

# 樋門開閉装置の潤滑油状態調査について —トライボロジーを活用した設備診断の可能性—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○田中 隆夫  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム 片野 浩司  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム 山口 和哉

河川用機械設備は、その多くが建設後30年から40年を迎え、老朽化の進行に伴う信頼性の低下、それを回復するための維持管理費用の増加が問題となっており、設備の延命化や信頼性を確保しつつ効率的で効果的な維持管理が求められている。本稿では、簡易で的確な劣化判断手法と維持管理手法の検討を行うための基礎データの抽出を目的として、平成23年度に実施した樋門開閉装置の潤滑油状態調査とその結果について報告する。

キーワード：健全度、長寿命化、維持・管理、基礎技術

## 1. はじめに

河川に設置されている樋門は、治水設備であり、設備が故障しその機能を失った場合、浸水被害により国民の生命、財産に影響を及ぼす恐れがあり、社会経済的影響が大きい設備である。また、通常時は待機状態で運転されていない設備（待機系設備）であるが、出水時には確実に機能しなければならない。したがって、日頃の維持管理が重要となる。特に積雪寒冷地においては設置環境も厳しく通常の機械設備とは異なった特性を有している。

これまで建設されてきた樋門設備の多くが、建設後30年から40年を迎えつつあり、老朽化への対応が課題となる設備も年々増加することが予想され、維持管理費用も増加すると考えられる。

しかし、公共事業予算は年々削減されている現状であり、設備の信頼性を確保しつつ効率的、効果的な維持管理が必要となる。

樋門は、河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル（案）（平成20年3月国土交通省総合政策局建設施工企画課、河川局治水課）によれば設備区分Ⅰ（高）予防保全対応の設備となり、重要度が最も高い分類となる。また、樋門の開閉装置は設備機能に致命的な影響を与える機器に位置づけられており、故障が発生した場合、樋門の基本機能を確保できなくなる。

開閉装置のほとんどは潤滑油を使用しているが、定期点検時の定量的な管理基準がなく、目視による量と水の混入の有無の判断のみといった状況である。本稿では、簡易で的確な劣化判断手法と維持管理手法の検討を行うための基礎データの抽出を目的として平成23年度に実施した樋門開閉装置の潤滑油状態調査の概要と結果について述べる。

## 2. トライボロジーを活用した設備診断

トライボロジーとは、「相對運動しながら互いに干渉しあう二面、ならびに関連した諸問題と実地応用に関する科学と技術」と1969年OECD（ヨーロッパ経済協力機構）の研究会にて定義され、機械の信頼性、耐久性、経済性に大きく影響する潤滑、摩耗、摩擦の問題を機械工学、科学、材料学等の関連分野を通じて扱う技術分野である。保全の分野においても、潤滑油の量や温度を測定するといった「メンテナンストライボロジー」が多くの保全現場で実施されている。

トライボロジーを活用した設備診断技法である潤滑診断は、回転機器等の潤滑油中の摩耗粒子等が軸受等の表面損傷と表裏の関係にあることに着目して、潤滑油を詳細に分析することにより機械設備の健全性を評価する技術である。潤滑診断の分析要素は潤滑油の劣化、汚染、軸受等の摩耗の三点である。

そこで、樋門の開閉装置の維持管理において、トライボロジーを活用した設備診断の可能性について検証を行った。

## 3. 調査対象樋門

### (1) 調査対象樋門の選定

北海道開発局が管理する河川用樋門設備は全道で約1,700基ほど設置されている。今回の調査においては、気候区分、河川流域、供用年数、設置方位等を考慮して、全道10河川、70樋門を選定した（表-1）。

