

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18310119

研究課題名（和文） 構造損傷のセンシング技術とそのモニタリングシステムの開発

研究課題名（英文） Sensing Technology of Structure Damage and Development of
Damage Monitoring System

研究代表者

宇都宮 登雄（UTSUNOMIYA TAKAO）

芝浦工業大学・先端工学研究機構・教授

研究者番号：60176708

研究成果の概要：構造部材の損傷センシング用のセンサとして、センサボルトと薄膜型センサを提案・作製し、その損傷検出用のセンサとしての有効性を示した。多点・長時間のモニタリングに適した計測法として、安価で小型化が可能な発振回路を用いた測定方法を提案した。この発振回路法を用いて測定した局所ひずみの時間的平均値の変化によって、構造物の損傷で問題となる疲労損傷（き裂の発生・進展）のセンシングが可能であることを示した。また、光通信を用いてひずみ波形をワイヤレスでモニタリングできることを確認した。さらに回転体の曲げ疲労においても、ひずみの時間平均値の変化により疲労損傷を検出できることを示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2007 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：安全システム

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械・構造物の破壊、破損は、それらの稼働中における構成部材材料の劣化や、荷重の変動による材料内部でのき裂の発生・成長（疲労破壊）によって起こるものと考えられる。したがって、機械・構造物の安全性、健全性を保証するためには、それらの構成部材の劣化や損傷（き裂の発生・成長）状態を的確に、かつ継続的にセンシングする技術が必要である。

(2) 機械・構造物の構成部材における、繰り返し（疲労）荷重下でのき裂発生・成長の把

握には、材料の損傷にともなうひずみ変化を測定することが行われている。ひずみ計測にはひずみゲージが使用されているが、ひずみゲージ自体は小さく軽量であるものの、それらによる測定データを計測器まで結線しなければならない。計測が多点にわたる場合、結線や測定データの量が膨大になり、それらの処理が大きな問題となっている。

(3) 近年、機械・構造物の高性能化や軽量化のため、軽量かつ耐熱性の高い超合金類や複合材が適用される場合が少なくない。そのため、機械・構造物中には異種金属同士や金属

と複合材のボルト締結型接合部（継手部）が多くなってきている。このような接合部では応力集中が起こるため、構造材の破壊・損傷の起点となる場合が多く、接合部での損傷センシングは非常に重要な事項である。接合部の損傷センシング用センサの候補として、結合ボルトに光ファイバーセンサを埋め込んだセンサボルト（以下スマートボルトと呼ぶ）を用いる方法と、薄膜型荷重センサの適用を考えている。

(4) 以上のような測定を可能にするには、「小型・軽量・安価」なセンシングモジュールを構成することが必要となる。また、一点のみの計測では不十分な問題であり、多くのセンサを構造物に分散配置させ、これらから得られる情報をもとにして多数の対象の状態把握、あるいは測定対象を全体的・総合的に把握する技術を発展させることが必要である。しかしながら、これまでのシステムは構造物のある点に集中したモニタリングシステムであり、構造物全体、およびその局所的な変化を捉えるためのものではない。

2. 研究の目的

- (1) スマートボルトおよび薄膜型荷重センサを提案・作製する。それらを構造材、ボルト接合部の破壊・破損に適用し、それらセンサの出力と発生した破壊、破損の状況を定量的に関連づけて、損傷センシング用のセンサとしての可能性を検討する。
- (2) ひずみゲージなどの小型計測要素に付加でき、測定データ収集が可能なセンサモジュールおよびセンシング方法を提案・開発する。
- (3) 提案したセンサモジュールおよびセンシング方法を、多点配置したひずみゲージ出力の測定などに適用し、構造物の局所的なひずみの測定、およびそれらからの健全性の評価を実現する。また、同様の方法を、ワイヤレスの特徴を生かして、回転体構造物の安全性・健全性の評価への適用を目指す。

