



状態監視を活用した 疲労損傷に対する保全支援技術

Miyashita Kazuhiro

宮下 和大^{*1}

Sugano Nobuhiro

菅野 亙泰^{*2}

Suzuki Yuhei

鈴木 優平^{*3}

産業プラント設備や社会インフラでは、長期供用に伴う老朽化や使用条件の変化により、疲労、振動、腐食、摩耗などの損傷リスクが顕在化しつつある。これらの設備を安全かつ合理的に使用し続けるためには、定期点検や非破壊検査による「ある時点の状態把握」に加えて、供用中の状態変化を継続的に把握するモニタリング技術が重要となる。特に疲労損傷は、繰返し荷重により徐々に進行し、外観上明瞭な変化を伴わないまま破断に至る場合があるため、実働応力や振動状態を把握することが保全判断の前提となる。本稿では、前報で整理した疲労評価に必要な調査・計測技術を踏まえ、設備保全における状態監視技術の位置付けを述べる。また、当社の簡易モニタリングサービスを例として、状態監視から精密計測、非破壊検査、構造解析および疲労寿命評価へ展開する保全支援の流れを紹介する。

キーワード： 状態監視、モニタリング、スマモニ[®]、疲労損傷、ひずみ計測、保全判断

1. はじめに

産業プラント設備や社会インフラは、長期間にわたり安全に使用されることが求められる。一方で、供用年数の増加、運転条件の変化、自然災害の激甚化、維持管理に携わる人員の不足などを背景として、設備状態を効率的に把握し、限られたリソースの中で合理的に保全判断を行うことの重要性が高まっている。

従来の保全では、定期点検や非破壊検査により損傷の有無を確認し、必要に応じて補修や更新を行う方法が一般的であった。これらの技術は現在でも重要であるが、基本的には点検時点の状態を

把握するものである。そのため、点検と点検の間に生じる実働荷重の変化、疲労損傷の進行兆候、振動状態の変化などを把握することは容易ではない。

前報⁽¹⁾では、機械・構造物の疲労評価を対象として、破面観察、材料試験、非破壊検査、ひずみモニタリング、解析技術などの調査・計測メニューを紹介した。これらの調査・計測技術は、疲労評価に必要な情報を取得するための手段として位置付けられる。疲労評価では、亀裂寸法、材料特性、応力履歴などの情報が評価の前提条件となる。これらの情報が不足する場合、評価は仮

*1：研究開発センター 研究開発グループ ひずみゲージ試験レベル3

*2：研究開発センター 研究開発グループ

*3：研究開発センター 研究開発グループ グループ長 ひずみゲージ試験レベル2 工学博士

定に基づく判断となり、過度に安全側の評価となる、あるいはリスクを十分に把握できない可能性がある。

本稿では、前報の続編として、疲労を中心とした設備保全における「状態監視」の役割を整理する。実働荷重や設備状態を継続的に把握する状態監視技術の位置付けを示すとともに、疲労損傷モニタリングへの活用方法を紹介する。また、簡易状態監視を起点として、精密計測、非破壊検査、材料調査、構造解析および疲労寿命評価へ展開する保全支援の流れについて述べる。

2. 疲労損傷と保全判断の課題

2.1 疲労損傷が重要となる理由

機械・構造物における金属部品や部材の破損では、疲労が重要な要因となる。疲労損傷は、一回の大きな荷重だけで発生するのではなく、降伏応力以下の比較的小さな応力であっても、応力集中が生じる部位に長期間繰り返し作用することで亀裂が発生し、徐々に進展して最終的な破断に至る現象である。

疲労損傷の検知の難しさは、初期段階では外観上の変化が小さく、目視点検のみでは把握しにくい点にある⁽²⁾。亀裂がある程度進展してから発

見される場合もあり、その時点で使用継続、補修、使用停止、次回点検時期などを短期間で判断しなければならないことがある。

このような判断を適切に行うには、単に「亀裂があるか、ないか」を確認するだけでは不十分である。亀裂の寸法、作用している応力、荷重の頻度、材料特性、使用環境などを総合的に把握し、今後どの程度の速度で損傷が進展する可能性があるかを評価する必要がある。

図1に、疲労亀裂の進展と保全判断の関係を示す。疲労損傷は時間の経過とともに進展し、定期検査によって亀裂長さを把握しながら補修要否を判断する。しかし、検査間隔によっては損傷の進展を十分に把握できず、破損リスクが高まる可能性がある。