### (2) 調査対象樋門の供用年数について

調査対象樋門の設置年数を5年ごとに区切り供用年数

表-1 調査対象樋門数一覧

河川名	樋門数	河川名	樋門数
石狩川	16	十勝川	7
当別川	2	釧路川	6
美瑛川	2	常呂川	9
後志利別川	8	渚滑川	4
鶴川	6	天塩川	10

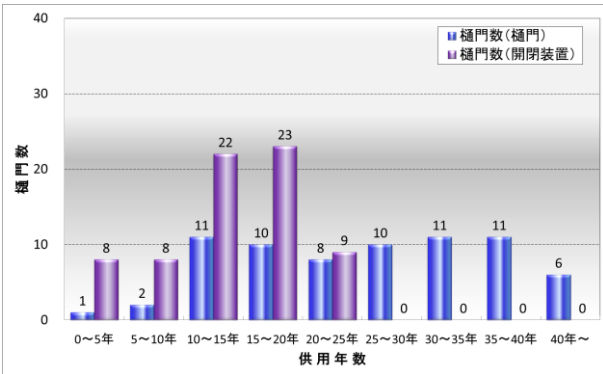


図-1 樋門及び開閉装置の供用年数

について整理した。樋門の設置は40年程前からコンスタントに行われ、開閉装置は設置後10~20年経過したものが66%を占めている(図-1)。

#### 4. 樋門開閉装置の潤滑油状態調査

選定した調査対象樋門の開閉装置の潤滑油を採取し潤滑油の劣化、汚染、潤滑状態(摩耗)について分析を行った。

##### (1) 潤滑油の採油箇所及び採油方法

樋門開閉装置は、設置箇所において種々の型式がある。代表的な開閉装置を図-2、採油検体を図-3に示す。採油箇所はメインギヤボックス、可逆装置、スタンドボックスの3箇所を標準とした。採油方法は給油口より吸引ポンプによる採油とし、サンプリングチューブが採油箇所の底部に接触しないように行った。概ね油槽の中層部から採油した。採油箇所毎にサンプリングチューブを新しいものに交換し、クロスコンタミネーション(サンプル間での混入)の防止に努めた。

採油量は、各箇所500ml程度とし、潤滑油が機械内部で均一な状態になるように樋門の開閉操作を十分に行ってから採油した。

##### (2) 潤滑油の性状等分析項目

採油した潤滑油について、表-2の各項目の分析を行った。潤滑油は、使用中に絶えず熱的影響を受け、さらに酸素、金属、水等との接触によって次第に性状が変化し

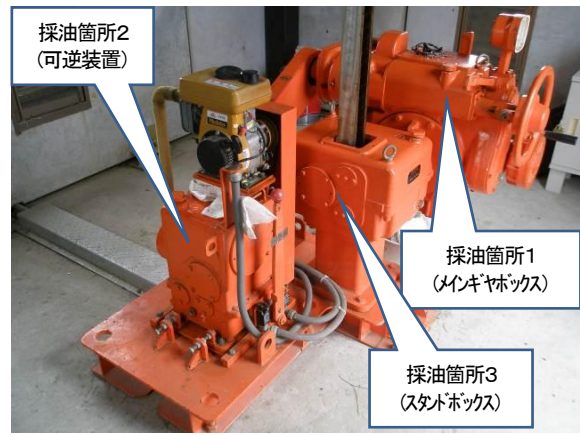


図-2 開閉装置全景及び採油箇所

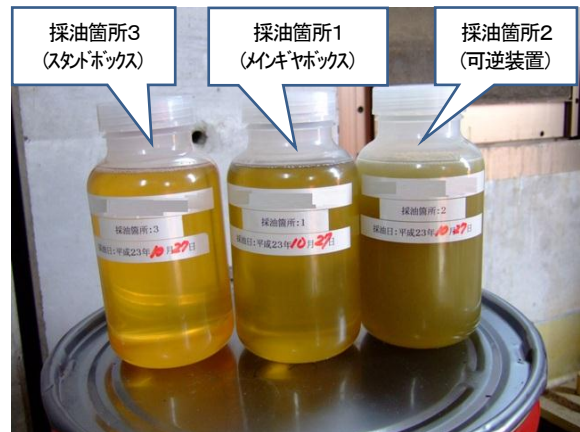


図-3 潤滑油採油検体

表-2 潤滑油の性状等分析項目

目的	項目	数量	目的	試験規格
潤滑油性状分析	粘度	154	1. 潤滑油の劣化を知る 2. 異種油混合の有無を知る 3. 潤滑特性を知る	JIS K 2283
	水分		水分量の測定	JIS K 2275
	酸価		油中酸成分の測定	JIS K 2501
	赤外線吸収スペクトル(IR)		1. 有機物の同定確認 2. 酸化防止剤の残存量測定 3. 酸化劣化物の測定	-
潤滑油汚染度分析	計数汚染度		潤滑油中の粒子数をサイズ別に知る	JIS B 9930
設備潤滑状態	摩耗診断フェログラフィー	50	摩耗粒子を直接観察し、摩耗程度、摩耗の過渡度を判定する	-
	金属成分SOAP法		油中金属の元素と濃度を知る	-

