

機械設備の状態監視保全技術の現場適用

上野仁士・藤野健一・平地一典

1. はじめに

河川ゲート、ポンプ、トンネル換気設備等の土木機械設備は、重要な社会基盤施設である。これらは、今後10年で約50%の設備が設置後30年超となり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念がある一方、整備予算の確保が厳しい現状にあり、この相反する状況下でいかに効率的で的確な設備維持管理を行うかが課題となっている。

これまで、これらの設備は時間計画保全に基づいて設備管理が行われてきた。工場プラントなどの一般の設備では、状態監視保全を導入することにより保全費用削減を可能とした例もある。したがって、土木機械設備においても状態監視保全を導入することは有効である可能性が高い。しかし、土木機械設備の中には排水機場ポンプ設備のように、平時は停止しており必要時だけ稼働する「非」常用設備も存在する。状態監視保全は常時稼働している機械設備に対して継続的にパラメータ計測をするものであり、このような設備では、状態監視保全による診断技術が確立していないため、的確な診断ができるか未知数である。

そこで土木研究所先端技術チームでは、「非」常用系の排水機場ポンプ設備の維持管理に適した状態監視保全技術の確立をめざし、平成22年度から研究を進めてきた。そのうち、振動解析による設備診断(以下「振動法」という。)の適否と劣化診断の目安の設定については、土木技術資料第55巻第8号(H25.8)(以下「前報文」¹⁾という。)で述べた。

本稿では、振動法の現場への適用にあたっての検討と、潤滑油分析による設備診断(以下「潤滑油法」という。)の適用性と活用法について概説する。

2. 振動法の適用性

2.1 振動法による診断と信頼度

振動法による状態監視保全技術は、①渦電流変

位計等によるポンプ主軸振動変位の直接計測と、②発生原因と発生周波数、③振動時刻歴波形と高速フーリエ変換による振動周波数分布により行うことは前報文で述べた。

発生周波数と発生原因を表-1に、振動法による代表的な診断例を図-1、2に再掲する。

表-1 発生原因と発生周波数

発生原因	発生する振動周波数
軸の異常(曲がり)	正常でも回転周波数成分(N)が発生するが、異常時には大きく発生する
軸芯のずれ	高調波(回転周波数成分(N)の整数倍)成分が発生
羽根車の摩耗	斜流ポンプの場合、回転周波数成分(N)の羽根車枚数倍の成分が発生することが多い
水中軸受の摩耗	回転周波数成分(N)の分数倍(1/2,1/3)の成分が発生

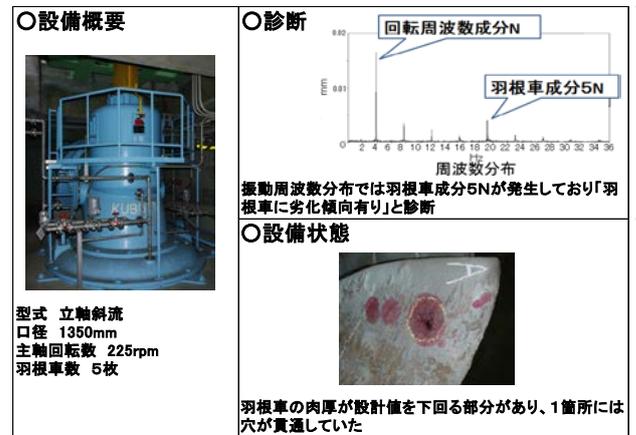


図-1 羽根車摩耗発見例

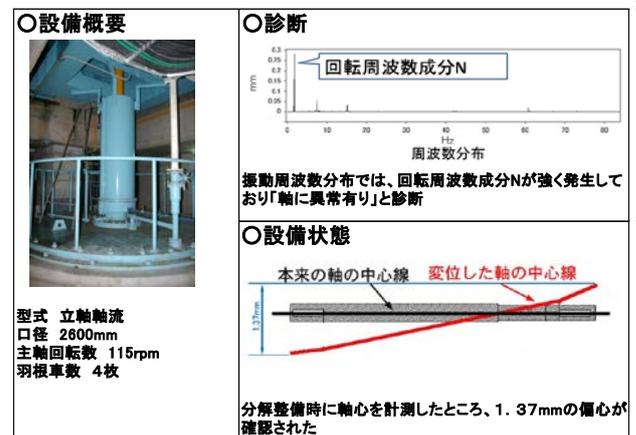


図-2 軸曲がり発見例

上記を代表とする調査は、直近に分解整備を予定している設備、つまり、診断結果と実際の設備内部状態を照合し的確に診断できたかを確認できる設備を主な対象として実施した。適正に診断できたかの診断率は表-2に示す結果となった。