3. 研究の方法

- (1) スマートボルトを実際に作製し、その基本特性の評価を行ったのち、金属/複合材せん断機械継手の引張り破壊試験を実施する。複合材に起こる面圧破壊を対象として、スマートボルトの軸方向ひずみと引張り荷重の関係から、ボルト孔周りの初期損傷を検出可能性に関する検討を行う。
- (2) ボルト締結型接合部等に適用可能な、静電容量変化型の薄膜型荷重センサを作製する。この薄板型荷重センサに荷重が負されると誘電体薄板の厚さが変化することで静電容量が変化するため、同センサの基礎特性として圧縮荷重に対する応答を測定し、応答特性を評価する。
- (3) 一つの測定点の情報量を少なくして、多点・長時間のモニタリングに適した計測法として、発振回路を用いた簡便な出力の測定方

法を提案する。この発振回路法で測定しやすい局所ひずみの時間的平均値の変化によって軸力疲労き裂の発生・進展の検出が可能であることを示す。

(4) 回転曲げ疲労試験を実施し、試験片の表面ひずみを、ワイヤレス機器を用いて測定することを試みる。その結果をもとに、回転曲げ疲労においても、軸力疲労の場合と同様に、ひずみ波形のサンプリング間の平均値によっても損傷検出が可能であることを示す。

4. 研究成果

(1) スマートボルト

図1に示す、チタン合金と複合材を一方は2本のチタン合金ボルトで、もう一方を1本のスマートボルトで結合した機械継手試験片の引張り試験を実施した。この試験片に加わる引張り荷重とスマートボルトの軸方向のひずみを測定することによって、力学的挙動や複合材の面圧破壊の検出が可能となる。図2に、スマートボルト出力、ボルト側面に貼付した2枚のひずみゲージの出力および複合材の厚み測定用の変位計の出力と引張り荷重の関係を示す。この図より、スマートボルト、ひずみゲージの出力と引張り荷重の関係は、24 kN付近（図中に Onset of Failure と示した地点）から引張り荷重の増加に対する出力の増加の割合が大きくなっていることがわかる。図3に、26 kN 負荷時（図2(b)の位置）における複合材の断面状況を示している。26 kN の負荷では、図のように、0°層において繊維のキンクバンドの発生と、これと隣接している45°層で層間剥離が発生しているのが確認できた。22 kN の負荷（図2(a)の位置）では損傷は確認されず、28 kN の負荷（図2(c)の位置）では図3よりさらに損傷は進んでいた。以上の結果より、複合材のボルト孔周りでの初期損傷は、図2のスマートボルトの出力と引張り荷重の関係の折れ曲がり点で複合材の初期損傷の有無を判断できる可能性のあることがわかった。なお図2より、スマートボルトの出力は変位計による板厚の直接計測よりも早い時点で折れ曲がりが見られており、変位計よりも複合材の初期の損傷を検出できることがわかる。またボルト

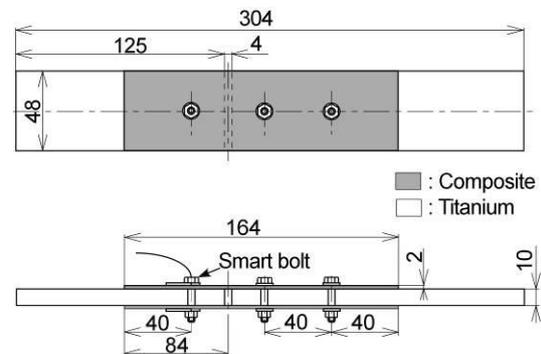


図1 複合材/金属せん断機械継手試験片

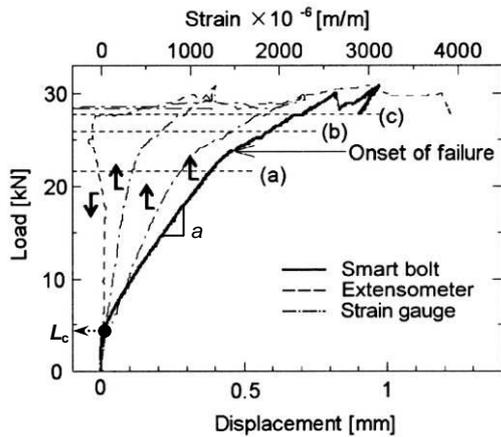


図2 ひずみおよび変位と引張り荷重の関係

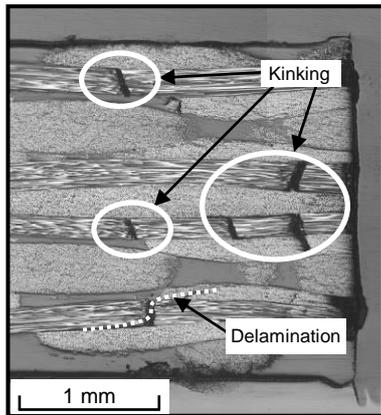


図3 断面での損傷状態 (26 kN 負荷時)

