

農業用ポンプ設備への状態監視診断技術の
適用に関する研究

東京農工大学 大学院工学府

機械システム工学専攻

國枝 正

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 世界および日本の農業水利の現状	2
1.3 農業用ポンプ設備の特徴	4
1.3.1 揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備の区分	4
1.3.2 ポンプ設備の稼働時間	4
1.3.3 ポンプ設備の起動回数	7
1.4 関連する他分野の研究	8
1.4.1 機械設備の診断技術	8
1.4.2 他分野の潤滑診断技術	8
1.5 潤滑剤の評価による機能診断技術	10
1.6 本研究の目的	16
1.7 本論文の構成	17
第1章の参考文献	20
第2章 農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析	23
2.1 はじめに	24
2.2 研究対象の概要と調査方法	25
2.2.1 研究対象の概要	25
2.2.2 調査方法	25
2.3 調査結果	26
2.3.1 ポンプ設備の施設情報	26
2.3.1.1 ポンプの形式と原動機の種類	26
2.3.1.2 ポンプの諸元	28
2.3.1.3 ポンプ設備の設置年代	30
2.3.2 分解点検	31
2.3.3 不具合の内容	33
2.3.3.1 軸受の不具合	33

2.3.3.2 軸受以外の部品の不具合	33
2.3.4 機器の重大なトラブルとその分類	35
2.4 考察	37
2.4.1 分解点検の分析結果から見た維持管理上の特徴	37
2.4.2 部品の不具合の診断と重大なトラブルの防止対策	38
2.4.3 故障の地域的な分布	38
2.5 まとめ	40
第2章の参考文献	41
第3章 農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性	43
3.1 はじめに	44
3.2 潤滑剤の役割	44
3.3 対象設備と分析方法	46
3.3.1 対象とする設備と試料	46
3.3.2 分析方法	46
3.4 分析結果	48
3.4.1 潤滑油	48
3.4.2 グリース	50
3.5 考察	52
3.5.1 潤滑油の粘度の劣化傾向	52
3.5.2 グリースのちょう度の劣化傾向	52
3.5.3 管理基準値との比較に対する現状の考察	53
3.5.4 ポンプ設備の故障を防止する方策	53
3.6 まとめ	54
第3章の参考文献	55
第4章 実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験	57
4.1 はじめに	58
4.2 試験対象の概要	61
4.3 試験方法	63

4.3.1	アブレシブ摩耗試験	64
4.3.2	凝着摩耗試験	66
4.3.3	溶融摩耗試験	68
4.3.4	試験終了の判断基準とレプリカ作成	68
4.4	試験結果	70
4.1	アブレシブ摩耗試験	70
4.2	凝着摩耗試験	73
4.3	溶融摩耗試験	76
4.5	考察	80
4.5.1	金属摩耗粒子とその発生部位	80
4.5.1.1	アブレシブ摩耗粒子	80
4.5.1.2	凝着摩耗粒子	80
4.5.1.3	溶融摩耗粒子	81
4.5.2	劣化兆候検出のための監視項目	82
4.6	まとめ	83
	第4章の参考文献	84
第5章	農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題	87
	— メンテナンストライボロジー —	
5.1	はじめに	88
5.2	対象設備と診断方法	89
5.3	潤滑診断の結果	92
5.3.1	正常な状態	92
5.3.2	異物混入による劣化	97
5.3.3	潤滑不良による劣化	100
5.3.4	電食による劣化	103
5.3.5	分解作業時のヒューマンエラー	107
5.4	考察	111
5.4.1	潤滑診断による劣化状態の評価と対処方法	111
5.4.2	潤滑診断の周期と分析項目	112

5.4.3	オイルマネジメントの適用	113
5.4.4	管理基準値の設定方法	114
5.5	まとめ	116
	第5章の参考文献	117
第6章	農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム	119
6.1	はじめに	120
6.2	簡易診断の分析項目と管理基準値	121
6.3	携帯型測定装置の開発	123
6.3.1	潤滑油の劣化簡易測定装置	123
6.3.2	潤滑油の汚染度簡易測定装置	126
6.3.3	機器の摩耗簡易測定装置	128
6.4	携帯型測定装置の性能評価	130
6.5	携帯型測定装置を用いた新たな機能診断システム	132
6.6	まとめ	134
	第6章の参考文献	135
第7章	結論	137
謝辞		141

第1章 序論

1.1 研究の背景

農業水利施設は、我が国の水田稲作の発展とともに逐次造成されてきた資産である。貯水池や河川などの水源から用水が取水された後、幹線水路、分水工、支線水路などから構成される農業水利施設により水田に用水が供給され、さらに利用された用水は下流の排水路に流入し、河川水や地下水に還元される。我が国の稲作は、紀元前3世紀頃から始まったといわれている。登呂遺跡にみられるように、弥生時代（紀元前2世紀～西暦2世紀）になって、ようやく小河川などからの小規模な水路工事が行われるようになった。戦国時代の築城や鉱山開発により土木技術の発達は著しく、その技術が沖積地や洪積台地の新田開発を可能にした。さらに江戸時代になってからの幕府や各大名による新田開発により、河川下流沖積平野の農業水利施設は江戸中期までに形成されていた^[101]。

大戦直後に行われた農地改革が一段落した昭和24年（1949年）に土地改良法が制定されるなど、現在の農業水利施設の造成や管理などの事業は法制度に基づいて実施されている。これらの事業は国民への安定的な食料供給を目的とし、農業施策の中の生産対策と両輪をなす構造対策の根幹であり、農業生産性の向上などを目指す社会資本の整備がその基本にある^[102]。

このように農業水利施設は、我が国の食料生産に不可欠な基本インフラである。なかでも、基幹的な農業用ポンプ場は全国に2,887箇所（平成24年3月末時点）あり、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設になっている。しかしながら、これらの施設の多くは戦後の食料増産の時代や高度成長期に整備されていることから、標準耐用年数を超過したポンプ場が年々増加し、超過割合は施設数ベースで67.5%となっている^[103]。したがって、今後、膨大な数のポンプ場を一斉に更新しなければならない事態が発生することが懸念される。

また、ポンプ設備の突発的な故障を防ぐためには、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する必要がある。さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断することによって補修・改修の優先順位を決定するなど、計画的な維持管理を行うことも必要である。現在、農業用ポンプ設備の機能診断は、主として、土地改良区などの施設管理者による日常点検や、農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ポンプ設備）」^[104]に基づいた数年に1

回程度の定期的な点検の結果に基づいて実施されている。しかし、これらの点検は目視や触診・聴診が中心となり、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が少ないことから、劣化がある程度進行しなければ機能診断の必要性を把握できないなどの問題がある。そのため、一定の年数が経過すれば不具合が生じていない部品の交換を余儀なくされるなど維持管理の非効率化や、突発的な故障が生じた時点で高額な分解整備費用を施設管理者が負担しなければならない事態を招いている。

一方、農業用ポンプ設備については、約70箇所の国営造成施設の補修記録の傾向を分析した報告^[105]や、特定の地区を対象にポンプの突発的な運転停止を発生させる要因の変動特性を分析した報告^[106]などがあるが、全国的な調査に基づきポンプ設備の劣化の進行形態を分析する研究は十分になされているとはいえない状況にある。

これらのことから、近年、農業用ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤を採取・分析し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受など回転機械の摩耗状態を把握する機能診断技術（以下、「潤滑診断」という）が報告されている^[107~110]。しかし、農業用ポンプ設備における潤滑診断は最近始められたばかりで潤滑剤の分析データなどの情報が少ないことから、農業水利施設の機能診断技術として国の基準などに位置付けられておらず、管理基準値は設定されていないのが現状である。

1.2 世界および日本の農業水利の現状

世界の五大灌漑国は面積でいうと、中国、インド、米国、ロシア、パキスタンである。ただし、**Fig. 1-1**に示すように、主な国の耕地率と灌漑率をプロットすると、米国とロシアは原点に近いところにあり、中国と日本を含む東アジアの灌漑率が最も高く、東南アジア、南アジアと続いている。乾燥した中近東地域の灌漑率は高いが国土の限られたところで農業が営まれており、ヨーロッパ諸国では無灌漑農業が行われている。このように、現在では、アジアに農業水利施設が多いことがわかる^[111]。

1960年代以前は、稲作を中心としたアジアでは、水の制御とともに環境への適応型稲作が行われ数千品種の稲が栽培されていた。ところが、1960年代半ばに、フィリピンの国際稲研究所（IRRI : International Rice Research Institute）が育種に成功した高収量品種（IR8）の急速な普及に端を発したいわゆる「緑の革命」を契機として、環境適応型稲作は急速に環境

形成型技術に取って代わられた。この稲は、適切な水管理のもとで育てられると画期的な高収量をもたらした。このため、各国政府は海外からの資金協力を仰いで農業水利施設の整備を行い、1970～80年代に灌漑面積は急速に伸び、その大半は60年代以降に建設されたものである^[112]。

一方、日本では、稲作はもとより農業水利施設の整備を中心とした環境形成型技術である。前節で述べたとおり、農業水利施設は稲作の発展とともに逐次造成されてきた歴史的資産というべきものであり、その大半は明治以前に築造されたものである。大戦後、食料増産のための緊急開拓などが進められるなかで、1949年（昭和24年）に土地改良法が制定され、50年代以降、ポンプ灌漑を行うなど日本は農業水利施設の高度化への取組をいち早く進めてきた。このような背景から、ポンプを利用した大型灌漑排水事業は日本の技術開発を中心として、アジアのみならず世界各地に広がっている状況にある。

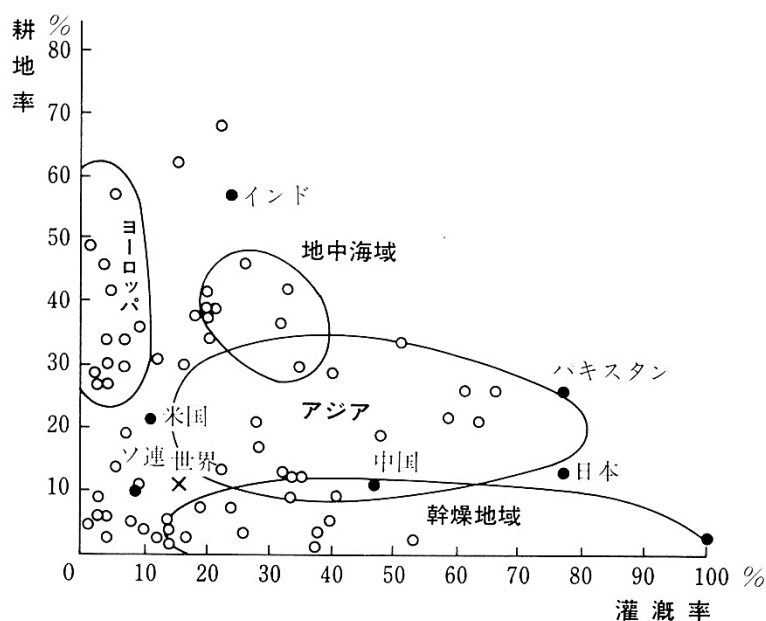


Fig. 1-1 世界の農地と灌漑の割合^[111]

Ratio of farmlands and irrigation in the world

農業用ポンプ設備の機能診断は、日本では、主として施設管理者による日常・定期点検記録をもとに目視・触診・聴診などの外観調査が実施されている。また、海外市場を持つ日本のポンプメーカーにおいては、専門業者による定期的な分解点検・整備を推奨している。この背景には、ポンプ設備は農業・河川・上下水道など土木系公共事業で使われることが大半であり、民間事業での需要が低いことから、ポンプ設備の機能診断技術の研究開発は遅れている状況にあると考えられる。このようなことから、農業用ポンプ設備の機能診断に関する海外文献を検索することは困難であり、農業用以外のポンプ設備では、Myhre らによる上下水道施設における振動法を用いた状態監視技術の報告^[13]を1件検索することができた。

1.3 農業用ポンプ設備の特徴

1.3.1 揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備の区分

農業用ポンプ場に設置される揚水ポンプ設備は、農業用水の需要に応じた水量を農地などの目的地まで効率的に送水するために設置され、配水や用水量調節などの機能を担っている。また、排水ポンプ設備は、地域内の水位を低下させることにより、農地などを湛水被害や洪水災害から守るために設置され、排水および排水量調節などの機能を担っている。ポンプ設備は、主ポンプ・原動機・動力伝達装置・補機設備などの機器類や部品の集合体であり、これらが各々の役割を果たすことにより機能を発揮している^[14]。

1.3.2 ポンプ設備の稼働時間

一般に、産業プラントや発電設備では、機械設備は1年間（8,760時間）停止することなく連続稼働している。一方、農業用ポンプ設備の稼働時間には次のような特徴がある。揚水ポンプは、農業用水が必要とされるかんがい期間（約半年間）に集中して稼働し送水を行う。排水ポンプ設備は、常時排水が必要とされる低平地では常時稼働を行うが、洪水時に備えて地域内の排水を行う排水機場では夏季に多く発生する洪水時にのみ稼働する。調査研究で得られた農業用ポンプ設備の稼働時間の事例では、揚水ポンプ設備（17基）の年稼働時間の平均は2,136時間（Fig. 1-2）、排水ポンプ設備（23基）の年稼働時間の平均は444時間（Fig. 1-3）であった。

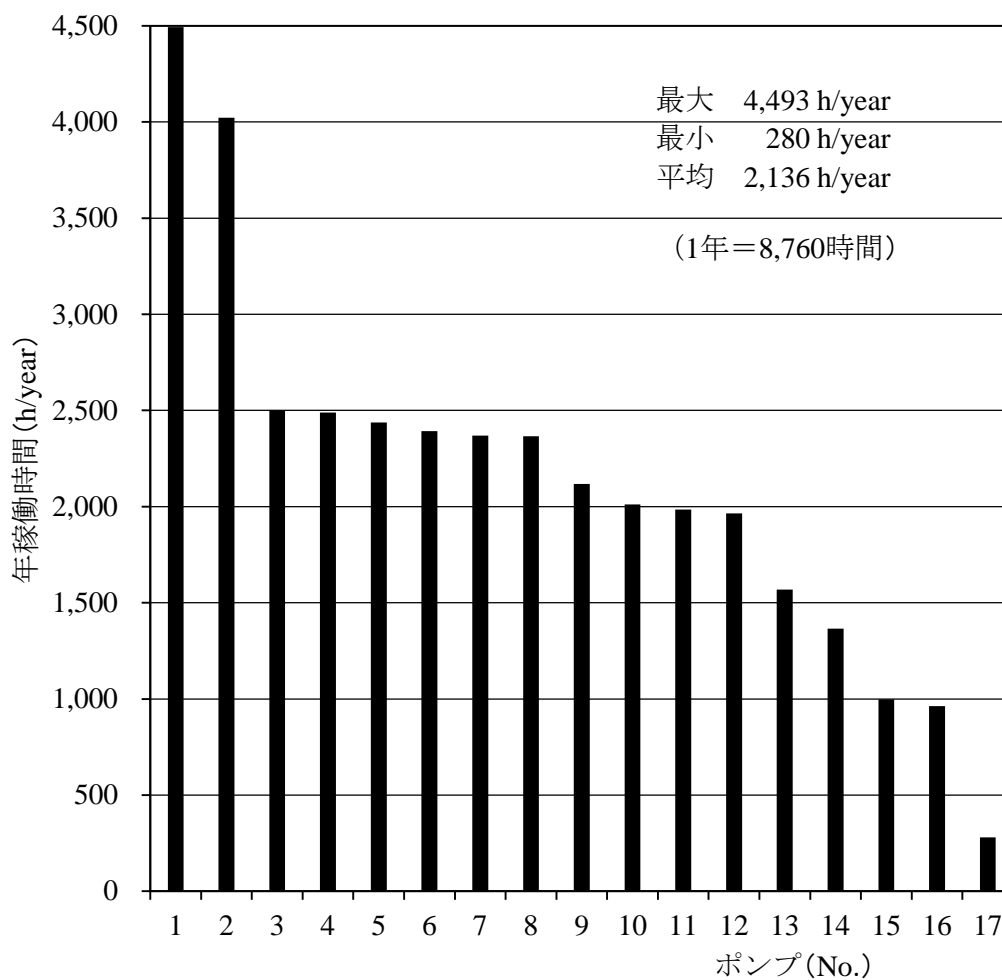


Fig. 1-2 農業用揚水ポンプの稼働実績

(関東における 17 基の調査事例)

Operation duration of irrigation-pump (17 samples)

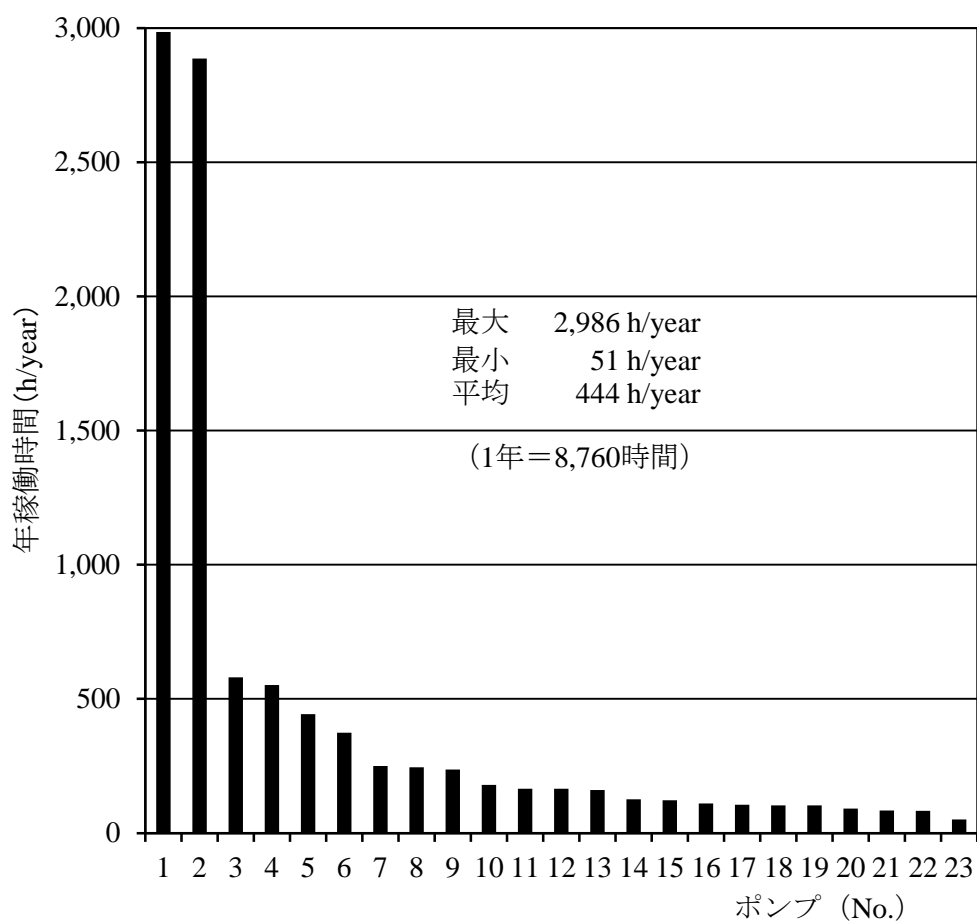


Fig. 1-3 農業用排水ポンプの稼働実績
 (関東・東海・近畿における 23 基の調査事例)
 Operation duration of drainage-pump (23 samples)

1.3.3 ポンプ設備の起動回数

2013年1月、地域の排水を担うA排水機場の4基の農業用ポンプ設備（チューブラポンプ、口径2,200mm）のうち1号機が、運転開始とともに減速機から異常音を発生して突然停止した。西尾ら^[14]は、減速機が損傷するに至った原因を分解して調査した結果、損傷した歯車表面の一部に経年劣化によるとみられるマイクロピッチングを電子顕微鏡で確認している。Table 1-1に、A排水機場の管理記録簿から算出したポンプ設備の年平均稼働時間と年平均起動回数を示す。1号機の起動回数は446回と、起動回数の少ない3号の32回と比べて約14倍と多くなっているが、1号機の稼働時間661時間は3号機の1,880時間と比較して35%と少なかった。

一般に、材料は繰り返し応力のもとでは、静的強度よりも低い応力によって破壊する。このような現象を疲労損傷という。また、機械の起動や停止時は境界潤滑領域と呼ばれ、油膜が極めて薄く摩擦は大きい状態である。回転数が増大するにつれて油膜は厚くなり摩擦も低下し、混合潤滑から液体潤滑（または弾性流体潤滑）へと移行していき、機械の運転時は摩擦の低い液体潤滑である。このことから、摩擦が大きい状態で、ポンプ設備の起動と停止を短い間隔で繰り返すことで起動時の高負荷による歯車の損傷が原因で、減速機が停止するとみられる。このような使われ方をしている農業用ポンプ設備は、同様な故障によるポンプ設備の突発的な停止が起きやすいと考えられることから、管理していくうえで損傷などの異常発生の兆候を早期に検出し、適正に対処する必要がある。

Table 1-1 A排水機場の稼働時間と起動回数

Operation duration and startup frequency of A-Pump-Station

号機	1号	2号	3号	4号
翼形式	固定翼	可動翼	可動翼	固定翼
年平均稼働時間 (h/year)	661	1,980	1,880	617
年平均起動回数 (回/year)	446	48	32	417

1.4 関連する他分野の研究

1.4.1 機械設備の診断技術

産業プラントにおけるメンテナンス方式は、一定期間毎に点検を実施する時間計画保全 (Time Based Maintenance : TBM) が従来からの主流であるが、近年では稼働している機械装置の状態を監視し、その情報に基づいて保守を行う状態監視保全 (Condition Based Maintenance : CBM) へと保全方式が移行しつつある。特に機械設備のメンテナンスの現場においては、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE (Acoustic Emission) 法、超音波法、油中摩耗粒子分析などがよく用いられている^[115, 116]。例えば、振動法には、回転体振動値 (振動加速度) を計測することにより異常の程度を判断する簡易診断法と、その計測結果に応じて異常の部位を特定し有効な対策を決定する精密診断法がある。温度法は、回転機械の温度上昇が軸受の焼付きなどの前兆現象であることを利用し、温度計や温度センサによる常時監視を行う方法である。潤滑油中の金属摩耗粒子を調べることで機械の状態を推測する方法としては、フェログラフィー法や SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program : 金属濃度分析) 法が代表的である^[117~119]。

潤滑診断は、機械設備の軸受、減速機、エンジンなどから潤滑油やグリースを採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、機械設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法である^[120]。振動や異音が発生する前に劣化の初期段階の兆候を検出できる高感度な分析手法であり、火力発電設備や船舶機器における潤滑診断技術が報告されているなど、産業分野の機械設備では適用が進みつつある診断技術である。

1.4.2 他分野の潤滑診断技術

(1) 火力発電設備

火力発電所では、平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災の影響により火力発電比率 (平成 26 年度, 87.8%)^[121]が大きくなるとともに電力の安定供給が求められ、コスト低減と効率的な保守対応の必要性が増している。そのため、法令で要求される定期検査期間以外には連続して運転することが求められ、一般的には 2 年間連続運転している状況にある^[122]。火力発電設備は主タービンや発電機の他に補機と呼ばれる数多くの回転機器から構成されており、日常巡視においては聴診棒を用いた異音検査や潤滑油の漏洩の有無調査など

により潤滑部の点検が行われている。また、ギヤや軸受などの潤滑部近傍の振動値や温度を計測し、その推移から潤滑状態の傾向監視を行っている。さらに、潤滑系統から採取した潤滑油を分析して、潤滑診断を実施している。電力各社は火力発電の高効率化ならびに高稼働率化に伴い発電設備の維持管理方法を見直し、保全方式を TBM から CBM へと移行しつつあり、回転機器の多くは潤滑部の摩耗劣化により故障に至るケースが多いことから、CBM の実施には潤滑診断の適用が必要とされている^[123]。

(2) 船舶機器

船舶の主推進軸装置、主機関および補機関、補機器には各種の軸受が使用されており、それらの損傷は自航不能や減速航行を余儀なくされ船舶運航に重大な影響を及ぼす。近年は、コンテナ物流の近代化や、気象・海象情報を用いた最適航路選定などによるジャストインタイム的な運行管理が求められており、従来は熟練乗組員の判断によっていた機関の異常診断も、各種センサを用いた機関・機器の常時監視へと移行してきている。また、これまで軸受は、船級協会規則により、一定間隔で分解してその健全性を確認することが義務づけられてきた。近年においては部品の状態を常時監視することで、分解点検の要否を判断する CBM の考え方が浸透してきている。主推進軸装置については、軸受の潤滑油中成分を監視してトレンドを把握するなどの状態監視システム（Propeller Shaft Condition Monitoring System : PSCM）を採用することにより、通常 5 年ごとに要求されるプロペラ軸抜き出しによる点検を行うことなく、10 年間同軸を無開放で運航される船舶が一般化してきている^[124]。

(3) 機械状態監視診断技術者資格

このように機械の状態を監視することが今日のメンテナンスの中核技術となっており、一般社団法人日本トライボロジー学会は日本機械学会と共同で、2009 年 10 月から ISO18436-4「機械状態監視診断技術者（トライボロジー）」の資格を認証している。受験者の主な所属産業分野は 2013 年 7 月現在の累計で、「エンジニアリング・メンテナンスサービス（39%）」、「電力・ガス（26%）」、「潤滑剤供給関連（14%）」、「石油・化学プラント（6%）」、「重工・機械（6%）」、「その他（9%）」となっている^[115]。

1.5 潤滑剤の評価による機能診断技術

潤滑剤は、その外観から分類すると、①液体潤滑剤（潤滑油）、②半固体潤滑剤（グリース）、③固体潤滑剤（二硫化モリブデン）の3種類に分類される。本論文では、機械設備の潤滑診断手法に用いる潤滑油とグリースを対象とする。

潤滑診断では、Table 1-2 に示すような潤滑剤の物理的性状、潤滑剤の汚染状態、機器の摩耗状態を把握することができる。ほとんどの分析項目はJIS規格に基づく指標であり、定量的なデータを得ることができる。

(1) 潤滑剤の物理的性状

物理的性状に係る診断を行う際には、「新油の値からの変化率」を用いて評価する。このため、潤滑診断においては、対象とする設備からの採油と同時に、使用している新油の採取・分析が必須である。なお、製油会社によって性状や添加剤に相違があるため、実際に使用している潤滑剤の名称、規格、交換時期を確認する。

Table 1-2 分析項目および仕様
Analysis items and specifications

潤滑油の 物理的性状	粘度 (40℃)	/ JIS K 2283
	水分	/ JIS K 2275
	酸価	/ JIS K 2501
	赤外線吸収スペクトル法 (IR)	/ JIS K 0117
グリースの 物理的性状	ちょう度	/ JIS K 2220
	滴点	/ JIS K 2220
潤滑剤の 汚染状態	計数汚染度	/ JIS B 9934 (NAS1638)
	質量汚染度	/ JIS B 9931 (NAS1638)
	光学顕微鏡写真	
機器の 摩耗状態	金属濃度分析 (SOAP 法)	/ ICP 発光分光分析
	フェログラフィー法 (定量フェログラフィー・分析フェログラフィー)	

(2) 潤滑剤の汚染状態

潤滑剤の汚染に関する評価指標として、全米航空宇宙工業会が制定した NAS 等級 (National Aerospace Standard) が一般的に用いられる。NAS 等級には、潤滑油 100mL 当たり存在する汚染粒子について、粒径別の個数で表す計数法 (Table 1-3) と重量で表す質量法 (Table 1-4) の規格が定められており、それぞれの等級で評価を行う^[125]。

Table 1-3 NAS 汚染度基準 (計数法, NAS1638)

NAS standard of pollution (Measurement method, NAS1638)

単位: 個/100mL

NAS 等級 \ 粒径	00	0	1	2	3	4	5
5~15 μ m	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
15~25 μ m	22	44	89	178	356	712	1,425
25~50 μ m	4	8	16	32	63	126	253
50~100 μ m	1	2	3	6	11	22	45
100 μ m以上	0	0	1	1	2	4	8

NAS 等級 \ 粒径	6	7	8	9	10	11	12
5~15 μ m	16,000	32,000	64,000	128,000	256,000	512,000	1,024,000
15~25 μ m	2,850	5,700	11,400	22,800	45,600	91,200	182,400
25~50 μ m	506	1,012	2,025	4,050	8,100	16,200	32,400
50~100 μ m	90	180	360	720	1,440	2,880	5,760
100 μ m以上	16	32	64	128	256	512	1,024

Table 1-4 NAS 汚染度基準 (質量法, NAS1638)

NAS standard of pollution (Mass method, NAS1638)

単位: mg/100mL

級	100	101	102	103	104	105	106	107	108
重量	0.02	0.05	0.10	0.30	0.50	0.70	1.00	2.00	4.00

(3) 機器の摩耗状態

二つの金属が接触してすべりや転がり運動をするとき、それらの固体の表面から次々と材料が除去されていく材料損失を、摩耗という。油中の金属摩耗粒子の元素と含有量を調べて摩耗粒子の発生部位を特定し、また、その量により摩耗の程度を把握することができる。

① 金属濃度分析 (SOAP 法)

SOAP 法 (Spectrometric Oil Analysis Program) は、油中に含まれる摩耗粒子を高周波プラズマ (ICP 法, Inductive Coupled Plasma) の中で燃焼させ、そのときに生じる金属特有のスペクトルを分析することによって摩耗粒子の元素と含有量を同定する方法である。

② フェログラフィー法

強力な磁力で油中の摩耗粒子を捕捉し、摩耗量の測定や粒子観測が容易にできるように大きさの順に配列する方法である。磁性のある摩耗粒子は磁界方向に鎖状に捕捉される。非鉄金属は鉄と凝着した状態で摩耗粒子が発生することが多いので磁力で捕捉されるが、磁界から受ける力が弱いので配列は規則的でない。摩耗粒子は、その発生原因により様々な特徴を有していることから、捕捉された摩耗粒子の形状や量、粒径、色などを分析することにより、軸受などの潤滑状態を推定することができる^[126]。

定量フェログラフィーは、摩耗粒子の量を測定し、その経時変化から異常摩耗の発生時期を予測する分析法である。「正常摩耗粒子は小さく、異常摩耗粒子は大きいことが多い」という現象を利用し、大摩耗粒子 (15 μm 以上) と小摩耗粒子 (5 μm 以下) に分け、式(1-1)を用いて異常摩耗指数 (Severity Index, 以下、「Is 値」という) を算出する。

$$Is \text{ 値} = (P_L + P_S) (P_L - P_S) = P_L^2 - P_S^2 \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

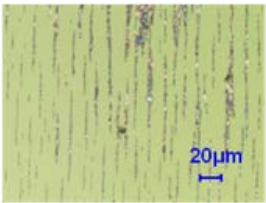
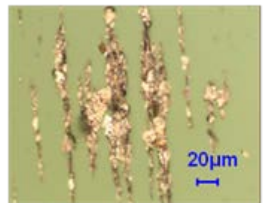
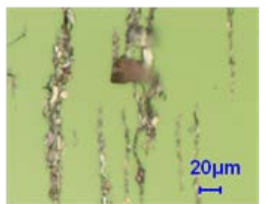
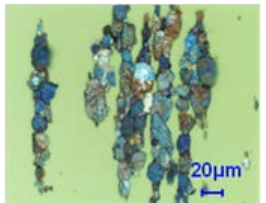
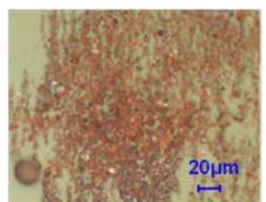
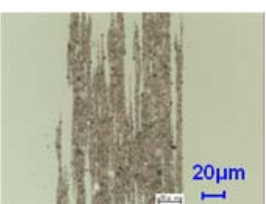
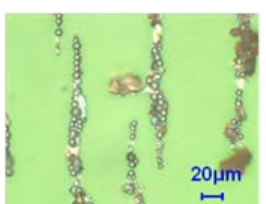
ここで、 P_L =大摩耗粒子 (15 μm 以上, 単位:%/mL), P_S =小摩耗粒子 (5 μm 以下, 単位:%/mL), $(P_L + P_S)$ =全摩耗量に相当, $(P_L - P_S)$ =摩耗の異常度である。異常摩耗が始まると大摩耗粒子が支配的になり Is 値が急上昇することから、異常の始まりを見つけることができる。

分析フェログラフィーは、ガラス基板上に配列した摩耗粒子を光学顕微鏡で観察することで、摺動面の潤滑状態について詳しい情報を得ることができる。正常に作動している機械の摩擦面から発生する摩耗粒子は、小さい粒子 (5 μm 以下) が支配的である。

主要な摩耗粒子形態の分類と発生原因を **Table 1-5** に例示する.

