以上の結果及び無注水型ポンプ共同研究における試験データから、1 時間程度の気中運転は可能と判断できる。

特殊セラミクス方式の軸受材質、構造は、軸受部に緩衝ゴムを介し特殊セラミクス(窒化ケイ素)、軸受スリーブに特殊超硬合金(W2C)を採用しており、溶液中のスラリーによる摩耗や異物混入による衝撃荷重に対し優れている。また、軸受構成部品についても汚水ポンプ等で使用してきた材質をベースとしており、これまでの実績から耐久性、信頼性の問題はないと判断できる。

4.2 回転油槽方式・・・千住ポンプ所、小松川ポンプ所

気中運転を 60 分間行った各実運転調査時のポンプ上部・下部水中軸受温度特性を図 1 2 に、ポンプ振動各 3 方向の振動特性を図 1 3 に示す。

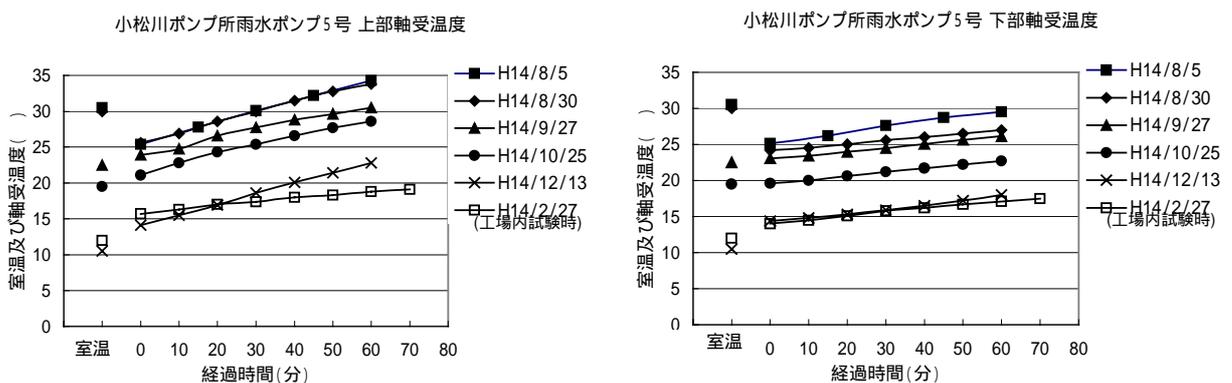


図 1 2 ポンプ上部・下部水中軸受温度特性(小松川ポンプ所雨水ポンプ 5 号)