側面に貼付したひずみゲージの出力の折れ曲がり点はスマートボルトによるそれとほぼ同じであり、同程度の初期損傷を検出することが可能と考えられる。しかしながら、ひずみゲージはボルトのねじ部を削って貼付するため、ボルト締結力や強度を低下させる可能性がある。

続いて、基盤目状および千鳥配列したボルトにより複合材とステンレス鋼を締結した多列継手試験片の引張り試験を実施した。スマートボルトの周りの締結ボルトのうち一箇所のボルトを0, 3, 6, 9 Nmの3通りのトルクで締め付けることにより緩みを模擬した。以下では、引張り荷重軸の方向を”行”, 荷重軸に対して垂直方向を”列”と呼ぶ。スマートボルトの複合材と金属間の固着がとけたときの荷重 L_c (図2参照) は、基盤目および千鳥配列のいずれの場合も、緩みを模擬したボルトの締め付けトルクが小さくなるとともに減少した。このような L_c の変化に基づいて、スマートボルト出力により周囲のボルトの緩みの検出が可能であった。継手にかかる荷重とひずみが線形的に増加する領域の傾き a ($=dL/d\varepsilon$, 図2参照) の変化に基づくと、基盤目状配列では、傾き a が減少する場合スマートボルトより行方向のボルトが、逆に増加

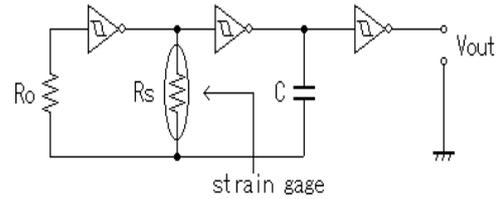


図4 発振回路の概要

する場合、列方向のボルトが緩んだと判断できた。千鳥配列では、傾き a が減少する場合、スマートボルトより一列だけ隣り合ったボルトが、逆に増加する場合、一列離れたボルトが緩んだと判断できた。

(2) 発振回路法

図4に、CMOSインバータを用いた自走マルチバイブレータと呼ばれる発振回路を示す。計測用センサ(ひずみゲージや薄膜型荷重センサなど、図4はひずみゲージを用いた場合である)は、発振周波数を決定する素子の一つとして発振回路に組み込まれている。図の構成をとれば、センサの状態変化によって発振周波数が変化することになり、センサ出力としては“発振周波数変化量”を取得すればよいことになる。また、この回路では、周波数計測は周期測定 of 加算平均結果を得ることになる。したがって、ランダムノイズおよび高周波ノイズは測定 of 段階でカットされる。回路の発振周波数 f とひずみゲージの抵抗 R_s の関係は、次式のように表される。

$$R_s = \frac{1}{\left\{ \left(-Cf \ln \frac{E - V_{HL}}{2E - V_{HL}} \right) + \left(-Cf \ln \frac{V_{HL}}{E + V_{LH}} \right) \right\}} = K \cdot \frac{1}{f} \quad (1)$$

ここで、 E [V] は回路の電源電圧、 V_{LH} [V] および V_{HL} [V] はインバータのスレッシュホールド電圧、 C は固定コンデンサである。式(1)の右辺は、発振周波数 f 以外は既知であるため、ゲージ抵抗 R_s は発振周波数と回路定数 K から算出できる。この回路の出力はデューティ比50%のデジタルパルスであるため、計測器もデジタルパルスカウンタを用いることができる。また、発振回路および計測器を少ない回路素子で構成でき、システム全体は安価で小型化にも寄与する。さらに、ボタン電池での駆動も可能で、1年程度は電池交換不要で駆動し続けることができるといった利点もある。この発振回路法は、ひずみや荷重計測だけでなく、基本的にセンサの種類を選ばず多くのセンサに用いることができる汎用性の高い方法である。