初期に有していた潤滑油の機能を失う。これが潤滑油の劣化であり、この劣化を測定する方法として、粘度、水分、酸価、赤外線吸収スペクトル(IR)の分析を実施した。潤滑油の汚染は、摩耗粒子等によって生じる内部からの汚染と砂等の混入による外部からの汚染がある。そのため汚染の測定として計数汚染度分析を実施した。また、性状分析、汚染度分析の結果から分析検体の抽出を行い、設備潤滑状態の分析を実施した。

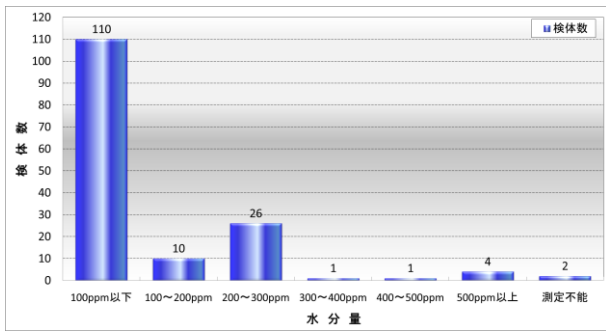


図-4 水分量別検体数

表-3 計数汚染度 (NAS 等級) 基準値

粒径サイズ ( $\mu$ m)	NAS 等級							
	5	6	7	8	9	10	11	12
5-15	8,000	16,000	32,000	64,000	128,000	256,000	512,000	1,024,000
15-25	1,425	2,850	5,700	11,400	22,800	45,600	91,200	182,400
25-50	253	506	1,012	2,025	4,050	8,100	16,200	32,400
50-100	45	90	180	360	720	1,440	2,880	5,760
100以上	8	16	32	64	128	256	512	1,024

### (3) 潤滑油の性状及び汚染度分析の結果

性状分析、汚染度分析の分析結果を下記に示す。

#### a) 粘度

粘度について、概ね良好な結果が得られたが、分析データより、一部の検体においてメーカー推奨グレードと異なる潤滑油を使用していると考えられるものも認められた。

#### b) 水分

水分について、概ね良好な結果が得られたが、管理基準値 (500ppm) を超過した検体が6検体認められた。ただし、管理基準値を超えていないが、200~500ppm未満と比較的高い水分値が検出された検体が約18% (28検体) 確認された (図-4)。

#### c) 酸価

酸価について、概ね良好な結果が得られたが、注意 (0.3mgKOH/g以上) と判定された検体が約16% (25検体) 確認された。

#### d) 赤外線吸収スペクトル (IR)

赤外線スペクトル (IR) について、全ての検体で酸化劣化によって生成するカルボン酸の吸収は認められず、酸化状態は良好であることが確認された。

#### e) 計数汚染度 (NAS等級)

潤滑油は、使用につれて様々な化学的変化をするとともに、外部からの微少な混入物の影響によって汚染が進む。計数汚染度は、潤滑油中の粒子数を一定の粒子径範囲ごとに計数し、その粒子数から汚染レベルを判定するものであり、潤滑油管理では重要な管理項目の一つである (表-3)。

計数汚染度については、約49% (76検体) で管理限界値 (NAS12等級) を超過する結果となった (表-4)。採油箇所別に計数汚染度を整理したものを図-5に示す。採油箇所別では、可逆装置の計数汚染度数値が高いものが

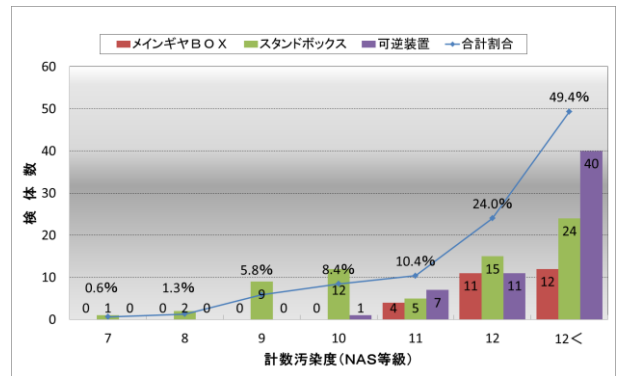


図-5 採油箇所別計数汚染度 (NAS 等級)