なお、診断後に分解していない設備については現在も正常に稼働しており、これを上記評価に含めた場合の数値を、参考として()内に記載している。

表-2 診断率

診断	設備状態	羽根車摩耗	主軸曲がり
		調査対象数 20(95)	調査対象数 22(97)
正常と診断 (整備延伸の判断)	正常(的中)	8 (83)	19 (94)
	異常(誤診)	6 (6)	2 (2)
	診断率	57.1% (93.3%)	90.5% (97.9%)
異常と診断 (異常の早期把握)	異常(的中)	4	1
	正常(誤診)	2	0
診断率(全体)		60.0% (91.6%)	90.9% (97.9%)

「調査対象数」「正常と診断」ならびに「診断率(全体)」の()内は、内部確認していないが正常に稼働している設備を含めた数値
「調査対象数」で、「羽根車摩耗」が「主軸曲がり」より少ないのは、羽根車の交換が前提で分解整備したので摩耗計測を行っていなかったものが2件あり正常か異常か判断できないのでそれを除外したため。

以上より、軸曲がりには高い精度での確な診断が可能な反面、羽根車の摩耗診断は精度の課題が残ることが確認された。

これについては、①診断事例の蓄積や②他の計測パラメータの併用による精度向上が考えられる。①については、一部の地方整備局で率先して本技術を導入しており、その診断実績を蓄積することが課題解決に繋がると考える。②については現在当所で、ポンプ吐出圧力等のパラメータの併用による診断技術について検討中である。

2.2 横軸ポンプへの振動法の適用性

本研究では、ポンプ形式を問わず「非」常用で用いられる排水機場ポンプ設備を対象に行ってきた。そして、研究を進める中で、形式毎に振動に特徴があることがわかってきた。

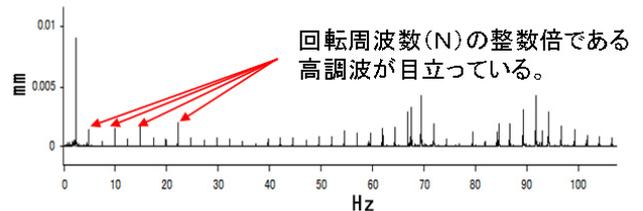
ポンプ形式は、立軸式と横軸式に大別される。加工精度やキー溝の存在等により、ポンプ主軸の軸断面形状は完全に真円とはならないが、横軸ポンプの場合、それと軸の自重によるたわみが原因で正常であっても回転周波数の整数倍の高調波の発生が予測されるため、適正な診断が可能か懸念

が生じた。排水機場ポンプ設備は全国的には立軸ポンプが主流だが、冬季の凍結による破損防止のため北海道で横軸ポンプの設置率がきわめて高いので、寒地土木研究所寒地機械技術チームが調査を行った。

横軸の特有と推定される高調波について、検証するため、横軸ポンプ(口径 1500mm, 羽根 5, 主軸回転 140rpm)の整備前後の振動波形の周波数を分析した。その結果を図-3に示す。

整備前の振動波形では回転周波数(N)の整数倍である高調波が目立っているが、整備後の振動波形では、高調波が大幅に減少したことがわかった。

整備前



整備後

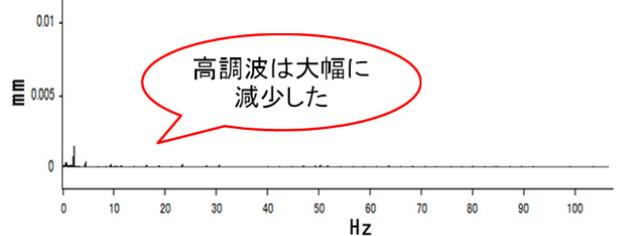


図-3 整備前後の周波数分析 (x方向)

これは一例だが、他の横軸ポンプでも同様の傾向があることが確認されている。以上より、横軸ポンプにおいても設備の状態が健全であれば、高調波があまり出現しないことがわかり、立軸と同様の診断が可能であることが確認された。