2.2 保全判断に必要な情報

設備管理や保全の現場で求められる判断は、「異常があるかどうか」だけではない。実際には、異常が確認された場合に、ただちに停止すべきか、補修まで使用できるか、次回点検を前倒しすべきか、類似設備にも同じリスクがあるか、といった判断が必要となる。

このため、検査・計測・解析技術は、損傷の有無を確認するためだけでなく、保全判断に必要

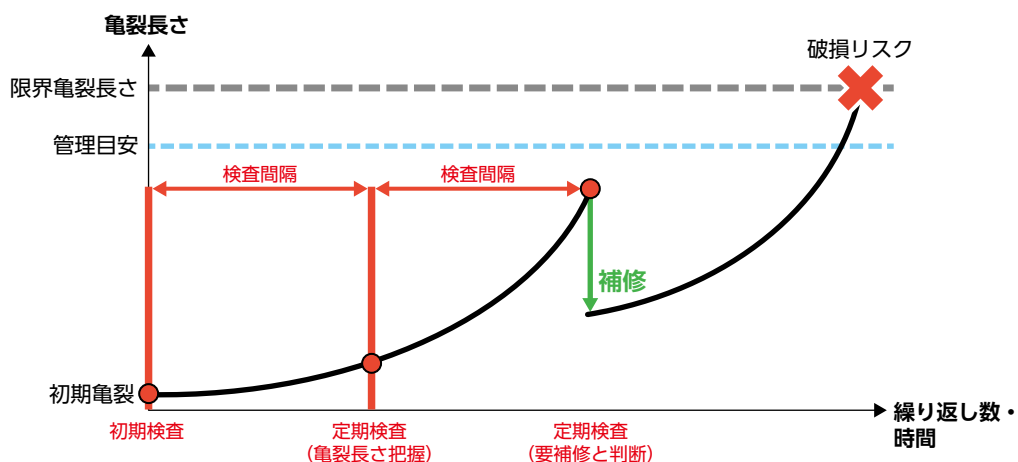


図1 疲労亀裂進展と保全判断の関係

な情報を取得するための手段として位置付けられる。保全判断には複数の情報が必要であり、単一の技術のみで判断できる場合は少ない。特に実働荷重や振動状態は、設計図面や過去資料だけでは把握できないことが多く、実機での計測が重要となる。

3. 状態監視技術の位置付け

3.1 点検とモニタリングの違い

点検や非破壊検査は、設備状態を把握するための基本的な技術である。これらは、ある時点における損傷の有無や寸法を確認する上で有効である。一方で、点検時点で異常が顕在化していない場合や、点検後に実働荷重や振動状態が変化した場合には、その後の状態変化を把握することが難しい。

これに対して、モニタリングは、設備に設置したセンサにより、ひずみ、加速度、温度などの物理量を継続的に取得する技術である。継続的にデータを取得することで、通常状態を把握し、時間変化や傾向変化を確認できる。疲労損傷や振動異常のように、時間変化や傾向変化が重要となる現象では、このような状態監視が有効である。た

だし、モニタリングは詳細調査や解析を不要にするものではない。むしろ、状態変化や異常兆候を把握し、精密計測や詳細解析の対象を絞り込む役割を担う。

図2に、モニタリングによる点検間の状態把握の概念を示す。定期点検ではある時点の亀裂長さを確認するのに対し、モニタリングでは点検間の状態変化を継続的に把握することができる。その結果、管理目安への到達や異常兆候を早期に把握し、詳細調査や補修判断を適切な時期に行うことが可能となる。

3.2 簡易状態監視の考え方

全ての設備に対して高精度な計測システムを常時設置し、詳細解析を行うことは、コストや運用面で現実的ではない場合が多い。そのため、設備状態の変化や異常兆候を把握することを目的とした簡易状態監視を行い、必要に応じて詳細な調査や詳細評価へ展開する段階的なアプローチが有効である。これによって調査対象を絞り込むことで、限られた保全リソースを効率的に活用することができる。