表-4 計数汚染度 (NAS 等級) 分析結果

計数汚染度 (NAS 等級)	検体数
12 等級以下	78
12 等級を超える	76

表-5 摩耗分析採油箇所表

目的	項目	採油箇所	検体数
摩耗分析	フェログラフィー/ 金属成分 (SOAP 法)	メインギヤボックス	20
		可逆装置	9
		スタンドボックス	21

多く見受けられた。

なお、新油の計数汚染度数値は、使用する潤滑油により多少の違いがあるが、今回分析した新油では、NAS等級7~8という数値となり汚染度評価の目安とした。

### (4) 設備の潤滑状態 (摩耗分析) の分析

設備の潤滑状態の分析として、摩耗分析を行った。対象検体は、計数汚染度の分析結果 (NAS等級、サイズレンジ) に重み付けをした点数にて評価を行って46検体を抽出した。また、水分値の測定が不可であった2検体及び管理基準値を大きく逸脱した2検体を加え、合計50検体とした。

50検体の採油箇所内訳を表-5に示す。

#### a) フェログラフィー

フェログラフィーは、希釈剤で混合された潤滑油中の摩耗粒子を、勾配をもった強力な磁場で分離し、摩耗量の測定や粒子観察が容易にできるように大きさの順に配列する方法であり、分析フェログラフィーと定量フェログラフィーに分けられる。分析フェログラフィーは摩耗粒子を直接顕微鏡によって観察し、その形状等から潤滑状態を推定するものである。また、定量フェログラフィーは、潤滑油中の摩耗粒子の量を定量的に測定するものであり、光学的に測定した粒子を大摩耗粒子と小摩耗粒子に分け、それぞれの密度から全摩耗量と摩耗過酷度指数を求め、定量的に摩耗の進行度合いを管理するものである。全摩耗量は式 (1a)、摩耗過酷度指数は式 (1b) で表すことができる。

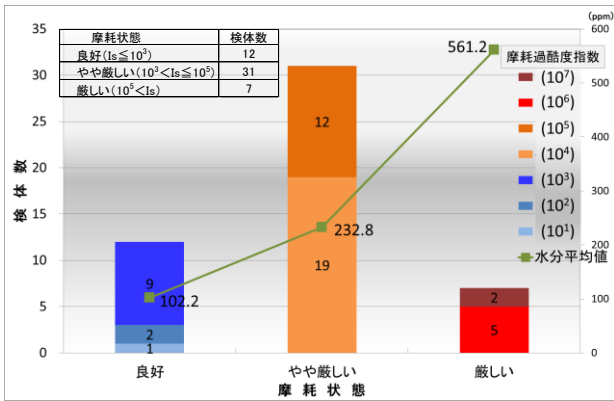


図-6 摩耗過酷度と水分の関係

表-6 摩耗形態の分類

磨耗の形態	名称	発生形態	形状
正常磨耗	ラッピング	表面薄層の剥離、境界潤滑、始動	15μ m以下の薄片
	なじみ	なじみ、始動	長方形の薄片
切削	カッティング	硬い異物の混入、突起物の切削効果	
シビア(鉄)	シビアスライディング	片当り、すべり、高速、高荷重	15μ m<表面に条痕
	スカuffing	ギヤ高速、高荷重、潤滑油不足	15μ m以上、テンパーカラー局在
	球状	溶着、高速、高荷重	球形(~200μ m)
疲労	スポール	ピッチング、フレーキング、ギヤ軸受の疲労	表面ピット15μ m以上
	ラミナー	疲労粒子の圧延、転がり軸受けの疲労	15μ m以上薄片孔、不規則周
	チャック	ギヤ、転動部の疲労	5μ m<薄片
	球状	転がり軸受の疲労	球形(~10μ m)
シビア(銅系) (メタルブッシュ磨耗)	銅合金	軸受、リテーナー、ポンプの磨耗	黄金色
	ホワイトメタル	軸受の磨耗	白色
化学変化	フクシオンポリマー(FP)	摩擦部、油、添加剤などの重合反応	ころ状、無定形
	反応生成物	異物油の混入、添加剤の反応物	粒子状

$$WPC = P_L + P_S \quad (1a)$$

$$I_s = (P_L + P_S) \times (P_L - P_S) = P_L^2 - P_S^2 \quad (1b)$$

ここで、WPC : 全摩耗量 (%/ml)