2.3 ガスタービンエンジンへの振動法の適用性

ガスタービンエンジンには、圧縮タービン軸と出力タービン軸が一つに結合されている一軸式と、圧縮タービン軸と出力タービン軸が分離している二軸式があり、二軸式はタービンが2組並列となっているものもある。また、それぞれ、軸が水平な横軸式と、垂直な立軸式がある。

国土交通省管理の排水機場のガスタービンエンジンでは、ほとんどが防音のためパッケージ化されており、複数組の遊星歯車や平歯車で構成された減速機が内蔵されている。

振動計測には3方向圧電式加速度センサを用い、

計測箇所は、ガスタービンエンジンの構造図により軸受位置を確認してその近傍としている。ガスタービンエンジンの代表例と計測箇所を写真-1に示す。

上記計測手法に基づき、12 機場 27 台のガスタービンエンジンについて、振動計測を行った。

代表例として、横軸タービン(機関出力 330kW(449ps), 回転数 39,840rpm(664Hz))における振動計測結果を図-4に示す。

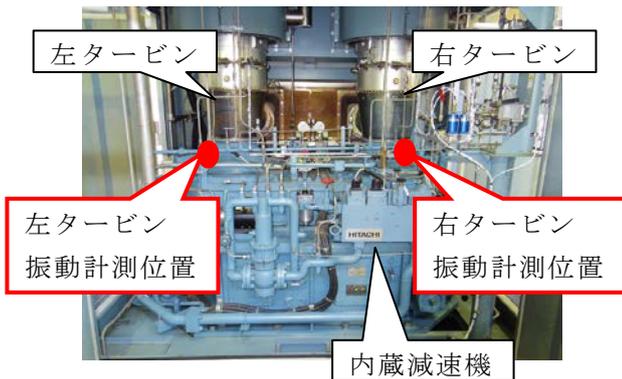


写真-1 立2軸ガスタービンエンジン

わかる。圧縮機の異常時にはこの周波数の波高変化が予想されること、特に横方向ではこの周波数が支配的であり、波高変化が振動値に大きく影響すると考えられることから、振動計測による異常兆候把握は可能と考える。

一般的に機械設備は、メーカーにより振動の異常値が示されているものもあり、振動がこの数値に至れば異常兆候があると判断できるが、より早期に異常兆候を把握するためには傾向管理が有効である。ガスタービンエンジンも同様に異常値が示されていることもある。

現時点では、計測データに乏しく、計測データと異常兆候の関係性については不明な点もあるが、ガスタービンエンジンにおいても、異常値による判断のみならず、初期値からの変化により診断する相対判定を主体とした診断が望ましいと考える。

また、羽根数や内蔵減速機の仕様が不明のエンジンがほとんどであることから、これも可能な限りメーカーには情報開示してもらおう等、仕様の把握に努める必要がある。

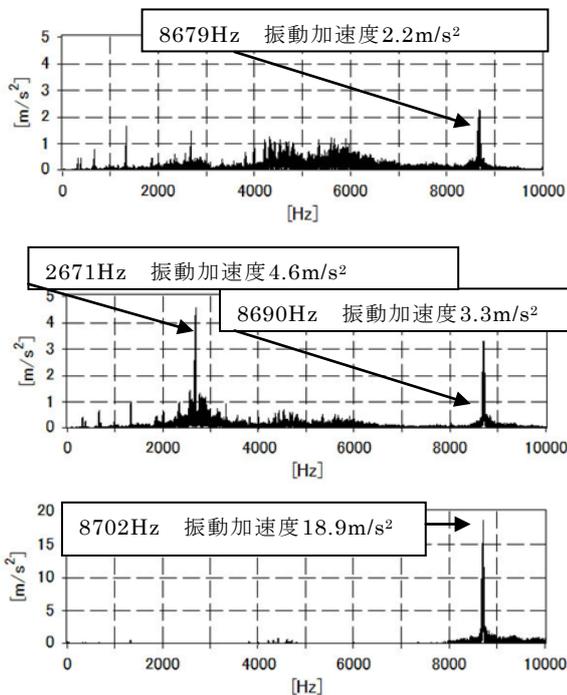


図-4 ガスタービンエンジンの振動周波数分布 (上: 軸方向 中: 垂直方向 下: 横方向)