3.3 簡易モニタリングサービスの概要

当社では、設備状態を継続的に把握するための

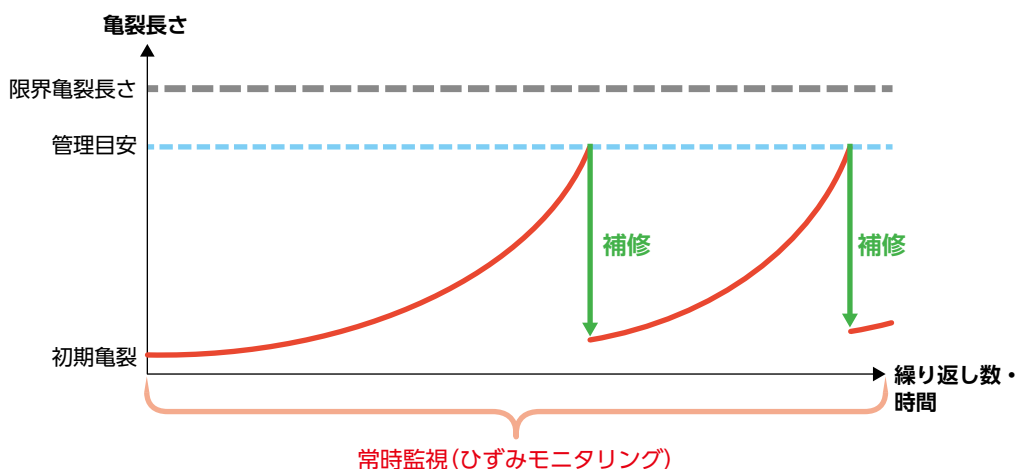


図2 モニタリングによる点検間の状態把握

簡易モニタリングサービスを提供している。本サービスでは、小型モニタリング装置「スマモニ[®]」⁽³⁾を用いて、ひずみ、加速度、温度などを計測する。図3に、スマモニ[®]を活用した保全支援フローを示す。本サービスの目的は、設備状態を常時監視し、異常兆候や負荷状態の変化を把握することである。取得したデータはクラウド上で可視化し、設備状態の変化を遠隔から確認することができる。また、必要に応じて精密計測や詳細評価へ展開することで、効率的な保全活動を支援する。例えば、状態監視によって応力変動が大きい部位や挙動変化が確認された場合には、必要に応じて計測点を追加し、多点計測や高いサンプリング周波数での計測などの詳細計測を実施する。さらに、非破壊検査による損傷確認、材料調査による材料特性評価、構造解析による応力評価を組み合わせることで、疲労寿命評価や補修要否判断へ展開することができる。

3.4 適用対象

簡易モニタリングサービスの適用対象としては、橋梁、歩道橋、栈橋、クレーン支持構造、配管支持部、架台、アンテナ支持構造、回転機械周辺構造、プラント設備の支持部材などが想定される。これらの設備では、交通荷重、振動、風荷重、温度変化などによって応力変動や振動特性が変化する。従来の定期点検では把握が難しい負荷の実態や状態変化を確認するための手段として活用が期待される。