Table 1-5 主要な金属摩耗粒子形態の分類と発生原因

Classification and the origin of metal wear particles

分類	発生原因等	摩耗粒子例
正常摩耗粒子	機械が正常なすべり摩耗をしている際に発生する。 微細な薄片状の粒子。	
凝着摩耗粒子	接触面が摩擦によって互いに凝着し、固体表面からの脱落または移着によって不規則な表面が生じる。	
アブレシブ 摩耗粒子	硬い固体または硬い粒子の介在による削りまたはひっかき作用による摩耗。	
疲労摩耗粒子	摩擦面材料の微小体積が繰返し応力を受ける際に、疲労破壊によって生じる。	
酸化摩耗粒子	酸素または酸化性雰囲気と材料の化学反応によって生じる。 赤褐色で小さな板状の粒子。	
腐食摩耗粒子	材料と雰囲気との化学的または電氣的相互作用を伴い、表面が粗い小径の摩耗粒子。	
熔融摩耗粒子	接触する2物体間に電流が流れる際に、接触面間に起きる放電による摩耗。	

(4) 機器の劣化状態

機械設備は、電動機や減速機、軸受などの回転機械が組み合わされて稼働している。それら回転機械の機能劣化の大部分は、回転部の金属が摩耗することが原因で進行する。金属摩耗を防止するためには、回転部の滑動を良くする潤滑油やグリースが重要な役割を果たしているが、潤滑油やグリースが劣化すると回転機械の性能は低下する。また、潤滑油やグリースに異物が混入すると、それが摩擦面の金属を削る摩耗の原因となり、その状態が進行すると摩擦による発熱が生じる。発熱によって潤滑油やグリースの劣化が進行する。このような関係（性状、汚染、摩耗、機器の劣化）を **Fig. 1-4** に示す。これらの関係性をもとに、潤滑油やグリースを分析して得られた情報（性状、汚染、摩耗）を総合的に評価して、機器の劣化状態を診断する^[27]。

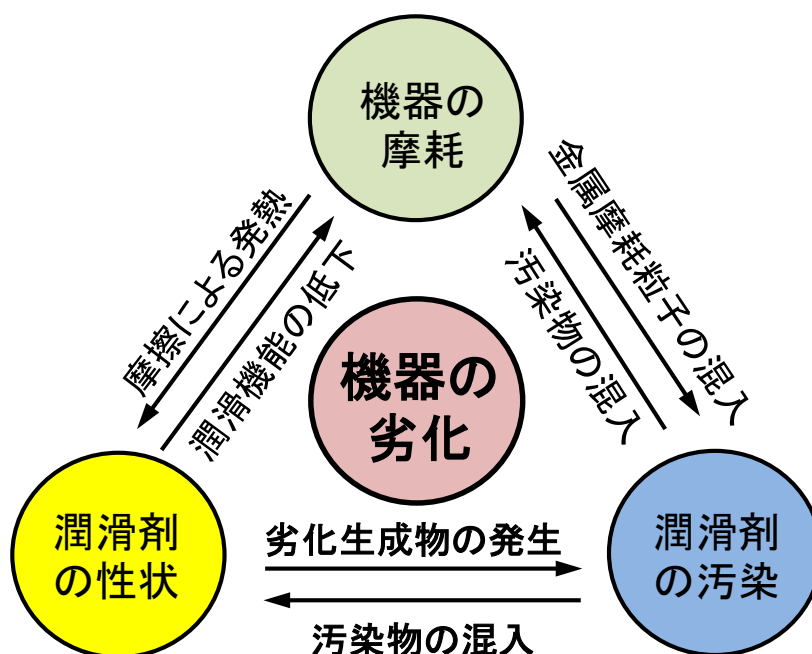


Fig. 1-4 潤滑剤の分析による機器の劣化診断

Degradation diagnosis of the machine by analysis of lubricant

1.6 本研究の目的

農業水利施設は、我が国の食料生産に不可欠な基本インフラである。なかでも農業用ポンプ設備は、農地ばかりでなく地域の用水や排水を担う重要な施設になっている。しかしながら、農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、日常・定期点検記録をもとに目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状況を把握することができない。また、海外市場を持つ日本のポンプメーカーにおいては、TBM方式で専門業者による分解点検・整備をこれまでも推奨している。ポンプ設備の突発的な故障を防ぐためには、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する必要がある。さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断することによって補修・改修の優先順位を決定するなど、計画的な維持管理を行うことも必要とされている。そのため、農業用ポンプ設備の維持管理においてもCBMを導入することは極めて有効であると考えられる。しかし、ポンプ設備は農業・河川・上下水道など土木系公共事業で使われることが大半であり、民間事業での需要が低いことから機能診断のための技術が確立されていない現状にある。

他方、産業プラントのメンテナンス方式は、稼働している機械設備の状態を監視し、その情報に基づいて保守を行うCBMへと保全方式が移行しつつある。機械設備の回転・摺動部から潤滑剤を採取・分析し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、軸受など回転機械の摩耗状態を把握する潤滑診断の適用が報告されている。その潤滑診断の技術を農業用ポンプ設備の維持管理に適用させるには、いくつかの課題がある。例えば2年間と長期に稼働し続ける火力発電設備と比較すると、農業用ポンプ設備の使用環境は大きく異なり、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返す状況にある。それらの課題解決のためには、農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断の適用について、早期に検証を進める必要がある。

これらのことを踏まえ、以下の研究課題が抽出された。

- (1) 農業用ポンプ設備を管理する担当者への維持管理や故障の原因などに関するアンケート結果をもとに、ポンプ設備の劣化の特徴を明らかにするとともに、劣化の進行を防ぐためのCBM適用について考察する。
- (2) 潤滑剤の物理的性状に着目し、それらの分析結果から農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性を明らかにする。

- (3) 実機を用いて、潤滑診断の劣化に対する応答を求めることを目的とし、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融現象を再現するための劣化促進試験を実施する。
- (4) 農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断を実施した事例に基づき適用時の留意点を示すとともに、潤滑診断の管理基準値の設定方法について考察する。
- (5) 農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断を実用化するための課題を整理し、ポンプ設備の機能診断について今後の展望を報告する。

本論文では、以上の研究課題の検討を通して、「農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用に関する研究」を行うことにより、ポンプ設備の故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する技術の適用を図り、さらに、設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断する技術を確立することを目的とする。

1.7 本論文の構成

本論文は全7章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章 序論

研究の背景と関連する他分野の研究をまとめることで、本研究の位置づけを行い、研究の目的について述べる。

第2章 農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析

農業用ポンプ場は、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設である。その多くが更新の時期を迎えているものの、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が不足している現状にある。そこで本章では、ポンプ設備の維持管理に関する実態や問題点を把握するために実施したアンケート調査に基づき、ポンプ設備の劣化の特徴の一つである軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであることを確認する。さらに、部品の劣化を定量的に診断することにより分解点検や補修の適切なタイミングの判断が可能となること示すとともに、状態監視保全の適用を図ることによりポンプ設備の劣化の進行を未然に防ぎ、突発的な故障を軽減する手法についての考え方

を述べる。

第3章 農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性

潤滑剤の劣化の要因には、酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因（水分、塵、異物混入など）によるものがある。潤滑油の粘度は劣化や異種油混入の有無などの判定に用いられ、また、グリースのちょう度は物理的な劣化度の評価に用いられる指標である。そこで本章では、研究調査で得られた潤滑剤の分析データの中から潤滑油の粘度およびグリースのちょう度に着目し、それらの分析結果から潤滑油やグリースの劣化特性について明らかにする。

第4章 実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験

機械設備では、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE（Acoustic Emission）法、超音波法などが試みられている。そこで本章では、実機を用いて摩擦面にアブレシブ（切削型）と凝着、溶融の3種類の摩耗を人為的に発生させ、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融の現象を再現する劣化促進試験を実施する。本試験では、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察して劣化状態を迅速に把握しながら、その時の振動加速度や温度の変化、潤滑油中に含まれる金属摩耗粒子の増加数の計測を行い、機械設備の劣化に対する応答特性を求める。さらに、ポンプ設備の損傷を起こす要因として主に想定される3種類の摩耗現象を確認し、油に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となることを報告する。

第5章 農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題

農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、日常・定期点検記録を基に目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状態を把握することができないことから、近年、潤滑剤の評価による機能診断の適用事例が報告されている。潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑油やグリースを採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法である。第4章の実機を用いた劣化促進試験では、油中に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出

する監視項目となることを報告した。しかし、その適用方法については、いまだ十分な評価がなされていないのが現状である。そこで、本章では、これまでに潤滑診断を実施して機器の劣化兆候を検出した研究事例を踏まえ、ポンプ設備の効率的かつ効果的な維持管理手法について報告するとともに、管理基準値の設定方法について考察する。

第6章 農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム

潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する機能診断技術である。農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、短い間隔で状態監視することが効果的であるが、潤滑診断の間隔を短くすることは分析業務を専門機関に依頼する必要があることから、時間とコストが多く掛かるという課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、分析項目を選定した一次スクリーニングを実施することが可能である。そこで本章では、分析項目を選定した簡易な診断方法を適用して、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システムについて述べる。

第7章 結論

本研究を通して得られた結論と知見をまとめて述べる。

第1章の参考文献

- [101] 國廣安彦：水利施設管理の理論と実務，地球社（1988），19-22.
- [102] 中 達雄，橋順二：農業水利施設のマネジメント工学，養賢堂（2010），186-193.
- [103] 農林水産省農村振興局（参照 2015.5.29）：農業水利施設におけるストックマネジメントの取組について，（オンライン）（2015），入手先<<http://www.maff.go.jp/j/nouisin/mizu/sutomane/pdf/torikumi.pdf>>
- [104] 農林水産省農村振興局整備部設計課（参照 2014.6.9）：農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ポンプ設備）」，（オンライン）（2013），入手先<<http://www.maff.go.jp/j/nouisin/mizu/sutomane/pdf/pump01.pdf>>
- [105] 山下 正：頭首工および用排水機場における補修の傾向分析，農業農村工学会誌，**79**(11)（2011），29-32.
- [106] 水間啓慈，國枝 正，森 丈久：農業用揚排水機場の整備補修記録に基づくポンプ停止要因分析，農業農村工学会論文集，**292**（2014），85-91.
- [107] 國枝 正，森 充広，水間啓慈：トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断，平成24年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集（2012），834-835.
- [108] 河淵鉄郎，國田欣悟，熊澤 明：トライボロジーを活用した機械設備の診断手法について，JAGREE 85（2013），44-50.
- [109] 萩原大輔：ポンプ施設における機能診断技術について，JAGREE 85（2013），58-62.
- [110] 國枝 正，水間啓慈，森 充広，安藤泰久：農業用ポンプ設備の潤滑油による機能診断における留意点，農業農村工学会誌，**82**(1)（2014），19-22.
- [111] 高谷好一編：東南アジアの自然，講座東南アジア学2，弘文堂（1990），189-214.
- [112] 農業土木学会編：農業土木ハンドブック（改訂6版），丸善（2000），835-871.
- [113] B. Myhre, S. Petersen, R. Ugarelli：Using wireless vibration monitoring to enable condition-based maintenance of rotating machinery in the water and wastewater industries, *Procedia Engineering*, **89**（2014），1397-1403.
- [114] 西尾光弘，國枝 正：七穂排水機場減速機損傷から学ぶ新たな排水機場診断，農業農村工学会誌，**84**(3)（2016），44-45.
- [115] 若林利明，間野大樹：軸受異常診断の現状と動向，トライボロジスト，**59**(6)（2014），323-329.
- [116] 本田知己：潤滑油劣化診断の現状と動向，トライボロジスト，**59**(6)（2014），330-336.

- [117] B. J. Roylance, G. Pocock : Wear studies through particle size distribution I - Application of the Weibull distribution to Ferrography -, *Wear*, **90**(1983), 113-136.
- [118] G. J. Wright, M. J. Neale : Wear-debris analysis as an integral component of machinery condition monitoring, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **87**(8) (1987), 253-260.
- [119] 日本トライボロジー学会 : トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 798-801.
- [120] Paula J. Dempsey, David G. Lewicki, Harry j. Decker : Investigation of gear and bearing fatigue damage using debris particle distributions, NASA/TM-2004-212883 (May 2004) , 1-11.
- [121] 電気事業連合会 : 電源別発電電力量構成比率, http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/pdf/kaiken_s1_20150522.pdf
- [122] 友安和行 : 石炭焼き火力発電所のトライボロジーの課題, *トライボロジスト*, **59**(3) (2014), 131-136.
- [123] 吉田直樹, 川畑雅彦 : 火力発電所の潤滑診断技術, *トライボロジスト*, **59**(3) (2014), 150-155.
- [124] 椎原裕美, 光清智洋, 森田孝宏 : 船舶機器のメンテナンスと状態監視, *トライボロジスト*, **59**(6) (2014), 337-344.
- [125] 日本トライボロジー学会編 : メンテナンストライボロジー (2006), 132-134.
- [126] 柴田正明 : フェログラフィについて, *潤滑*, **27** (7) (1982), 487-491.
- [127] 國枝 正 : トライボロジーを活用したポンプ設備の機能診断, *農村振興*, **752** (2012), 28-29.

第2章 農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析

農業用ポンプ場は、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設である。その多くが更新の時期を迎えているものの、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が不足している現状にある。そこで本章では、ポンプ設備の維持管理に関する実態や問題点を把握するために実施したアンケート調査に基づき、ポンプ設備の劣化の特徴の一つである軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであることを確認する。さらに、部品の劣化を定量的に診断することにより分解点検や補修の適切なタイミングの判断が可能となること示すとともに、状態監視保全の適用を図ることによりポンプ設備の劣化の進行を未然に防ぎ、突発的な故障を軽減する手法についての考え方を述べる。

2.1 はじめに

基幹的な農業用ポンプ場は全国に 2,800 箇所以上あり、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設になっている。しかし、標準耐用年数を超過したポンプ場が年々増加し、超過割合は施設数ベースで 67.5%となっている^[201]。したがって、今後、膨大な数のポンプ場の更新を一斉に行わなければならない事態が発生することが懸念される。

現在、農業用ポンプ設備の機能診断は、主として、土地改良区などの施設管理者による日常点検や、農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ポンプ設備）」^[202]に基づいた数年に 1 回程度の定期的な点検の結果に基づいて実施されている。しかし、これらの点検は目視や触診・聴診が中心となり、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が少ないことから、劣化がある程度進行しなければ機能診断の必要性を把握できないなどの問題がある。そのため、一定の年数が経過すれば不具合が生じていない部品の交換を余儀なくされるなど維持管理の非効率化や、突発的な故障が生じた時点で高額な分解整備費用を施設管理者が負担しなければならない事態を招いている。こうした事態を避けるためには、供用年数を目安とした TBM（Time Based Maintenance：時間計画保全）を基本とする現行の保全方式に加え、施設の状態を的確に診断し、実際に性能が低下している施設から効果的に保守・保全する管理手法を確立する必要がある。この保全方式は CBM（Condition Based Maintenance：状態監視保全）と呼ばれ、火力発電設備^[203]や船舶機器^[204]における潤滑診断技術が報告されているなど、産業分野の機械設備では適用が進みつつある方式である。

一方、農業用ポンプ設備については、約 70 箇所の国営造成施設の補修記録の傾向を分析した報告^[205]や、特定の地区を対象にポンプの突発的な運転停止を発生させる要因の変動特性を分析した報告^[206]などがあるが、全国的な調査に基づきポンプ設備の劣化の進行形態を分析する研究は十分になされているとはいえない状況にある。

そこで本章では、土地改良区などで農業用ポンプ設備を管理する担当者への維持管理や故障の原因などに関するアンケート結果をもとに、ポンプ設備

の劣化の特徴を明らかにするとともに、劣化の進行を未然に防ぐための CBM 適用の重要性について考察した。

2.2 研究対象の概要と調査方法

2.2.1 研究対象の概要

研究の対象とするポンプ場の抽出は各都道府県土地改良事業団体連合会に依頼し、口径 300mm 以上を目安として、供用開始後の経過年数（概ね 10 年，15 年，20 年，25 年，30 年以上）の異なる揚水機場を 3 箇所，並びに排水機場 3 箇所を各々選定した。東京都，神奈川県，富山県，和歌山県を除く 43 道府県の土地改良区などから合計 227 箇所のポンプ場についての回答があり，調査票の回収率は 80.5%であった。これは，平成 24 年 3 月現在，受益面積が 100ha 以上の基幹的な農業用ポンプ場の総数 2,887 箇所^[201]に対し，その約 8%に相当する。その内訳は，揚水機場が 107 箇所，揚水ポンプ設備は 234 基，排水機場は 120 箇所，排水ポンプ設備は 289 基であった。

2.2.2 調査方法

ポンプ設備の維持管理に関する実態や問題点などを把握するとともに，分解点検が行われた際の回転・摺動部における劣化状況に関するデータの収集を調査目的として，土地改良区などでポンプ場を管理する担当者に調査票への記入を求める形式でアンケート調査を実施した。この調査票は，①施設管理者および施設名称などの基本情報のほか，②ポンプ設備の型式や口径，揚程，設置年月などに関する情報，③分解点検に関する質問（**Table 2-1**），の構成とした。

なお，分解点検（定期整備）とは，ポンプ設備研究会^[207]によれば，主として機器を分解して行う整備で，設備の故障，疲労，劣化などの防止および低下した機能を復元させることを目的とし，機器の用途により異なるが 5～8 年に 1 回実施することが望ましく，メーカーの診断によって損傷，摩耗，その他異常部分の補修，部品の交換を行うものであるとしている。定期整備は TBM

Table 2-1 分解点検に関する質問項目

Questionnaire about disassemble-check	
質 問	選択または記述
分解点検の実績	有・無・不明
その概算費用	記述
分解点検時における「軸受部」の交換 不具合の内容を具体的に記入	有・無・不明 記述
分解点検時における「軸受部以外」の交換 不具合の内容を具体的に記入	有・無・不明 記述
ある一定の年数（あるいは運転時間） の経過に伴い分解点検を行う場合、 分解点検の周期を記入	記述
過去にあった機器の重大なトラブル 具体的な問題点について記入	有・無・不明 記述

であるが，ここでは分解点検の中に突発的な故障による緊急措置も含まれている。

2.3 調査結果

アンケート調査で得られた回答について分析した結果を以下に示す。

2.3.1 ポンプ設備の施設情報

2.3.1.1 ポンプの型式と原動機の種類

揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備のそれぞれについて，アンケート調査で得られたポンプの型式別割合を **Fig. 2-1** に，原動機の種類別割合を **Fig. 2-2** に示す。揚水ポンプ設備では，渦巻ポンプが 64.5% を占めており，原動機は全てに電動モータが使用されている。排水ポンプ設備では，斜流ポンプが 60.9% となっており，揚水ポンプで多く使用されている渦巻ポンプはほとんど使用されていない。排水ポンプ設備の原動機は，電動モータとディーゼルエンジンがそれぞれ半数となっている。

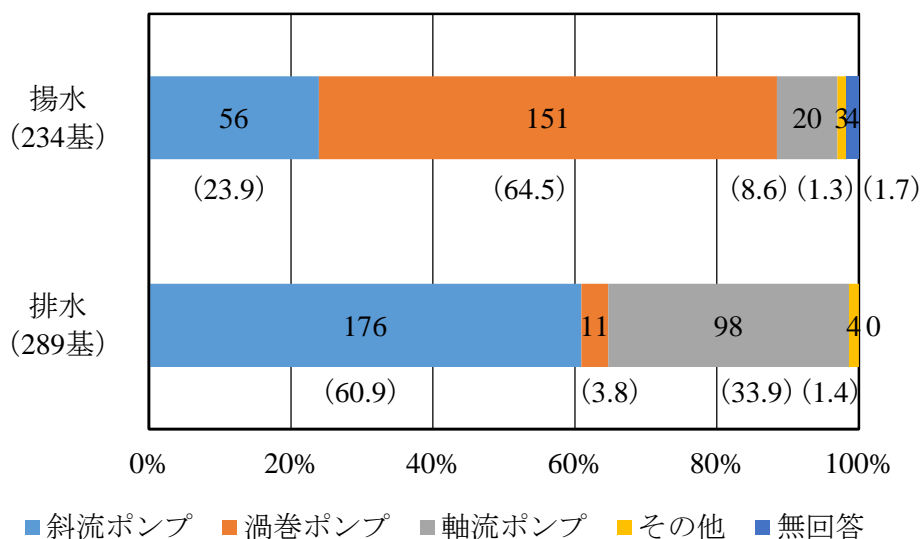


Fig. 2-1 ポンプの型式別割合
Percentage according to the model of pump

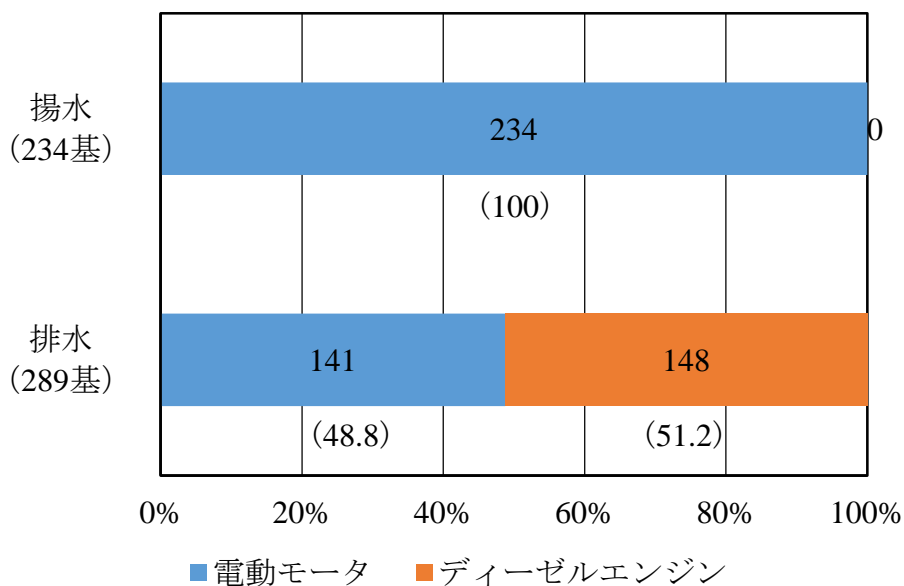


Fig. 2-2 原動機の種別割合
Percentage according to the kind of motor

2.3.1.2 ポンプの諸元

揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備について、口径別割合を **Fig. 2-3** に、1基当たりの揚程と吐出量の関係を **Fig. 2-4** に示す。

揚水ポンプは口径 500mm 未満が 60.7% を占め、1,000mm 以上は 3.4% とわずかであった。揚程は 10m 以下から 300m を超えるものまで種々であるが、吐出量は 1m³/s 未満が 85.1% を占めていた。最大口径は 1,400mm であり、吐出量 4.7m³/s、揚程 1.9m の軸流ポンプであった。

排水ポンプは口径 1,000mm 以上が 54.3% と大きな割合を占める一方、500mm 未満は 6.9% とわずかであった。揚程は全てのポンプが 10m 以下であり、吐出量は 1m³/s 以上が 78.7% を占めている。最大口径は 2,200mm であり、吐出量 10.3m³/s、揚程 2.8m の斜流ポンプであった。

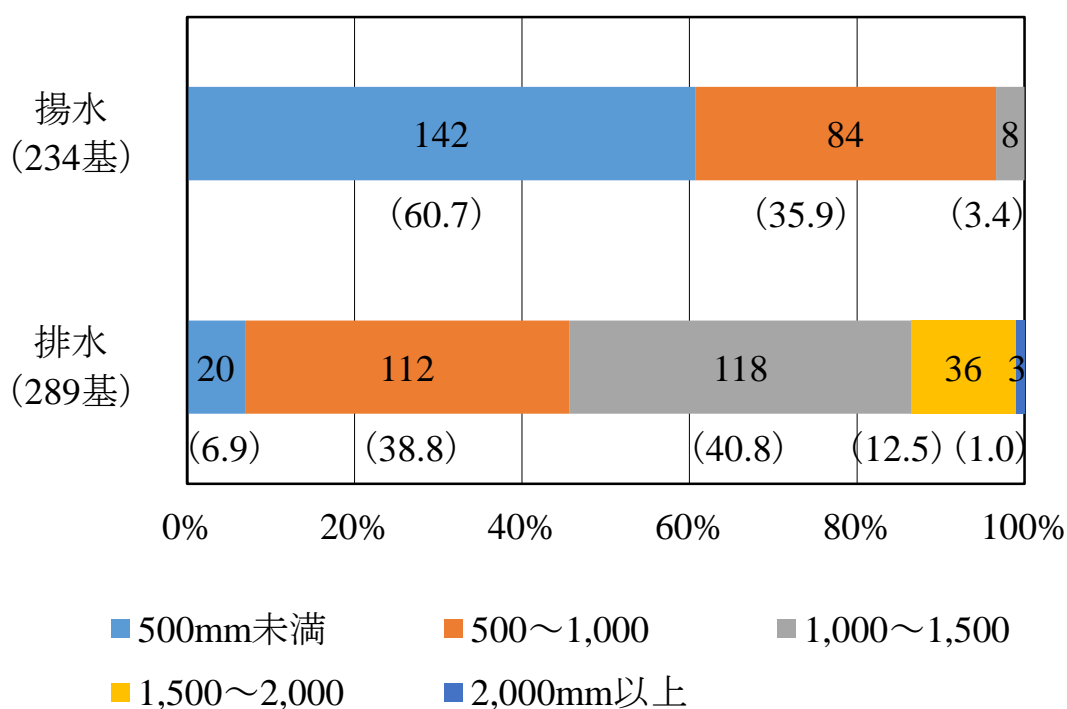
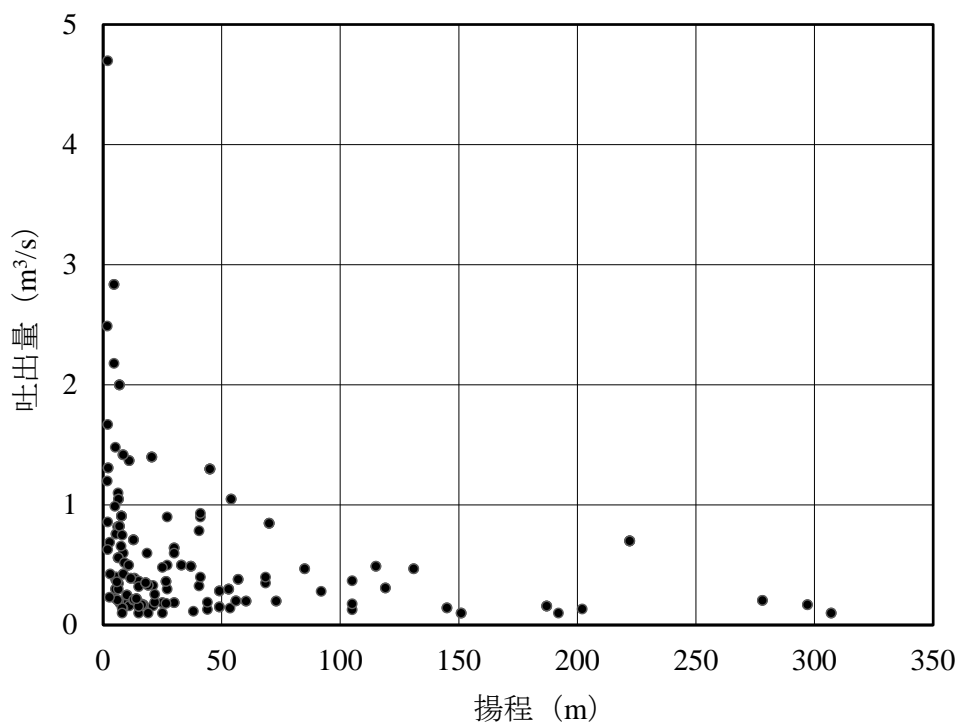
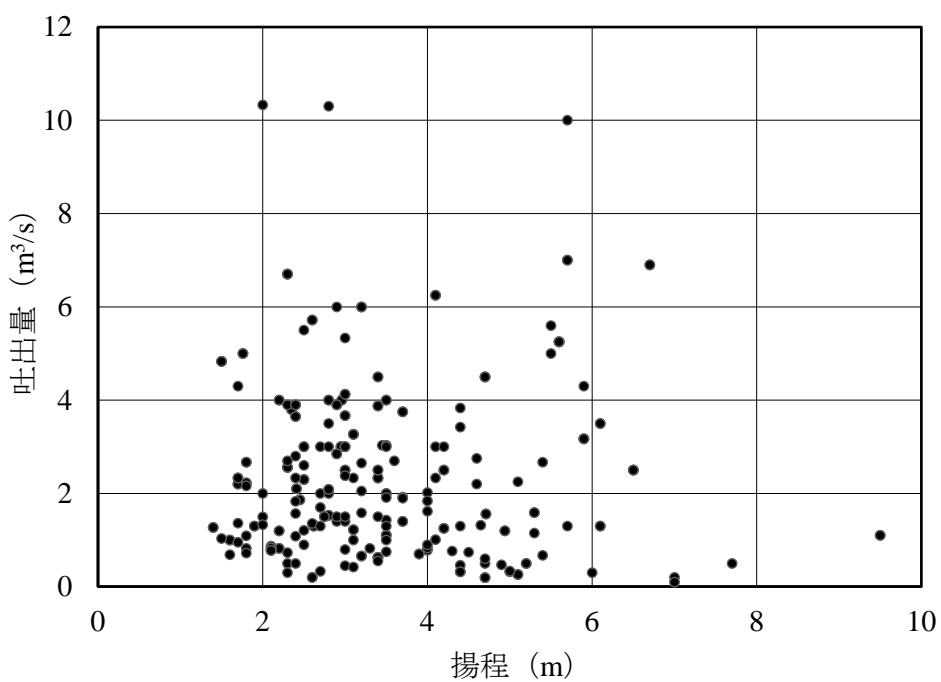


Fig. 2-3 ポンプの口径別割合

Percentage according to the diameter of pump



(a) 揚水ポンプ設備 (1 基当たり)



(b) 排水ポンプ設備 (1 基当たり)

Fig. 2-4 ポンプ設備の揚程と吐出量の関係

Relations of pump-head and discharge about pump facilities

2.3.1.3 ポンプ設備の設置年代

調査票に設置年の記載があった揚水ポンプ設備 205 基と排水ポンプ設備 216 基について、設置年代別の台数を **Fig. 2-5** に示す。ともに 1980 年代に設置されたものが多い。古いものでは、1950 年代に設置され供用年数 50 年を超えるポンプ設備が 7 基あった。供用年数がポンプ設備の標準耐用年数である 20 年を超えるポンプ設備は 285 件（67.7%）であり、1. で述べた農林水産省のデータと同じ傾向となっている。

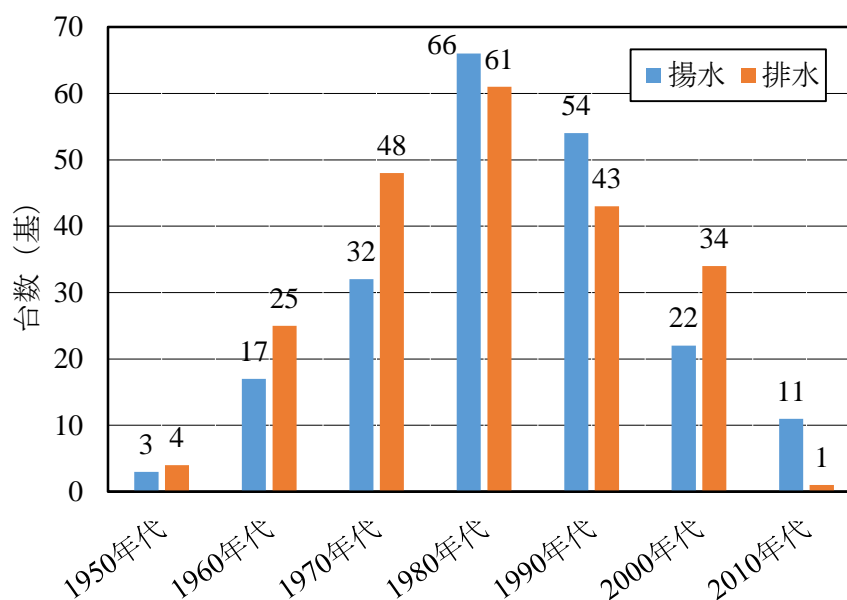


Fig. 2-5 ポンプ設備の設置年代別台数

Number according to the generation of pump facilities

2.3.2 分解点検

ポンプ設備の分解点検の有無や、その際の軸受や部品交換の有無などを **Table 2-2** に示す。分解点検時点の概算費用に関する分布を **Fig. 2-6** に示す。なお、ここで分解点検の概算費用には補修や整備の費用が含まれている。分解点検の周期についての分布を **Fig. 2-7** に示す。

揚水ポンプ設備では 178 基 (76.1%) が分解点検の履歴を有しており、さらに軸受の交換履歴は 137 基 (58.5%)、軸受以外の交換履歴は 122 基 (52.1%) とともに半数を超えていた。分解点検費用は 500 万円未満が 58.8% であるが、1,000~5,000 万円が 21.9% と分解点検に高額な費用を要しているケースも少なくないことがわかる。揚水ポンプ設備は分解点検や軸受交換の履歴が多く、分解点検の周期は 20 年未満が 86.1% となっている。

排水ポンプ設備では 136 基 (47.1%) が分解点検の履歴を有しており、揚水ポンプよりも約 3 割少ない。軸受は 74 基 (25.6%)、軸受以外の部品は 92 基 (31.8%) とともに約 3 割の交換履歴があった。分解点検の概算費用は 1,000~5,000 万円が 36.3% と最も多く、揚水ポンプと比較して高額な費用を要している。概算費用の最高額は 5,000 万円であり、1971 年に設置された口径 2,100mm の斜流ポンプであった。分解点検の周期は 20 年以上が 31.1% と揚水ポンプ設備に比べ周期が長いことが特徴であり、このなかには 1968 年に設置した排水ポンプ設備で周期が 35 年と 36 年との回答が含まれている。

Table 2-2 ポンプ設備の分解点検や部品交換
Disassemble-check and exchanged parts of pump facilities

(上段:基, 下段:%)

	分解点検			分解点検有のうち 軸受の交換			分解点検有の うち軸受以外の部品交換		
	有	無	不明	有	無	不明	有	無	不明
揚水 (234基)	178	51	5	137	24	17	122	29	27
	76.1	21.8	2.1	58.5	10.3	7.3	52.1	12.4	11.5
排水 (289基)	136	141	12	74	37	25	92	25	19
	47.1	48.8	4.1	25.6	12.8	8.7	31.8	8.7	6.6

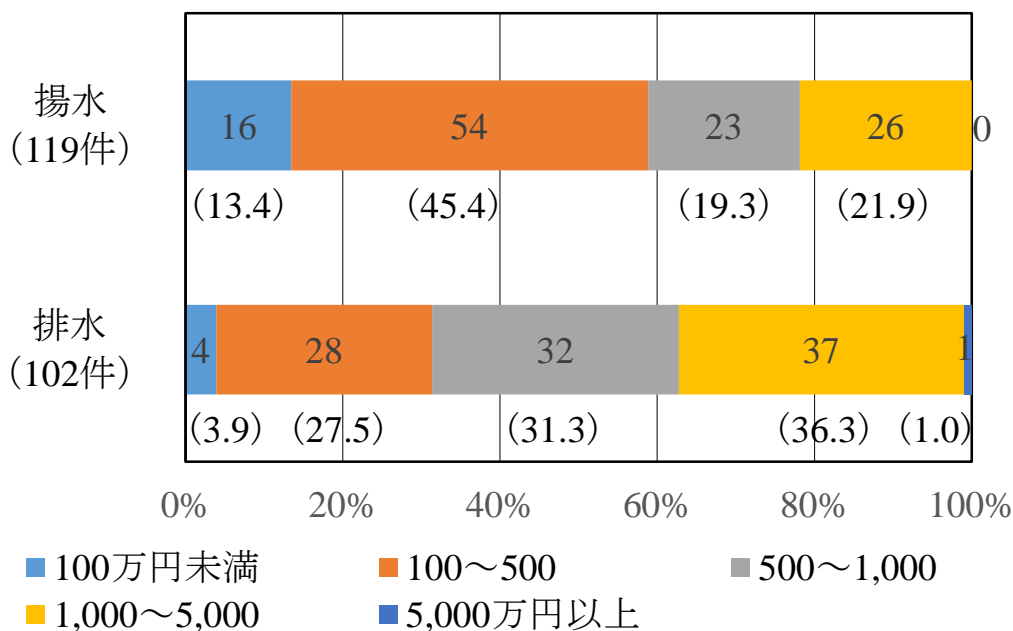


Fig. 2-6 分解点検の概算費用の分布 (1件当たり)

Distribution chart about cost of disassemble-check (per one)