この例では、計測方向により若干の違いはあるが、特に 8700Hz 近傍の周波数が卓越している。

これは回転周波数 664Hz×圧縮機羽根数 13 枚 = 8632Hz に近似しており、このガスタービンエンジンの特徴的な周波数が計測されていることが

3. 潤滑油法の適用性と活用法²⁾

潤滑油法は、運転中または運転停止直後の設備から採取した分析用潤滑油サンプルを分析するもので、潤滑油そのものの劣化傾向を診断する性状分析と、混入している摩耗粉の状態から設備の状態を診断する技術 (SOAP 法・フェログラフィ法) がある。そこで、「非」常用のポンプ設備の原動機、減速機における、これらの技術の適用性を検証した。

3.1 性状分析の適用性

性状分析は、一般的な分析項目である、動粘度、酸価、塩基価、水分量、不溶解分について調査した。その中で特徴的なこととして、特にディーゼル原動機的水分量が高めに推移していることが確認された。平成 25 年度に調査した 33 台のディーゼル原動機的水分量を図-5に示す。

一般に原動機の潤滑油にとって最も劣悪な運転条件は、短時間の低負荷運転と言われている。これは、短時間の運転では、燃焼で発生した水分が熱量不足により完全に蒸発しきらず機関内に残留し潤滑油中に混入するためである。

排水機場においても、実排水運転頻度が少ない機場は月に 30 分程度の管理運転が主となり同様

の条件となりうることから、水分量が高めになると思われる。

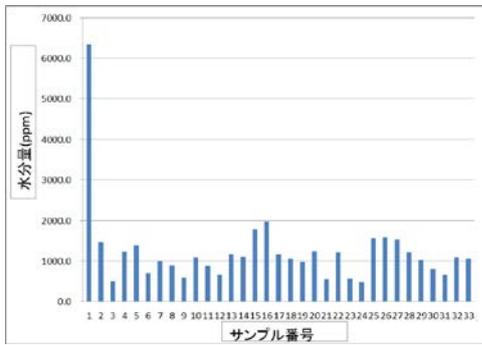


図-5 水分量分析結果

水分量が多くなると、設備内の発錆や潤滑不良（油膜切れ）、潤滑油の酸化促進の原因となる。一般にはディーゼル原動機の潤滑油監視項目には水分量は重要視されていないが、排水機場ポンプ設備においては重要な監視項目であるといえる。

3.2 SOAP法の適用性

SOAP法は、元素毎に発光スペクトルが異なることを利用した分析法である。ネフライザ（霧化器）によりアルゴンガスと混合された分析用潤滑油が、高周波誘導コイルによるプラズマ化で熱エネルギーを受けて発光する。それを分光分析することによって試料内に含有される金属元素成分とその濃度を測定して摩耗損傷箇所を推定する方法である。概念図を図-6に示す。

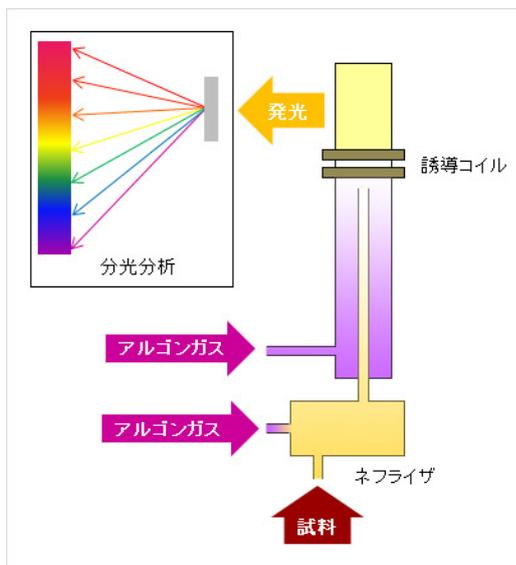


図-6 SOAP法 概念図

SOAP法の適用性については、同一機場、同一仕様で整備年次の異なる1号機（整備後4年の状態）と3号機（14年未整備状態）の比較を行ったところ、図-7に示すように、鉄や銅といった摩耗すると増大する成分は、より長期にわたり継続使用している3号機の方が多く検出されていることが確認され、排水機場ポンプ設備でも、含有元素の変化を見て機械のコンディションを予測する事が可能であることが示されている。