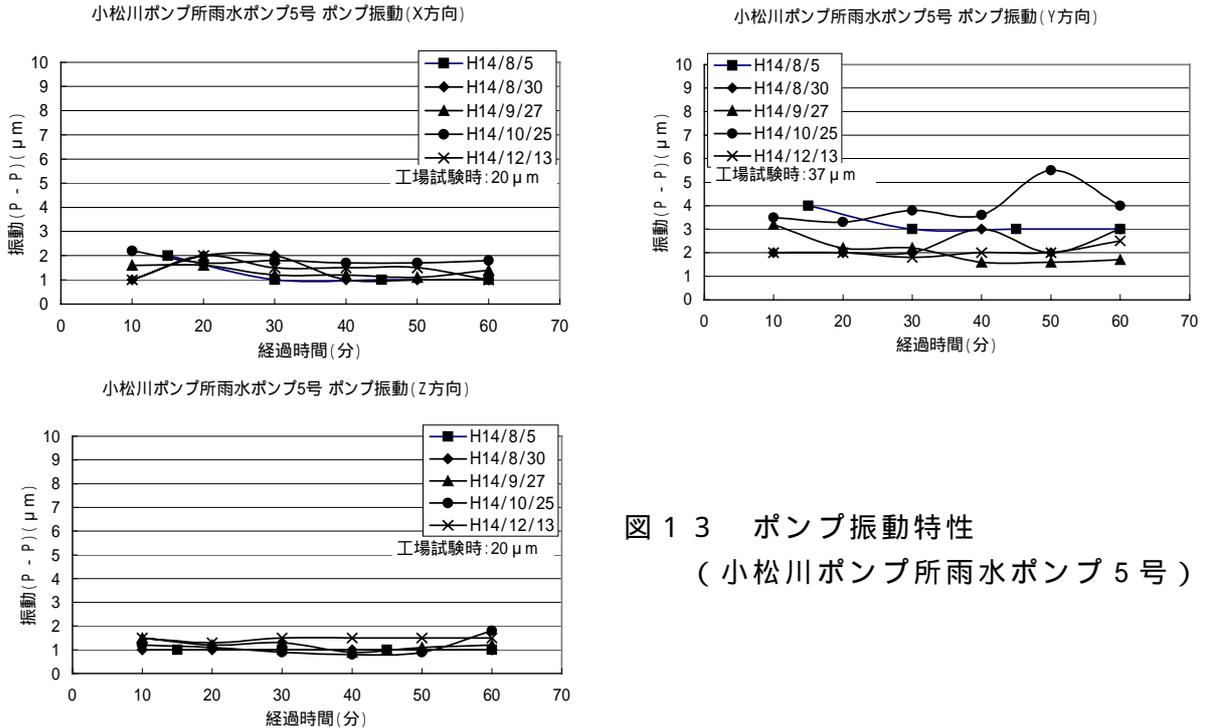


図 1 3 ポンプ振動特性
(小松川ポンプ所雨水ポンプ5号)

気中運転 60 分後のポンプ水中軸受温度の上昇は最大で約 9℃、最高温度は約 34℃で、判定値 50℃（軽故障警報値、許容値は 100℃）以下であり安定している。

ポンプ水中軸受温度の室温に対する相対値については、室温が高いほど軸受温度は高くなるが、温度上昇傾向は室温に作用されず、各室温について急激な温度上昇は見られず安定しており、ほぼ同傾向である。平成 13 年度の千住ポンプ所雨水ポンプ 1 号追跡調査も温度特性は同傾向を示しており、このことから、室温が 40℃となっても、気中運転 60 分後のポンプ水中軸受温度は判定値である 50℃（許容値は 100℃）を超えることはないと推定できる。

ポンプ振動については、X-X 方向（吐出し方向）1～2.2 μm、Y-Y 方向（吐出し直角方向）1～5.5 μm、Z-Z 方向（垂直方向）1～1.5 μm であり、各振動ともに許容値である 80 μm 以下であった。10 月 25 日の Y-Y 方向のポンプ振動値が最大で 5.5 μm であるが、正常なばらつきの範囲内であり問題ないと判断できる。

また、軸受温度、振動値以外の各計測データは、すべて許容値内であり、故障等の不具合を発生することはなかった。

以上の結果及び平成 13 年度千住ポンプ所追跡調査の結果から、1 時間程度の気中運転は可能と判断できる。

回転油槽方式は、従来技術であるセラミクス軸受を回転油槽内に設置し、気中運転時にドライ摺動としない構造としている。よって、軸受面圧、水質に関しては、従来型のセラミクス軸受を使用しているポンプと同じ軸受面圧 1MPa（水質は汚水）まで対応でき、周速に関しては、共同研究結果より 5m/s まで対応できる。

軸受の耐久性については、回転油槽方式の軸受材質、構造は、軸受部にセラミクス、軸受スリーブに超合金を採用しており、ポンプ揚水時におけるスラリー等による摩耗には優れている。また、軸受構成部品についても現在まで汚水ポンプ等で使用してきた材質で

あり、これまでの実績から耐久性、信頼性の問題はないと判断できる。本軸受に使用している特殊潤滑油については、科学的に不活性で安定した潤滑油であり、定期的に潤滑油の補充をすれば良い。