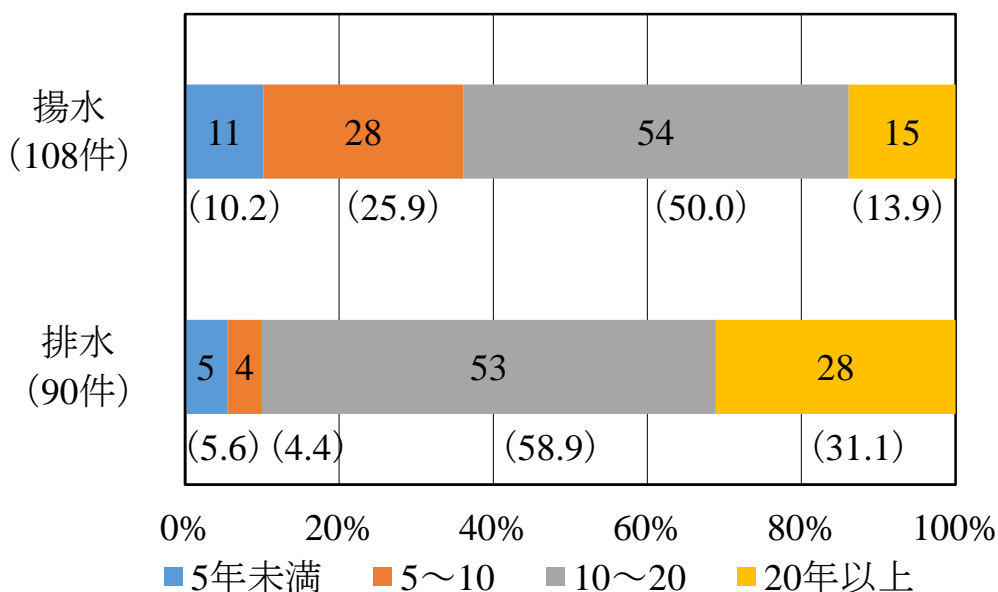


Fig. 2-7 分解点検の周期の分布

Distribution chart about period of disassemble-check

2.3.3 不具合の内容

2.3.3.1 軸受の不具合

分解点検の際に軸受を交換した 211 基のうち、理由について具体的な記載があった 59 件の回答を分類すると、27 件 (45.8%) が摩耗によるものであった (**Fig. 2-8**)。摩耗は時間の経過によって進行する劣化であり、揚水ポンプでは摩耗による軸受の交換件数が 21 件と多かった。また、不具合はないものの定期整備補修にあわせて軸受の交換を行っているとの回答が 10 件 (16.9%) あった。

2.3.3.2 軸受以外の部品の不具合

分解点検の際に軸受以外の部品を交換した 214 基のうち、理由について具体的な記載があった 80 件の回答を分類すると、不具合はないものの定期整備補修にあわせて部品の交換を行っているとの回答が 11 件 (13.8%) あった。これ以外の 69 件の回答には複数の交換部品の記載があり、それら 132 項目をポンプや補機、原動機、減速機などの構成機器に分類した。その結果、88 項目 (66.7%) が回転・摺動部を有するポンプや原動機、減速機であることが分かった (**Fig. 2-9**)。特に、揚水ポンプ設備においては、インペラの摩耗 13 項目を含む 65 項目がポンプに集中していた。

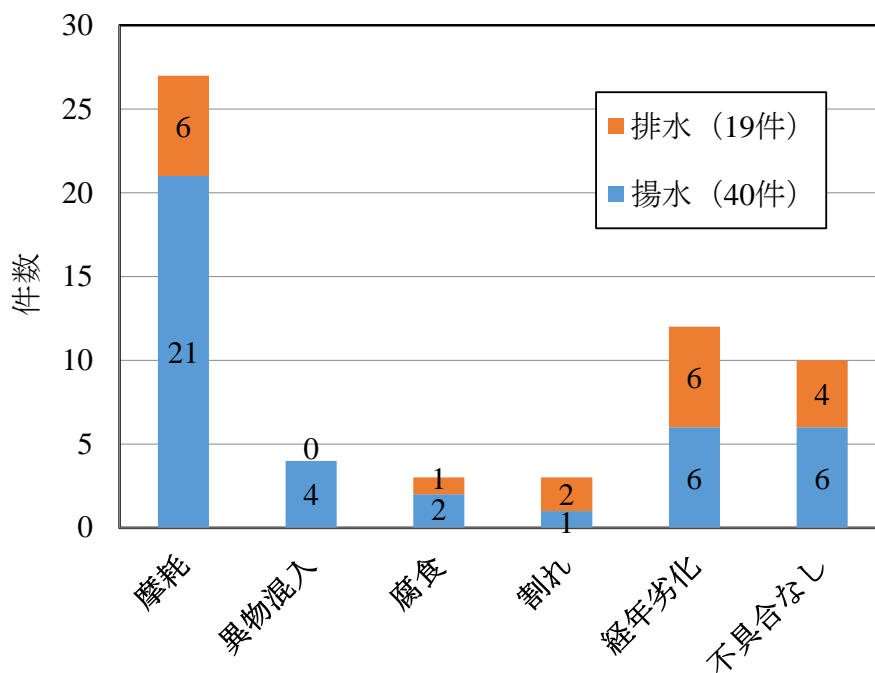


Fig. 2-8 軸受の交換理由

Exchange reason of the bearing

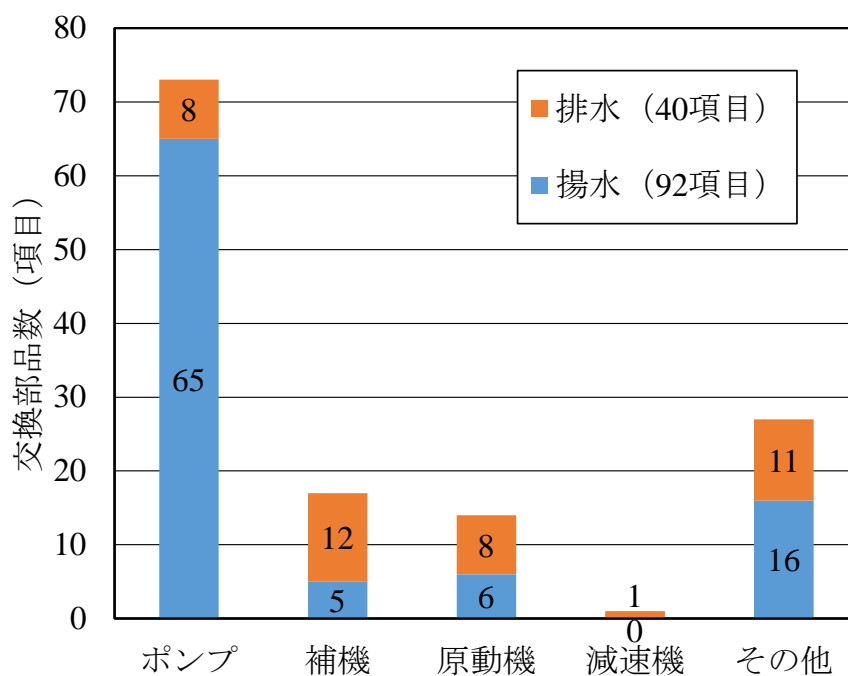


Fig. 2-9 軸受以外の交換部品の構成機器

Apparatus of the exchanged parts except the bearing

2.3.4 機器の重大なトラブルとその分類

ここでは、重大なトラブルとは機器の不具合によって直ちにポンプ設備を停止せざるを得なかったケースとした。過去にあった機器の重大なトラブルに関する回答では、揚水ポンプが 23 件 (9.8%)、排水ポンプが 36 件 (12.5%) と、ともに約 1 割が重大なトラブルを経験していた。機器の重大なトラブルについて、ポンプの設置年代別の件数と割合を **Table 2-3** に示す。設置年が 2000 年代以降の比較的新しいポンプ設備では、重大なトラブルの発生は 1 件とわずかであり、1990 年代以前に設置されたポンプ設備ではトラブル発生の割合は高くなっている。なお、この分析では、トラブル発生の有無のみの回答を求めることとしたことから、発生年月は不明であり、また、複数回発生したとしても集計値は 1 回となる。

また、トラブルの内容について具体的な記載があった回答 (44 件) を構成部品などで分類し、その結果を **Fig. 2-10** に示す。現象が多岐にわたり特定のトラブルに集約されないが、性能限界が突発的に発生する電気・制御部品を除き、時間の経過により性能が徐々に低下していく劣化進展型のモータ部品やエンジン、インペラ、軸受、歯車が多く見られる。

Table 2-3 設置年代別のポンプ設備のトラブル件数と割合
Number and percentage about the trouble of pump facilities

年 代	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
揚水ポンプ設置数	3	17	32	66	54	22	11
トラブル件数	0	4	9	6	4	0	0
比率 (%)	0	23.5	28.1	9.1	7.4	0	0
排水ポンプ設置数	4	25	48	61	43	34	1
トラブル件数	3	8	7	6	11	1	0
比率 (%)	75.0	32.0	14.6	9.8	25.6	2.9	0

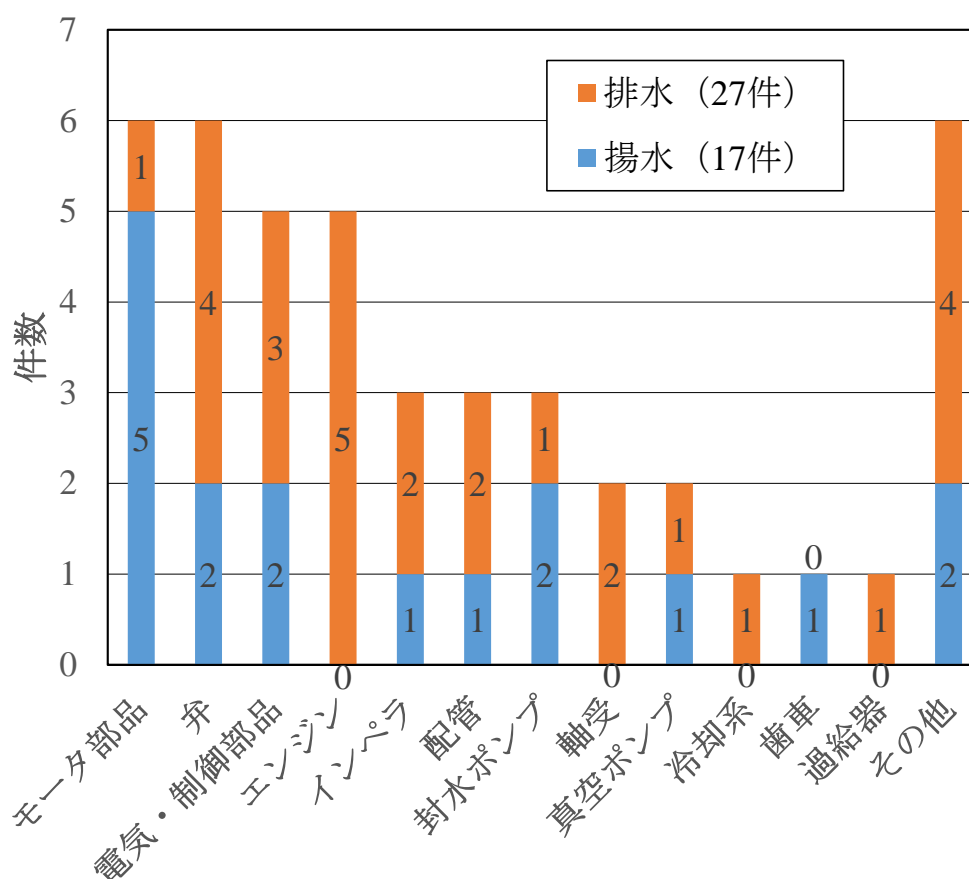


Fig. 2-10 機器の重大なトラブルの分類

Classification about the trouble of apparatus

2.4 考察

2.4.1 分解点検の分析結果から見た維持管理上の特徴

揚水ポンプ設備では、分解点検が行われた履歴を有する割合が排水ポンプ設備に比べて約3割高くなっており、分解点検周期は排水ポンプ設備よりも短くなっていた。また、揚水ポンプ設備では軸受および軸受以外の部品を交換した割合がとともに5割を超えていたが、排水ポンプ設備ではそれらの交換割合は約3割であった。これらは、揚水ポンプ設備の稼働時間が排水ポンプ設備よりも長いことから、摩耗などの劣化が進行したことによると考えられる。調査研究で得られたポンプ設備の稼働時間の事例では、排水ポンプ設備（23基）の年稼働時間の平均が444時間に対し、揚水ポンプ設備（17基）はその4.8倍の2,136時間であった（第1章参照）。機能診断の頻度を検討する際にポンプ設備の稼働時間は重要な情報となる。

一方、分解点検を行ったが結果として軸受や部品の交換を行っていないとの回答が約1割、また、不具合はないものの分解点検にあわせて部品交換を行っているとの回答が1割を超えていた。これらは、部品の劣化の進行は一樣ではないことから、劣化による故障防止のために分解点検や部品交換を定期的に行うというTBMの考え方による対応である。

CBMの考え方に基づき、農業用ポンプ設備を対象として回転体振動値により部品の劣化状態を把握する簡易機能診断技術の適用が試みられている^[208~210]。また、筆者らは、ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤（潤滑油やグリース）を採取・分析する機能診断技術を適用することによって、ポンプ設備を分解することなく、摩耗や異物混入、腐食などの不具合の兆候を早期に検知することが可能であると報告している^[211]。これらの機能診断技術を用いて部品の劣化状態を定量的に把握することにより、ポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となると考える。

2.4.2 部品の不具合の診断と重大なトラブルの防止対策

軸受の不具合の原因の多くが摩耗によるものであり、これは時間の経過によって進行する劣化である。また、機器の重大なトラブルでは、性能が徐々に低下していく劣化進展型の部品の故障が数多く見られた。したがって、突発的な故障の防止を図るには、部品の劣化を状態監視することにより異常な振動や発熱、異音が発生する前に、ポンプ設備の補修を行うことが重要であると考えられる。

軸受以外の交換部品の66.7%を占めているポンプ・原動機・減速機は、回転・摺動部で構成された装置である。ポンプ設備は装置の集合体であり、軸受以外の部品に不具合が生じた場合に軸振れや片当たりなどによって軸受の摩耗が発現する事例^[202]が報告されている。

これらのことから、ポンプ設備の重大なトラブルを防止するためには、部品の劣化を定量的に診断することによって劣化の度合いが許容範囲を超える前の時点で補修を行うなど、ポンプ設備におけるCBMの適用が効果的であると考えられる。

2.4.3 故障の地域的な分布

揚水および排水ポンプ設備に関し、気候差等により故障が発生し易い地域が限定されているか否かを確認するため、重大なトラブルを経験したとの回答のあった都道府県の分布を地図上で示した（**Fig. 2-11**）。これを見ると故障の発生は地域に偏りが無いことが分かる。その理由の一つとして、ポンプ設備は建屋の中に設置され温度や湿度への対策が施されていることから、気候の影響を受けにくいことが考えられる。このことから、ポンプ設備の故障に関する調査を実施する際に対象地域を限定する必要はなく、また、調査で得られた結果は全国のポンプ設備に共通であると考えられる。

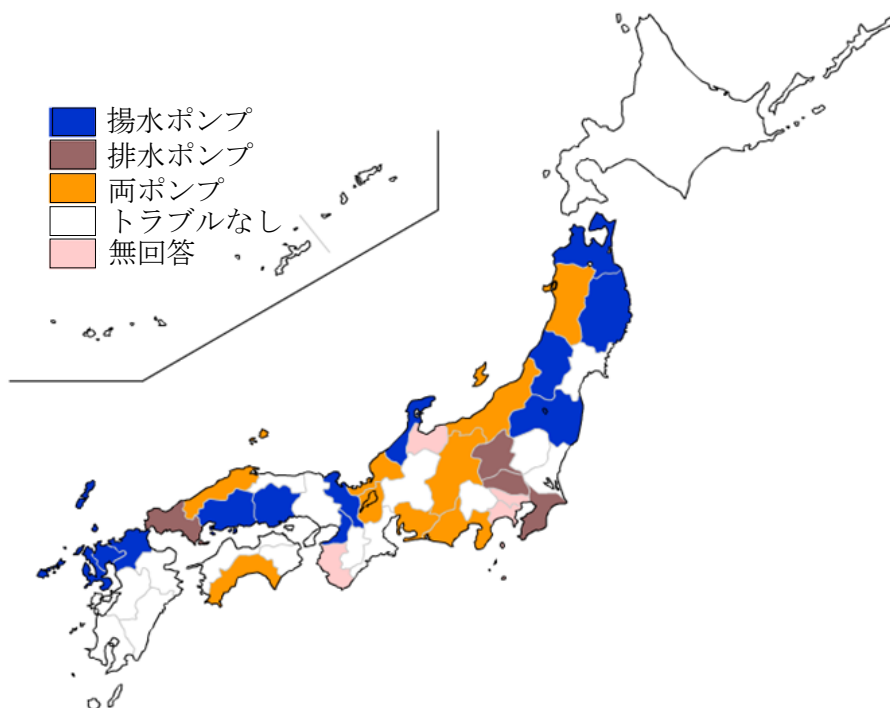


Fig. 2-11 ポンプ設備の故障に関する地域的な分布
Regional distribution about the trouble of pump facilities

2.5. まとめ

本研究では、農業用ポンプ設備の維持管理に関する現状や課題などを把握するためにアンケート調査を実施した。調査対象としたポンプ設備の型式による性能の特徴として揚水ポンプの型式は高揚程の渦巻ポンプが多いのに対し、排水ポンプは低揚程の斜流ポンプが多くなっている。原動機の種類は、揚水ポンプ設備では全設備が電動機であったのに対し、排水ポンプ設備では電動機とディーゼルエンジンが半数ずつとなっている。また、双方ともに1980年代に設置されたものが最も多く、設備更新時期が近年に集中することが想定され、農林水産省が示すデータと同じ傾向となっている。アンケート調査を分析したその結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 分解点検が行われた履歴を有する割合は、揚水ポンプ設備が排水ポンプ設備に比べて高くなっていた。揚水ポンプ設備の軸受および軸受以外の部品について交換した割合はともに5割を超えており、排水ポンプ設備ではそれらの交換割合は約3割であった。これらは、揚水ポンプ設備の稼働時間が排水ポンプ設備よりも長かったことから、摩耗などの劣化が進行したと考えられる。
- (2) 軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであった。軸受以外の交換部品の66.7%をポンプ・原動機・減速機が占めていた。また、機器の重大なトラブルでは、性能が徐々に低下していく劣化進行型の部品の故障が数多く見られた。
- (3) 気候差などにより故障が発生し易い地域が限定されているか否かを確認したところ、ポンプ設備の故障には発生する地域に偏りはないことが分かった。
- (4) ポンプ設備の重大なトラブルを防止するためには、部品の劣化が進行する前の適期に補修を行うなど、ポンプ設備におけるCBMの適用が効果的であると考えられる。

第 2 章の参考文献

- [201] 農林水産省農村振興局(参照 2015.5.29) : 農業水利施設におけるストックマネジメントの取組について, (オンライン) (2015), 入手先 <<http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/pdf/torikumi.pdf>>
- [202] 農林水産省農村振興局整備部設計課(参照 2014.6.9) : 農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場(ポンプ設備)」, (オンライン) (2013), 入手先 <<http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/pdf/pump01.pdf>>
- [203] 吉田直樹, 川畑雅彦 : 火力発電所の潤滑診断技術, トライボロジスト, **59**(3) (2014), 150-155.
- [204] 椎原裕美, 光清智洋, 森田孝宏 : 船舶機器のメンテナンスと状態監視, トライボロジスト, **59**(6) (2014), 337-344.
- [205] 山下 正 : 頭首工および用排水機場における補修の傾向分析, 農業農村工学会誌, **79**(11) (2011), 29-32.
- [206] 水間啓慈, 國枝 正, 森 丈久 : 農業用揚排水機場の整備補修記録に基づくポンプ停止要因分析, 農業農村工学会論文集, **292**(2014), 85-91.
- [207] ポンプ設備研究会 : 実務家のための最新ポンプ設備工学ハンドブック(改訂版), 農業土木事業協会(2007), 1015-1017.
- [208] 末政信夫, 中田一茂, 米澤 亘 : 簡易振動診断技術を用いたポンプの健全度評価について, 水と土, **158**(2009), 37-43.
- [209] 酒井雅史, 久保田貴純, 長野浩一 : 東部幹線揚水機場ポンプ設備の機能診断調査および改修設計, 水と土, **163**(2011), 53-61.
- [210] 蒔苗英孝, 西田真弓 : 振動調査技術の農業用ポンプ設備診断への適用, 水と土, **166**(2012), 10-17.
- [211] 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 安藤泰久 : 農業用ポンプ設備の潤滑油による機能診断における留意点, 農業農村工学会誌, **82**(1) (2014), 19-22.

第3章 農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性

潤滑剤の劣化の要因には、酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因（水分、塵、異物混入など）によるものがある。潤滑油の粘度は劣化や異種油混入の有無などの判定に用いられ、また、グリースのちょう度は物理的な劣化度の評価に用いられる指標である。そこで本章では、研究調査で得られた潤滑剤の分析データの中から潤滑油の粘度およびグリースのちょう度に着目し、それらの分析結果から潤滑油やグリースの劣化特性について明らかにする。

3.1 はじめに

近年，農業用ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤を採取・分析し，油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて，ポンプ設備を分解せずに軸受など回転機械の摩耗状態を把握する機能診断技術（以下，「潤滑診断」という）が報告されている^[301]。しかし，潤滑診断は最近始められたばかりで農業水利施設の機能診断技術として位置付けられていないことから，農業用ポンプ設備の国の基準などに管理基準値は設定されていないのが現状である。

潤滑剤の劣化の要因には，酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因（水分，塵，異物混入など）によるものがある。潤滑油の粘度は劣化や異種油混入の有無などの判定に用いられる指標である。また，グリースの硬さの尺度であるちょう度は，物理的な劣化度の評価に用いられる指標である^[302]。そこで本章では，研究調査で得られた潤滑剤の分析データ^[303]の中から潤滑油の粘度およびグリースのちょう度に着目し，それらの分析結果から潤滑油やグリースの劣化特性について明らかにするとともに，管理基準値の設定方法を考察する。

3.2 潤滑剤の役割

本章で分析の対象とする潤滑剤は，潤滑油とグリースである。潤滑油は基油と添加剤から構成されており，基油には原油を精製して製造された鉱油，PAO（Poly- α -Olefin）や脂肪酸エステルなどの化学合成油などが用いられる。基油だけでは足りない性能を高めるために，用途に応じてさまざまな添加剤が加えられている。グリースは，潤滑油（基油）に増ちょう剤を分散させて半固体または固体状としたものである。

潤滑剤には用途に応じた性能を付与するため，適正な基油の選定や添加剤の配合が行われており，新油に要求される性状や性能については用途に応じて JIS 規格が制定されている。しかしながら，使用油に関しては公的な規格

が明示されていないのが現状である。これは、使用油の管理基準が使用条件（装置の種類、運転条件、給油方法など）に左右され、一義的に決めるのが困難なためである^[304]。

農業用ポンプ設備の回転・摺動部に使われている潤滑剤は、①潤滑作用、②冷却作用、③清浄作用、④さび止め作用、⑤密封作用、⑥動力伝達作用（例、油圧作動油）、⑦防塵作用（例、グリース）などの重要な役割を果たしている。劣化に伴い潤滑剤本来の性能が低下してくるとポンプ設備の故障につながることになる。潤滑剤の作用を十分に発揮させ、ポンプ設備を正常に稼働させるためには、分析項目や点検間隔を定め潤滑剤を適切に管理し、その性状がどのように変化したかを知ることが大切である。潤滑剤の状態を適正に管理することにより、機械の異常や故障を未然に防いだり、劣化の進行を抑えたりすることができる^[305]。

3.3 対象設備と分析方法

3.3.1 対象とする設備と試料

平成24年度から27年度の4年間で、千葉や新潟、石川、愛知、滋賀、沖縄の6県の排水機場19箇所および揚水機場7箇所において、ポンプ設備61基の軸受や減速機、電動機から潤滑油113試料とグリース29試料を採取し、潤滑診断を実施した。

3.3.2 分析方法

潤滑診断で実施した分析項目のうち、潤滑剤の性状を調べるために本研究で用いた分析項目および適用規格を **Table 3-1** に示す。潤滑油の粘度に係る管理基準の目安は、潤滑油使用機械の重要度「普通」を適用し、新油の粘度からの変化率 $\pm 15\%$ ^[306]を採用した。また、グリースのちょう度に係る管理基準の目安は、新グリースからの変化率 $\pm 20\%$ ^[305]を用いた。

赤外線吸収スペクトル法（Infrared Absorption Analysis : IR）は、赤外線の領域に現れる物質の吸収スペクトルを用いる分析法であり、潤滑剤の基油のタイプ分析や添加剤の分析、劣化の確認などに使用されている^[307]。その分析による潤滑油のIRチャートを **Fig. 3-1** に例示する。波数 $650\sim 1,300\text{cm}^{-1}$ は細かい吸収が多数みられる指紋領域と呼ばれ、そのパターンは物質に固有のものとなる。このパターンが新油と一致していれば同じ油種であるが、本例では新油と吸収スペクトルのピークが一致しないことから油名が異なる、もしくは異種油の混入の可能性があると判定する。

Table 3-1 分析項目および適用規格

Analysis items and specifications		
分析項目	適用規格	分析の内容
潤滑油の粘度	JIS K 2283	油の動粘度（40℃）を測定する。
グリースの ちょう度	JIS K 2220	グリースの見かけの硬さを表す数値。
赤外線吸収スペ クトル法（IR）	JIS K 0117	油が酸化することにより発生するカル ボン酸を主に測定する。
金属濃度分析	ICP 発光 分光分析	油中の金属元素と含有量を測定するこ とにより，回転・摺動部の摩耗状態など を評価する。

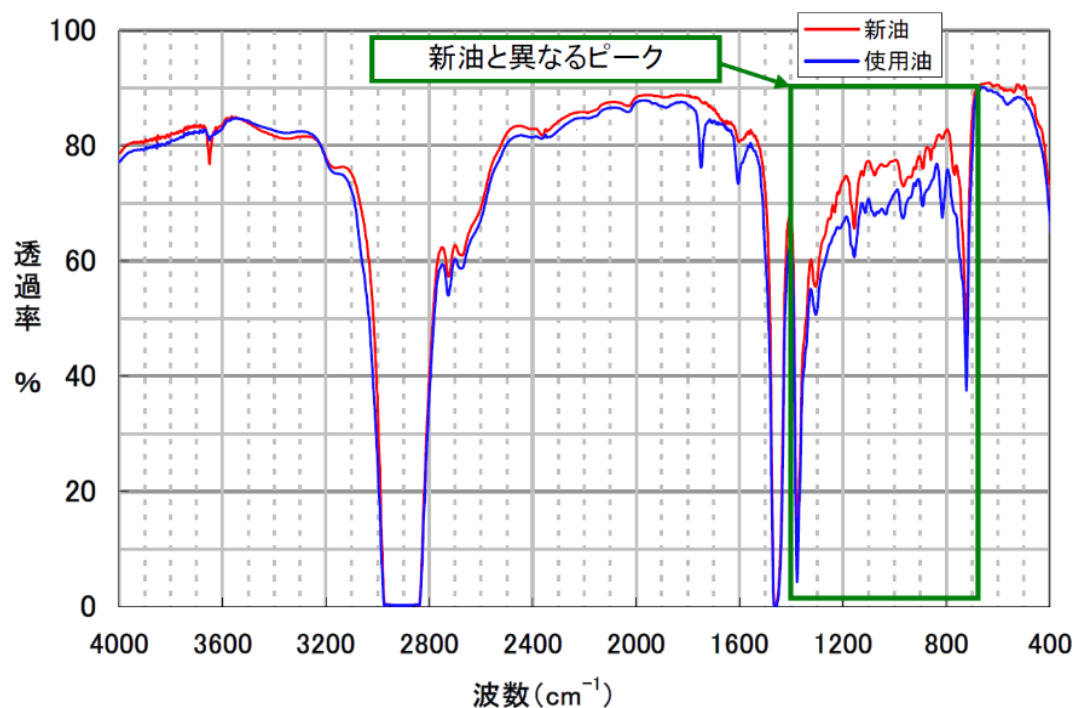


Fig. 3-1 潤滑診断の IR チャート（一例）

IR-chart in oil analysis (an example)

3.4 分析結果

3.4.1 潤滑油

潤滑油 113 試料の分析結果を **Table 3-2** に示す。赤外線吸収スペクトル法 (IR) の分析により新油と吸収スペクトルのピークが一致しない潤滑油が 29 試料 (25.7%)、また、金属濃度分析により新油と異なる添加剤成分を検出した潤滑油が 7 試料 (6.2%) であった。これらの合計 36 試料 (31.9%) は異種の潤滑油が混入している、もしくは聞き取りを行った潤滑油の製品名称が異なるなど、3 分の 1 の潤滑油が正しく管理されていないことを示している。これら 36 試料を除外し、77 試料 (68.1%) を対象として潤滑油の粘度の変化率を算出した。粘度の変化率についての算定結果を **Fig. 3-2** に示す。変化率は全て管理基準の目安 ($\pm 15\%$) に収まっており、粘度においては潤滑油の性状は劣化していないと評価した。

一方で、除外した 36 試料のうち、6 試料は粘度の測定値が記録されていた新油値と比較して高い値 ($+15\%$ 以上)、1 試料が低い値 (-15% 以下) を示していた。これら 7 試料は潤滑油が劣化している可能性がある。

Table 3-2 潤滑油の分析結果

Analysis of lubricating oil

項目	試料数 (%)
採取した試料	113 (100)
IR でピークが一致しない試料	29 (25.7)
異なる添加剤成分を検出した試料	7 (6.2)
新油値との変化率を求めた試料	77 (68.1)

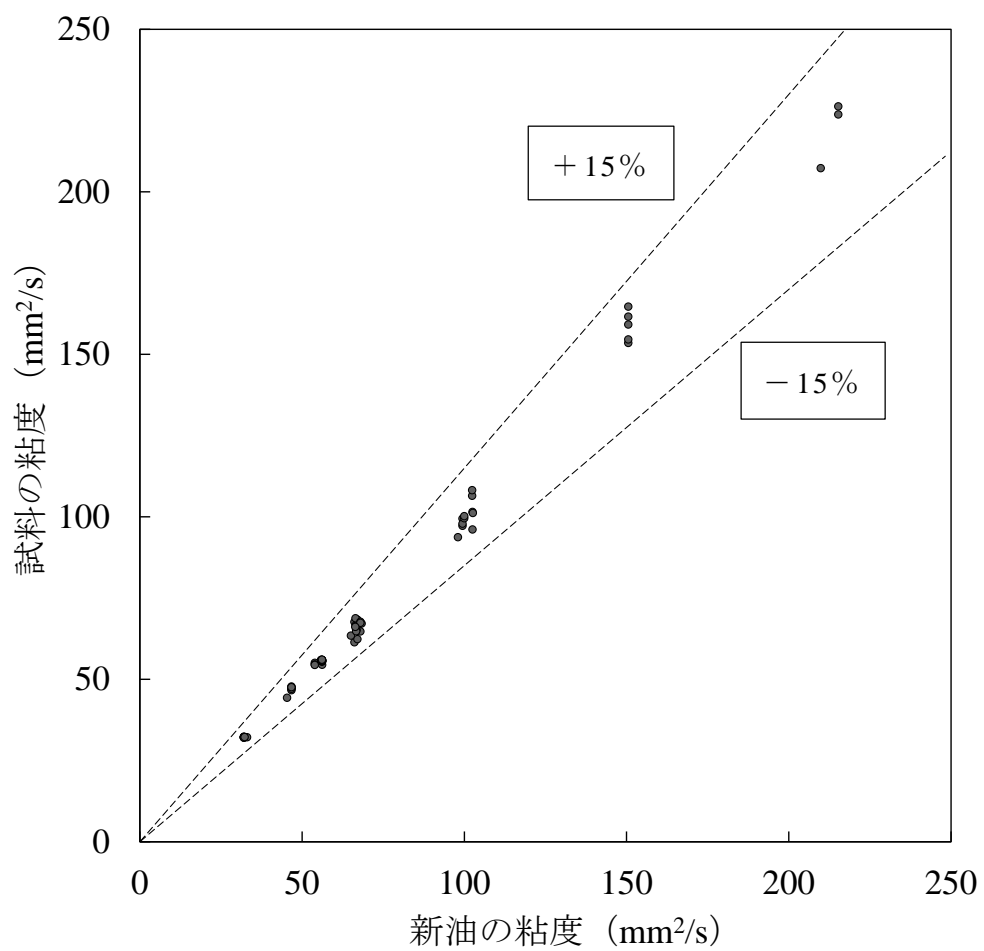


Fig. 3-2 潤滑油の粘度の変化率 (77 試料)

Change rates of the viscosity about lubricating oils (77 samples)

3.4.2 グリース

グリース 29 試料の分析結果を **Table 3-3** に示す。赤外線吸収スペクトル法 (IR) の分析により新油と吸収スペクトルのピークが一致しないグリースが 10 試料 (34.5%) であった。これらの 10 試料は異種のグリースが混入している、もしくは聞き取りを行ったグリースの製品名称が異なるなど、3 分の 1 のグリースが正しく管理されていないことを示している。これら 10 試料を除外し、19 試料 (65.5%) を対象としてグリースのちょう度の変化率を算出した。ちょう度の変化率についての算定結果を **Fig. 3-3** に示す。変化率は 13 試料 (68.4%) が管理基準の目安 ($\pm 20\%$) に収まっており、6 試料 (31.6%) についてはちょう度において性状が劣化していると評価した。また、揚水ポンプ設備から採取したグリース 10 試料は全て軟化の傾向を、排水ポンプ設備から採取した 9 試料のうち 8 試料が硬化の傾向を示していた。

一方で、除外した 10 試料のうち、5 試料はちょう度の測定値が記録されていた新油値と比較して高い値 ($+20\%$ 以上) を示していた。これら 5 試料はグリースが劣化 (軟化) している可能性がある。

Table 3-3 グリースの分析結果

Analysis of grease

項目	試料数 (%)
採取した試料	29 (100)
IR でピークが一致しない試料	10 (34.5)
新油値との変化率を求めた試料	19 (65.5)