(3) 薄膜型荷重センサ

図5に、今回評価に使用した静電容量変化型薄膜荷重センサの構造を示す。図に示すように誘電体を電極でサンドウィッチしたシ

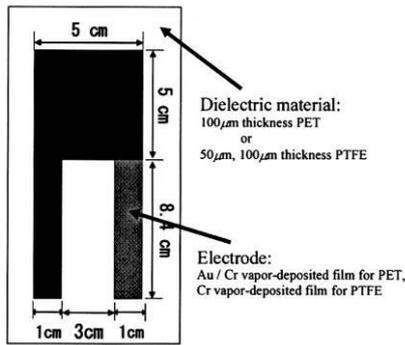


図5 薄膜型荷重センサの概要

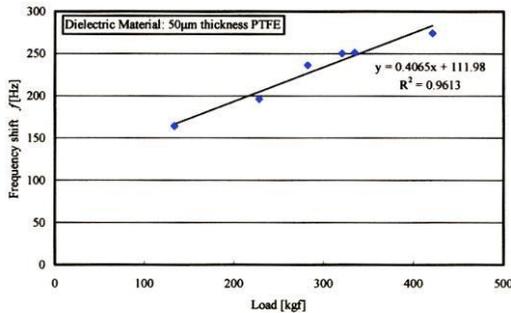


図6 圧縮荷重と発振周波数の関係

ンプルな平行平板型コンデンサである。電極対向面積 S [m²]、電極間隔 d [m]、真空の誘電率を ϵ_0 および誘電体の比誘電率を ϵ_r [F/m] とすると、平行平板型コンデンサの静電容量 C [F] は以下のように表すことができる。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (2)$$

この薄膜型荷重センサを圧縮荷重が負荷されるような環境に挿入した場合、この負荷により定常状態での誘電体薄膜の厚さ d が決まり、センサの静電容量値は一定となる。この接合部の負荷が何らかの影響により変動した場合、その影響により薄膜の厚さが d から $d + \Delta d$ となり、結果として静電容量値が変化することになる（電極対向面積 S は変化しないものと仮定）。このセンサの特性は、誘電体として用いる薄膜の機械的特性によって決まる。したがって、誘電体は検出対象となる負荷荷重の範囲および希望感度によって選択する必要がある。今回の薄膜型センサでは、誘電体薄板として厚さ $100 \mu\text{m}$ の PET (Polyethylene terephthalate) および厚さ $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ の PTFE (Poly-tetrafluoroethylene) を用いた。また、電極は誘電体板の両面に Au/Cr 薄膜 (PET の場合) および Cr (PTFE の場合) を真空蒸着によって形成した。電極の形状は全てのセンサにおいて同じである。

この薄膜型荷重センサを前述の発振回路に組み込み、発振回路法によりその出力を計測した。すなわち、センサに圧縮負荷を加え、

荷重変化と発振周波数変化の関係について調べた。図6に、測定結果の例として、ロードセルによって測定された荷重負荷値と発振周波数変化との関係を示す。この図より、荷重負荷量と発振周波数変化量の間にはほぼ線形の関係が成り立つことがわかる。同様の関係は、他のセンサにおいても確認されている。この結果および他のセンサにおける荷重値と発振周波数変化量の関係から、今回最も感度が良かったのは PTFE $50 \mu\text{m}$ のセンサであった。

(4) ひずみ計測による疲労損傷検出

疲労試験には、平滑試験片と円孔試験片を用いた。平滑試験片の表裏面には、それぞれ、抵抗値 120Ω , $1 \text{ k}\Omega$ の汎用および半導体ひずみゲージを貼付し、それらを発振回路と通常使用するセンサインターフェース (共和電業 PCD-300A) に接続した。応力振幅 $R=0.1$ とし、繰り返し荷重の周波数を $0.1 \sim 2.0 \text{ Hz}$ まで 0.1 Hz 毎に変化させて、ひずみ計測を繰り返した。円孔試験片は、長方形板の中央に直径 2 mm の円孔を開けている。試験片の一方の面には、図7に示すように円孔端近傍に抵抗値 120Ω の汎用ひずみゲージを、反対の面には $1 \text{ k}\Omega$ の半導体ひずみゲージを2枚の単軸ゲージと同じ位置に貼付した。汎用ひずみゲージはセンサインターフェースに、半導体ひずみゲージは発振回路に接続した。応力振幅 $R=0.1$ と -1 (完全両振り) とし、き裂の発生・進展にもなうひずみの変化を測定した。試験中には、読取り顕微鏡を用いてき裂発生と、発生したき裂の長さを計測した。