4. 状態監視データを活用した疲労評価

4.1 ひずみ計測による疲労損傷評価

疲労損傷を評価するためには、対象部位に作用する応力の大きさと発生頻度を把握する必要がある。

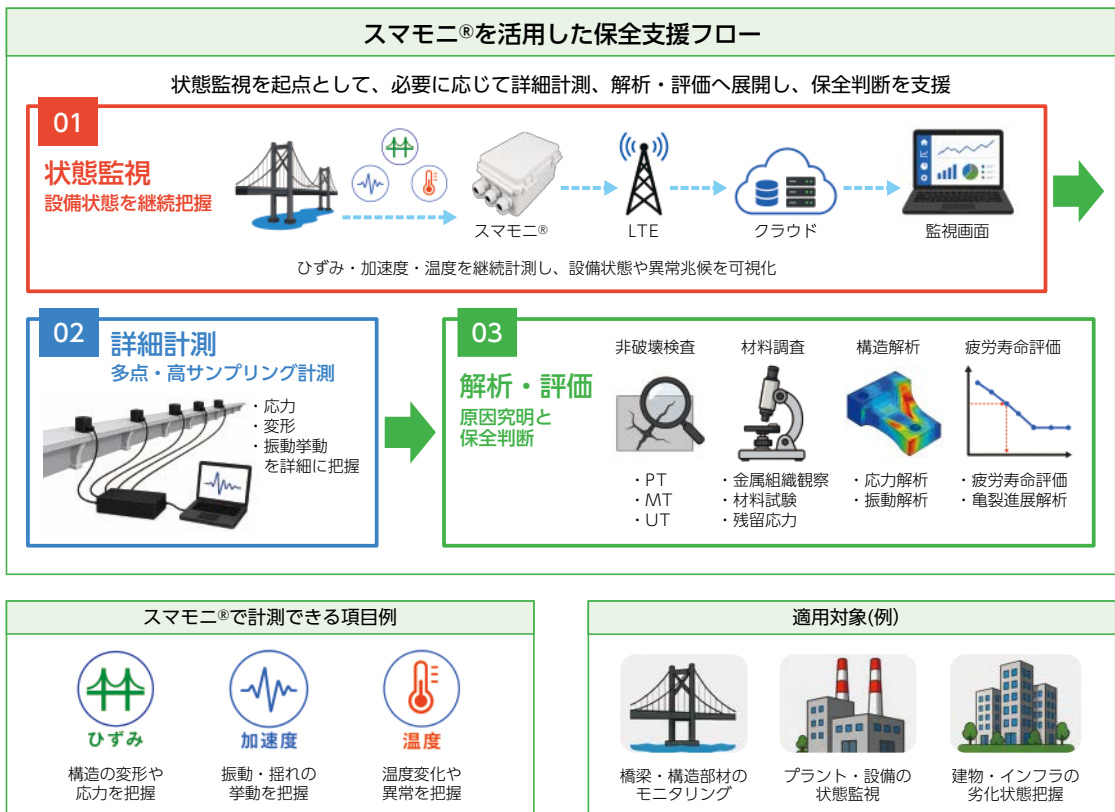


図3 スマモニ[®]を活用した保全支援フロー

る。ひずみをモニタリングすることで、供用中のひずみ時系列データを取得できる。

図4に、ひずみデータ収集から累積疲労損傷度の算出・疲労寿命推定をする流れを示す。この図はアンテナの根元部近傍のひずみを計測した例である。取得したひずみデータを応力に換算し、レインフロー法⁽⁴⁾などによって応力範囲と頻度、すなわち応力履歴を把握できる。鋼構造物の疲労設計指針⁽⁵⁾などに基づいて、この応力履歴から、累積疲労損傷度を算出でき、疲労寿命を推定できる。疲労は応力振幅と繰り返し数に依存するため、

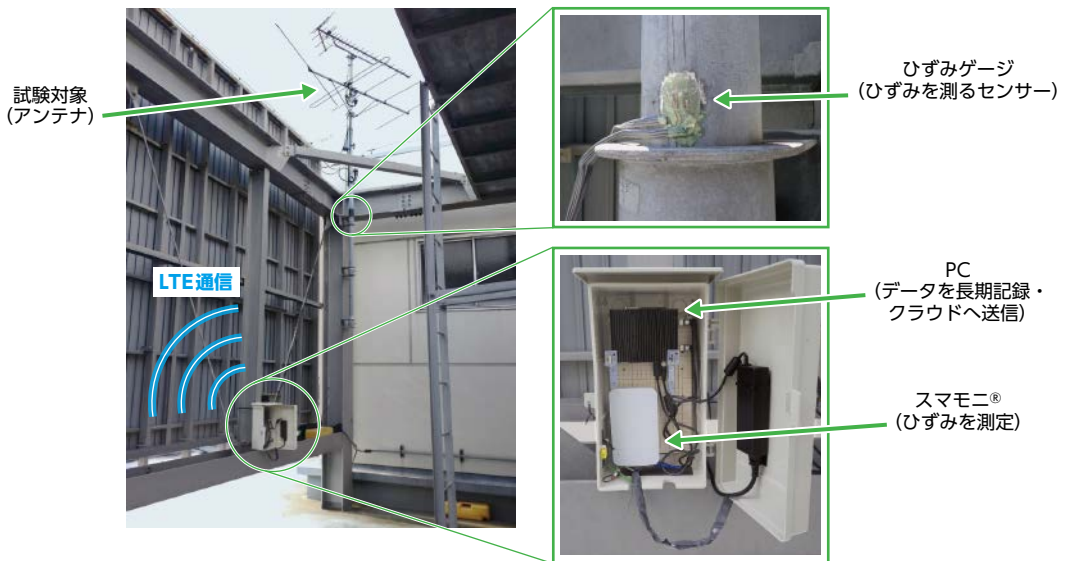
単に最大応力を確認するだけでなく、このような頻度情報は保全判断において重要である。