$I_s$  : 摩耗過酷度指数

$P_L$  : 大摩耗粒子 (%/ml)

$P_S$  : 小摩耗粒子 (%/ml)

%/ml : 試料 1 ml のデータプレート上に補択された摩耗粒子の影の被覆率 (%)

#### b) フェログラフィーの分析結果

フェログラフィー分析の結果、摩耗状態が良好と判断された検体は50検体中12検体であった。次に、摩耗状態がやや厳しいと評価された検体は31検体、厳しいと評価された検体は7検体となった。また、摩耗状態に順じて混入水分の平均値が増加の傾向にあることがわかった(図-6)。

中でも、厳しいと評価された検体については、摩耗過酷度を表す $I_s$ 値が $10^6 \sim 10^7$ とかなり高い値が測定されて

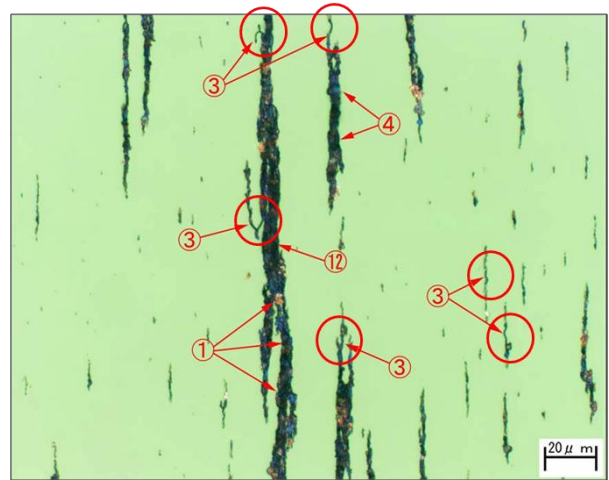


図-7 摩耗粒子の顕微鏡観察例(切削摩耗粒子)

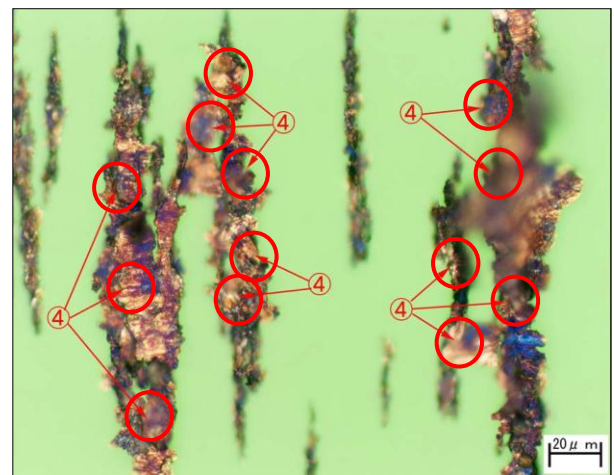


図-8 摩耗粒子の顕微鏡観察例(シビア摩耗粒子)

おり、異物混入による切削摩耗や油膜切れによるシビア摩耗が多く観察されるなど、非常に厳しい環境下での設備運転となっていることがわかった。

表-6に摩耗形態の分類を示す。図-7,8に摩耗粒子の顕微鏡観察例を示す。

#### c) 金属成分分析(SOAP法)

金属成分分析(SOAP法)は、潤滑油中に分散している金属元素を高周波プラズマを光源として発光させ、各元素固有の波長を測定し、金属の種類や量を定量的に測定するものである。測定元素から摩耗の発生箇所、測定濃度から摩耗の程度を推定でき、機器の異常の兆候を早期に知る有力な手がかりとなる。