4.3 内部循環方式・・・砂町水処理センター

平成 11 年度の共同研究で実施したフィールドテスト及び平成 13 年度追跡調査で計測した振動、温度データを図 1 4 に示す。

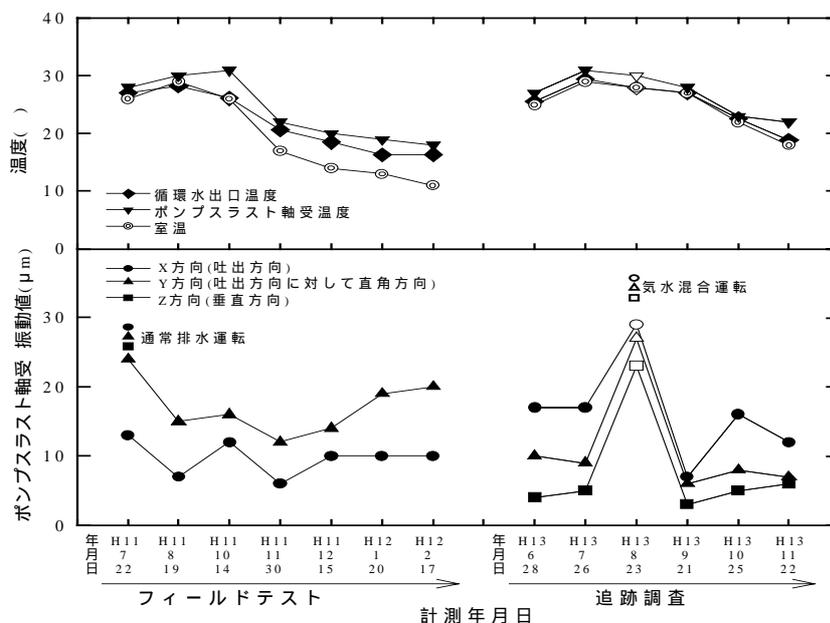


図 1 4 ポンプ振動、温度特性（砂町水処理センター雨水ポンプ 8 号）

ポンプ循環水の温度については、気中運転 113 分での温度上昇が最大で 3℃、最高温度は 30℃で、スラスト軸受の温度についても、温度上昇は最大で 19℃、最高温度は 43℃で、許容値である 80℃以下であった。

ポンプ振動については、気中運転において、X-X 方向（吐出し方向）10～60 μm、Y-Y 方向（吐出し直角方向）20～70 μm、Z-Z 方向（垂直方向）3～30 μm であり、許容値である 80 μm 以下であった。

また、軸受温度、振動値以外の各計測データは、すべて許容値内であり、故障等の不具合を発生することはなかった。

以上の試験データから、1 時間程度の気中運転は可能と判断できる。

内部循環方式は、ポンプ単体で循環水を閉ループで内部循環しているため、循環水水質の悪化は軸受部に悪影響を与える。よって、本方式の信頼性を確認するために、循環水水質の変化を調査した。表 4 に循環水水質分析の結果を示す。

表 4 循環水水質分析結果（砂町水処理センター雨水ポンプ 8 号）

調査日時	透視度(度)	濁度(度)	スラリー(ppm)	一般細菌数(個/mL)
平成 13 年 5 月 28 日	38	8	170	2.0×10^5
平成 13 年 11 月 26 日	50 以上	4	150	2.1×10^4

水質分析の結果から、循環水質は、濁りや腐食などはなく安定していることが確認され

た。これは、調圧装置による調圧作用により、循環水圧力とポンプ揚程が等しくなり、揚水が循環水に混入することがないためである。また、循環水は空気に触れることなく密封されており、循環中に軸受部の発熱による低温滅菌作用により雑菌が殺菌されて、フィルターによりスラリーが除去されたためと考えられる。

約半年の運転期間中、貯留タンクに循環水の補給はなかった。これは、調圧装置の効果により循環水の圧力が自動的にポンプ吐出圧に追従するため、下部メカニカルシールのシール差圧が無くなり、ポンプ揚水の混入または冷却水の漏洩が制限されたためと考えられる。

耐久性については、軸受材質に従来から実績がある PTFE を採用しており、また、ポンプ内部循環水に外部からスラリー等の混入がないため摩耗の点で優れている。メカニカルシール構成部品についても現在まで汚水ポンプ等で使用してきた材質であり、耐久性信頼性の問題はないと判断できる。

5．無注水システム総合評価

5．1 無注水システム 3 方式の各項目比較評価

各評価項目について、追跡調査の結果、運転実績を基に各無注水システム 3 方式の評価を行った。

各評価項目の考察を以下に示す。

(1) 操作性

3 方式ともに操作性については、従来の注水型先行待機ポンプと同様に遠方監視、制御にて運転可能なため、有意な差はない。

(2) 信頼性

接液による信頼性については、ドライ軸受方式は揚液に接するが、摩耗性、耐食性において、雨水ポンプとして特に問題はないため、他の 2 方式とほぼ同等である。

(3) 保守性

内部循環方式、回転油槽方式は、定期的に潤滑液（水又は油）を補給しなければならないが、ドライ軸受方式はその必要がないため、他の 2 方式と比べ優れている。

(4) 故障要因

内部循環方式は、ドライ軸受方式、回転油槽方式と比較して、部品点数及び補機が多いため、ドライ軸受方式、回転油槽方式より故障要因が多く、故障発生の確率が高くなる恐れがある。