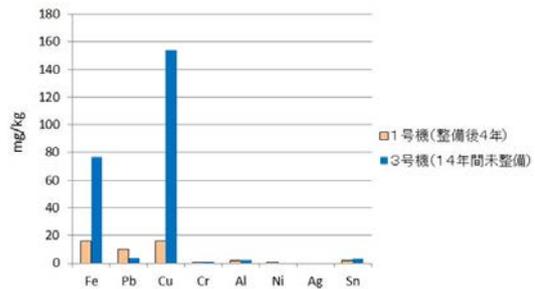


図-7 SOAP法比較

3.3 フェログラフィ法の適用性

フェログラフィ法は、金属摩耗分が含まれた潤滑油を、磁石を下に敷いたスライドガラス上または沈着チューブ内に流し、油中の摩耗粉を捕捉分離することで摩耗分を分析する方法で、分析フェログラフィと定量フェログラフィがある。それぞれの概念図を図-8、9に示す。

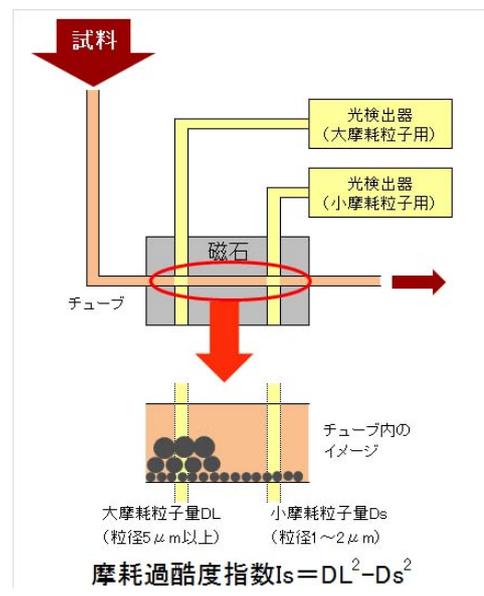


図-8 定量フェログラフィ法 概念図

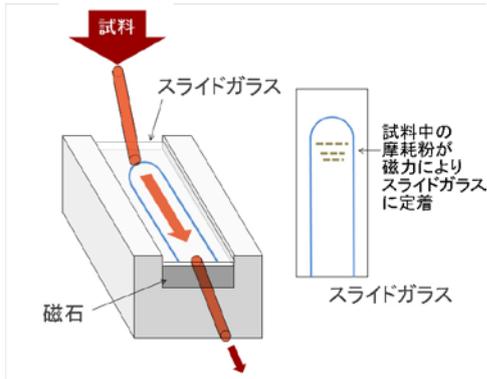


図-9 分析フェログラフィ法 概念図

定量フェログラフィでは、同一機場、同一仕様の原動機を同時に分解整備した際の部品の摩耗量と、図-8 内の式により算出される摩耗過酷度指数の比較を行ったところ、表-3 に示すように部品の摩耗量が大きいと推測できる原動機では、摩耗過酷度指数も高くなり、摩耗兆候は捉えることが可能と確認できた。

表-3 定量フェログラフィ比較

	1号機	2号機	備考
シリンダライナ摩耗量(mm)	0.038	0.082	各気筒の摩耗量平均値の合計
大摩耗粒子量DL(%/mL)	40	45	
小摩耗粒子量DS(%/mL)	30	20	
摩耗過酷度指数	700	1625	DL ² -DS ² で算出

分析フェログラフィについては、概ね同規模の、H 排水機場 1 号ポンプと N 排水機場 1 号ポンプのディーゼル原動機 2 台の分析結果の比較を行った。結果を写真-2、3 に示す。

この結果から、正常摩耗粒子（写真中の縦に長く配列した黒い粒子）の量が多く、ホワイトメタル（写真中の赤丸の銀色粒子）も目立つ H 排水機場の摩耗状態が進行しているものと推察できる。実際にそれぞれの原動機を分解したところ、やはり H 排水機場の方が摩耗劣化が進行していることが確認された。それぞれのクランクピンメタルの状況を、写真-4、5 に示す。