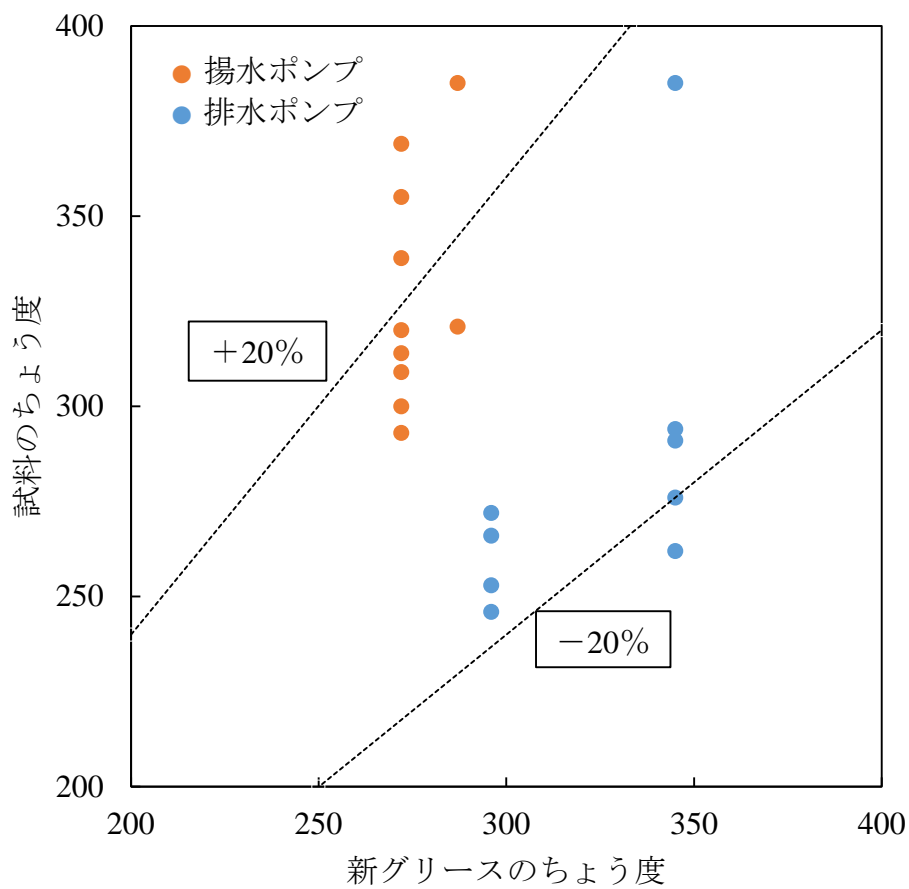


Fig. 3-3 グリースのちよう度の変化率 (19 試料)
Change rates of the consistency about grease (19 samples)

3.5 考察

3.5.1 潤滑油の粘度の劣化傾向

一般的に、劣化傾向にある潤滑油では粘度や酸価が増加し、界面張力が低下することが知られている^[308]。粘度が変化する要因については、酸化劣化や添加剤の消耗・変質、外部からの異物混入、異種油の混入などが挙げられる。粘度低下による影響としては焼き付きの危険性が、また、上昇した場合には摩擦抵抗の増大による動力損失の増加が考えられる^[304]。

Fig. 3-2 に示すように、潤滑油 77 試料における粘度の変化率は最小値－7.2%から最大値＋9.4%の間に収まっており、劣化がほとんどみられない。適正に管理された潤滑油における粘度の変化率の幅が狭く良好な状況にあることから、潤滑油の粘度の劣化傾向を見出せなかった。参考となる指標として、潤滑油の物理的性状を示す酸価と水分、IR チャートを確認したところ、最大値と最小値を示した試料ともに良好の範囲であった。

3.5.2 グリースのちょう度の劣化傾向

グリースの劣化が進行すると、潤滑性能が低下して軸受の摩耗を促進させ、音や振動が大きくなり、最終的には軸受は回転できなくなる。グリースの劣化は、酸化劣化や回転による機械的なせん断、外部からの異物などの混入により、その成分や性状が変化して、グリースの潤滑性能は時間の経過とともに低下する^[308]。**Fig. 3-3** に示すように、グリースの硬さの尺度であるちょう度の変化率は最小値－24.1%から最大値＋35.7%の間にあり、排水ポンプ設備のグリースは硬化（－側）の傾向を示し、揚水ポンプ設備のグリースは軟化（＋側）の傾向を示していた。研究調査で得られたポンプ設備の稼働時間の事例では、排水ポンプ設備（23 基）の年稼働時間の平均が 444 時間に対し、揚水ポンプ設備（17 基）はその 4.8 倍の 2,136 時間であった（第 1 章参照）。このことから、稼働時間が比較的長い揚水ポンプでは増ちょう剤のせん断による軟化が、稼働時間の短い排水ポンプでは酸化劣化による硬化が生じた可能性がある。グリース選定のためにはポンプ設備の使用状況（年稼働時間）が重要な指標のひとつになると考えられる。

なお、排水ポンプ設備のグリースは硬化する傾向にあったが、管理基準値内ではあるものの1試料が軟化（ちょう度 385）していた。本試料については、他の物理的性状（滴点、酸価、水分）は良好の範囲にあり、かつ、ポンプ設備の年間稼働時間は166時間と少なく、劣化要因を特定することは困難であった。

3.5.3 管理基準値との比較に対する現状の考察

今回の分析結果では、潤滑油の粘度の変化率は全て管理基準の目安（±15%）よりも厳しい値（±10%）を満足しており、粘度においては劣化していないと評価した。一方、グリースのちょう度の変化率は31.6%の試料が管理基準の目安（±20%）を超過しており、ちょう度において性状が劣化していると評価した。潤滑剤はポンプ設備を円滑に作動させるうえでなくてはならないものである。現在、潤滑剤については日常点検のなかで簡易な目視観察が実施されているが、それに加えて定期的に潤滑剤の性状を分析してその劣化状況を把握し、管理基準値を超えている場合には早めに新油と交換するなどの対策を講じる必要がある^[309,310]。そこで、潤滑剤を用いた潤滑診断の実用化を図るためには、農業用ポンプ設備に適した管理基準値の設定が重要である。ここで、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなることから、農業用ポンプ設備の潤滑診断の実測データを集積することにより、実状に即した適切な管理基準値を設定することが必要となる。

さらに、管理基準値は対象とする施設の重要度に応じて設定する必要がある。農地だけでなく地域の排水を担う排水機場では、故障によるポンプ設備の停止が地域の生活に大きく影響を与える場合がある。このような施設の場合には管理基準値を潤滑油使用機械の重要度「高い」を適用し、例えば潤滑油の粘度であれば新油値からの変化率±10%^[306]と厳しく設定することで整備点検の頻度を高め、異常兆候の早期検出が可能となると考える。

3.5.4 ポンプ設備の故障を防止する方策

本章で明らかになった課題は、潤滑剤の製品名称が正しく管理されていない

いなどの試料の割合が、潤滑油 31.9%，グリース 34.5%といずれも高かったことである。潤滑剤の性状を分析した結果、適正に管理された潤滑剤は著しい劣化が認められない一方で、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認された。潤滑剤に関わるポンプ設備の故障を未然に防止するためには、従来の油量や油温、漏洩の管理に加えて、保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理記録に残すことが重要であると考えられる。

3.6 まとめ

本章では、農業用ポンプ設備で使用される潤滑剤の性状（粘度，ちょう度）を分析して得られた結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 適正に管理された潤滑油は、粘度の変化率の幅が狭く良好な状況にあることから、劣化の傾向を見出せなかった。
- (2) 揚水ポンプ設備のグリースは軟化の傾向を、排水ポンプ設備のグリースは硬化の傾向を示していた。グリース選定のためには、ポンプ設備の使用状況（年稼働時間）が重要な指標のひとつになる。
- (3) 農業用ポンプ設備に適した管理基準値の設定が重要である。ここで、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなることから、実状に即した適切な管理基準値を設定しなければならない。さらに、管理基準値は対象とする施設の重要度に応じて設定する必要がある。
- (4) 潤滑剤の性状を測定した結果、潤滑剤の製品名称を正しく記録するなど適正に管理されている潤滑剤は著しい劣化が認められない一方、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認された。

第 3 章の参考文献

- [301] 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 安藤泰久: 農業用ポンプ設備の潤滑油による機能診断における留意点, 農業農村工学会誌, **82**(1) (2014), 19-22.
- [302] 小宮広志: グリースのちょう度－試験法と意義, トライボロジスト, **57**(10) (2012), 701-708.
- [303] 川畑雅彦, 吉田直規, 國枝 正: トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断技術の開発, ARIC 情報 119 号 (2015), 28-35.
- [304] 柴田正明: 潤滑油の劣化診断とトライボロジー, トライボロジスト, **39**(7) (1994), 559-565.
- [305] 日本トライボロジー学会編: メンテナンストライボロジー, 養賢堂 (2006), 84-146.
- [306] 日本トライボロジー学会: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 846-849.
- [307] 河野通郎: 潤滑剤の赤外線吸収スペクトル, トライボロジスト, **5**(4) (1960), 221-228.
- [308] 日本トライボロジー学会: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 577-730.
- [309] 國枝 正: 潤滑油やグリースの劣化度を簡易に評価する携帯型測定装置, 平成 25 年度農村工学研究所成果情報 (2014), 17-18.
- [310] Tadashi KUNIEDA: A portable device measures the degree of deterioration in lubricants of pump facilities, Research Topics 2013, National institute for rural engineering, (2015), p.2.

第4章 実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験

機械設備では、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE (Acoustic Emission) 法、超音波法などが試みられている。そこで本章では、実機を用いて摩擦面にアブレシブ（切削型）と凝着、溶融の3種類の摩耗を人為的に発生させ、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融の現象を再現する劣化促進試験を実施する。本試験では、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察して劣化状態を迅速に把握しながら、その時の振動加速度や温度の変化、潤滑油中に含まれる金属摩耗粒子の増加数の計測を行い、機械設備の劣化に対する応答特性を求める。さらに、ポンプ設備の損傷を起こす要因として主に想定される3種類の摩耗現象を確認し、油に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となることを報告する。

4.1 はじめに

農業用ポンプ場は、農地ばかりでなく地域の用水や排水を担う重要な施設となっている。それらの多くが更新の時期を迎えているものの、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が不足している現状にある。水間らは、長期に供用されている農業用ポンプ場を対象として、整備補修記録をもとにポンプの運転停止要因を分析し、突発的な運転停止を回避する観点から異常の兆候を早期に把握する取り組みを強化し劣化した部品を適期に交換する必要があると報告している^[401]。

産業プラントにおけるメンテナンス方式は、一定期間毎に点検を実施する時間計画保全（Time Based Maintenance：TBM）が従来からの主流であるが、近年では稼働している機械装置の状態を監視し、その情報に基づいて保守を行う状態監視保全（Condition Based Maintenance：CBM）へと保全方式が移行しつつある。特に機械設備のメンテナンスの現場においては、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE（Acoustic Emission）法、超音波法、油中摩耗粒子分析などがよく用いられている^[402,403]。例えば、振動法には、回転体振動値（振動加速度）を計測することにより異常の程度を判断する簡易診断法と、その計測結果に応じて異常の部位を特定し有効な対策を決定する精密診断法がある。温度法は、回転機械の温度上昇が軸受の焼付きなどの前兆現象であることを利用し、温度計や温度センサによる常時監視を行う方法である。潤滑油中の金属摩耗粒子を調べることで機械の状態を推測する方法としては、フェログラフイー法や金属濃度分析（Spectrometric Oil Analysis Program：SOAP法）が代表的である^[404]。

農業用ポンプ設備を対象として、近年、振動加速度により部品の劣化状態を把握する簡易機能診断手法の適用が試みられている^[405,406]。また、ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤（潤滑油やグリース）を採取し油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受など回転機械の摩耗状態を把握する手法（以下、「潤滑診断」という）が報告されている^[407]。これらの手法を用いて部品の劣化状態を定量的に診断す

ることにより、分解点検や補修の適切なタイミングを判断する技術を示しているが、これらの報告では診断技術の有効性が十分検証されていない。

これらの診断技術を検証することを目的として、回転機械の劣化促進試験による検証がこれまでに行われている。実機を用いた試験方法は稼働している機械設備の劣化兆候を検出する技術検証となることから、設備の保守管理や機能診断に資するものとなる。例えば、赤垣らは、水力発電機のすべり軸受を用いて潤滑油を排出する手法で摩耗試験を実施しており、軸受の挙動について軸変位および軸振れを非接触変位計で、また軸受温度を熱電対で監視し、損傷過程をフェログラフィー法と SOAP 法を用いて解析を行っている^[408]。また、川畑は、潤滑油をヒータで昇温し油の粘性を下げた過酷な状態をつくる手法で実機のすべり軸受を用いて摩耗試験を行い、発生した金属摩耗粒子から潤滑状態の評価を行っている^[409]。しかし、ポンプ設備の損傷を引き起こす複数の要因を想定して劣化促進試験を行い、多角的に劣化兆候を検出して、金属摩耗粒子の形態を観察した事例は報告されていない。

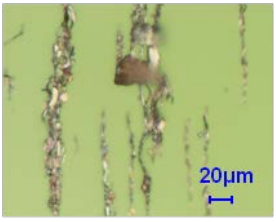
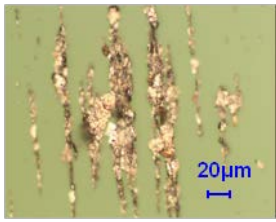
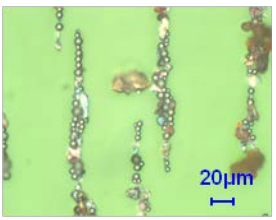
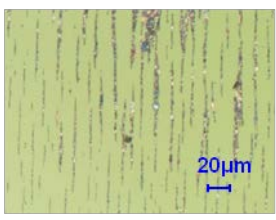
摩耗は一般に、アブレシブ（切削型）摩耗と凝着摩耗に分類される。アブレシブ摩耗（切削型）は、潤滑油中に混入した堅い異物が柔らかい金属の表面に食い込み、その表面から一部が突き出て対面する金属を削り、切削型摩耗粒子を発生させる摩耗であるとされている^[410]。凝着摩耗は、摩耗する表面間の凝着と、凝着部の破断によって真実接触部の一部がちぎれて相手面に移着することを起源とする摩耗である。微細な粒子が摩耗の進行に伴い摩擦面で集合して成長する過程を経て、その脱落によって凝着摩耗粒子が生成すると報告されている^[411~413]。これらに加え、過酷な摩擦条件あるいは2面間に電流が流れる場合など摩擦面が高温になる条件下では、溶融摩耗が発生する。溶融摩耗は、固体表面の一部が溶融するために起きる摩耗である。表面の一部が溶融した後に再び凝固するため、摩耗粒子は球状になることが多い。川畑は、水力発電機のすべり軸受を用いて交流電源装置で印加して溶融摩耗試験を実施し、球状粒子の発生を電子顕微鏡で確認している^[414]。これら3種類の金属摩耗粒子と、良好な潤滑状態で発生する正常摩耗粒子の形態の分類と発生原因を一覧表にして、**Table 4-1** に示す。

そこで本章では、実機を用いて摩擦面にアブレシブ（切削型）と凝着、溶

融の3種類の摩耗を人為的に発生させ、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融の現象を再現する劣化促進試験を実施した。劣化促進試験中に、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察して機器の劣化状態を迅速に把握しながら、その時の振動加速度や温度の変化、潤滑油中に含まれる金属摩耗粒子の増加数の計測を行い、ポンプ設備の劣化兆候に対する応答特性を求めた。さらに、損傷を起こす要因として想定した3種類の摩耗現象を確認するとともに、潤滑診断の状態監視保全への適用について考察を行った。

Table 4-1 金属摩耗粒子形態の分類と発生原因

Classification and the origin of metal wear particles

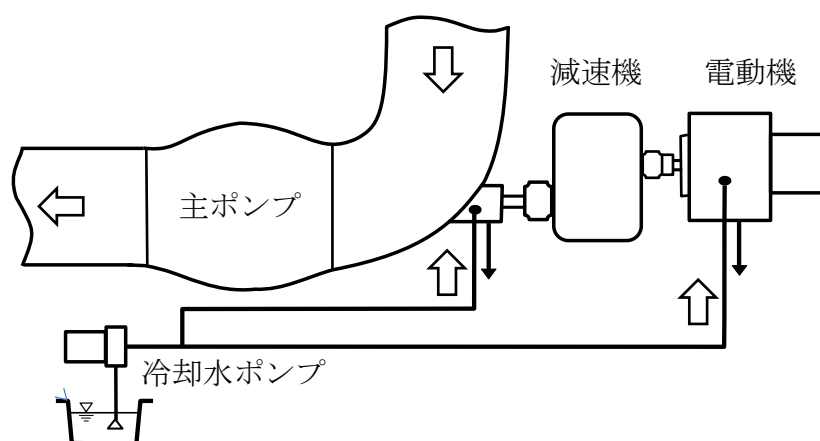
分類	発生原因等	摩耗粒子例
アブレシブ 摩耗粒子	硬い固体または硬い粒子の介在による削り、または、ひっかき作用による摩耗。 三日月形やコイルスプリング状の粒子。	
凝着 摩耗粒子	接触面が摩擦によって互いに凝着し、固体表面からの脱落または移着によって不規則な表面が生じる。微細な粒子の結合。	
溶融 摩耗粒子	接触する2物体間に電流が流れる際に、接触面間に起きる放電による摩耗。 粒子は球状。	
正常 摩耗粒子	機械が正常なすべり摩耗をしている際に発生する。 微細な薄片状の粒子。	

4.2 試験対象の概要

劣化促進試験は、1976年に製造され、廃棄が予定されている回流発生装置用ポンプ設備を用いて実施した。ポンプ設備の外観と構成を **Fig. 4-1** に示す。主ポンプは横軸斜流型であり、主な仕様は口径 900mm, 全揚程 4.2m, 揚水量 100m³/min である。



(a) 外観



(b) ポンプ設備の構成

Fig. 4-1 横軸斜流ポンプ

Horizontal axis type mixed flow pump

試験は、このポンプ設備の減速機のギヤおよび転がり軸受、電動機の転がり軸受、冷却水ポンプ主軸のすべり軸受を対象とした。減速機と軸受の諸元を **Table 4-2** に示す。なお、冷却水ポンプは横軸遠心型であり、主な仕様については口径の記録がなく、全揚程 15m、揚水量 0.1m³/min であった。

Table 4-2 減速機と軸受の諸元

Specifications of speed reducer and bearings

名称	規格
減速機	はすば歯車 ギヤ比 5.769 : 1
減速機の 転がり軸受	自動調心ころ軸受 22318 内径・外径・幅 90×190×64mm
電動機の 転がり軸受	深溝玉軸受 6312 内径・外径・幅 60×130×31mm
冷却水ポンプの すべり軸受	材質 ホワイトメタル 直径・幅 25×55mm

4.3 試験方法

本章では、ポンプ設備の軸受や歯車を対象として劣化の初期段階から損傷に至る劣化促進試験を実施した。試験により、アブレシブ（切削型）摩耗と凝着摩耗，溶融摩耗の3種類の摩耗を回転・摺動部に人為的に発生させて，その時の温度や振動加速度，潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態や個数，サイズを監視項目として測定した。監視項目とその測定装置を **Table 4-3** に示す。試験前に，ポンプ設備の潤滑油およびグリースを新品に交換して，ギヤや軸受の定常状態の値を測定した。試験中は，劣化状態を迅速に把握するために，回転式フェログラフィー装置^[415]を用いて金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察した。試験後，採取した試料を分析室に持ち帰り，分析フェログラフィー法を実施して金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡ならびに電子顕微鏡で観察して画像に記録した。

Table 4-3 監視項目と測定装置

Monitoring item and measuring device

監視項目	単位	測定装置
金属摩耗粒子数 と粒度分布	個/100mL	微粒子計数装置 (Particle MATE)
金属摩耗粒子の 形態やサイズ	μm	分析フェログラフィー法 で計測
温度	°C	J熱電対
振動加速度	mG	振動センサ (周波数帯域 5Hz~5kHz)
回転数	r/min	回転計（非接触式）
印加電圧	V	オシロスコープ

4.3.1 アブレイブ摩耗試験

硬い粒子の介在による削りまたは引っ掻き作用を起こして、アブレイブ摩耗を電動機の転がり軸受に発生させた。軸受に硬い異物が混入した状態を人為的に作り出すために、調合した試験用粉体をグリースに混入し、異物濃度が異なる3種類（100mg/L, 1,000mg/L, 6,100mg/L）の異物混入グリースを事前に作製した。試験用粉体は、通常環境に存在する粉じんの代表的なものを標準化して粒子径分布を規定・調整された粉体であり、粉じんに係わる各種装置の性能試験などに使用される。試験に用いた JIS 試験用粉体 1 の仕様と調合割合を **Table 4-4** に示す。

Fig. 4-2 に示すように、試験は電動機の回転数を 1,500r/min で一定とし、電動機のグリースニップルから軸受に異物を混入していない新しいグリースの給脂を行い、続けて3種類の異物混入グリースを低濃度のものから高濃度のものの順に給脂を行った。軸受の振動加速度は、軸受が組み込まれたケーシング上部表面に振動センサを貼り付け垂直方向振動を、温度はケーシング上部表面に熱電対を貼り付けて軸受温度を測定した。それぞれの異物濃度で3分毎に3回以上の給脂を繰り返し、排脂口から排出されたグリースを採取して、グリースに含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを観察した。なお、

Table 4-4 試験用粉体の仕様と調合割合

Specifications of powders for examinations and compounding ratio

名称	JIS試験用粉体1 (JIS Z 8901)		
使用材料	関東ローム (800°Cで焼成し、その後、粒度調整)		
特徴	粉じんを想定して標準化したもの。土ぼこり		
種別	7種	8種	11種
中位径の範囲 (μm)	27~31	6.6~8.6	1.6~2.3
調合割合	7種 : 8種 : 11種 = 1 : 1 : 1		

グリース潤滑の軸受は、試験前に発生した金属摩耗粒子を取り除くことが困難であることから、試験前に充填されていたグリースに含まれる既存の金属摩耗粒子を観察した。また、排出されたグリースには金属摩耗粒子が均等に含まれていないことから、金属摩耗粒子数は計測の対象外とした。

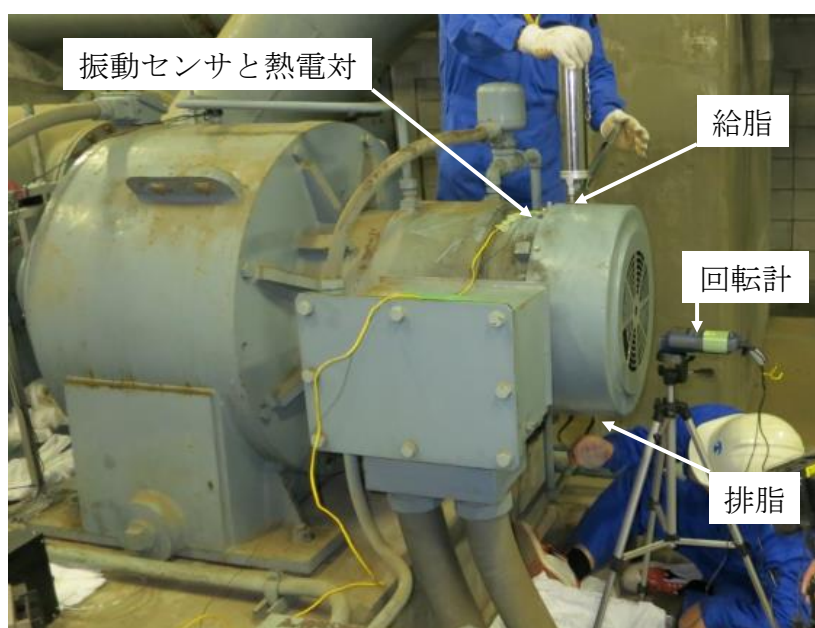


Fig. 4-2 電動機軸受を対象としたアブレイブ摩耗試験
Abrasive wear test for the bearing of motor

4.3.2 凝着摩耗試験

接触面が摩擦によって互いに凝着し、固体表面からの脱落または移着によって不規則な表面が生じる凝着摩耗を冷却水ポンプ主軸のすべり軸受に発生させた。試験前に発生した金属摩耗粒子や混入した異物を取り除くため油槽の清掃を行い、新油（55mL）を充填した後、ろ過器を用いて油槽の浄化を行った。油槽ドレインから潤滑油を排出することで、すべり軸受の潤滑油量を減少させ徐々に油膜を薄くし、主軸と軸受を接触させて凝着摩耗を発生させた。軸受の振動加速度は、軸受が組み込まれたケーシング上部表面に振動センサを貼り付け垂直方向振動を、温度はケーシング油面計接続口から熱電対を差込み油槽底部の油温を測定した。また、**Fig. 4-3**に示すように、油槽から排出する潤滑油を微粒子計数装置を通過させることで、油中の金属摩耗粒子数を計測できるようにした。試験は、ポンプ主軸の回転数を1,500r/minで一定とし、15分間運転した後、主軸の油槽ドレインから潤滑油を4分毎に3mLずつ排出して採油瓶で採取し、潤滑油に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを観察した。

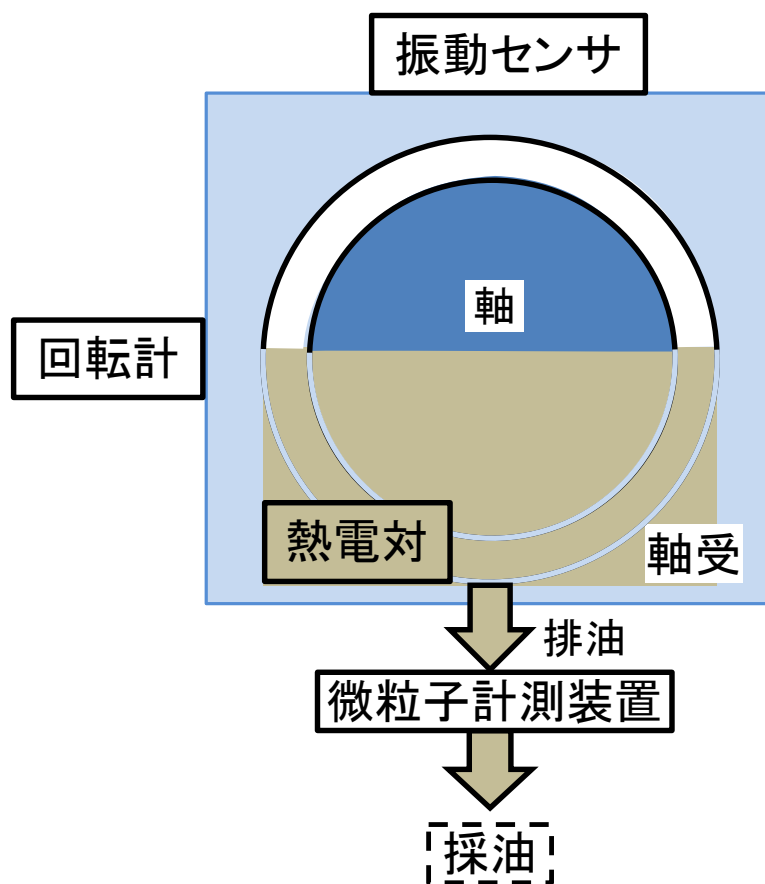


Fig. 4-3 冷却水ポンプ軸受を対象とした凝着摩耗試験
Adhesive wear test for the bearing of cooling pump

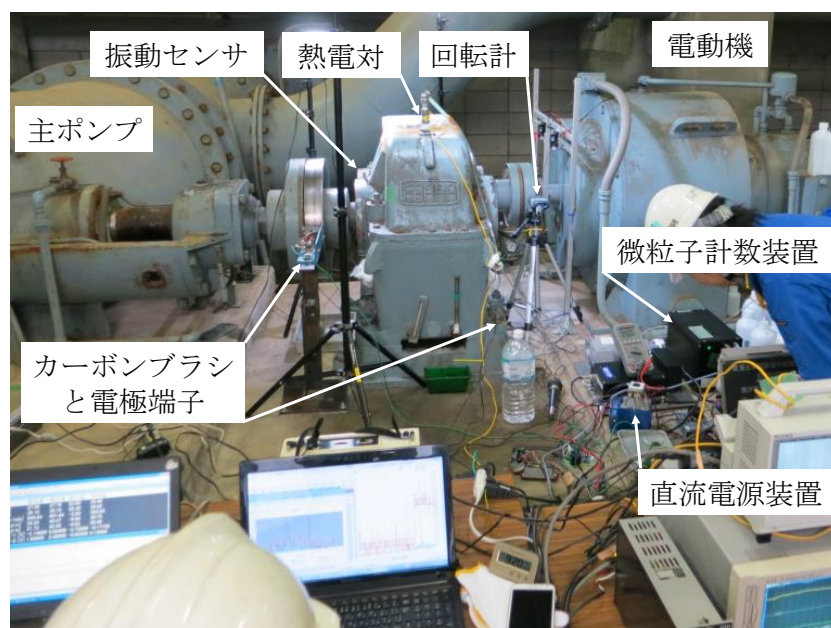
4.3.3 溶融摩耗試験

ポンプ主軸と減速機のケーシングとの間に電圧を印加して放電を起こし、溶融摩耗を減速機内部のギヤおよび転がり軸受に発生させた。減速機に設置した測定装置を **Fig. 4-4 (a)** に示す。試験前に減速機の上蓋を取り外して油槽の清掃を行い (**Fig. 4-4 (b)**)、新油 (40L) を充填した後、ろ過器を用いて油槽の浄化を行った。試験は、ポンプ主軸にカーボンブラシを、減速機のケーシングに電極端子を取り付け、直流電源装置から電圧 (最大 12V) を印加し、電流が流れた際に発生する放電によって、減速機内部のギヤおよび転がり軸受に電食を起こし溶融摩耗を発生させた。軸受の振動加速度は、軸受が組み込まれたケーシング上部表面に振動センサを貼り付け垂直方向振動を、温度はケーシング上部点検窓から熱電対を差し込み油槽中層部の油温を測定した。また、潤滑油を油槽と微粒子計数装置とを循環させて油中の金属摩耗粒子数を計測するとともに、油槽へ戻る潤滑油の一部を採油瓶で採取し、金属摩耗粒子の形態とサイズを観察した。

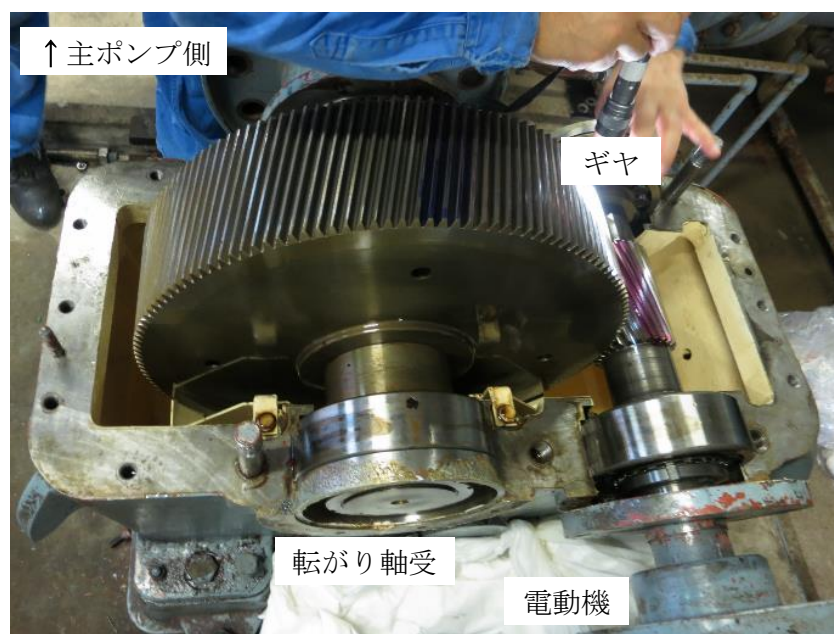
試験は 3 つのステージで実施した。第 1 ステージは電動機の回転数を 600r/min で一定とし、5 分間隔で電圧を 4V から 12V まで段階的に増加して放電を起こした。第 2 ステージは電圧を 12V で一定とし、油膜を薄くして放電を起こすために 10 分間隔で回転数を 600r/min から 100r/min まで段階的に低下させ、その間の計測および採油を行った。第 3 ステージは電圧を 12V で一定とし、油膜が厚い状態で放電を起こすために、10 分間隔で回転数を 800r/min から 1,350r/min まで段階的に増加させて試験を行った。

4.3.4 試験終了の判断基準とレプリカ作成

ポンプ設備の稼働時には、軸受の温度や音、振動加速度、そして発生した金属摩耗粒子数を常に監視し、これらの監視項目のうちいずれかが急上昇した時点でポンプの運転を停止して試験を終了した。試験後に、減速機を分解してギヤのレプリカ (樹脂による型取り) を作成した。また、試験で損傷した転がり軸受および冷却水ポンプ主軸を取り外して分解し、電子顕微鏡を用いて損傷した箇所の画像解析を行った。



(a) 減速機に設置した測定装置



(b) 減速機の内部

Fig. 4-4 減速機を対象とした熔融摩耗試験

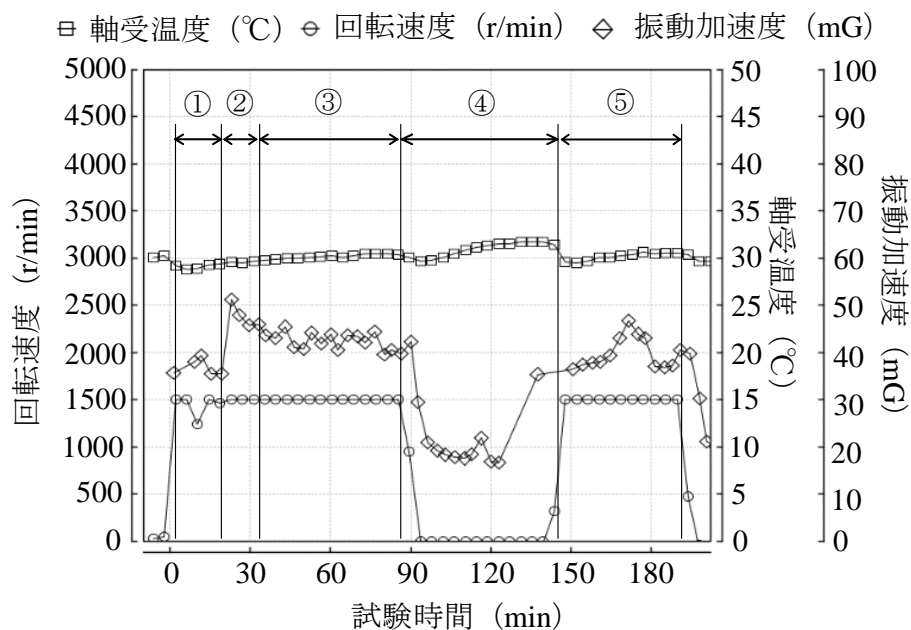
Welding wear test for the speed reducer

4.4 試験結果

4.4.1 アブレシブ摩耗試験

Fig. 4-5 に示すように、100mg/L と 1,000mg/L 異物混入グリースの給脂では、軸受温度および振動加速度に大きな変化がみられなかったことから、試験を始めて 87 分経過した時点で電動機を一時停止した。高濃度（6,100mg/L）の異物混入グリースを準備して試験を 58 分後に再開し、給脂を 3 分毎に 9 回繰り返して、排脂口から排出されたグリースを採取した。軸受温度および振動加速度を 47 分経過するまで監視したが測定値に大きな変動はみられなかった。