4.2 疲労損傷度のトレンド監視

状態監視では、取得した応力履歴から累積疲労損傷度を算出し、その推移を継続的に確認することができる。例えば、日単位、週単位または月単位で疲労損傷度を整理することで、設備が受けている負荷状況の変化を把握することができる。

本サービスでは、スマモニ[®]により取得したひずみデータを一定期間ごとに集約し、バッチ処

① ひずみデータ収集



② ひずみデータ整理 → 累積疲労損傷度の算出・疲労寿命推定

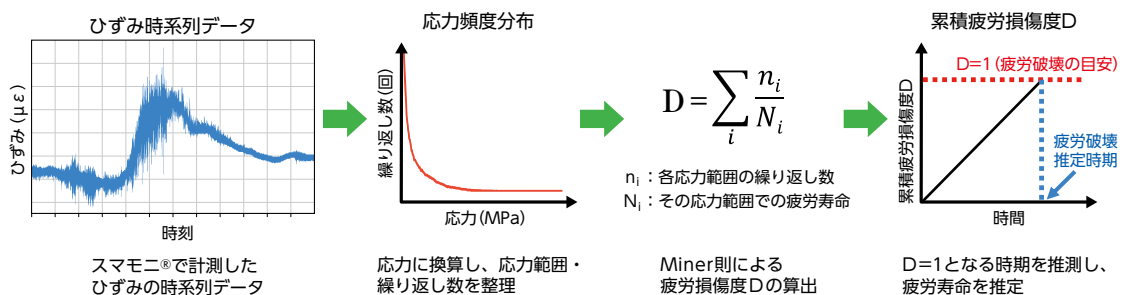


図4 ひずみデータ収集から累積疲労損傷度の算出・疲労寿命推定する流れ

理によって応力換算や疲労損傷度が算出できる。疲労損傷度は、鋼構造物の疲労設計指針⁽⁵⁾などの規格に基づき算出している。得られた疲労損傷度や関連指標は、SORACOM Lagoon[®]等のIoT ダッシュボード上に表示することで、設備ごとの状態変化や負荷傾向を視覚的に把握できる。SORACOM Lagoon[®]は、クラウド上で計測データを可視化・共有するためのダッシュボードサービスである⁽⁶⁾。また、取得した計測データおよび解析結果はデータファイルとして提供することが可能であり、利用者による追加評価や詳細解析

にも活用できる。図5に、状態監視データを用いた疲労損傷度の可視化例を示す。ダッシュボード上で累積疲労損傷度や疲労損傷度増分、ひずみおよび温度などを継続的に表示することで、設備状態の変化や負荷傾向を把握できる。

マイナー則では、各応力振幅レベルにおける繰返し回数 n_i と、その応力振幅での疲労寿命 N_i の比 n_i/N_i を累積し、累積値 $D = \sum (n_i/N_i)$ によって疲労損傷を評価する。一般に、累積疲労損傷度 D が 1 に達したときが疲労破壊の目安とされる。本サービスでは、累積疲労損傷度の推移を継続的