(5) 環境負荷

3 方式ともに臭気、振動、騒音等の問題はないと考えられる。また、回転油槽方式で使用している潤滑油が漏洩した場合、周囲環境への影響が懸念されるが、使用している潤滑油が化学的に非常に安定かつ不活性な物質であるため、問題はないと考えられる。

(6) 実績

3方式ともに無注水型先行待機ポンプとして、運転実績があり、他地方自治体にも納入実績があり、その評価は定着してきている。

(7) 適用範囲

3方式ともに口径、全揚程等の適用範囲は、基本的に同一である。また、ドライ軸受方式は、揚液に接するため水質の影響を受ける懸念があるが、摩耗性、耐食性につい

ては無注水型先行待機ポンプとして特に問題はない。

(8) 既存ポンプへの改良範囲

3方式ともに製造メーカー工場での改良が必要となる。改良範囲は、基本的に無注水ポンプマニュアルによるが、詳細はポンプの構造によって異なり個別対応となり、有意な差はない。

(9) コスト

1) 改良工事

注水型先行待機ポンプからの改良工事に関しては、3方式とも製造メーカー工場での改良となり、工事費的には有意な差はない。

2) 維持管理コスト

維持管理コストについては、ドライ軸受方式の場合、注水型先行待機ポンプの運転に必要であった潤滑水が不要となり、わずかであるが安価となる。しかし、全体比率としては微少であり、注水型先行待機ポンプとほぼ同様と考えられる。内部循環方式は、注水型先行待機ポンプとほぼ同等、回転油槽方式は、潤滑油代として年間2万円程度の増であるが、僅かであるため有意な差はない。

(10) 省エネルギー

3方式ともにポンプ効率、ランニングコストへの影響に有意な差はないと考えられる。内部潤滑方式においては潤滑用ポンプの動力を必要とするものの、数kWと微少であるので無視できる。

(11) 省スペース

ドライ軸受方式、回転油槽方式は、水中軸受のみの改良である。内部循環方式については、水中軸受箇所の改良と軸封水循環装置が付属機器として追加されるが、設置スペースはポンプ投影面積内にある。よって、3方式ともに注水型先行待機ポンプと設置スペースは同様で有意な差はない。

5.1 総合評価

3方式ともに追跡調査の結果からも明らかなように、無注水ポンプシステムとして十分採用可能であり、運転実績からも十分に実用レベルの優れたシステムである。各評価項目はほぼ同等の評価であるが、保守性、故障要因について、構造がシンプルで故障要因が少なく、保守が容易等の結果から、ドライ軸受方式が総合評価ではより優れていると判断する。

6. まとめ及び今後の課題

6.1 まとめ

平成13年度の追跡調査(ドライ軸受方式、回転油槽方式、内部循環方式)、平成14年度の追跡調査(ドライ軸受方式2か所、回転油槽方式)の計6機の各無注水システムについて、特に異常は確認されず、各3方式で気中運転、排水運転にて良好な運転状態が得られ、実運転で問題がないことが確認された。

無注水システム3方式総合評価では、構造がシンプルで故障要因が少ない、保守が容易等の結果から、ドライ軸受が優れているという評価となった。

無注水システム3方式ともに、雨天時に震災が発生し、冷却水等が遮断されても確実な雨水排水が実現できるため、注水型先行待機ポンプと比較して信頼性に優れたシステムである。

6.2 今後の課題

無注水システム導入後の運用期間がまだ短く、雨水ポンプということもあり運転時間が少ないため、より長期運用した場合の耐久性や信頼性についての評価はまだできない。

今後、運転時間が増えた時期にポンプを引き上げ、軸受の摩耗、軸受構成部品の腐食、劣化等の調査を行い、健全性を確認していく必要がある。

また、電動機やスラスト軸受の無注水化は、大容量、高揚程のポンプについて、その発熱対策がまだ確立していないことから、すべてのポンプに今回の無注水技術を適用できるとはいえない。

水中軸受だけでなく、電動機、スラスト軸受、軸封部等の無水化を行うことにより、震災への対応が図れるとともに、設備の簡素化、信頼性の向上及びコストの低減に貢献できる。

今後は、大容量、高揚程ポンプにも採用可能な無注水システムを技術的に確立していく必要がある。

7. 協力会社

本調査は、(株)荏原製作所、(株)クボタ、(株)西島製作所及び(株)日立製作所のポンプメーカー各社のご協力により行なった。ここに改めて感謝の意を表する。