図8に、平滑試験片の疲労試験で得られた結果の例として、発振周波数変化 Δf と時間の関係を示す (この Δf がひずみ値に相当する)。この図より、ひずみの平均値を中心に振動する波形が得られることがわかる。荷重の周波数が整数倍のときは、ひずみの平均値で一定となる。また、繰り返し荷重の周波数がサンプリング周波数の $1/10$ (0.1 Hz) のとき、通常の測定で得られたひずみ波形とかなり近いものが得られたが、それより大きいとき正確な波形を得ることはできなかった。これは、 Δf は1秒間の変化の平均値として現れるためである。このように、荷重の周波数が小さい

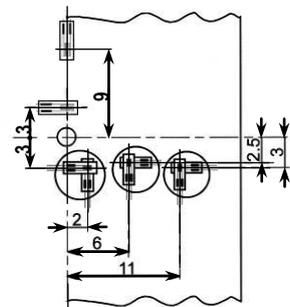


図7 ひずみゲージ添付位置

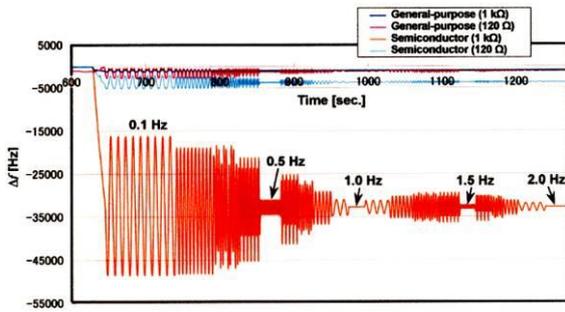


図8 発振周波数変化と時間の関係

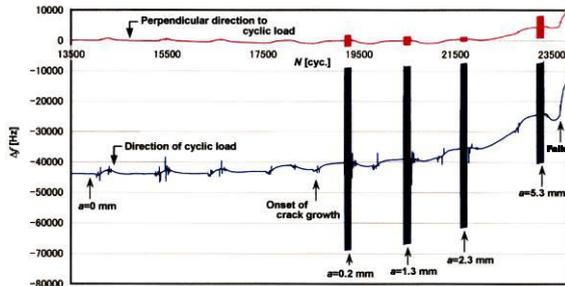


図9 発振周波数変化とサイクル数の関係

場合、発振回路によっても正確なひずみ波形を計測できることがわかった。発振回路によるひずみ測定は、長時間にわたってひずみ値の正確な波形を採取するというより、サンプリング間の平均値を採取するところに特徴がある。

図9は、き裂の発生・進展にともなう発振周波数変化 Δf の変化の例として、 $R=0.1$ の場合の Δf と繰り返し数 N の関係を示している。図中には、試験中に測定したき裂長さ a を示している。き裂長さ a の測定時に Δf は大きく振れているが、これはひずみを0.1 Hzで採取した際に現れたものである。この図より、 Δf はき裂発生・進展にともなって変化していることがわかる。図には、 Δf の変化から予想されるき裂発生点を示している。このように、発振回路で測定されるサンプリング間の平均値としての Δf （ひずみ）の変化をモニタリングすることにより、疲労き裂の発生・進展を検出できると考えられる。この疲労損傷試験に対するひずみ計測では、回路定数（式(1)の K ）の線形の周波数依存性を考慮することにより、ひずみの測定値の精度向上および安定性の向上をはかることができた。また、損傷検出試験において、ひずみ計測と同時にサーミスタを用いて微小な温度変化の測定を行い、その結果を用いてひずみ測定値を補正することにより、測定精度および損傷の有無の判定精度を向上させることができた。さらに、光通信機能用いたワイヤレス通信によるひずみの計測を試みたが、繰り返し荷重によるひずみ波形は、通常のひずみ計測による結果と同程度のものが計測できた。