①システム概要



②ダッシュボード画面

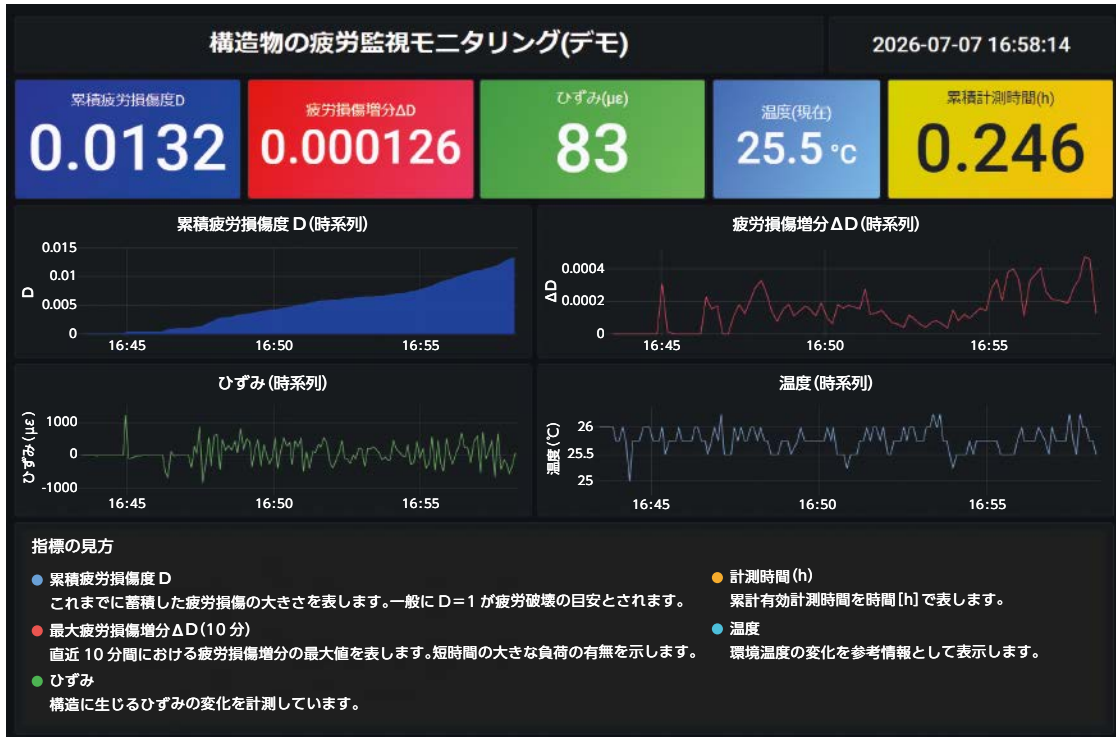


図5 状態監視データを用いた疲労損傷度の可視化例

に把握することで、設備の損傷蓄積傾向や負荷状態の変化を評価するとともに、疲労寿命推定に活用することができる。

5. 今後の展開

IoT 技術や通信技術の発展により、設備状態を遠隔から継続的に把握することが容易になりつつある。当社では、状態監視技術について実設備への適用を進めている。その手段の一つとしてスマホ[®]を活用している。今後は適用事例を蓄積するとともに、取得したデータを活用した疲労損傷度評価や異常兆候検知の高度化を進めていく予定である。

6. まとめ

産業プラント設備や社会インフラでは、疲労をはじめとする損傷リスクに対して合理的な保全判断を行うことが求められている。そのためには、定期的な点検だけでなく、設備状態を継続的に把握する状態監視技術が有効である。状態監視技術は、設備状態の変化を継続的に把握し、詳細評価が必要な設備や部位を効率的に抽出する手段として有効である。さらに、状態監視を起点として精密計測、非破壊検査および解析評価へ展開することで、合理的な保全判断につなげることが可能となる。

参考文献

- (1) 宮下和太：機械・構造物の疲労評価のための調査・計測メ
ニュー、IIC REVIEW、No.73、2025/04、pp.47-56.
[https://www.iic-hq.co.jp/library/073/
pdf/073_07.pdf](https://www.iic-hq.co.jp/library/073/pdf/073_07.pdf)
- (2) 武正文夫：疲労損傷モニタリングのための基礎技術、
IIC REVIEW、No.72、2024/10、pp.3-10、
[https://www.iic-hq.co.jp/library/072/
pdf/072_02.pdf](https://www.iic-hq.co.jp/library/072/pdf/072_02.pdf)
- (3) 鈴木優平：簡易モニタリングシステムの開発（その1）、
IIC REVIEW、No.72、2024/10、pp.40-42.
[https://www.iic-hq.co.jp/library/072/
pdf/072_07.pdf](https://www.iic-hq.co.jp/library/072/pdf/072_07.pdf)
- (4) Matsuishi, M. and Endo, T. : Fatigue of metals
subject to varying stress, Journal of the Japan
Society of Mechanical Engineers, Vol.71, No.589,
1968, pp.37-40.
- (5) 社団法人日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・
同解説－付・設計例－ 2012 年改定版．
- (6) 株式会社ソラコム：SORACOM Lagoon.
<https://soracom.jp/services/lagoon/>



研究開発センター 研究開発グループ
ひずみゲージ試験レベル3

宮下 和太

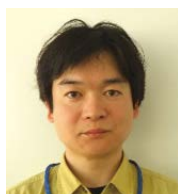
TEL 045-791-3522



研究開発センター 研究開発グループ

菅野 互泰

TEL 045-791-3522



研究開発センター 研究開発グループ
グループ長

ひずみゲージ試験レベル2 工学博士

鈴木 優平

TEL 045-791-3522