#### d) 金属成分分析(SOAP法)の結果

金属成分分析は、イオン化分析(粒子サイズが小さい場合)と、固形分分析(粒子サイズが大きい場合)とを行うが、今回の分析ではイオン化分析の結果、全検体で鉄分の検出はほとんどなかった。

固形分分析の結果を以下に記す。

フェログラフィー分析で良好と評価された検体については、油中に含まれる比較的サイズの大きい粒子の鉄分濃度も低い結果となった。計数汚染度の結果が思わしく

なかった理由は、軽度の摩耗による摩耗粉の発生と外部からの異物混入が主な原因であることが推測される。

フェログラフィー分析でやや厳しいと評価された検体については、一部の検体を除き比較的高い鉄分濃度が検出された。これらの検体は良好と評価された検体に比べ摩耗が進行していると思われるが、中でも7検体については他の検体に比べ水分値が高いことから、ギヤ歯面の摩耗のみならず、ギヤ及びギヤボックス内部で発生した錆が異物となり、油中に混入した事が推測される。

フェログラフィー分析で厳しいと評価された検体については、全検体で高い鉄分濃度が検出され、水分値についても4検体で非常に高かった。その内2検体については、油槽から採取された試料の半分近くが水であり、測定不能になるほどだった。さらにフェログラフィーで捕捉された摩耗粉の形態観察においても鉄錆の存在が確認された。このことから、本設備内では水分混入による錆の発生と、激しいギヤの摩耗が同時に起きていると推測される。

### e) 摩耗分析と計数汚染度の検証

今回の分析結果により、潤滑油の計数汚染度が思わしくない検体が全体の約49%となり非常に汚染比率が高いことが明らかになった。そこで計数汚染度と設備の摩耗の関係について検証を行った。

摩耗分析実施のために選定した50検体は、全てNAS12等級以上であるため、NAS等級別に検証するのは、困難である。そこで、NAS等級のサイズ別にレンジ分けし、(5~15 $\mu$ m、15~25 $\mu$ m、25~50 $\mu$ m、50~100 $\mu$ m、100 $\mu$ m以上) いくつかのレンジでNAS12等級を超過したのかを基に検証した。レンジ数別、NAS12等級超過数を図-9に示す。本図から、全てのレンジ(5レンジ)でNAS12等級を超えた検体が全体の48%となり、半数近い検体において重度の汚染が確認された。

次に各超過レンジ数別に、フェログラフィー分析によるIs値、金属成分分析による含有鉄分濃度との関係を検証した。図-10にその結果を示す。

Is値との検証においては、超過レンジ数の増加による傾向は確認できないが、各レンジのIs値の平均値が $10^4$ ~ $10^5$ を示しており、全レンジにおいて摩耗状態はやや厳しい評価となった。

含有鉄分濃度との検証においては、超過レンジ数が増加するに従い、含有鉄分濃度も上昇する傾向が確認された。含有鉄分は、ギヤの摩耗により検出される金属元素であり、計数汚染度が悪化するに従い、ギヤ歯面の摩耗も進行する傾向であることがわかった。

なお、図-10において、1レンジのみNAS12等級を超過している検体について、含有鉄分濃度の平均値が突出して高い(81.5ppm)が、これは1検体のみ含有鉄分濃度が161ppmと非常に高い数値が検出されたためであり、この検体を除けば1.8ppmとなり、超過レンジ数の増加が含有鉄分濃度増加の傾向を示している。