写真-2 H排水機場 フェログラフィ結果



写真-3 N排水機場 フェログラフィ結果



写真-4 H排水機場 クランクピンメタルの状況



写真-5 N排水機場 クランクピンメタルの状況

これらのことから、潤滑油分析による設備の摩耗劣化程度の診断が十分可能であると考える。

3.4 潤滑油法の活用法（傾向管理の課題と提案）

潤滑油法が、「非」常用設備においても有効であることは上記に示したとおりである。しかし、排水機場ポンプ設備を管理する国や地方公共団体では、潤滑油分析を専門業者に依頼する場合、契約制度上一般競争入札が原則のため、同一の分析者で継続して分析することは難しい、と言う問題がある。

そこで複数の分析業者による同一サンプルの分析結果を比較したところ、設備診断結果（設備状態の良否）は同一の傾向を示すが、分析技術個々の結果、特に SOAP 法や定量フェログラフィ法など数値で示される分析結果については業者毎に数値が異なる事が示された。これは分析業者毎の

知見等により分析・診断手法が異なるためである。

そのため、潤滑油分析の活用の一手法として、傾向管理を管理者が自ら保有することが可能な鉄粉濃度計により実施し、異常傾向が見られる場合に SOAP 法やフェログラフィ法による分析を行う方法を検討した。鉄粉濃度計計測結果と、SOAP 法による鉄元素濃度の比較を、原動機については 33 サンプル、減速機については 24 サンプルに対して行った。結果を図-10、11 に示す。

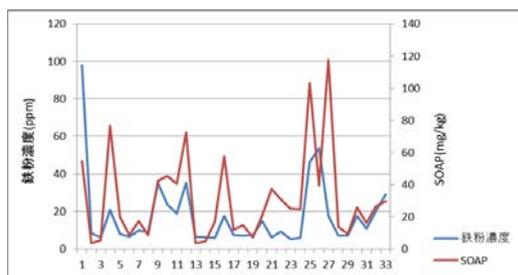


図-10 鉄粉濃度とSOAP法（鉄元素）比較（原動機）

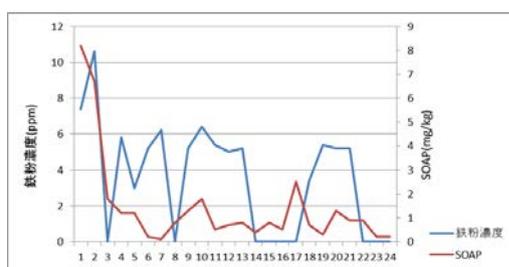


図-11 鉄粉濃度とSOAP法（鉄元素）比較（減速機）

原動機については、一部に例外があるがおおむね双方の計測結果が類似した傾向にあるので、鉄粉濃度計による傾向管理は可能と考える。

減速機については、類似した傾向を示しているとは言えない。これは濃度範囲が 10ppm 程度と鉄粉濃度計の誤差範囲内であることが起因すると思われる。

そのため傾向管理の精度は高くないが、異常摩耗時には鉄粉濃度の急激な増大が予想されるので、鉄粉濃度計による継続した計測は有効であると考ええる。

4. まとめ

「非」常用系である排水機場ポンプ設備においても、常用設備と同様に、振動解析による異常箇所特定や、潤滑油分析による設備劣化傾向の把握が可能であることがこれまでの調査で示された。

特に振動法については、前述の表-2 に示すように現段階では 100%の信頼性があるとは言えないが、現状の点検技術では全く発見できなかった軸曲がりを見逃すなど、異常兆候把握の可能性を広げる技術であるとは言える。

今後、診断精度を高めてゆく必要があるが、この技術が河川ポンプ設備の効果的、効率的な維持管理に貢献しうる技術となりうるものと確信するものである。

謝 辞

本研究の実施にあたっては、各地方整備局、北海道開発局に多大なご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 上野仁士、藤野健一、田中義光：「アセットマネジメントに向けた河川ポンプ設備の状態監視保全技術」土木技術資料、第55巻、第8号、pp.22～25、2013
- 2) 上野仁士、藤野健一、伊藤 圭：「河川ポンプ設備への状態監視保全技術の適用について」、一般社団法人日本機械学会、第14回評価・診断に関するシンポジウム、2015

上野仁士



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員
Hitoshi UENO

藤野健一



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主席研究員
Kenichi FUJINO

平地一典



土木研究所寒地土木研究所寒地機械技術チーム 研究員
Kazunori HIRACHI