採取したグリースに含まれる金属摩耗粒子を光学顕微鏡で観察した結果、試験前に軸受に充填されていたグリースで観察された既存の金属摩耗粒子の形態はうろこ状の剥離片（長さ 5～10 μ m）であった。一方、異物を混入していない新しいグリースと 100mg/L 異物混入グリースの中には摩耗粒子は観察されなかったものの、1,000mg/L 異物混入グリースからはうろこ状の剥離片が観察された。6,100mg/L 異物混入グリースでは、うろこ状の剥離片と黒錆が観察され、さらに、硬いもので削られたような三日月形の摩耗粒子（長さ 4 μ m）が観察された。これを電子顕微鏡で観察した画像を **Fig. 4-6** に示す。この摩耗粒子の組成を、X 線マイクロアナライザで分析すると 99.4%が鉄であった。また、電子顕微鏡による観察では、**Fig. 4-7** に示すように軸受の転動体表面に削られてできたと思われる痕跡が観察された。



- ①新しいグリース給脂 ②100mg/L 異物混入グリース給脂
 ③1,000mg/L 異物混入 ④試験停止 ⑤6,100mg/L 異物混入

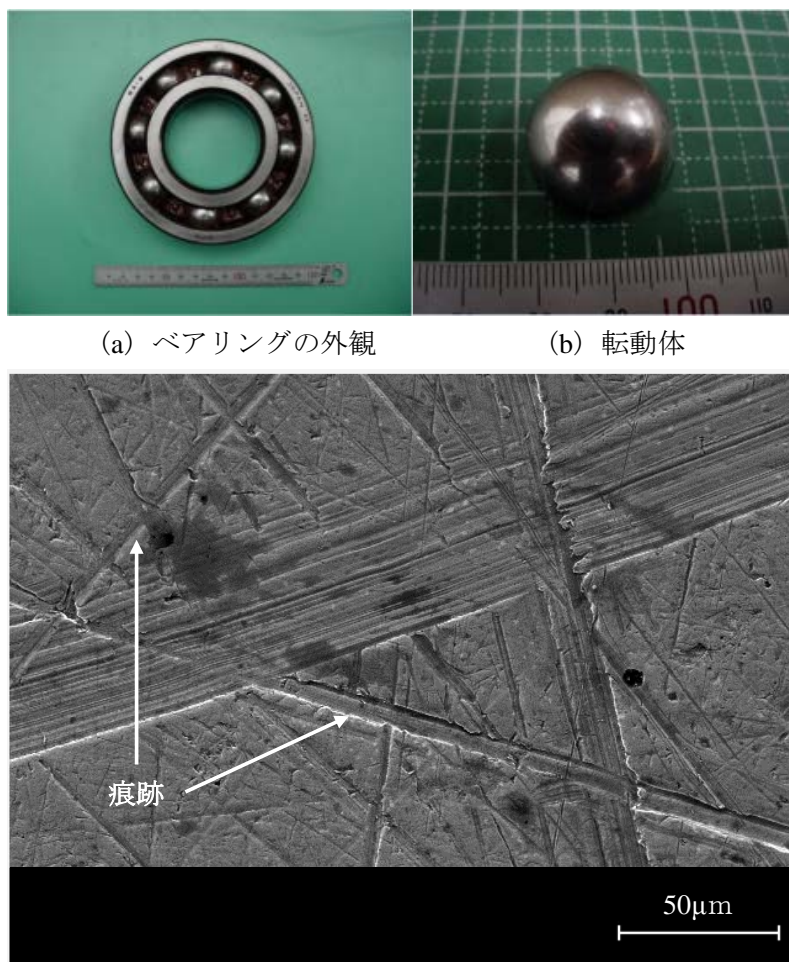
Fig. 4-5 アブレイブ摩耗試験の測定データ

Measurement data of abrasive wear test



Fig. 4-6 アブレイブ摩耗試験で確認した金属摩耗粒子

Metal wear particle of abrasive wear test



(c) 転動体表面の電子顕微鏡写真

Fig. 4-7 電動機軸受の転動体の電子顕微鏡写真

Photograph by electron microscope about the rolling element in bearing of motor

4.4.2 凝着摩耗試験

微粒子計測装置で計測した潤滑油中の金属摩耗粒子数の経時変化を **Fig. 4-8** に示す。油中の金属摩耗粒子数は 15 回の排油を行うまでは緩やかな増加傾向が見られ、図中の変化点に示すように、15 回目の排油後に急激に増加し始めた。18 回目の排油を行った後に、金属摩耗粒子数が増加傾向にあることを確認し試験を終了した。なお、摩耗粒子数が急増しているにもかかわらず、振動加速度と油温には大きな変化はみられなかった。

金属摩耗粒子の形態を観察した結果、14 回目から 18 回目の排油中に、粒子が結合して大きなサイズ（長さ 8 μ m）に成長した摩耗粒子が観察された（**Fig. 4-9**）。摩耗粒子の組成は 98.6%が鉄であった。また、電子顕微鏡による観察では、**Fig. 4-10** に示すように主軸の表面に激しい摩耗によって生じたとみられる痕跡が確認された。また、軸受の表面には軸との接触で発生したとみられる痕跡が観察された。

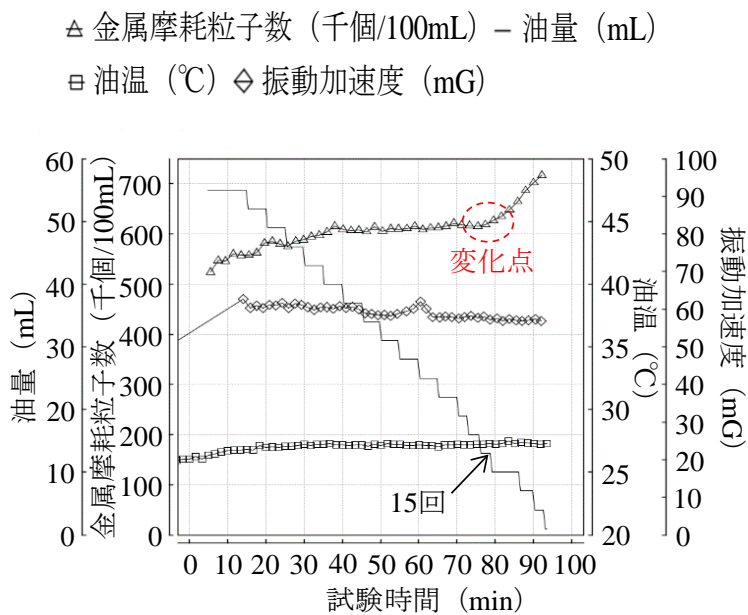


Fig. 4-8 凝着摩耗試験の測定データ
 Measurement data of adhesive wear test

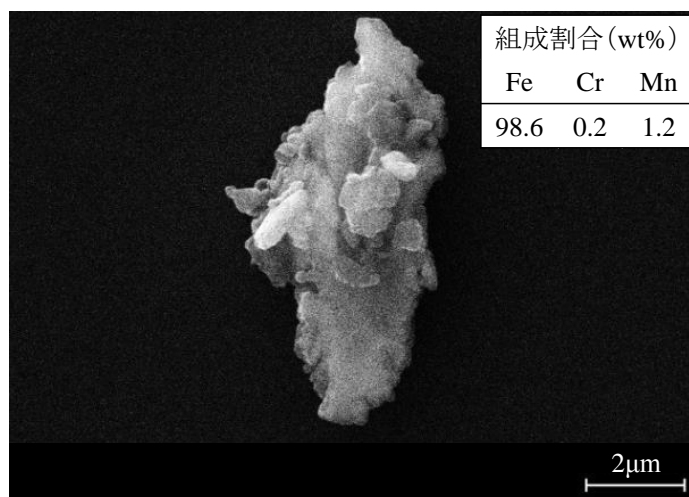
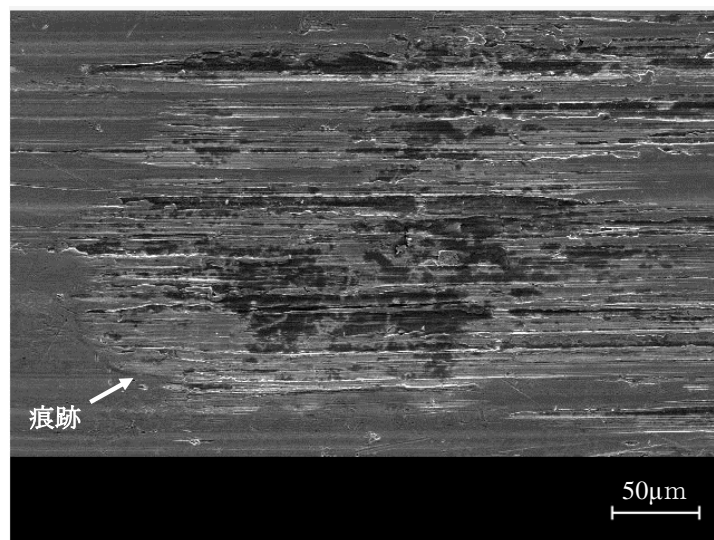


Fig. 4-9 凝着摩耗試験で確認した金属摩耗粒子
 Metal wear particle of adhesive wear test



(a) 軸の外観

(b) 切断後の軸



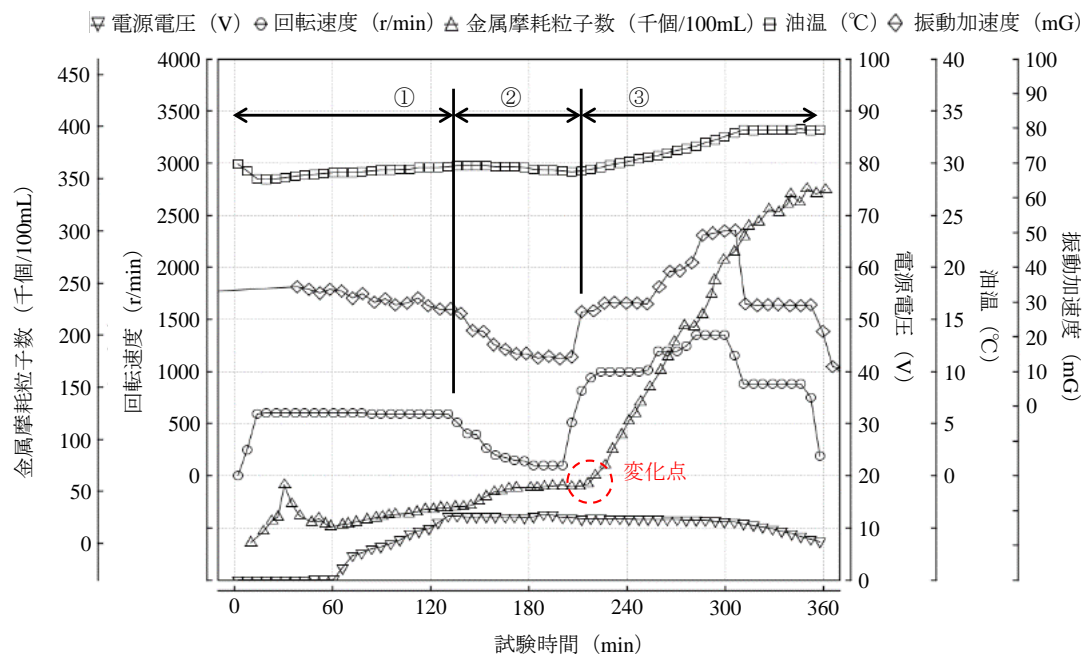
(c) 軸表面の電子顕微鏡写真

Fig. 4-10 冷却水ポンプの軸の電子顕微鏡写真

Photograph by electron microscope about the shaft of cooling pump

4.4.3 熔融摩耗試験

熔融摩耗試験で発生した金属摩耗粒子数の経時変化を **Fig. 4-11** に示す。第1ステージでは、最大電圧 12V においても金属摩耗粒子数などの数値に大きな変動はなかった。第2ステージでは、600r/min 以下の回転数では油膜が薄く常に通電状態となり放電が発生しなかったことから、金属摩耗粒子数などの数値に大きな変動はなかった。第3ステージでは、回転数を 800r/min から段階的に増加させて油膜を厚くしたことから放電が発生した。その結果、回転数を増大してすぐに金属摩耗粒子数が急激に増加する傾向が確認され、その後、880r/min で 40 分間計測を続けて試験を終了した。試験終盤の電圧降下は、直流電源装置の消耗によるものであった。試験後に分析室において、採取した潤滑油に含まれる金属摩耗粒子の形態を電子顕微鏡で観察した結果、1,000r/min を超えてからの潤滑油サンプルで硬いもので削られたとみられる形状の摩耗粒子が数多く観察され、わずかではあるが 2 μ m サイズの表面が滑らかな球状粒子 (**Fig. 4-12**) が観察された。球状粒子の組成は 98.0% が鉄であった。また、軸受の保持器およびギヤ歯面レプリカの表面観察において、熱で金属表面が熔融してできたとみられる痕跡が観察された (**Fig. 4-13, Fig. 4-14**)。



① 第 1 ステージ ② 第 2 ステージ ③ 第 3 ステージ

Fig. 4-11 溶融摩耗試験の測定データ

Measurement data of welding wear test

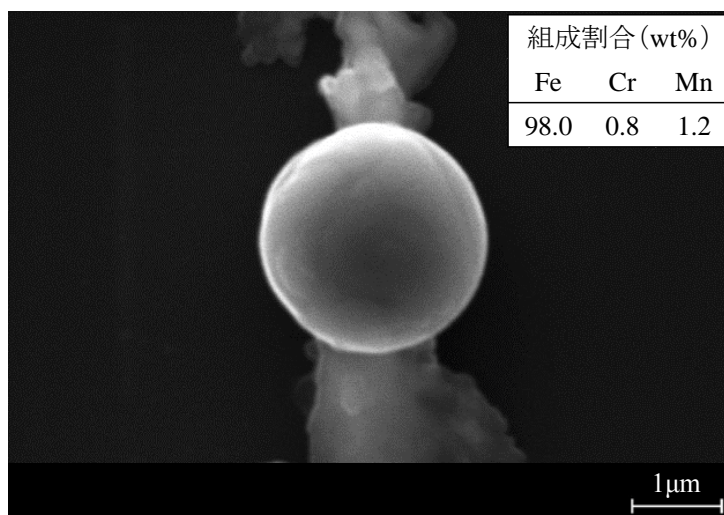
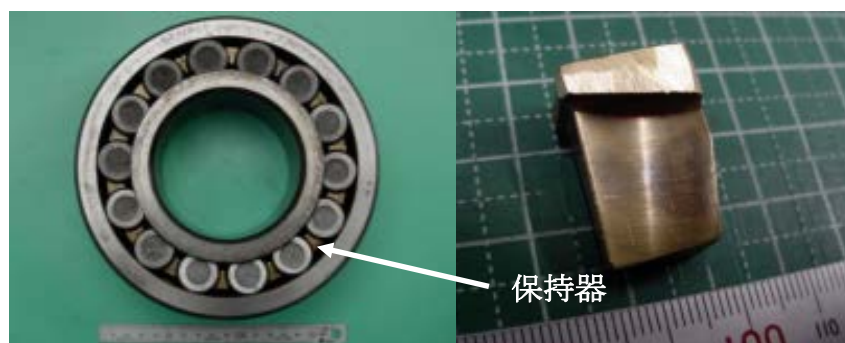


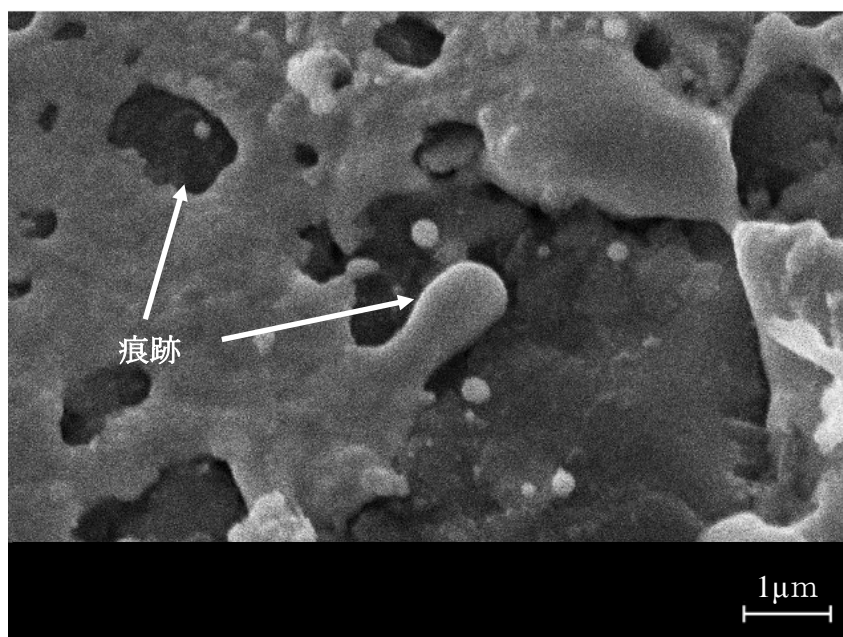
Fig. 4-12 溶融摩耗試験で確認した金属摩耗粒子

Metal wear particle of welding wear test



(a) ベアリングの外観

(b) 保持器の軌道面



(c) 保持器軌道面の電子顕微鏡写真

Fig. 4-13 軸受保持器の電子顕微鏡写真

Photograph by electron microscope about the holder of bearing

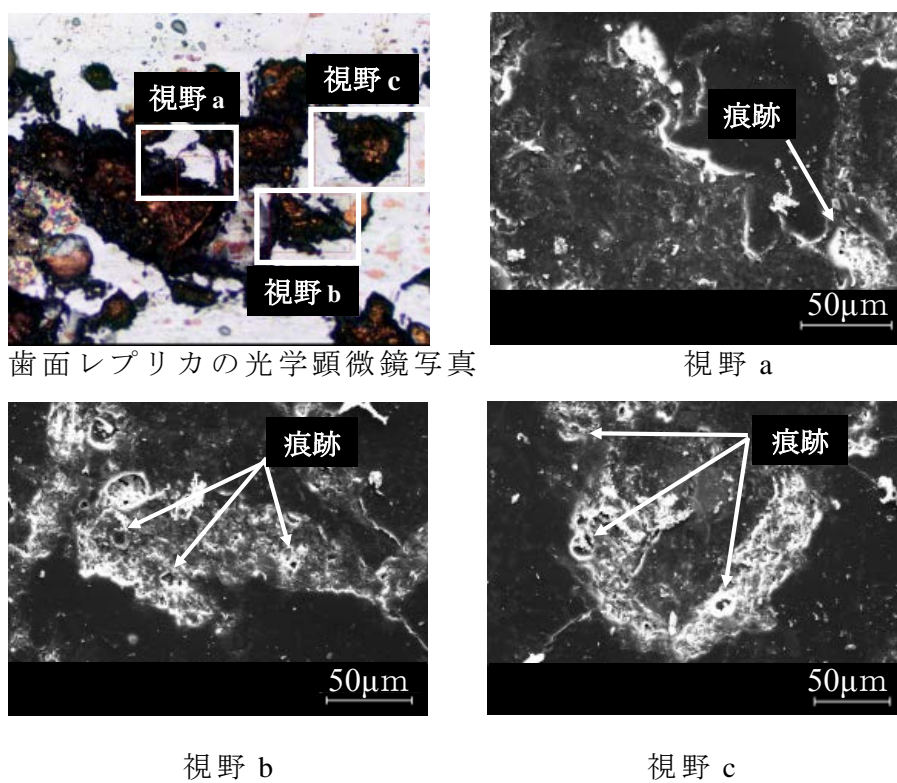


Fig. 4-14 減速機ギヤ歯面の転写レプリカ観察

Photograph by electron microscope about the replica which copied the surface of gear in speed reducer

4.5 考察

4.5.1 金属摩耗粒子とその発生部位

二つの金属が接触してすべりや転がり運動をするとき、それらの固体の表面から次々と材料が除去されていく材料損失を、摩耗という。油中の金属摩耗粒子の元素と含有量を調べて摩耗粒子の発生部位を特定し、また、その量により摩耗の程度を把握することができる（第1章を参照）。

4.5.1.1 アブレシブ摩耗粒子

光学顕微鏡による金属摩耗粒子の形態観察から、試験前に軸受に充填されていたグリースで観察された既存の摩耗粒子（うろこ状の剥離片）は、繰返し応力を受けて金属疲労により発生する疲労摩耗粒子の形態^[410]と同じ特徴を有していた。

一方、試験開始後に新たに観察された 6,100mg/L 異物混入グリース中の摩耗粒子は、**Fig. 4-6** に示すように、硬い粒子の介在による削りまたは引っ掻き作用で発生する切削型のアブレシブ摩耗粒子（長さ 4 μ m、幅 1 μ m）とみられる。この摩耗粒子は、松本らが報告した潤滑油中に混入した堅い異物が柔らかい金属の表面に食い込み、その表面から一部が突き出て対面する金属を削り発生した研削粒子（Cutting）の形態^[410]と同じ特徴を有している。このアブレシブ摩耗粒子の主成分は鉄（99.4wt%）であることから、軸受内輪か軸受外輪、転動体、保持器のいずれかで発生した摩耗粒子であると考えられる。また、電子顕微鏡による観察から、軸受の転動体表面に削られてできたと思われる切削痕を確認した（**Fig. 4-7**）。グリースに混入した試験用粉体には、二酸化ケイ素（SiO₂）が質量分率で 34~40%含まれている。これらのことから、混入した異物が軸受軌道面あるいは転動面に噛み込み、アブレシブ摩耗粒子を発生させたと考えられる。

4.5.1.2 凝着摩耗粒子

試験開始後、油槽ドレインから 15 回の排油を行うまでは、潤滑油中の金属摩耗粒子数は緩やかな増加傾向が見られ、15 回目の排油後に金属摩耗粒子数は急激に増加し始めた。これは排油によって油面が低下することで、主軸と軸受の間の油膜が形成され難くなることによって潤滑状態が悪くなり、凝

着摩耗が発生する条件が整ったためと考えられる。

金属摩耗粒子の形態を電子顕微鏡で観察した結果、**Fig. 4-9**に示すように、微細な粒子が結合して大きなサイズ（長さ $8\mu\text{m}$ ）に成長した摩耗粒子を確認した。この摩耗粒子は、三科らが報告した凝着摩耗粒子の形態^[411~413]と同じ特徴を有している。また、観察された摩耗粒子の主成分は鉄（98.6wt%）であることから、発生箇所は主軸であると考えられる。そこで、主軸を電子顕微鏡で観察すると、表面に激しい摩耗によって生じたとみられる凝着痕を確認した（**Fig. 4-10**）。これらのことから、排油による油面の低下により主軸と軸受との間の油膜が破断して、金属同士が接触して摩擦を繰り返し凝着摩耗粒子が発生したと考えられる。

4.5.1.3 溶融摩耗粒子

溶融摩耗試験では、ポンプ主軸と減速機のケーシングとの間に電圧を印加して放電を起こし、潤滑油中に球状粒子を確認することができた（**Fig. 4-12**）。この摩耗粒子は、川畑が報告した球状粒子の形態^[414]と同じ特徴を有している。球状粒子は、溶融した金属が固体に戻るときに球形になる性質の表れであることから、摺動面近傍で金属融点を超える高温が発生したことを示しており、この熱は放電で発生したと考えられる。この球状粒子は鉄（98.0wt%）が主成分であり、保持器は銅合金であったことから、球状粒子の発生箇所は軸受内輪と転動体との間か、軸受外輪と転動体との間、ギヤ歯面の間のいずれかであると考えられる。**Fig. 4-13**および**Fig. 4-14**に示すように、保持器およびギヤ歯面レプリカの表面観察において、放電による熱で金属表面が溶融したとみられる電食痕を確認したことから、軸受およびギヤ歯面の潤滑面の極微小領域において放電による電食が発生し、溶融摩耗粒子が発生したと考えられる。

なお、溶融摩耗試験の第3ステージにおいて、回転数を増大してすぐに金属摩耗粒子数が急激に増加した現象は、回転数増により軸受軌道面および歯面の摺動部に異物が噛み込み、切削型のアブレシブ摩耗粒子が発生する頻度が増加したことによるものと考えられる。

4.5.2 劣化兆候検出のための監視項目

凝着摩耗試験での潤滑油量は 55mL であり溶解摩耗試験は 40L と違いはあったが、油量に関係なく潤滑油に含まれる金属摩耗粒子数の増加傾向を時系列で検出できることを確認した。さらに、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが損傷の兆候を検出できる監視項目になることを確認した。油中の金属摩耗粒子数を計測して変化点を確認した時点で、ポンプ設備を停止して更油やろ過などの対策、もしくは分解点検を実施して原因を除去することで、ポンプ設備が損傷に至る前に劣化の進行を防ぐことができると考える。

一方、**Fig. 4-5** および **Fig. 4-8**, **Fig. 4-11** に示すように、これらの試験時に軸受の振動加速度と温度には損傷の兆候を示す変動（変化点）を確認することができなかった。振動調査技術を用いた農業用ポンプ設備の機能診断の事例が報告されているが、その有効性は十分に検証されていない^[405, 406]。これらのことから、油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は振動法や温度法と比較してより早期に劣化の兆候を捉えることができると考える。

4.6 まとめ

ポンプ設備の軸受や歯車を対象として劣化の初期段階から損傷に至る劣化促進試験を、実機を用いて実施した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) アブレイブ摩耗試験および凝着摩耗試験，溶融摩耗試験の 3 試験を行い，損傷を起こす要因として想定した現象に対応する金属摩耗粒子とその発生部位をそれぞれ確認することができた。
- (2) 油量に関係なく，潤滑油に含まれる金属摩耗粒子数の増加傾向を時系列で検出できることを確認した。
- (3) 潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態，サイズが，ポンプ設備の劣化の兆候を検出する監視項目になることを確認した。
- (4) 油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は，振動法や温度法と比較して設備の劣化の兆候をより早期に検出できることを確認した。

第4章の参考文献

- [401] 水間啓慈, 國枝 正, 森 丈久: 農業用揚排水機場の整備補修記録に基づくポンプ停止要因分析, 農業農村工学会論文集, **292** (2014), 85-91.
- [402] 若林利明, 間野大樹: 軸受異常診断の現状と動向, トライボロジスト, **59**(6) (2014), 323-329.
- [403] 本田知己: 潤滑油劣化診断の現状と動向, トライボロジスト, **59**(6) (2014), 330-336.
- [404] 日本トライボロジー学会: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 798-801.
- [405] 末政信夫, 中田一茂, 米澤 亘: 簡易振動診断技術を用いたポンプの健全度評価について, 水と土, **158** (2009), 37-43.
- [406] 蒔苗英孝, 西田真弓: 振動調査技術の農業用ポンプ設備診断への適用, 水と土, **166** (2012), 10-17.
- [407] 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 安藤泰久: 農業用ポンプ設備の潤滑油による機能診断における留意点, 農業農村工学会誌, **82**(1) (2014), 19-22.
- [408] 赤垣友治, 加藤康司, 古矢千吉, 川畑雅彦: フェログラフィーによる実機ジャーナル軸受の破損過程の解析, 日本機械学会第69期全国大会講演会講演論文集 (Vol. C) (1991), 471-473.
- [409] 川畑雅彦: 潤滑油診断技術の発電設備への適用, 配管技術, **52**(1) (2010), 62-67.
- [410] 松本善政, Roger H. Rotondi: フェログラフィー法による摩耗粒子分析と故障予知, 日本船用機関学会誌, **15** (5) (1980), 369-377.
- [411] 三科博司, 蒔田裕之, 笹田 直, 野呂瀬進: 純金属間摩耗粉形成における移着成長過程の諸相, 潤滑, **24**(7) (1978), 466-472.
- [412] 三科博司, 金釜雲巖, 河野彰夫: 摩擦に伴う表面の変形と摩耗の素過程, トライボロジスト, **41**(4) (1995), 332-339.
- [413] 三科博司, 凝着摩耗のもっとも素になる粒子(摩耗素子)の発見と摩耗の素過程, トライボロジスト, **48**(4) (2002), 307-314.

- [414] 川畑雅彦：発電設備におけるメンテナンストライボロジービジネス，トライボロジスト，**49**(3) (2004)，206-212.
- [415] 安部田泰，川畑雅彦：回転式フェログラフイー装置の開発と実機適用の事例，日本機械学会第12回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集(2013)，55-57.

第5章 農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題

— メンテナンストライボロジー —

農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、日常・定期点検記録を基に目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状態を把握することができないことから、近年、潤滑剤の評価による機能診断の適用事例が報告されている。潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑油やグリースを採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法である。第4章の実機を用いた劣化促進試験では、油中に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となることを報告した。しかし、その適用方法については、いまだ十分な評価がなされていないのが現状である。そこで、本章では、これまでに潤滑診断を実施して機器の劣化兆候を検出した研究事例を踏まえ、ポンプ設備の効率的かつ効果的な維持管理手法について報告するとともに、管理基準値の設定方法について考察する。

5.1 はじめに

2013年1月、地域の排水を担う4基の農業用ポンプ設備(チューブラポンプ, 口径2,200mm)のうち1基が、運転開始とともに減速機から異常音を発生して突然停止した。西尾ら^[501]は、減速機が損傷するに至った原因を分解して調査した結果、損傷した歯車表面の一部に経年劣化によるとみられる疲労破面を電子顕微鏡で確認している。起動時の高負荷による歯車の損傷が原因であるとみられるが、同様な故障によるポンプ設備の突発的な停止を防止し、管理していくうえで損傷などの異常発生兆候を早期に検出し、適正に対処する必要があると述べている。

第2章において、軸受の不具合の原因の多くが稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであることなどを確認し、農業用ポンプ設備における状態監視保全(Condition Based Maintenance: CBM)の適用の必要性について述べた。農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、日常・定期点検記録をもとに目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状態を把握することができないことから、近年、ポンプ設備の軸受などに使われている潤滑剤の評価による機能診断の適用事例^[502-506]が報告されている。軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法(以下、「潤滑診断」という)である。第4章の実機を用いた劣化促進試験では、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、熔融の3種類の摩耗現象を確認し、油中に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となること報告した。さらに、油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は、振動や異音が発生する前に劣化の初期段階の兆候を検出できる高感度な分析手法であることを確認した。しかし、その適用方法については、いまだ十分な評価がなされていないのが現状である。そこで、本章では、これまでに潤滑診断を実施して機器の劣化兆候を検出した研究事例を踏まえ、その適用における課題について考察する。

5.2 対象設備と診断方法

平成 24 年度から 27 年度の 4 年間で千葉や新潟、石川、愛知、滋賀、沖縄の 6 県の排水機場 19 箇所および揚水機場 7 箇所において、ポンプ設備 61 の軸受や減速機、電動機から潤滑油 114 試料とグリース 29 試料、合計 143 試料を採取した。これらの試料について第 1 章 3 節で報告した潤滑診断を実施し、潤滑剤の物理的性状および潤滑剤の汚染状態、機器の摩耗状態を確認した。

潤滑剤を分析して正確なデータを得るために、以下の点に注意を払い潤滑剤の採取を行った。まず、農業用ポンプ設備は、潤滑診断の実施を前提に設計されていないことが多いことから、対象とするポンプ設備が潤滑油を容易に採取できる構造であることが採油時の前提条件である。分析に必要な油量は、潤滑油の物理的性状に約 100mL、潤滑油の汚染状態に約 300mL、機器の摩耗状態に約 100mL、合計で概ね 500mL である。分析機関では正確なデータを得るために、分析時のロスと予備量（再分析用）を含めて採油量 1L 程度を推奨している。グリースの場合、採取量は 50g 程度である。潤滑剤を採取する際には、周囲の粉塵などが混入しないようにする必要がある。

ポンプ設備が停止している状態では、金属摩耗粒子は潤滑油より重いことから油槽に沈降している。そのため、採油前に 30 分程度運転を行い、油中の金属摩耗粒子が十分に均質となった状態の潤滑油を採取する。排水ポンプを対象とする場合は、排水路の水位を事前に調整してポンプ運転が可能な状態にしておく必要がある。一方、揚水ポンプを対象とする場合には、水利権や電力契約期間を考慮し、ポンプ運転が可能な灌漑期間中に実施する必要がある。

潤滑診断では、ほとんどの分析項目は JIS 規格に基づく指標であり定量的なデータが得られ、潤滑剤の物理的性状および潤滑剤の汚染状態、機器の摩耗状態を把握することができる。ここでの評価に用いた管理基準値は、一般的な潤滑油使用機械の重要度「普通」^[507,508] および田中らの報告^[509]を準用している。管理基準値の目安の一覧表を **Table 5-1** に示す。これらの分析項目を用いて正確な評価を行う際に、注意すべき点を以下に述べる。

(1) 潤滑剤の物理的性状

物理的性状に係る診断を行う際には、「新油の値からの変化率」を用いて評価する。このため、潤滑診断においては、対象とするポンプ設備からの採油と同時に、使用している新油の採取・分析が必須である。なお、製油会社によって性状や添加剤に相違があること

から、実際に使用している潤滑剤の名称、規格、交換時期を管理点検記録で確認する。

(2) 潤滑油の汚染状態

潤滑油の汚染に関する評価指標として、全米航空宇宙工業会が制定した NAS 等級 (National Aerospace Standard) が一般的に用いられる^[510]。NAS 等級には、潤滑油 100mL 当たりに存在する汚染粒子について、粒径別の個数で表す計数法と重量で表す質量法の規格が定められており、それぞれの等級で評価を行う。その際、潤滑油に配合されている添加剤 (微小な粒子) に影響を受ける事例などがあり、新油であっても機器に給油した段階で高位の汚染等級を示すことがあることから、新油の等級を確認して傾向管理を行う必要がある。

(3) 機器の摩耗状態

油中に浮遊している金属摩耗粒子の元素と含有量を調べ、摩耗粒子の発生部位を特定する。また、その量により摩耗の程度を把握することができる。そのための基本情報として、機器の材質と寸法を設計図書などで確認しておく必要がある。

Table 5-1 潤滑診断の評価に用いた管理基準値の目安

Management standards for Oil Analysis		
分類	分析項目	管理基準値の目安
潤滑油の 物理的性状	粘度 40℃	新油の値からの変化率 ±15%
	水分	500ppm 未満
	酸価	新油の値からの上昇率+25%以下
グリースの 物理的性状	ちょう度	新グリース値からの変化率 ±20%
	滴点	150℃以上
	酸価	—
潤滑油の 汚染状態	計数汚染度	(NAS12 級未満)
	質量汚染度	(NAS107 級未満)
機器の 摩耗状態	異常摩耗指数 (Is 値)	(10 ³ 未満)

注：() 内の値は、農業用ポンプ設備を対象とした参考値である。

(4) 総合的な評価

上述した(1), (2), (3)の項目について, それぞれの項目を単独で評価するのではなく, これらの項目を総合的に評価することで, 機器の劣化状態についての正確な評価を行うことができる. さらに, 潤滑診断を継続的に実施し, 各評価項目の変化を時系列でモニタリングすることにより, 劣化の兆候を早期に検出することが可能となる. 評価結果は, 潤滑油のろ過や分解点検などの維持管理や補修対策の要否判定に有効に活用する. 潤滑診断の評価結果に応じて推奨される対処方法を **Table 5-2** に示す.