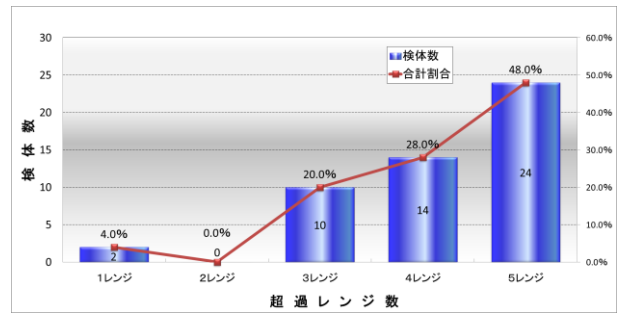


図-9 レンジ数別 NAS12 等級超過数

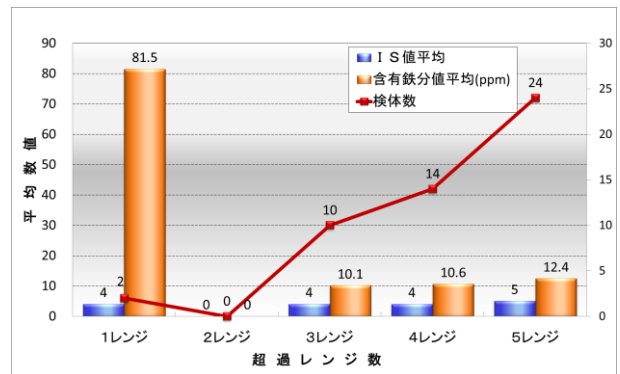


図-10 レンジ数別 Is 値・含有鉄分値

## 5. まとめ

本研究では、潤滑油の劣化、汚染、潤滑状態(摩耗)について分析を行った。その結果以下のことが明らかになった。

### (1) 劣化について

性状分析の結果、粘度、酸化劣化はほぼ問題がないこと、水分は、全体の約3% (6検体) で基準値を超える結果が見られ、約20% (28検体) で基準値は超えていないが比較的高い値であることがわかった。

### (2) 汚染度について

計数汚染度分析の結果、通常ギヤの汚染度を管理するNAS12等級を超過する検体が全体の約49% (76検体) となり、非常に汚染比率が高いことがわかった。

### (3) 潤滑状態(摩耗分析)について

計数汚染度及び水分分析の結果から抽出した50検体を対象に実施した。その結果、摩耗状態が良好と判断された検体が12検体、やや厳しいと判断された検体が31検体、厳しいと判断された検体が7検体となった。

摩耗分析と計数汚染度(NAS等級)について、NAS等級のサイズレンジ分け(5~15 $\mu$ m、15~25 $\mu$ m、25~50 $\mu$ m、50~100 $\mu$ m、100 $\mu$ m以上)により、いくつかのレンジでNAS12等級を超過したのかを基に検証を行った。

定量フェログラフィーの結果から、摩耗過酷度指数(Is値)が大きいかほど水分値も増加する傾向が確認され

た。また、分析フェログラフイーの結果から、全超過レンジ数において、異物の噛み込みによって発生する「切削粒子」の割合が10～20%と高い傾向を示しており、1つのレンジでもNAS12等級を超過した場合、異物の混入及びそれを起点とした「切削摩耗」が発生していることがわかった。

金属成分分析により超過レンジ数が増加するに従い、ギヤの摩耗により検出される金属元素である含有鉄分平均値も上昇する傾向が確認された。

以上のことから、水分値及び計数汚染度（NAS等級）が樋門開閉装置の摩耗状況と関連があり、潤滑油管理による簡易な劣化判断手法を確立するための重要な要素となり得ることがわかった。

また、今回の潤滑油分析において夾雑物（スラッジ等）を評価する重量汚染度の分析も必要であることがわかった。平成24年度は、潤滑状態が厳しいと評価された樋門を中心に、潤滑油分析における傾向管理の可能性及び重量汚染度の分析も含め追跡調査を実施している。今後もトライボロジーを活用した樋門開閉装置（待機系設備）の簡易で的確な劣化判断手法と維持管理手法の確立に向け調査、研究を進めていく。

**謝辞：**本研究の実施に際し、既存施設資料及び維持管理に関する資料等の提供、現地調査に関する調整等にご協力いただいた、北海道開発局建設部河川工事課、河川管理課、事業振興部機械課及び調査対象樋門を管轄されている各開発建設部の関係各位に対し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 出光興産 潤滑油部潤滑技術二課：工業潤滑剤基礎のきそ、2006.6
- 2) (社)日本トライボロジー学会：メンテナンストライボロジー、2006.11
- 3) 国土交通省 総合政策局 建設施工企画課 河川局 治水課：河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル（案）、H20.3
- 4) (財)下水道新技術推進機構：トライボロジーを活用した設備診断に関する技術マニュアル（潤滑診断による状態監視保全）、2009.12
- 5) 小岩祐太，佐藤大輔，蝦名健二：樋門開閉装置の効率的な維持管理手法に関する検討，第54回（平成22年度）北海道開発技術研究発表会（発表論文集）、2011