Table 5-2 潤滑診断の評価結果と対処方法

Countermeasures against Oil Analysis

分類 診断	潤滑剤の 物理的性状	潤滑剤の 汚染状態	機器の 摩耗状態
良好	状態監視を継続		
注意	診断周期を短縮 更油を検討	診断周期を短縮 ろ過または更油を検討	診断周期を短縮
異常	更油を実施	ろ過または更油を実施	分解点検を実施

5.3 潤滑診断の結果

稼働中の農業用ポンプ設備を対象として、潤滑剤 143 試料について潤滑診断を実施した。そのうち、特徴的な金属摩耗粒子の形態を確認し、劣化の兆候を示した診断結果に着目して、それらの評価から導かれるポンプ設備の劣化状態に対処する方法を事例として以下に述べる。ここで、潤滑剤の正しい分析データに基づいた適正な潤滑診断を実施するには、潤滑剤の製品名称や交換日、稼働時間などの管理記録を入手することが求められる。

5.3.1 正常な状態

2001年に設置された横軸斜流ポンプ（口径 1,000mm）の外観および構造図（断面図）を **Fig. 5-1** に示す。減速機（遊星歯車型）のケーシング上部の給油口から潤滑油（A社製タービン油 68）を約 1L 採取し、分析を行った。

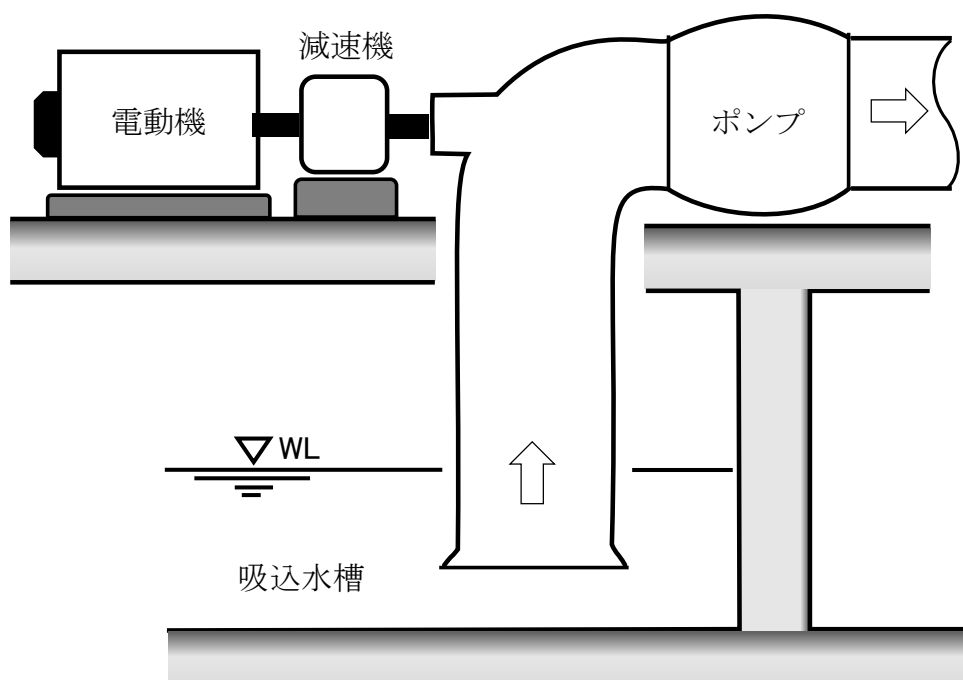
Table 5-3 に示す分析の結果から、潤滑油の物理的性状を表す粘度は $66.13\text{mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は -0.4% （管理基準の目安 $\pm 15\%$ ）、水分は 31.9ppm （同 500ppm 未満）、酸価は 0.03mgKOH/g と新油値 0.08mgKOH/g 以下であり、良好の範囲にあることを確認した。

潤滑油の汚染状態を表す計数汚染度は 8 級（同 12 級未満）、質量汚染度は 104 級（同 107 級未満）であり、良好の範囲にあることを確認した。

機器の摩耗状態について、異常摩耗を早期に発見するパラメータである異常摩耗指数（Severity Index : Is 値）は 10^0 であり正常の範囲であった（Is 値の算出方法は、第 1 章の式 1-1 を参照）。ただし、SOAP 法による金属濃度分析の結果では、銅（Cu）が 10.2mg/kg 検出されたことから、銅を使用した箇所において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。分析フェログラフィーにおいて、光学顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を **Fig. 5-2** に示す。第 1 章 **Table 1-4** に例示した正常摩耗粒子やアブレシブ（切削型）摩耗粒子、疲労摩耗粒子などを観察したが、いずれも少量であった。



(a) 外観



(b) 構造図

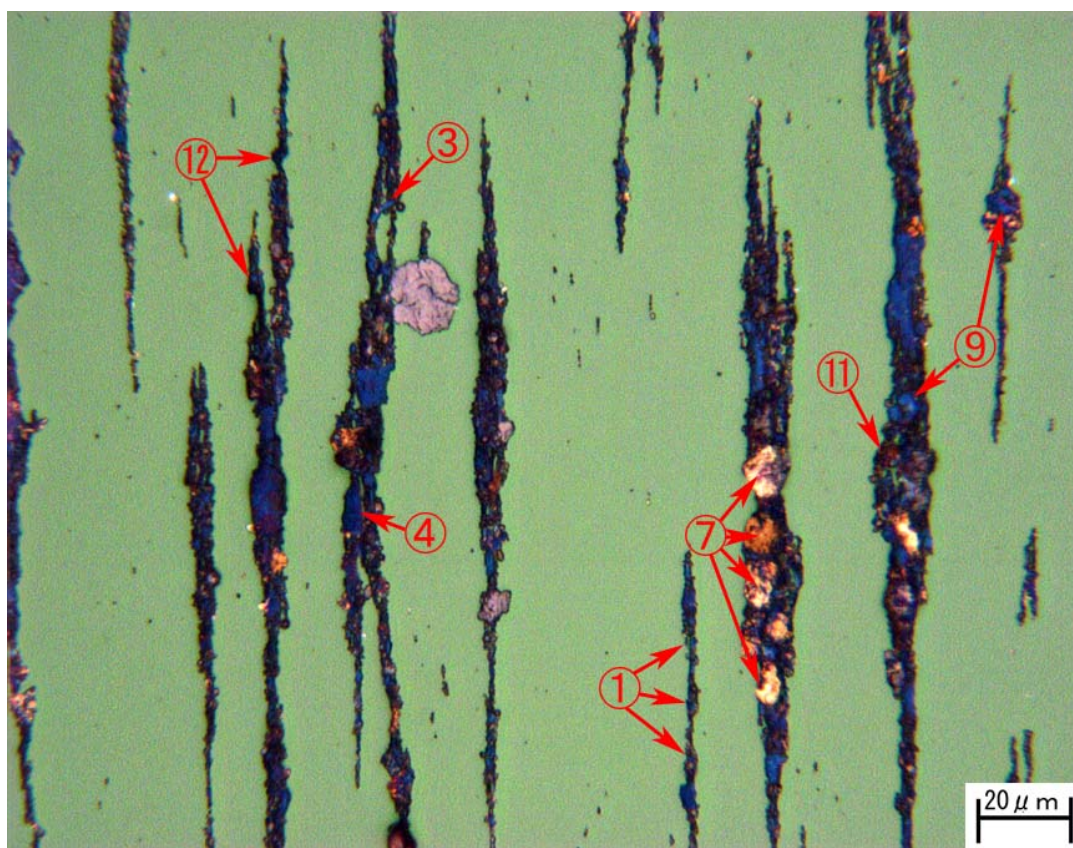
Fig. 5-1 横軸斜流ポンプ (口径 1,000mm)

Horizontal axis type mixed flow pump (ϕ 1,000mm)

Table 5-3 潤滑油の分析結果

Analysis of lubricating oil

油種 (A社製・68)		測定値	新油値		
潤滑油の 物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	66.13	66.39	
	水分	ppm	31.9	43.1	
	酸価	mgKOH/g	0.03	0.08	
潤滑油の 汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	10,416	1,017	
		15~25μm	334	137	
		25~50μm	90	83	
		50~100μm	26	20	
		100μm以上	37	0	
	計数汚染度	級	8	4	
	質量汚染度	mg/100mL	0.45	0.60	
機器の 摩耗状態	大摩耗粒子量	%/ml	2.70	0.02	
		小摩耗粒子量	%/ml	2.50	0.01
	異常摩耗指数 (Is値)	-	1.0×10 ⁰	3.0×10 ⁻⁴	
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩耗	鉄	1.1	0
			クロム	0	0
			アルミニウム	0	0
			銅	10.2	0
			鉛	0.0	0
			アンチモン	0.0	0
		汚染	ケイ素	5.0	0
			カリウム	0	0
			ナトリウム	0	0
			カルシウム	0	0
添加剤		亜鉛	6.0	1.0	
	リン	7.0	0		
	モリブデン	0.1	0.1		
	バリウム	0	0		



No.	摩耗粒子の名称	形態	量
1	正常	5μm未満の微細な薄片	少
3	アブレシブ (切削型)	切りくず状	少
4	凝着	相互移着で不規則な表面	少
7	疲労	うろこ状の剥離片 (15μm以上)	少
9	疲労	うろこ状の剥離片 (5μm未満)	少
11	赤さび	赤褐色の多晶質	少
12	黒さび	灰褐色の多晶質	少

Fig. 5-2 光学顕微鏡による金属摩耗粒子の画像

Photograph by optical microscope about metal wear particles

Fig. 5-3 に、新油ならびに使用油（試料）を赤外線吸収スペクトル法（Infrared Absorption Analysis : IR）で分析した IR チャートを示す。波数 650～1,300 cm^{-1} は細かい吸収が多数みられる指紋領域と呼ばれ、そのパターンは物質に固有のものとなる。このパターンが新油と一致していることから同じ油種であることを確認した。また、1,710 cm^{-1} 付近に吸収ピークが存在しないことから潤滑油は酸化劣化していないと判定した。

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を示す各データは良好の範囲にあった。Table 5-2 に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、減速機は正常な状態であると診断し、状態監視を継続することを推奨した。

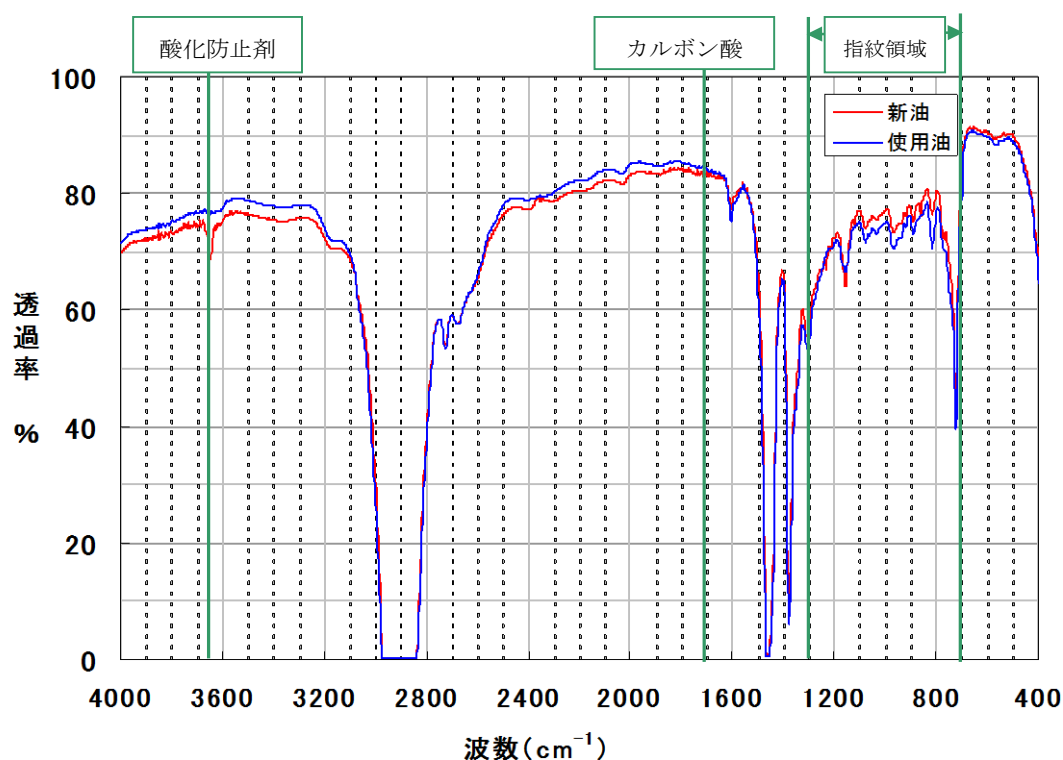


Fig. 5-3 潤滑油の IR チャート

IR-chart in oil analysis

5.3.2 異物混入による劣化

1996年に設置された横軸斜流ポンプ（口径800mm）の電動機の転がり軸受の排脂口からグリース（B社製・296）を約50g採取し、分析を行った。ただし、グリースは流動性が低いことから、潤滑部で発生した全ての金属摩耗粒子が採取した試料に含まれていないので、油中粒子数の計測は行わない。

Table 5-4に示す分析の結果から、グリースの物理的性状を表すちょう度は278であり、新油からの変化率は-6.1%（管理基準の目安±20%）と良好の範囲にあることを確認した。滴点は181℃（管理基準の目安150℃以上）であった。酸価は2.65mgKOH/gと新油値3.76mgKOH/g以下であり、IRチャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、物理的性状は良好と判定した。

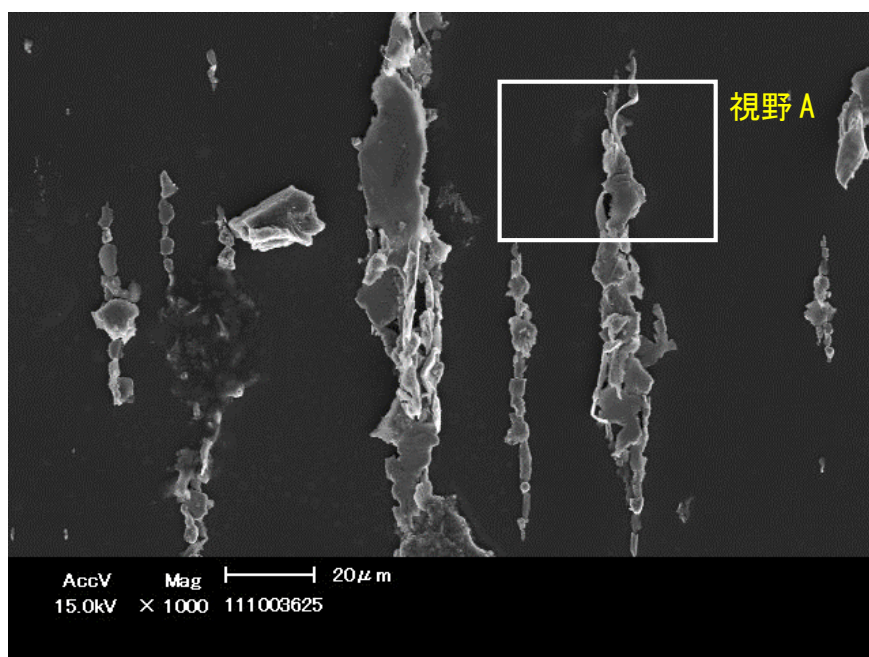
機器の摩耗状態について、Is値は 2.5×10^5 と高い数値であることから、異常摩耗の兆候を示していた。金属濃度分析の結果では、鉄（Fe）が31.6mg/kg検出されていることから、軸受軌道面および転動体表面において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。また、銅（Cu）が108.4mg/kg検出されたことから、軸受保持器の摩耗とみられる。分析フェログラフィーにおいて、電子顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を**Fig. 5-4 (a)**に示す。**Fig. 5-4 (b)**に示す視野Aに、第4章の劣化促進試験におけるアブレシブ摩耗試験で確認した金属摩耗粒子の形態と同じ特徴を有する10μmを超えるサイズのアブレシブ（切削型）摩耗粒子を観察した。これらは異物混入や金属表面の微小突起によって発生したとみられる。

潤滑診断の結果、グリースの物理的性状は良好の範囲にあるものの異常摩耗の兆候がみられ、軸受の摩耗状態が厳しくなっていることや異物混入が確認できた。**Table 5-2**に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、分解点検を実施する必要があると診断した。

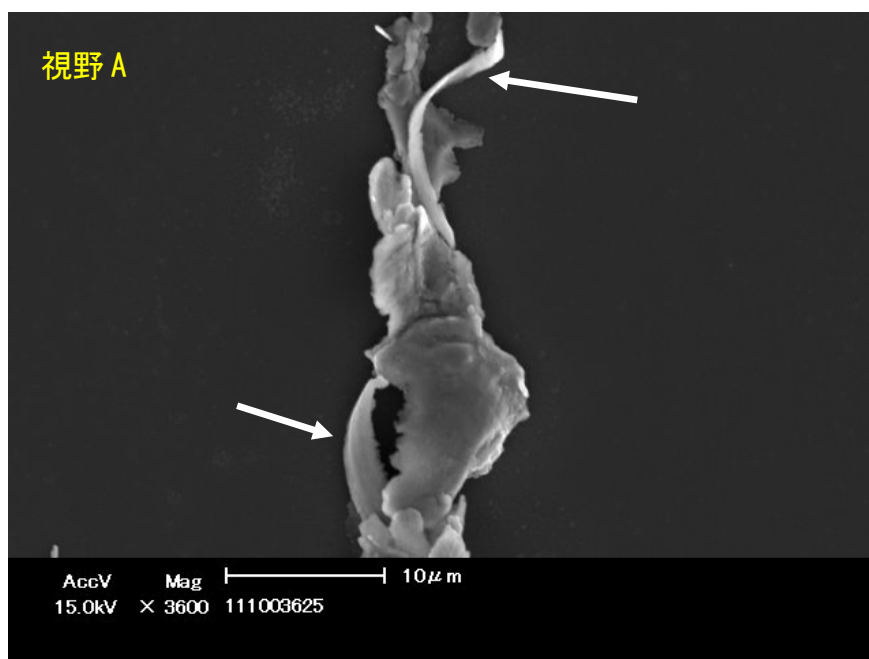
Table 5-4 グリースの分析結果

Analysis of grease

油種 (B社製296)		測定値	新油値		
グリースの 物理的性状	ちょう度	—	278		
	滴点	°C	181		
	酸価	mgKOH/g	2.65		
機器の 摩耗状態	大摩耗粒子量	%/ml	5.0×10^2	—	
	小摩耗粒子量	%/ml	7.0×10^1	—	
	異常摩耗指数 (Is値)	-	2.5×10^5	—	
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩 耗	鉄	31.6	0
			クロム	0	0
			アルミニウム	0	0
			ニッケル	46.0	5.0
			銅	108.4	0
			鉛	0	0
		汚 染	アンチモン	0	0
			ケイ素	0	0
			カリウム	0	0
			ナトリウム	739.0	14.0
		添 加 剤	カルシウム	1,138.4	475.0
			亜鉛	650.4	1,338.0
マグネシウム			214.0	373.0	
リン			328.4	1,146.0	
モリブデン	0		0		
	バリウム	68.0	12.0		



(a) 分析フェログラフィー



(b) アブレジブ（切削型）摩耗粒子

Fig. 5-4 電子顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像

Photograph by electron microscope about metal wear particles

5.3.3 潤滑不良による劣化

1963年から稼働している横軸斜流ポンプ（口径 1,200mm）の主軸のすべり軸受のケーシング上部の給油口から潤滑油（C社製・46）を約 1L 採取し、分析を行った。

Table 5-5 に潤滑油の分析結果を示す。潤滑油の物理的性状を表す粘度は $43.56\text{mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は -0.1% （管理基準の目安 $\pm 15\%$ ）、水分は 69.3ppm （同 500ppm 未満）であり、良好の範囲にあることを確認した。酸価は 0.15mgKOH/g と新油値 0.19mgKOH/g 以下であり、IR チャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、潤滑油は劣化していないと判定した。

潤滑油の汚染状態を表す計数汚染度は 11 級（同 12 級未満）、質量汚染度は 108 級（同 107 級未満）であり、汚染度は高いと判定した。

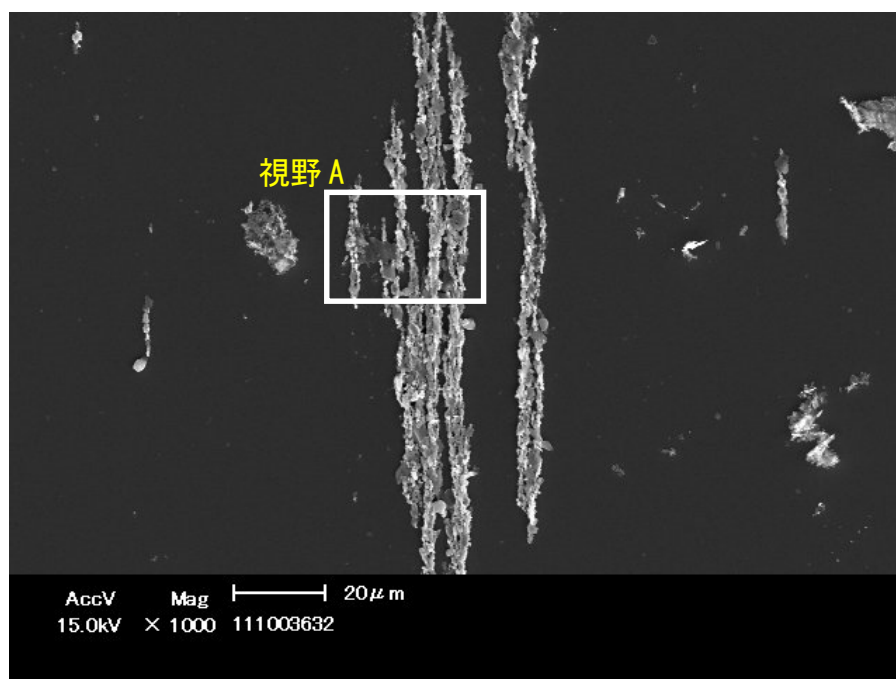
機器の摩耗状態について、異常摩耗のパラメータである I_s 値は 1.2×10^5 であったことから、潤滑状態は厳しいと判定した。また、金属濃度分析の結果では、銅（Cu）が 16.0mg/kg 検出されたことから、銅を使用した箇所において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。分析フェログラフイーにおいて、電子顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を **Fig. 5-5 (a)** に示す。**Fig. 5-5 (b)** に示す視野 A に、第 4 章の劣化促進試験における凝着摩耗試験で確認した金属摩耗粒子の形態と同じ特徴を有する $10\mu\text{m}$ を超えるサイズの凝着摩耗粒子を確認した。これらは、厳しい潤滑状態で発生することから、潤滑部で油膜切れを起こしていると思われる。

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状は良好の範囲にあるものの異常摩耗の兆候がみられ、軸受の摩耗状態が厳しくなっていることが確認できた。潤滑油の汚染度が高いことから、金属摩耗粒子が軸受摺動面に噛み込み摩耗が進行することが懸念される。**Table 5-2** に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、主軸のすべり軸受の分解点検補修を推奨すると診断した。

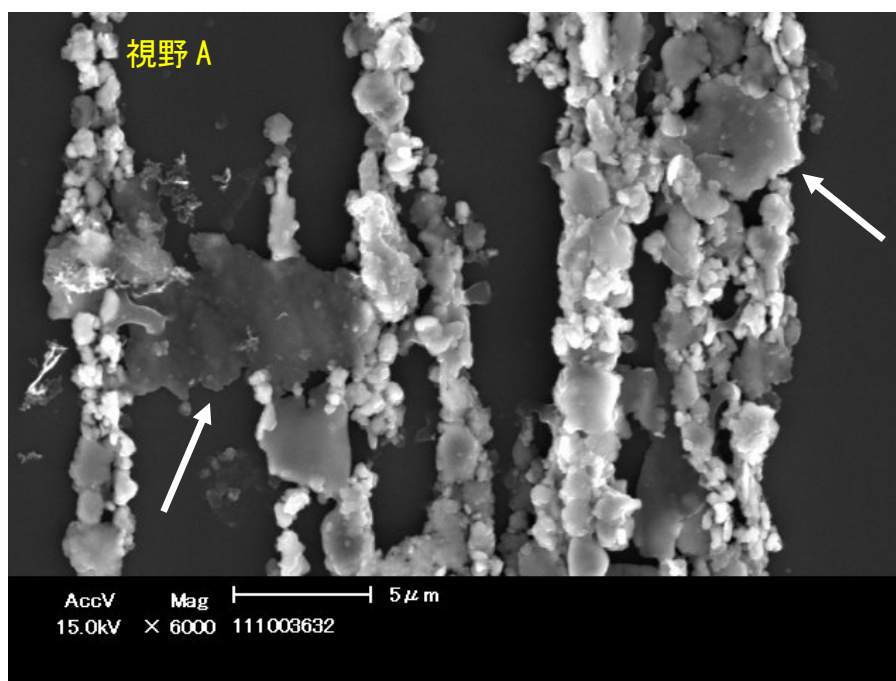
Table 5-5 潤滑油の分析結果

Analysis of lubricating oil

油種 (C社製・46)		測定値	新油値		
潤滑油の 物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	43.56	43.59	
	水分	ppm	69.3	21.5	
	酸価	mgKOH/g	0.15	0.19	
潤滑油の 汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	483,570	1,953	
		15~25μm	8,570	40	
		25~50μm	2,653	20	
		50~100μm	347	0	
		100μm以上	10	0	
	計数汚染度	級	11	3	
	質量汚染度	mg/100mL	3.80	0.10	
機器の 摩耗状態		級	108	103	
	大摩耗粒子量	%/ml	3.8×10^2	—	
	小摩耗粒子量	%/ml	1.6×10^2	—	
	異常摩耗指数 (Is値)	-	1.2×10^5	—	
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩 耗	鉄	6.6	0
			クロム	0	0
			錫	0.3	0
			銅	16.0	0
			アンチモン	0.1	0
		汚 染	ケイ素	0	0
ナトリウム			0	0	
カルシウム			0.7	0	
添 加 剤		亜鉛	73.2	64.0	
		リン	116.1	108.0	
		モリブデン	0	0	



(a) 分析フェログラフィー



(b) 凝着摩耗粒子

Fig. 5-5 電子顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像

Photograph by electron microscope about metal wear particles

5.3.4 電食による劣化

1971年から稼働しているチューブラポンプ（口径 1,200mm）の外観を **Fig. 5-6** (a) に示す。**Fig. 5-6** (b) に示すように、ポンプケーシングは二重の円筒からなり、減速機は内側の円筒ケーシング内に収められ、内筒と電動機の外周が水の流路となっている構造のポンプである。電動機や減速機はポンプ内部に収納してあるため、これらを点検するには外筒のケーシングを分解する必要がある。そこで、チューブラポンプの外部にある潤滑油循環装置から潤滑油（D社製・32）を約 1L 採取し、主軸のすべり軸受の劣化状態を診断した。

Table 5-6 に潤滑油の分析結果を示す。潤滑油の物理的性状を表す粘度は $30.61\text{mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は -5.1% （管理基準の目安 $\pm 15\%$ ）、水分は 35.6ppm （同 500ppm 未満）、酸価は 0.02mgKOH/g であり、IR チャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、良好の範囲にあることを確認した。

潤滑油の汚染状態を表す質量汚染度は 106 級（同 107 級未満）であったが、計数汚染度は 12 級（同 12 級未満）と異常の数値を示していることから、異常と判定した。

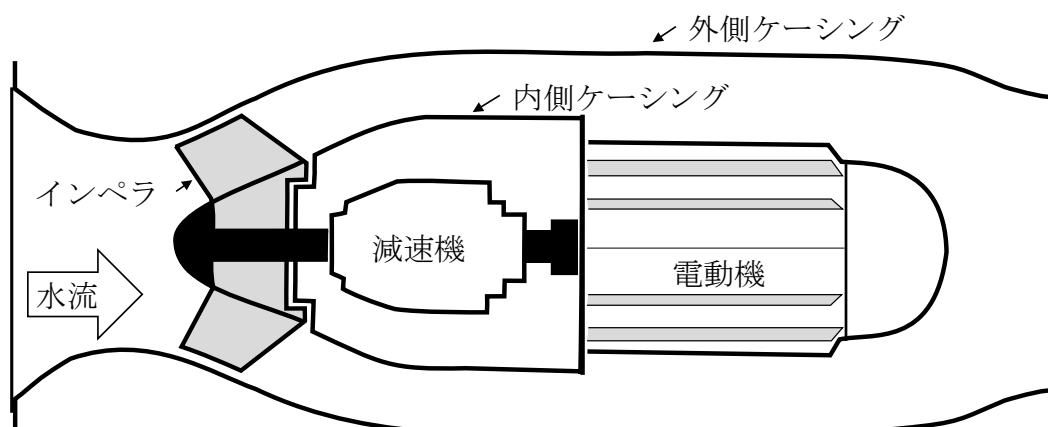
機器の摩耗状態について、異常摩耗のパラメータである I_s 値は 2.8×10^1 であり正常の範囲であった。ただし、金属濃度分析の結果では、鉄 (Fe) が 0.5mg/kg 、銅 (Cu) が 3.4mg/kg 検出されたことから、軸受において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。

電子顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を **Fig. 5-7** (a) に示す。**Fig. 5-7** (b) に示すように、表面が滑らかな球状をした溶融摩耗粒子を確認した。第 4 章の劣化促進試験における溶融摩耗試験で確認した金属摩耗粒子の形態と同じ特徴を有する $2\mu\text{m}$ サイズの球状粒子であった。球状粒子は、溶融した金属が固体に戻るときに球形になる性質の表れであることから、摺動面近傍で金属融点を超える高温が発生したことを示しており、この熱は電動機からの漏電による放電で発生したものと診断した。

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状は良好の範囲にあるが、油中の汚染度が高く溶融摩耗粒子を確認したことから、汚染物が軸受摺動面に噛み込み摩耗が進行することが懸念される。また、漏電の発生原因を確認して除去する必要がある。**Table 5-2** に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、チューブラポンプの分解点検補修を推奨すると診断した。



(a) 外観



(b) 構造図 (断面図)

Fig. 5-6 チューブラポンプ

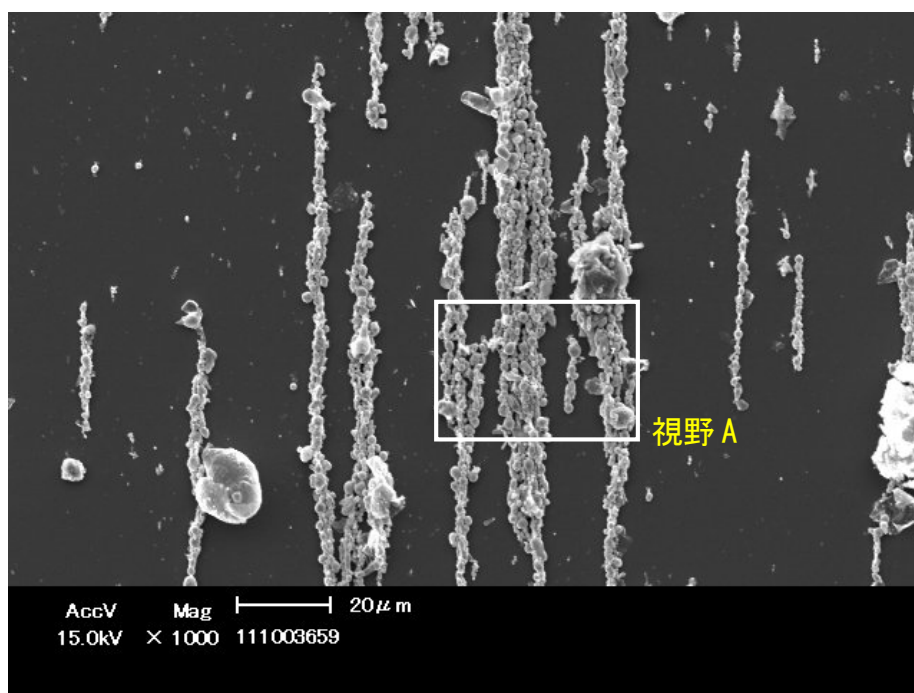
Tubular pump

Table 5-6 潤滑油の分析結果

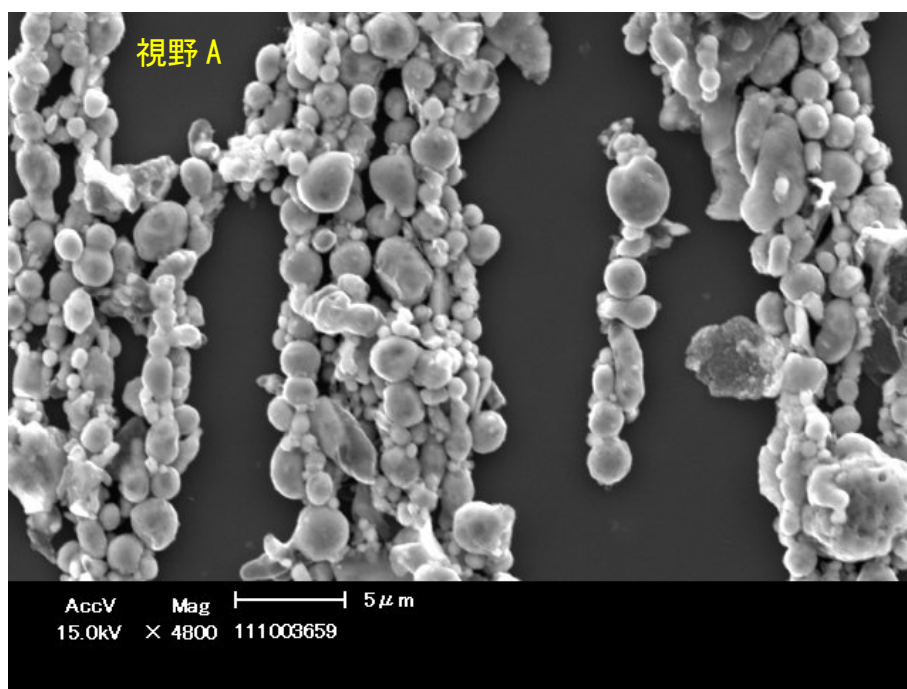
Analysis of lubricating oil

油種 (D社製・32)		測定値	新油値*	
潤滑油の 物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	30.61	32.27
	水分	ppm	35.6	41.1
	酸価	mgKOH/g	0.02	0.00
潤滑油の 汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	540,844	
		15~25μm	5,423	
		25~50μm	800	
		50~100μm	0	
		100μm以上	0	
	計数汚染度	級	12	
	質量汚染度	mg/100mL	0.90	
	級	106		
機器の 摩耗状態	大摩耗粒子量		%/ml	6.60
	小摩耗粒子量		%/ml	3.90
	異常摩耗指数 (Is値)		-	2.8×10 ¹
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩耗	鉄	0.5
			クロム	0
			アルミニウム	0
			銅	3.4
			鉛	0
			アンチモン	0
		汚染	ケイ素	0
			カリウム	0
			ナトリウム	0.2
			カルシウム	0.1
添加剤		亜鉛	0	
		モリブデン	0	
	バリウム	0		

*新油が入手困難のため、同油種による参考値.



(a) 分析フェログラフィー



(b) 溶融摩耗粒子

Fig. 5-4 電子顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像

Photograph by electron microscope about metal wear particles

5.3.5 分解作業時のヒューマンエラー

1995年に設置された横軸斜流ポンプ（口径900mm）の主軸の転がり軸受のケーシング上部の給油口から潤滑油（E社製・46）を約1L採取し、分析を行った。このポンプは設置後20年のオーバーホール点検を終えたところであり、26時間稼働した時点で採油を実施した。

Table 5-7に潤滑油の分析結果を示す。潤滑油の物理的性状を表す粘度は $44.35\text{mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は -2.2% （管理基準の目安 $\pm 15\%$ ）、水分は 14.6ppm （同 500ppm 未満）、酸価は 0.08mgKOH/g と新油値 0.09mgKOH/g 以下であり、IRチャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、良好の範囲にあることを確認した。

更油後の稼働時間が26時間と短いにもかかわらず、潤滑油の汚染状態を表す計数汚染度は12級超（同12級未満）、質量汚染度は108級（同107級未満）であり、摩耗速度が非常に速くなっている可能性があり、汚染状態は異常と判定した。

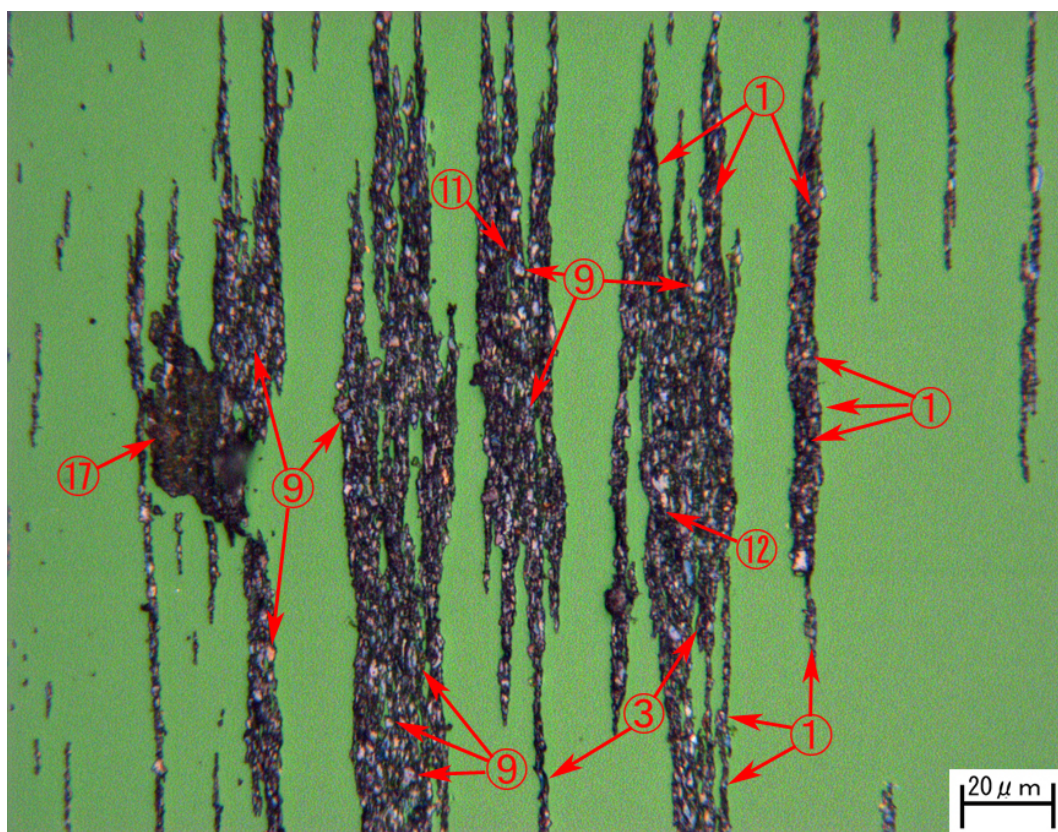
機器の摩耗状態について、異常摩耗のパラメータである I_s 値は 5.9×10^3 であったことから、潤滑状態は厳しいと判定した。また、金属濃度分析の結果では、鉄（Fe）が 8.8mg/kg 検出されたことから、軸受軌道面や転動面で摩耗が発生しているとみられる。また、銅（Cu）が 2.9mg/kg 検出されたことから、転がり軸受の保持器で摩耗が発生している可能性がある。分析フェログラフィーにおいて、光学顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を**Fig. 5-8**に示す。5 μm 未満のうろこ状の剥離片が数多く確認された。これらは微小体積が繰返し応力を受け、表面から亀裂が進展し、剥離することで発生する疲労摩耗粒子^[508]であり、粒子が大型化するとフレーキングが進行して破壊に至ることが懸念される。採取した潤滑油をろ過したメンブランフィルターの残渣には、微少な金属片や鉄さび、外部から混入した砂、さらに繊維状の異物（**Fig. 5-9**）が観察されたことから、分解作業時のヒューマンエラー^[511]の可能性があると診断した。

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状は良好の範囲にあるものの異常摩耗の兆候がみられ、軸受の摩耗状態が厳しくなっていることが確認できた。潤滑油の汚染度が高いことから、金属摩耗粒子や外部混入異物が軸受摺動面に噛み込み摩耗が進行することが懸念される。前回の更油の残留物の影響で今回の分析の汚染度が高くなった可能性も考えられる。**Table 5-2**に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、まずは油槽内を清掃して更油を行い、潤滑診断を再度実施して、摩耗の進行を定期的に監視する必要があると診断した。

Table 5-7 潤滑油の分析結果

Analysis of lubricating oil

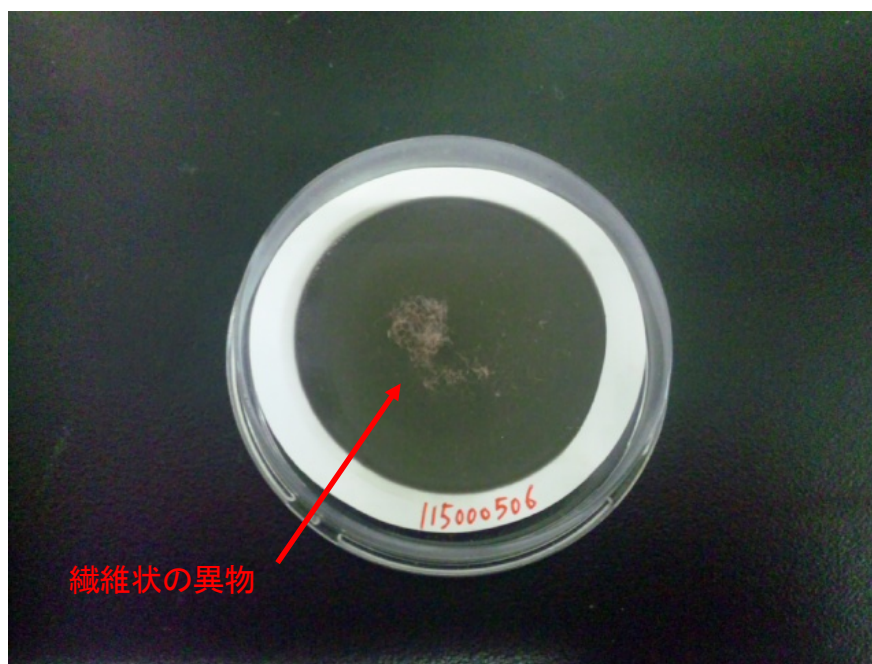
油種 (E社製・46)		測定値	新油値		
潤滑油の 物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	44.35	45.36	
	水分	ppm	14.6	23.8	
	酸価	mgKOH/g	0.08	0.09	
潤滑油の 汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	1,286,626	8,340	
		15~25μm	28,217	563	
		25~50μm	9,910	177	
		50~100μm	2,920	0	
		100μm以上	870	0	
	計数汚染度	級	12 <	6	
	質量汚染度	mg/100mL	3.20	0.40	
機器の 摩耗状態	大摩耗粒子量	%/ml	158.33	0.03	
		小摩耗粒子量	%/ml	138.33	0.01
	異常摩耗指数 (Is値)	-	5.9×10 ³	6.1×10 ⁻⁴	
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩耗	鉄	8.8	0
			クロム	0.1	0
			アルミニウム	0.1	0
			銅	2.9	0
			鉛	0.1	0
		汚染	アンチモン	0.1	0
			ケイ素	11.0	0
			カリウム	0	0
			ナトリウム	0	0.1
		添加剤	カルシウム	1.6	0
亜鉛			4.8	3	
モリブデン	0.2		0.1		
	バリウム	12.6	0		



No.	摩耗粒子の名称	形態	量
1	正常	5μm未満の微細な薄片	多
3	アブレシブ (切削型)	切りくず状	少
9	疲労	うろこ状の剥離片 (5μm未満)	多
11	赤さび	赤褐色の多晶質	少
12	黒さび	灰褐色の多晶質	少
17	フリクションポリマ	不定形	少

Fig. 5-8 光学顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像

Photograph by optical microscope about metal wear particles



(a) フィルターの外観写真



(b) 光学顕微鏡による観察

Fig. 5-9 メンブランフィルター上の異物

Contaminants on the membrane filter

5.4 考察

5.4.1 潤滑診断による劣化状態の評価と対処方法

前節で報告した5事例について、Table 5-2に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、潤滑剤の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態の各々の判定を併せて総合的に評価を行った。それらの潤滑診断の結果と対処方法を、一覧表にしてTable 5-8に示す。採取した油中に含まれる金属摩耗粒子の形態やサイズは、第4章の劣化促進試験で観察した金属摩耗粒子と同じ特徴を有していた。特に、「5.3.4 電食による劣化」と診断する根拠となった直径2 μm 程の熔融摩耗粒子（球状粒子）の存在を、分解点検の作業行程において確認することは困難である。これらの事例が示すように、油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断を用いることで、農業用ポンプ設備において劣化の兆候を検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となると考えられる。さらに、「5.3.5 分解作業時のヒューマンエラー」の診断事例では、分解点検を行った直後に潤滑診断を実施して、劣化兆候を適時適切に検出している。従来方式の時間計画保全（Time Based Maintenance：TBM）を補うに十分な効果を示していると考えられる。

これらの潤滑診断の結果から、農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うためには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて状態監

Table 5-8 潤滑診断の結果と対処方法

Countermeasures against Oil Analysis

診断事例 (節番号)	分析項目			診断結果	対処方法
	潤滑剤の 物理的性状	潤滑剤の 汚染状態	機器の 摩耗状態		
5.3.1	良好	良好	良好	正常な状態	使用を継続
5.3.2	良好	*	異常	異物混入による劣化	分解点検
5.3.3	良好	異常	異常	潤滑不良による劣化	分解点検
5.3.4	良好	異常	異常	電食による劣化	分解点検
5.3.5	良好	異常	注意	分解作業時の ヒューマンエラー	油槽を洗浄し更油、 定期的に監視

* グリースは流動性が低いことから、定量的評価は困難。

視保全（Condition Based Maintenance：CBM）を行うことが有効であると考える。トライボロジーの知見を活用した潤滑診断は、機器の劣化が進行して破損に至る前に劣化の初期段階の兆候を検出できる高感度な分析手法である^[512]。今後、潤滑診断の実測データをより蓄積して、農業用ポンプ設備の劣化状態との相関が明らかになれば、補修整備の優先度決定や分解点検時期の予測が容易になることから、ポンプ設備の計画的な維持管理が可能となると考える。

5.4.2 潤滑診断の周期と分析項目

機械部品の損傷進行度のイメージ図を **Fig.5-10** に示す^[513]。異常の兆候を早期に発見し、異常の原因を的確に診断して損傷要因を除去するためには、短い間隔で状態監視することが効果的である。特に農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、潤滑診断の間隔を短くして機器の劣化状態を継続的に監視する必要がある。しかし、潤滑診断の間隔を短くすることは、分析業務を専門機関に依頼する必要がある。

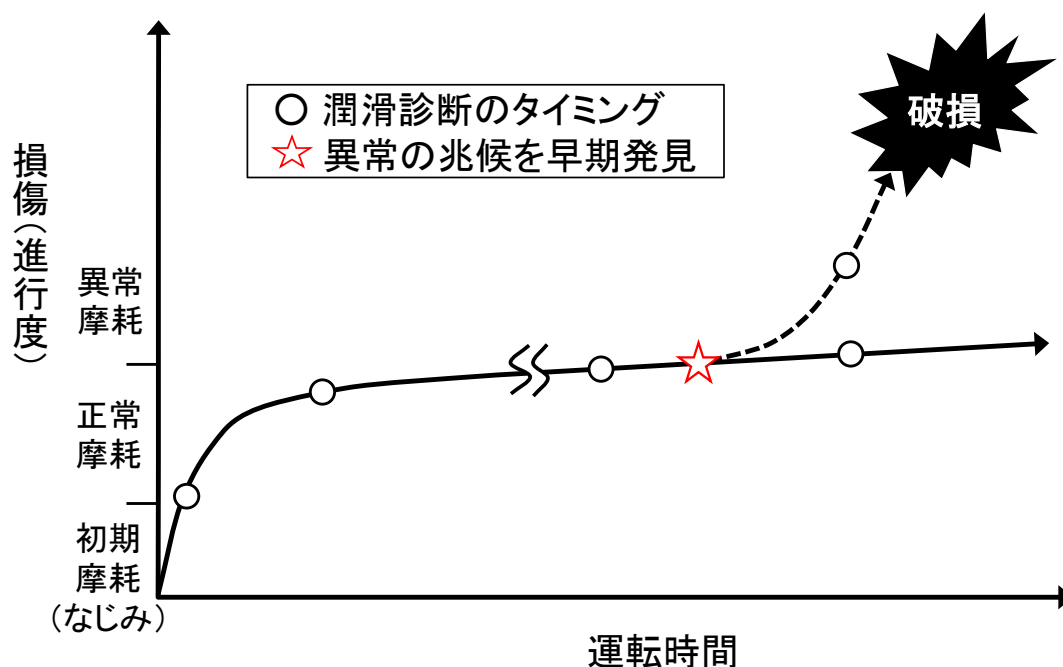


Fig. 5-10 機器の損傷進行度のイメージ図

Image of degradation progress of machinery

ることから、時間とコストが多く掛かるという課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、潤滑剤の物理的性状や汚染状態、さらに機器の摩耗状態における Is 値までの測定結果が正常であると判定されれば、金属濃度分析 (SOAP 法) や異常原因を特定するための分析フェログラフィー (光学顕微鏡による観察) を実施する必要がないことから、分析項目を減らすことが可能である。そこで、分析項目を選定した簡易な診断方法で判定を行い、異常がなければポンプ設備を継続して使用すると診断する。簡易診断で異常があると判定されれば全項目で分析を行い、異常の原因を特定するという機能診断システムを構築することが効率的かつ効果的である。このような簡易な診断方法を導入することで、潤滑診断の周期を気にすることなく状態監視の継続が容易になると考える。

5.4.3 オイルマネジメントの適用

潤滑剤の正確な分析データに基づいた適正な潤滑診断を実施するには、潤滑剤の製品名称や交換日、稼働時間などの管理記録の入手が不可欠であった。潤滑剤本来の性能が低下してくると機器の劣化が進行してポンプ設備の故障につながることから、潤滑剤の作用を十分に発揮させ、ポンプ設備を正常に稼働させるためには、分析項目を定めて潤滑剤を適切に管理し、その性状がどのように変化したかを知ることが効果的であると考えられる。このような、機械の異常や故障を未然に防いだり、進行を抑えたりすることを目的として実施される潤滑剤の状態を適正に管理する手法をオイルマネジメントと呼ぶ^[508]。

潤滑剤の劣化の要因には、酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因 (水分、塵、異物混入など) によるものがある。第3章では、潤滑油の粘度ならびにグリースのちょう度の分析結果から、それらの劣化傾向を報告した。さらに、潤滑剤の製品名称を正しく記録するなど適正に管理されている潤滑剤は著しい劣化が認められないものの、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認されたことを明らかにした。潤滑剤はポンプ設備を円滑に作動させるうえでなくてはならないものである。潤滑剤に関わるトラブルを未然に防止し、さらに、潤滑診断で正確な評価を行い劣化の進行を抑えるためには、オイルマネジメントの手法を取り入れ、ポンプ設備の保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理点検記録に残すことが効果的であると考えられる^[514]。

5.4.4 管理基準値の設定方法

潤滑剤の劣化状態の診断に用いられる管理基準値は、使用機械メーカーとユーザー、潤滑剤メーカー間の協議によって決められるものが多い。また、事故による波及効果の大きな機械では、より厳しい基準が設けられている。しかしながら、農業用ポンプ設備を対象とした潤滑診断の適用については、試行的に潤滑診断を行っているところであり、いまだ公的な指針は策定されていない。そのため、本研究の潤滑診断で用いた管理基準値の目安は、一般的な潤滑油使用機械の重要度「普通」を準用している。これらを適用して各々の分析項目を評価し、農業用ポンプ設備について劣化状態の評価を行い、推奨する対処方法を決定した。しかし、例えば2年間と長期に稼働し続ける火力発電設備と比較すると、農業用ポンプ設備の稼働条件は大きく異なり、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返す状況にある。管理基準値を適用するにあたり、農業用ポンプ設備を対象として早期に検討を進める必要があると考える。

そこで、農業用ポンプ設備に適する管理基準値を検討し実用的な指針とするために、潤滑診断に関する十分な測定データの集積を組織的に実施することを提案する。Fig. 5-11に、管理基準値の設定のためのフロー図を示す。まず、潤滑診断で正確な評価を行うためには、潤滑剤の製品名称や交換日などが適正に管理されている必要があることから、定期点検が実施されているポンプ設備を揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備に区分して、各々について複数箇所を選定する。その際に、「2.4.3 故障の地域的な分布」で述べたとおり、得られた測定データは全国のポンプ設備に共通であることから、地域を限定する必要はない。測定データを収集する際に、排水ポンプを対象とする場合は、排水路の水位を事前に調整してポンプ運転が可能な状態にしておく必要がある。一方、揚水ポンプを対象とする場合には、水利権や電力契約期間を考慮し、ポンプ運転が可能な灌漑期間中に潤滑診断を実施する。測定データを収集する頻度は、ポンプ設備の稼働条件（稼働時間や起動停止回数など）により異なるが、起動と停止を短い間隔で繰り返すポンプ設備においては、診断周期を短縮して機器の劣化状態を継続して監視することにより、劣化兆候を把握する必要がある。測定データをもとに潤滑剤および機器の劣化傾向を把握して使用限界を推定することに利用する。

管理基準値を検討するにあたり、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなり効果のないものとなる恐れがある。例えば本研究において、第3章で農業用ポンプ設備における潤滑剤の物理的性状の劣化特性を確認した結果、潤滑剤の製品名称や交換日などが適正に管理された潤滑油の粘度は劣化の傾向がみ

られなかった一方で、グリースのちょう度は 31.6%が管理基準値の目安を超過していた。このような潤滑剤の使用状況のもとで、標準耐用年数を超過しているポンプ場が施設数ベースで 67.5%であり、かつ稼働している状況にあることから、グリースのちょう度の管理基準値の目安 ($\pm 20\%$) については、機器の劣化傾向を確認したうえで緩和に向けた調整を図る必要があるといえる。

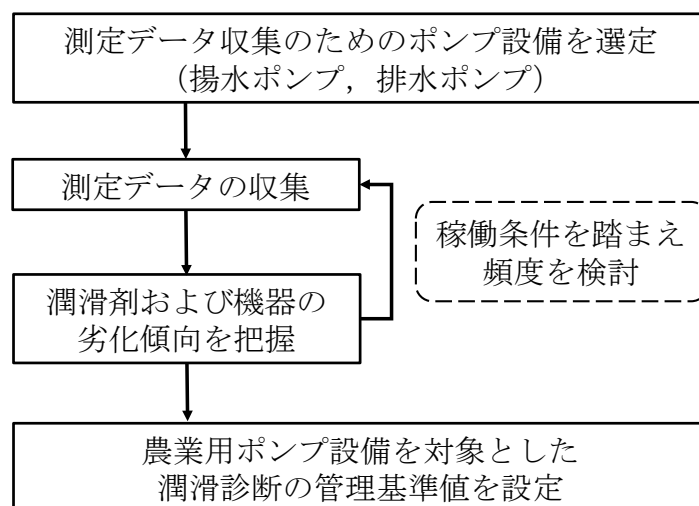


Fig. 5-11 管理基準値の設定のためのフロー図

Flowchart for setting control criteria values

5.5 まとめ

本章では、稼働中の農業用ポンプ設備から潤滑剤の採取・分析を行い、その評価を用いてポンプ設備の劣化状態の診断を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 潤滑診断は、潤滑剤の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態の各々の判定を併せて総合的に評価することで、機器の劣化状態を診断できることを確認した。
- (2) 油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断を用いることで、農業用ポンプ設備において劣化の兆候を検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となることを確認した。
- (3) 農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて、状態監視保全を行うことが有効であることを示した。
- (4) 農業用ポンプ設備において潤滑診断を効率的かつ効果的に実施するには、分析項目を選定した簡易な診断方法で判定を行い、異常であると判定されれば全項目で分析を行うことにより異常原因を特定するという新たな機能診断システムを構築することを提案した。
- (5) 潤滑剤に関わるトラブルを未然に防止し、さらに、潤滑診断で正確な評価を行い劣化の進行を抑えるためには、オイルマネジメントの手法を取り入れ、ポンプ設備の保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理点検記録に残すことが重要であることを示した。
- (6) 農業用ポンプ設備を対象とした潤滑診断における管理基準値について、その設定方法を提案した。

第5章の参考文献

- [501] 西尾光弘, 國枝 正: 七穂排水機場減速機損傷から学ぶ新たな排水機場診断, 農業農村工学会誌, **84**(3) (2016), 44-45.
- [502] 國枝 正, 森 充広, 水間啓慈: トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (2012), 834-835.
- [503] 河淵鉄郎, 國田欣悟, 熊澤 明: トライボロジーを活用した機械設備の診断手法について, JAGREE 85 (2013), 44-50.
- [504] 萩原大輔: ポンプ施設における機能診断技術について, JAGREE 85 (2013), 58-62.
- [505] 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 川畑雅彦: 潤滑油によるポンプ設備の機能診断, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (2013), 780-781.
- [506] 安部田泰, 伊藤耕祐, 國枝 正, 水間啓慈: 油中粒子解析法を用いた潤滑状態監視・診断の実機適用, 平成 27 年度農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨 (2015), 21-24.
- [507] 日本トライボロジー学会: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 846-849.
- [508] 日本トライボロジー学会編: メンテナンストライボロジー, 養賢堂 (2006), 84-146.
- [509] 田中隆夫, 片野浩司, 山口和哉: 河川用樋門開閉装置における潤滑油診断を利用した機械要素の劣化判断手法について, 日本機械学会第 12 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集 (2013), 31-36.
- [510] 松本善政, Roger H. Rotondi: フェログラフィー法による摩耗粒子分析と故障予知, 日本船用機関学会誌, **15** (5) (1980), 369-377.
- [511] 柚原直弘, 稲垣敏之, 古川 修: ヒューマンエラーと機械・システム設計, 講談社 (2012), 1-35.
- [512] Hiral Shah, Harish Hirami: Online condition monitoring of spur gears, The International Journal of Condition Monitoring, **4**(1) (September 2014), 1-8.
- [513] 日本トライボロジー学会編: メンテナンストライボロジー, 養賢堂 (2006), 147-169.
- [514] 國枝 正, 安藤泰久, 水間啓慈, 森 充広, 安部田泰: 農業用ポンプ設備へのオイルマネジメントの適用, 農業農村工学会論文集, **299**(83-5) (2015), IV_19-IV_20.

第6章 農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム

潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する機能診断技術である。農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、短い間隔で状態監視することが効果的であるが、潤滑診断の間隔を短くすることは分析業務を専門機関に依頼する必要があることから、時間とコストが多く掛かるという課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、分析項目を選定した一次スクリーニングを実施することが可能である。そこで本章では、分析項目を選定した簡易な診断方法を適用して、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システムについて述べる。

6.1 はじめに

第5章では、農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて状態監視保全 (Condition Based Maintenance : CBM) を行うことが有効であることを示した。潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する機能診断技術である^[601-605]。本研究で対象とする農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある^[606]。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、短い間隔で状態監視することが効果的であるが、潤滑診断の間隔を短くすることは分析業務を専門機関に依頼する必要があることから、時間とコストが多く掛かるという課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、潤滑剤の物理的性状や汚染状態、さらに機器の摩耗状態における異常摩耗指数 (Severity Index : Is 値) の測定結果が正常であると判定されれば、金属濃度分析 (Spectrometric Oil Analysis Program : SOAP 法)^[607]や異常原因を特定するための分析フェログラフィー (光学顕微鏡による観察)^[608, 609]を実施する必要がない。そのため、潤滑診断を行う前に、分析項目を選定した一次スクリーニングを実施することが可能である。

そこで本章では、分析項目を選定した簡易な診断方法 (以下、「簡易診断」という) を適用して、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システムについて述べる。

なお、本章で述べる携帯型測定装置の開発は、農業用ポンプ設備の機能診断技術の適用を促進することを目的として、農林水産省農村振興局・官民連携新技術研究開発事業「トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断技術開発 (平成24年～26年)」^[610-612]において、民間企業と共同研究を行った成果の一部である。

6.2 簡易診断の分析項目と管理基準値

農業用ポンプ設備では、軸受や減速機などの回転部に潤滑剤が使用されている。川畑らは、ポンプ設備に用いられる潤滑油の劣化の多くが酸化劣化と水分混入であることから、簡易診断の分析項目では潤滑油の酸価と水分を測定すれば、潤滑油の物理的性状を概ね判定できると報告している^[612]。このことについては、第3章の潤滑剤の劣化特性において潤滑油の粘度の変化率は小さいことを確認したことから、同様のことがいえる。潤滑油の汚染に関する劣化は、油中の固形物の粒子数と質量の増加であり、粒子数の増加現象は78%であり質量の増加現象22%に比べて非常に高いことから、粒子数を示す計数汚染度を選定項目とすると述べている。また、機器の摩耗状態では、凝着摩耗粒子(37%)、疲労摩耗粒子(32%)、切削摩耗粒子(26%)が多く発生していると報告している。

機器の摩耗状態を判定する定量フェログラフィーは、摩耗粒子の量を測定し、その経時変化から異常摩耗の発生時期を予測する分析法である。「正常摩耗粒子は小さく、異常摩耗粒子は大きいことが多い」という現象を利用し、大摩耗粒子(15 μm 以上)と小摩耗粒子(5 μm 以下)に分け、式(6-1)を用いてIs値を算出する。

$$Is \text{ 値} = (P_L + P_S) (P_L - P_S) = P_L^2 - P_S^2 \quad \dots\dots\dots (6-1)$$

ここで、 P_L =大摩耗粒子(15 μm 以上, 単位:%/mL), P_S =小摩耗粒子(5 μm 以下, 単位:%/mL), $(P_L + P_S)$ =全摩耗量に相当, $(P_L - P_S)$ =摩耗の異常度である。異常摩耗が始まると大摩耗粒子が支配的になり Is 値が急上昇することから、異常の始まりを見つけることができる。そこで、定量フェログラフィー(Is 値)を選定項目とする。

これらのことから、簡易診断における潤滑油の分析項目として、物理的性状は水分と酸価を、汚染状態は計数汚染度を、機器の摩耗状態は定量フェログラフィー(Is 値)を選定することとした。潤滑診断の分析項目と簡易診断における選定項目を整理した一覧表を **Table 6-1** に示す。また、選定した項目の管理基準値は、一般的な潤滑油使用機械の重要度「普通」^[613]および田中らの報告^[614]を準用している。管理基準値の目安の一覧表を **Table 6-2** に示す。

Table 6-1 潤滑診断の分析項目および簡易診断の選定項目

Analysis items of lubrication diagnosis and chosen items of simplified diagnosis

項目	潤滑診断の分析項目と仕様	選定項目
潤滑油の 物理的性状	粘度 (40°C) / JIS K 2283	
	水分 / JIS K 2275	○
	酸価 / JIS K 2501	○
	赤外線吸収スペクトル法 (IR) / JIS K 0117	
潤滑油の 汚染状態	計数汚染度 / JIS B 9934 (NAS1638)	○
	質量汚染度 / JIS B 9931 (NAS1638)	
	光学顕微鏡写真	
機器の 摩耗状態	金属濃度分析 (SOAP 法) / ICP 発光分光分析	
	フェログラフィー法 (定量フェログラフィー・分析フェログラフィー)	○ (Is 値)

Table 6-2 潤滑診断の評価に用いた管理基準値の目安

Management standards for Oil Analysis

分類	分析項目	管理基準値の目安
潤滑油の 物理的性状	水分	500ppm 未満
	酸価	新油の値からの上昇率+25%
潤滑油の 汚染状態	計数汚染度	(NAS12 級未満)
機器の 摩耗状態	異常摩耗指数 (Is 値)	(10 ³ 未満)

注：() 内の値は、農業用ポンプ設備を対象とした参考値である。

6.3 携帯型測定装置の開発

分析項目を選定した簡易な診断方法で、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことが可能な携帯型測定装置の開発を行う。携帯型測定装置は、潤滑油の物理的性状に関する酸化劣化の発生および水分混入を評価する劣化簡易測定装置と、潤滑油の汚染に関する計数汚染度の増加を評価する汚染度簡易測定装置、さらに潤滑部の摩耗に関する凝着摩耗と切削摩耗、疲労摩耗の発生を評価する摩耗簡易測定装置の3機種とし、それぞれについて設計・製作を行う。携帯型測定装置は持ち運びが可能な大きさとし、現地に100Vの電源と操作台（折りたたみ机）があれば簡易診断を行うことができる仕様とした。

携帯型測定装置の測定は、ポンプ設備の運転管理者が潤滑剤に関する専門知識が十分でなくても判断できることを前提条件として、良好を○、注意を△、異常を×とする三段階に評価して表示する形式とした。ここでは、良好とは問題がない場合とし、注意とは軽微な劣化が発生している場合を、異常とは劣化が比較的進行している場合と定義する。

6.3.1 潤滑油の劣化簡易測定装置

潤滑油の劣化の多くが酸化劣化と水分混入であることから、潤滑油の酸価（mgKOH/g）と水分（ppm）を測定すれば、その劣化の程度を概ね推定できる。開発した携帯型測定装置は、ATR（Attenuated Total Reflection, 減衰全反射）結晶を用いた検出部と、評価部および表示部から構成されている（Fig. 6-1）^[615]。本装置の特徴は、反射光を目的の波長に絞り、潤滑油の酸化劣化の指標となるカルボキシル基（-COOH）により赤外線が吸収される帯域（ $1,710\text{cm}^{-1}$ 付近）と、水分では水酸基（-OH）により吸収される帯域（ $3,100\sim 3,600\text{cm}^{-1}$ 付近）の2種の赤外線通過帯域フィルタを採用し、それらを受光素子の前面に並列配置して自動スライドさせることにより、2帯域の赤外線を簡易な機器構成で分光可能にした点にある。さらに、投入光量の変化を補正するために、潤滑油を構成する様々な分子の固有振動領域と無関係な $2,000\text{cm}^{-1}$ 付近の通過帯域フィルタを用いて精度を上げている。

Fig. 6-1に示すように、ポンプ設備の回転部から採取した潤滑油を、検出部のATR結晶表面に塗布する。その際にATR結晶内を通過した赤外線は、界面で潤滑油の影響を受けて反射光のエネルギーが減少する。2種の帯域フィルタを通過した赤外線の強度を受光素子で電氣的に検出することによって、潤滑剤の酸価と水分を各々測定することができる。

潤滑油を五段階に酸化劣化させ、それぞれの試料の酸価と検出した電圧の関係を Fig. 6-2

に示す。酸価の値が大きいほど測定される電圧の値は小さくなり、両者には線形の関係が認められる。このグラフに三段階評価（良好、注意、異常）のイメージ図を重ねる。潤滑油に含まれる添加剤の種類や量で酸化劣化の上限値が異なることから、基油の酸化劣化がこれ以上に進行し難いと判断できる酸価の増加量を限界値と定め、限界値の半値を判定基準値とした。水分については、潤滑診断の管理基準値の目安である 500ppm を判定基準値とした。判定基準値以上の酸価であれば「異常」とし、判定基準値の半値以上で判定基準値未満であれば「注意」、判定基準値の半値未満の場合には「良好」と判定する。

本装置の外観と表示画面を Fig. 6-3 に示す。外寸は縦 195 mm，横 95mm，高さ 51mm で、重さは 553g と小型軽量である。採取した潤滑剤を検出部に塗布するだけで専門的な知識がなくても劣化状態を判断できるよう、瞬時に、酸化劣化と水分上昇の程度をそれぞれ三段階に評価（良好、注意、異常）して表示することができる。なお、取得データ（数値）についても表示することが可能である。

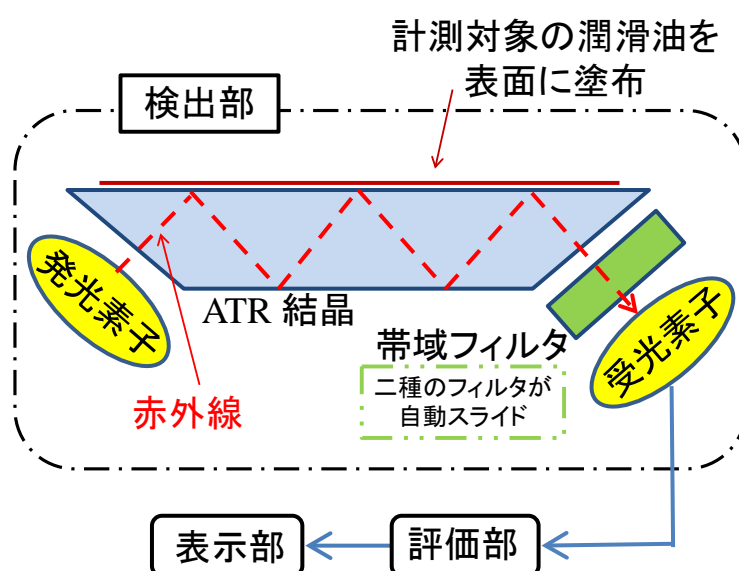


Fig. 6-1 劣化簡易測定装置のイメージ図

Image of simplified measurement device for degradation

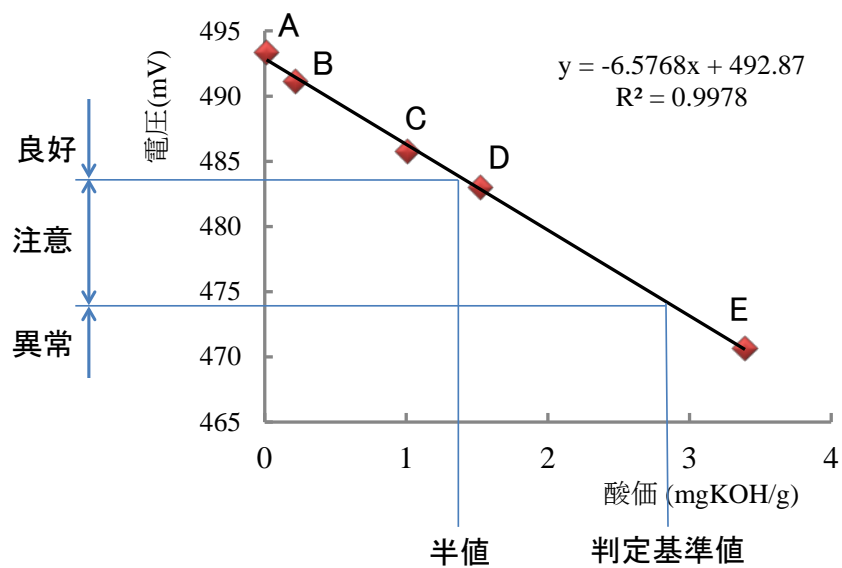


Fig. 6-2 三段階評価のイメージ図

Image of estimation with three phases



(a) 外観

(b) 表示画面1

(c) 表示画面2

Fig. 6-3 劣化簡易測定装置と表示画面

Simplified measurement device of degradation and displays

6.3.2 潤滑油の汚染度簡易測定装置

計数汚染度の測定には、油中の金属摩耗粒子の個数を計数する光遮へい式レーザ計測装置が一般的に用いられるが、油中に存在する気泡も光を遮へいするため、計測装置は気泡を除去する（脱泡）機能が不可欠である^[616]ことから大型で高価となる。そこで、光遮へい効果に光反射効果を組み合わせることにより油中の金属摩耗粒子と気泡を瞬時に判別できる技術を適用することで、現場にも持ち運びできる小型の測定装置を開発した。

本装置で用いる新たな測定法として、これまで区別することができなかった固形物と気泡を自動的に判別できる微粒子計数方法^[617]を適用する。その技術の原理を以下に述べる。気泡は潤滑油中において真球に近い形状で存在する。一方、固体粒子は板状や針状などいびつな形状をしているものがほとんどである。そこで、いびつな形状に当たった光は不規則に反射し、真球に当たった光の反射光は左右対称となることを利用し、左右に反射した光が同期した場合に気泡と判別して粒子カウントから外すこととする。このようにして、一部遮へいされた透過光強度から粒子の大きさを計測し、反射光の同期を利用してコンピュータ上で三次元解析することによって粒子と気泡を判別することが可能となる。そのため、気泡の影響を考慮することなく、採取した潤滑油をそのままの状態での測定できることから、現場での簡易診断に適した技術であるといえる。

本装置では、潤滑油を検出部まで運ぶ方法として、**Fig. 6-4**に示すようにシリンジとリニアアクチュエータを使用することで、油種によらず一定流量で、微量油量での測定を可能とした。これにより、油送ポンプや脱泡用コンプレッサーが不要となることで小型化を実現した。

計数汚染度については、潤滑診断の管理基準値の目安であるNAS12級を判定基準値とした。判定基準値以上の汚染度であれば「異常」とし、1等級下を「注意」、2等級以下の場合には「良好」と判定する。

本装置の外観と表示画面を**Fig. 6-5**に示す。外寸は横247mm、奥行226mm、高さ308mmで、重さは8.5kgであり、持ち運びが可能なサイズである。測定結果は、三段階に評価（良好、注意、異常）して表示する。なお、取得データ（数値）についても表示することができる。

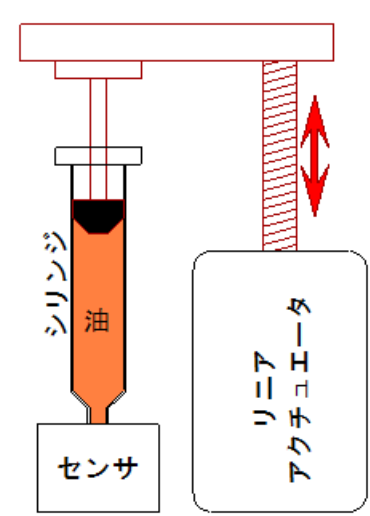
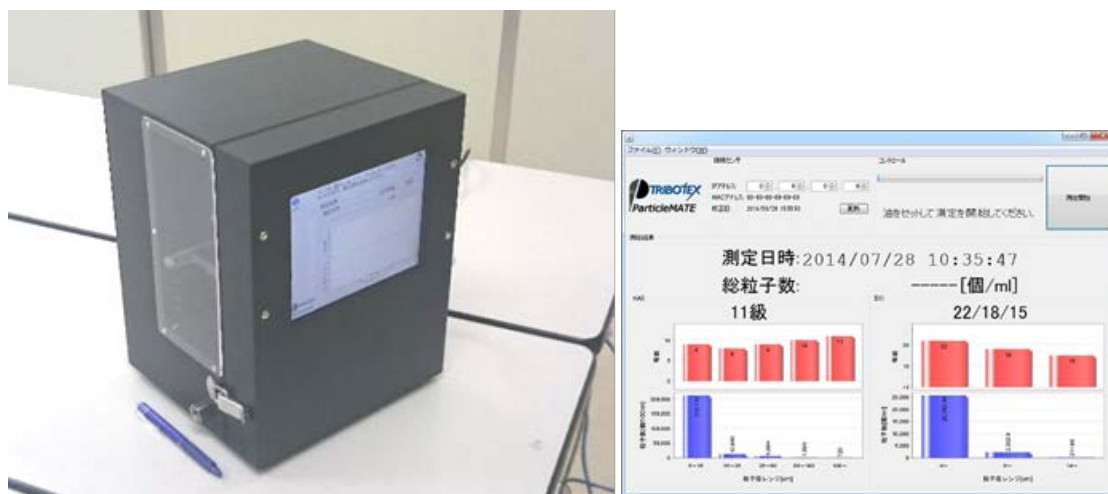


Fig. 6-4 汚染度簡易測定装置のイメージ図

Image of simplified measurement device of pollution degree



(a) 外観

(b) 表示画面

Fig. 6-5 汚染度簡易測定装置と表示画面

Simplified measurement device of pollution degree and display

6.3.3 機器の摩耗簡易測定装置

定量フェログラフィーで機器の摩耗状態を判定するには、まず磁場を用いて金属摩耗粒子を潤滑油から取り出して大きさの順に配列したデータプレートを作成し、観察・測定する必要がある。データプレートを簡単に作成できる小型軽量の回転式フェログラフィー分析装置^[618]が既に実用化されていることから、本研究では、回転式フェログラフィー分析装置で作成したデータプレートを用いて、現場で簡単に摩耗状態を測定できる装置を開発した。

Fig. 6-6に示すように、機器の摩耗簡易測定装置は、データプレートを置くステージをモーターで水平方向に可動することにより、金属摩耗粒子をマイクروسコープで自動的に観察できる構造とした。

回転式フェログラフィー分析装置は、遠心力を利用して金属摩耗粒子を配列させる方法をとることにより、データプレートの中心近くに大摩耗粒子が円状に補足される。また、小摩耗粒子は同心円の外側に沈着する。開発した摩耗簡易測定装置は、マイクروسコープで各々の摩耗粒子の光学濃度を読み込み、 I_s 値に相当する劣化度を算出する方式とした。算出した値は、その数値が大きいほど摩耗状態が進展していることを示す。本装置で得られた算出値と、フェログラフィー法による I_s 値との相関を検証すると相関係数は 0.96 と高いことから、簡易型の摩耗診断装置として用いることとした。

I_s 値については、潤滑診断の管理基準値の目安である 10^3 を判定基準値とした。判定基準値以上であれば「異常」とし、判定基準値以下を「注意」、判定基準値より 2 桁以下の場合には「良好」と設定し、 I_s 値との相関に基づき評価を行う。

本装置の外観と表示画面を **Fig. 6-7** に示す。外寸は横 150mm、奥行 200mm、高さ 200mm で、重さは 3.0kg であり、持ち運びが可能なサイズである。測定結果は、三段階に評価（良好、注意、異常）して表示する。なお、取得データ（数値）についても表示することができる。

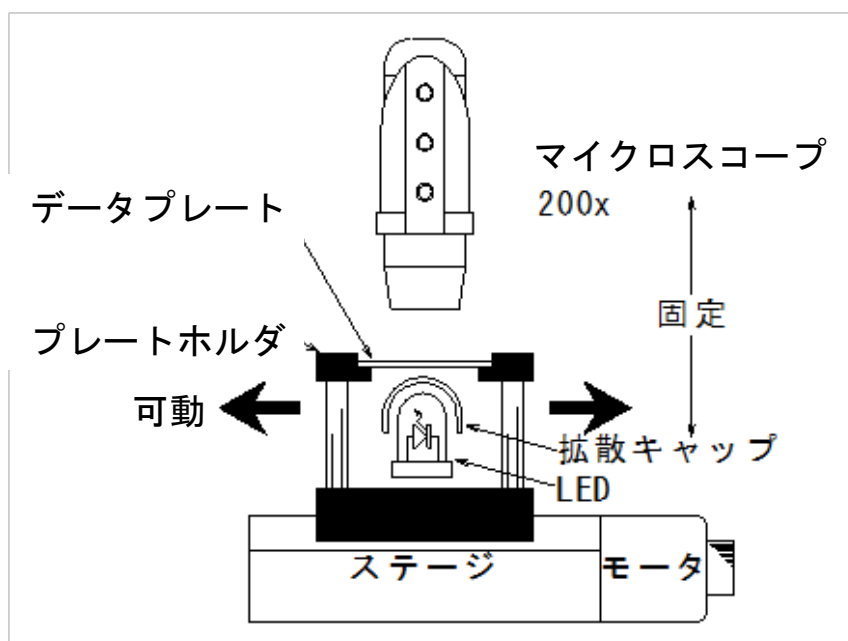
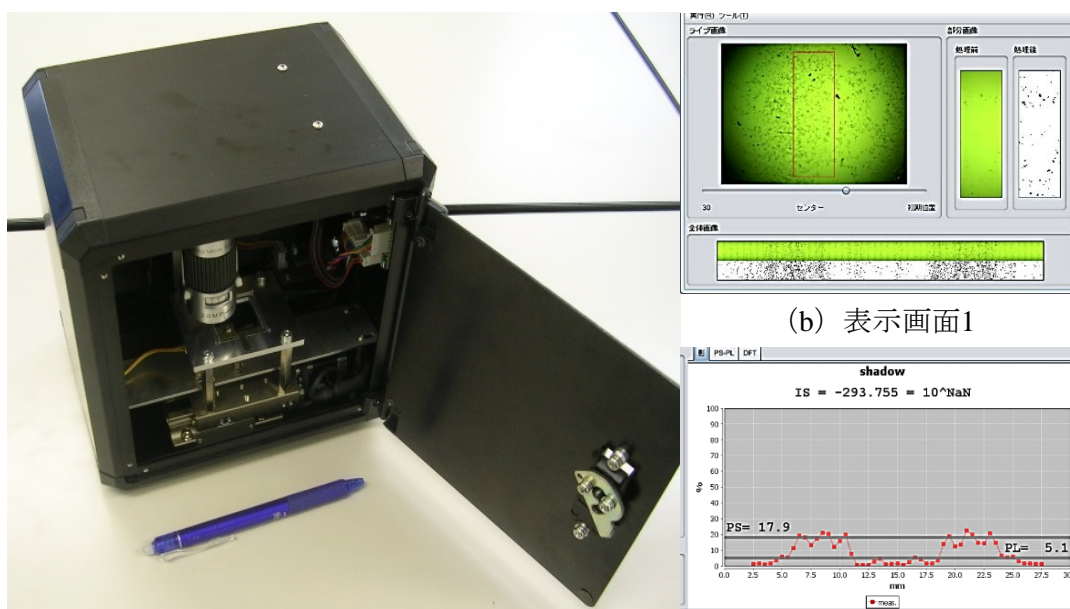


Fig. 6-6 摩耗簡易測定装置のイメージ図

Image of simplified measurement device of abrasion



(a) 外観

(c) 表示画面2

Fig. 6-7 摩耗簡易測定装置と表示画面

Simplified measurement device of the abrasion and displays

6.4 携帯型測定装置の性能評価

携帯型測定装置の性能を確認するために、4箇所の農業用排水機場において、10基のポンプ設備から潤滑油28試料を採取し、現地において携帯型測定装置を用いた簡易診断を行った。さらに、それらの試料について分析室において潤滑診断を行い、**Table 6-2**に示した管理基準との目安を適用し、潤滑油の物理的性状（酸化劣化と水分混入）と汚染状態、機器の摩耗状態に関して劣化の進行状態の評価を行った。潤滑診断の三段階評価の判定基準値は、酸価については管理基準値の目安である「新油の値からの上昇率+25%」を判定基準値としたが、その他の判定基準値は簡易診断と同様である。潤滑診断の三段階評価と携帯型測定装置で判定された診断結果との整合をみることによって、携帯型測定装置の性能評価を行った。**Table 6-3**の結果一覧表に示すように、診断結果の整合率については、潤滑油の酸化劣化は92.6%であり、潤滑油の水分は100%、潤滑油の汚染状態は96.4%、機器の摩耗状態は89.3%であり、簡易診断はいずれも概ね9割以上で一致した診断結果が得られた。

ここで、不整合がみられた評価結果をもとに、携帯型測定装置の有用性について述べる。簡易診断は「異常」な試料を「異常」と判定することが求められることから、潤滑油の物理的性状（酸化劣化と水分混入）については整合率が高いものの、潤滑診断で「異常」と判定された試料がなく有用性を判断し難い。また、潤滑油の汚染状態については整合率が96.4%と高いものの、「異常」の試料を「良好」と判定したものが1試料あり、機器の摩耗状態については、「良好」の試料を「良好」と判定したものが3試料ある。それらについては、判定基準値の補正が必要である。そのため、潤滑診断との比較を行った簡易診断の実施データをより集積して、携帯型測定装置の三段階評価（良好、注意、異常）の補正を行うことで、整合性をより高いものにすることができると考える。

携帯型測定装置を用いた簡易診断で適正な評価を行うには、測定する潤滑油を正しく採取することが重要である。施設を管理する技術者は、潤滑油を採取する前にポンプ設備を約30分稼働させ潤滑油を十分に攪拌し、油中に含まれる金属摩耗粒子が均一になっている状態で潤滑油の採取を行う。さらに、採油時に、外部からの異物などを混入させないよう注意を払う必要がある。このような留意事項や使用手順を示した操作マニュアル^[612]を既に整えており、携帯型測定装置を用いれば、専門知識が十分でなくても潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を簡易に判定することが可能となる。

Table 6-3 潤滑診断と簡易診断の結果一覧表

Table of lubrication diagnosis and simplified diagnosis

No.	排水機場	ポンプ型式	口径 (mm)	原動機	採油箇所	潤滑油の物理的性状				潤滑油の汚染状態		機器の摩耗状態			
						酸化劣化		水分混入		潤滑 診断	簡易 診断	潤滑 診断	簡易 診断	潤滑 診断	簡易 診断
						潤滑 診断	簡易 診断	潤滑 診断	簡易 診断						
1	A機場	横軸斜流	800	EM	主軸すべり軸受	○	○	○	○	○	○	△	△		
2	A機場	横軸斜流	800	EM	減速機	○	○	○	○	×	△	×	×		
3	A機場	横軸斜流	800	EM	主軸すべり軸受	○	○	○	○	△	△	△	△		
4	A機場	横軸斜流	800	EM	減速機	○	△	○	○	○	○	○	○		
5	A機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	×	×	△	△		
6	A機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
7	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	○		
8	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	△	△	△	△		
9	A機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	○	○	○	○		
10	A機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
11	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	△		
12	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	△		
13	A機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	○	○	○	○		
14	A機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
15	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	○		
16	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	○	○		
17	B機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	×	×	×	×		
18	B機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
19	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	△		
20	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	△	△	△	△		
21	B機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	×	×	×	×		
22	B機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
23	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	△	△	△	○		
24	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	×	×	△	△		
25	C機場	チューブラ	1,200	EM	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
26	C機場	チューブラ	1,200	EM	主軸すべり軸受	○	△	○	○	×	×	△	△		
27	D機場	チューブラ	2,100	EM	潤滑油槽	○	○	○	○	×	×	△	△		
28	D機場	チューブラ	2,100	EM	潤滑油槽	○	○	○	○	○	○	△	△		
EM：電動機					一致数	26	28	27	25						
DE：ディーゼルエンジン					整合率 (%)	92.9	100	96.4	89.3						

6.5 携帯型測定装置を用いた新たな機能診断システム

現在、農業用ポンプ設備には劣化状態を定量的に診断する手法がなく、供用年数などを判断基準として定期的に分解点検・補修を行う方式が適用されている。そこで、ポンプ設備の回転部（減速機や軸受など）から潤滑油を採取・分析することによって、設備を分解することなく劣化状態を定量的に診断し、劣化が致命的な故障にいたる前に異常を検知して、突発的な故障リスクを低減するための新たな機能診断システムを導入することを提案する^[619, 620]。潤滑診断は、潤滑剤に関する知識を有する専門家が大型分析装置を用いて行う精密診断である。一方、本研究で開発した携帯型測定装置を用いた簡易診断は、施設を管理する技術者自らが現地で簡便に診断を行うことができる一次診断と位置づけられる。3種類の携帯型測定装置は小型かつ軽量であることから施設現場に持ち運び、100V電源と操作台（折りたたみ机）があれば、容易に現地で簡易診断ができることを確認している。

新たな機能診断システムのフロー図を **Fig. 6-8** に示す。新たな方式は、まず一次診断として、施設管理者自らが携帯型測定装置を用いて簡易診断を実施する。一次診断で「異常」と判定されれば、専門の分析機関に詳細な潤滑診断（二次診断）を依頼し、二次診断で異常箇所を特定した後に、機械設備会社にポンプ設備の分解点検・補修を発注する方式である。施設の管理者自らが日常点検のなかで劣化状態を診断できることから、効率的かつ効果的にポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となると考えられる。

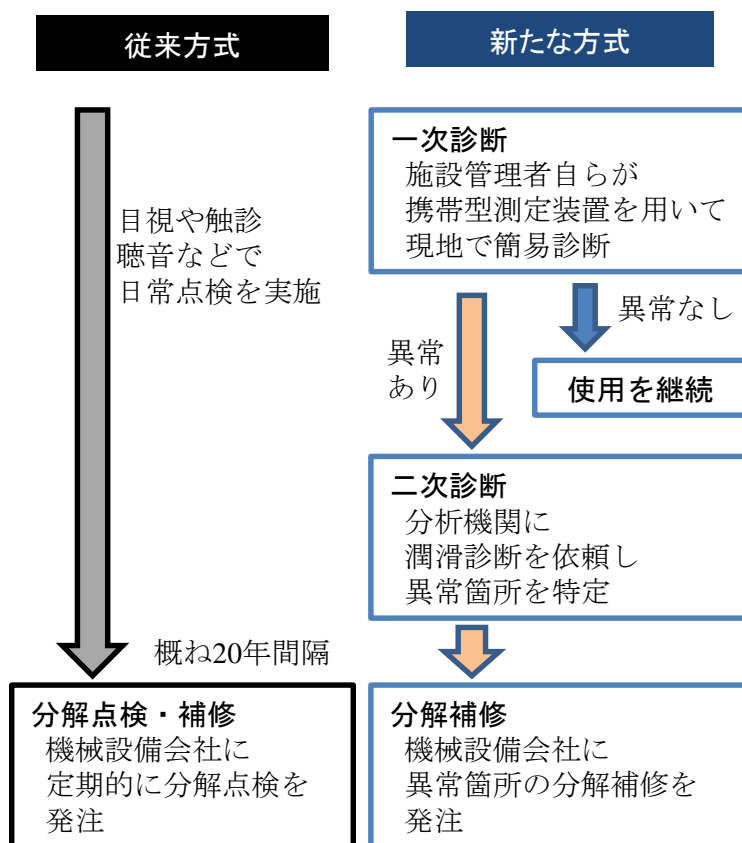


Fig. 6-8 新たな機能診断システムのフロー図

Flowchart of new diagnosis system

6.6 まとめ

本章では、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム導入の提案について述べた。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 開発した携帯型測定装置を用いれば、専門知識が十分でなくても潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を簡易に判定することができる。3種類の携帯型測定装置は小型かつ軽量であることから施設現場に持ち運び、100V電源と操作台（折りたたみ机）があれば、容易に現地において簡易診断ができることを確認した。
- (2) 簡易診断はいずれも概ね9割以上で一致した診断結果が得られた。今後は、潤滑診断との比較を行った簡易診断の実施データをより集積して、携帯型測定装置の三段階評価（良好、注意、異常）の補正を行うことで、整合性をより高いものにすることが可能となる。
- (3) 携帯型測定装置を用いた簡易診断で適正な評価を行うには、測定する潤滑油を正しく採取することが重要である。潤滑油を採取する前にポンプ設備を約30分稼働させ潤滑油を十分に攪拌し、油中に含まれる金属摩耗粒子が均一になっている状態で潤滑油の採取を行う。さらに、採油時に、外部からの異物などを混入させないように注意を払う必要がある。
- (4) ポンプ設備の回転部（減速機や軸受など）から潤滑油を採取・分析することによって、設備を分解することなく劣化状態を定量的に診断し、劣化が致命的な故障にいたる前に異常を検知して、突発的な故障リスクを低減するための新たな機能診断システムを導入することを提案した。新たな方式は、携帯型測定装置を用いることで施設の管理者自らが日常点検のなかで劣化状態を診断できることから、効率的かつ効果的にポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となる。

第6章の参考文献

- [601] 國枝 正, 森 充広, 水間啓慈: トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (2012), 834-835.
- [602] 河淵鉄郎, 國田欣悟, 熊澤 明: トライボロジーを活用した機械設備の診断手法について, JAGREE 85 (2013), 44-50.
- [603] 萩原大輔: ポンプ施設における機能診断技術について, JAGREE 85 (2013), 58-62.
- [604] 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 川畑雅彦: 潤滑油によるポンプ設備の機能診断, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (2013), 780-781.
- [605] 安部田泰, 伊藤耕祐, 國枝 正, 水間啓慈: 油中粒子解析法を用いた潤滑状態監視・診断の実機適用, 平成 27 年度農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨 (2015), 21-24.
- [606] 西尾光弘, 國枝 正: 七穂排水機場減速機損傷から学ぶ新たな排水機場診断, 農業農村工学会誌, **84** (3) (2016), 44-45.
- [607] 日本トライボロジー学会: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 798-801.
- [608] 柴田正明: フェログラフィについて, 潤滑, **27** (7) (1982), 487-491.
- [609] 松本善政, Roger H. Rotondi: フェログラフィー法による摩耗粒子分析と故障予知, 日本船用機関学会誌, **15** (5) (1980), 369-377.
- [610] 國枝 正: 潤滑油やグリースの劣化度を簡易に評価する携帯型測定装置, 平成 25 年度農村工学研究所成果情報 (2014), 17-18.
- [611] Tadashi KUNIEDA: A portable device measures the degree of deterioration in lubricants of pump facilities, Research Topics 2013, National institute for rural engineering, (2015), p.2.
- [612] 川畑雅彦, 吉田直樹, 國枝 正: トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断技術の開発, ARIC 情報 119 号 (2015), 28-35.
- [613] 日本トライボロジー学会: トライボロジーハンドブック, 養賢堂 (2001), 846-849.
- [614] 田中隆夫, 片野浩司, 山口和哉: 河川用樋門開閉装置における潤滑油診断を利用した機械要素の劣化判断手法について, 日本機械学会第 12 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集 (2013), 31-36.
- [615] 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 川畑雅彦, 吉田直樹, 井原 聡: 潤滑剤の劣化度評価装置及び劣化度評価方法, (2014), 特願 2014-16164.

- [616] 飯田健次郎：液中粒子数濃度の計測および校正技術に関する調査研究，産総研計量標準報告，**8** (2)，(2011)，213-243.
- [617] トライボテックス株式会社：微粒子計数装置，これを用いる微粒子計数方法及びこれを備える潤滑対象部診断システム，特許第 4719587 号.
- [618] 安部田泰，川畑雅彦：回転式フェログラフイー装置の開発と実機適用の事例，日本機械学会第 12 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集 (2013)，55-57.
- [619] 國枝 正：潤滑油等の分析によるポンプ設備の総合診断システム，平成 26 年度農村工学研究所成果情報 (主要普及成果)，(2015)，11-12.
- [620] Tadashi KUNIEDA：New functional diagnosis system for pump facilities by analysis of lubricating oil，Research Topics 2014，National institute for rural engineering，(2016)，p.4.

第7章 結論

本研究は農業用ポンプ設備を対象とし、ポンプ設備の突発的な故障を防ぐために、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する技術の適用を図り、さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断する技術を確立することを目的として研究を行った。

以下に、本論文で議論した研究課題を示す。

- (1) 農業用ポンプ設備を管理する担当者への維持管理や故障の原因などに関するアンケート結果をもとに、ポンプ設備の劣化の特徴を明らかにするとともに、劣化の進行を防ぐための状態監視保全の適用を考察する。
- (2) 潤滑剤の物理的性状に着目し、それらの分析結果から農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性と、潤滑診断の管理基準値の設定方法について考察する。
- (3) 実機を用いて、潤滑診断の劣化に対する応答特性を求めることを目的とし、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融現象を再現するための劣化促進試験を実施する。
- (4) 農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断を実施した事例に基づき適用時の留意点を示し、ポンプ設備への適用に当たっての課題と今後の展望について考察する。

本研究で得られた結論と知見を以下に示す。

第2章「農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析」では、農業用ポンプ設備の維持管理に関する現状や課題などを把握するためにアンケート調査を実施した。調査対象としたポンプ設備の型式による性能の特徴として揚水ポンプの型式は高揚程の渦巻ポンプが多いのに対し、排水ポンプは低揚程の斜流ポンプが多くなっている。原動機の種類は、揚水ポンプ設備では全設備が電動機であったのに対し、排水ポンプ設備では電動機とディーゼルエンジンが半数ずつとなっている。また、双方ともに1980年代に設置されたものが最も多く、設備更新時期が近年に集中することが想定され、農林水産省が示すデータと同じ傾向となっている。アンケート調査を分析したその結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 分解点検が行われた履歴を有する割合は、揚水ポンプ設備が排水ポンプ設備に比べて高くなっていた。揚水ポンプ設備の軸受および軸受以外の部品について交換した割合はともに5割を超えており、排水ポンプ設備ではそれらの交換割合は約3割であった。これらは、揚水ポンプ設備の稼働時間が排水ポンプ設備よりも長かったことから、摩耗など

の劣化が進行したと考えられる。

(2) 軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであった。軸受以外の交換部品の66.7%をポンプ・原動機・減速機が占めていた。また、機器の重大なトラブルでは、性能が徐々に低下していく劣化進行型の部品の故障が数多く見られた。

(3) 気候差などにより故障が発生し易い地域が限定されているか否かを確認したところ、ポンプ設備の故障には発生する地域に偏りはないことが分かった。

(4) ポンプ設備の重大なトラブルを防止するためには、部品の劣化が進行する前の適期に補修を行うなど、ポンプ設備における状態監視保全の適用が重要であることを確認した。

第3章「農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性」では、農業用ポンプ設備で使用される潤滑剤の性状（粘度，ちょう度）を分析して得られた結果から，以下のことが明らかになった。

(1) 適正に管理された潤滑油は，粘度の変化率の幅が狭く良好な状況にあることから，劣化の傾向を見出せなかった。

(2) 揚水ポンプ設備のグリースは軟化の傾向を，排水ポンプ設備のグリースは硬化の傾向を示していた。グリース選定のためには，ポンプ設備の使用状況（年稼働時間）が重要な指標のひとつになる。

(3) 農業用ポンプ設備に適した管理基準値の設定が必要である。ここで，厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり，甘い値にすると故障リスクが大きくなることから，実状に即した適切な管理基準値を設定しなければならない。さらに，管理基準値は対象とする施設の重要度に応じて設定する必要がある。

(4) 潤滑剤の性状を測定した結果，正しく管理された潤滑剤は著しい劣化が認められない一方で，正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認された。

第4章「実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験」では，ポンプ設備の軸受や歯車を対象として劣化の初期段階から損傷に至る劣化促進試験を，実機を用いて実施した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) アブレイブ摩耗試験および凝着摩耗試験，溶融摩耗試験の3試験を行い，損傷を起こ

す要因として想定した現象に対応する金属摩耗粒子とその発生部位をそれぞれ確認することができた。

- (2) 油量に関係なく、潤滑油に含まれる金属摩耗粒子数の増加傾向を時系列で検出できることを確認した。
- (3) 潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが、ポンプ設備の劣化の兆候を検出する監視項目になることを確認した。
- (4) 油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は、振動法や温度法と比較して設備の劣化の兆候をより早期に検出できることを確認した。

第5章「農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題」では、稼働中の農業用ポンプ設備から潤滑剤の採取・分析を行い、それらの分析結果で得られた評価を用いてポンプ設備の劣化状態の診断を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 潤滑診断は、潤滑剤の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態の各々の判定を併せて総合的に評価することで、機器の劣化状態を診断できることを確認した。
- (2) 油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断を用いることで、農業用ポンプ設備において劣化の兆候を検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となることを確認した。
- (3) 農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて、状態監視保全を行うことが有効であることを示した。
- (4) 農業用ポンプ設備において潤滑診断を効率的かつ効果的に実施するには、分析項目を選定した簡易な診断方法で判定を行い、異常であると判定されれば全項目で分析を行うことにより異常原因を特定するという新たな機能診断システムを構築することを提案した。
- (5) 潤滑剤に関わるトラブルを未然に防止し、さらに、潤滑診断で正確な評価を行い劣化の進行を抑えるためには、オイルマネジメントの手法を取り入れ、ポンプ設備の保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理点検記録に残すことが重要であることを示した。
- (6) 農業用ポンプ設備を対象とした潤滑診断における管理基準値について、その設定方法を提案した。

第6章「農業用ポンプ設備の新たな診断システム」では、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム導入の提案について述べた。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 開発した携帯型測定装置を用いれば、専門知識が十分でなくても潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を簡易に判定することができる。3種類の携帯型測定装置は小型かつ軽量であることから施設現場に持ち運び、100V電源と操作台（折りたたみ机）があれば、容易に現地において簡易診断ができることを確認した。
- (2) 簡易診断はいずれも概ね9割以上で一致した診断結果が得られた。今後は、潤滑診断との比較を行った簡易診断の実施データをより集積して、携帯型測定装置の三段階評価（良好、注意、異常）の補正を行うことで、整合性をより高いものにすることが可能となる。
- (3) 携帯型測定装置を用いた簡易診断で適正な評価を行うには、測定する潤滑油を正しく採取することが重要である。潤滑油を採取する前にポンプ設備を約30分稼働させ潤滑油を十分に攪拌し、油中に含まれる金属摩耗粒子が均一になっている状態で潤滑油の採取を行う。さらに、採油時に、外部からの異物などを混入させないように注意を払う必要がある。
- (4) ポンプ設備の回転部（減速機や軸受など）から潤滑油を採取・分析することによって、設備を分解することなく劣化状態を定量的に診断し、劣化が致命的な故障にいたる前に異常を検知して、突発的な故障リスクを低減するための新たな機能診断システムを導入することを提案した。新たな方式は、携帯型測定装置を用いることで施設の管理者自らが日常点検のなかで劣化状態を診断できることから、効率的かつ効果的にポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、懇切丁寧なご指導とご教示を賜りました安藤泰久教授に深甚なる感謝の意を表します。安藤教授には、理論的な研究の進め方や摩擦現象の考え方など学術的な見地から多くの知識や示唆を頂き、また、論文のご校閲においても、技術的な内容はもちろん論文構成に至るまで、有意義かつ的確なご意見を頂き、深く感謝しております。

小笠原俊夫教授、笹原弘之教授、夏亘教授、許允禎准教授には、学位論文審査において貴重なご意見とご指導を頂き、学位論文の精緻な考察を補うことができました。大変お忙しい中、ご指導いただきありがとうございました。

農林水産省の行政職として 20 数年間の勤務を経た後、このような研究の機会を与えて下さった皆様に感謝の言葉を述べさせていただきます。農研機構農村工学研究所 高橋順二前所長、小泉健所長、山本徳司企画管理部長には、本研究を開始した時点では到達点が見えない中で様々なご支援を賜りました。施設工学研究領域施設保全管理担当 水間啓慈主任研究員、森充広主任研究員、安部田泰特別研究員には、現地調査など本研究の遂行にあたり、多大なるご協力および貴重なご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

トライボテックス株式会社 川畑雅彦社長には、ご教示いただいた知見により開眼することができ、新たな学術分野であったトライボロジーに足を踏み入れる動機付けを頂きました。また、吉田直樹部長、藤平道孝部長をはじめ社員の皆様には、官民連携新技術研究開発事業の共同研究を通じて、携帯型測定装置の開発や劣化促進試験などに多大なるご協力とご助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

九州大学 黒田正治名誉教授には、学生時代に教えていただいた研究者としての基礎があったことにより、34 年を経て学術論文として実を結ぶことができました。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に、私の研究生活について、寛容にして最良の理解者である妻、祐子に感謝の意を表します。