ひずみ波形を詳細に採取すると、構造物内

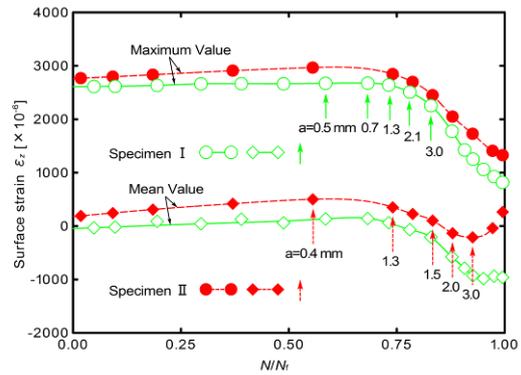


図10 ひずみの最大値と平均値のサイクル数に対する変化

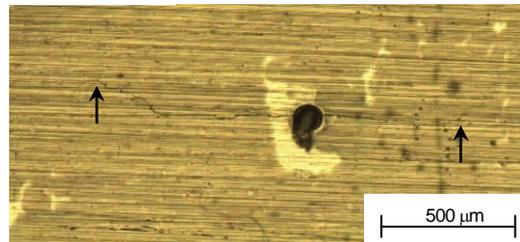


図11 き裂進展の観察 ($N/N_f=0.74$)。

で多点および長時間にわたる計測を考えると膨大なデータの処理など困難な問題が発生する。発振回路法によるひずみ計測は、損傷の有無を計測出力のみで判断できる可能性があり、多点や長時間の計測を対象とする場合、有効と思われる。

(5) 回転体の疲労損傷検出

試験片には砂時計型試験片を使用し、試験片長手方向中央（最小断面積）部に一箇所、100 μm 径の微小穴を開けき裂の発生地点を特定できるようにした。また、微小穴から軸方向に約2 mm離れた位置に、表面ひずみ測定用としてひずみゲージを貼付した。疲労試験には、小野式回転曲げ疲労試験機を用い、ひずみはテレメータ送信機（共和電業 MRT-300A）と受信機（共和電業 MRT-301A）を用い、ワイヤレスで測定した。

図10には、表面ひずみ波形の最大値、1サイクルの平均値と破断寿命 N_f とのサイクル数比 N/N_f の関係の例を示す。図中には、あわせて試験片表面で採取したレプリカにより求めたき裂長さ a も示している。図11は、波形が変化を始めたほぼ $N/N_f=0.74$ のときに採取した微小穴近傍のレプリカ写真である（図中の矢印はき裂端を示す）。この図のように、微小穴より1.3 mm程度の長さのき裂が確認でき、波形の最大値や平均値の変化はき裂の発生・進展によって起こっていることがわかる。また図10より、発振回路法で測定しやすいひずみ波形の1サイクルの平均値の変化によっても、最大値と同程度にき裂の発生・進展を捉えることができることがわ

かる。しかしながら、レプリカによる観察結果では、 $N/N_f=0.6$ 程度で約0.5 mmのき裂が確認されており、ひずみ波形で可能な発生の確認は若干遅くなっている。回転曲げの場合、表面き裂での発生となるため、き裂長さが短いときその開口量が小さいことが原因と考えられる。

以上のように、き裂の検出精度に差はあるものの、回転曲げ疲労においても、試験片の表面ひずみの1サイクルの平均値の変化をモニタリングすることにより、疲労き裂の発生・進展を検出できることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① 佐藤裕, 宇都宮登雄, 高戸谷健, 薄一平, 複合材せん断機械継手の力学挙動モニタリングおよび初期損傷検知, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-07-010 (2008), 1-9, 査読有。

② 佐藤裕, 宇都宮登雄, 高戸谷健, 薄一平, スマートボルトを用いた複合材せん断機械継手の初期損傷検知, 日本機械学会論文集 (A編), 74巻737号 (2008), 90-96, 査読有。

③ 佐藤裕, 宇都宮登雄, 高戸谷健, 薄一平, 複合材せん断機械継手の力学挙動モニタリング (第2報, 実験に基づく検討), 日本機械学会論文集 (A編), 73巻735号 (2007), 1236-1304, 査読有。

[学会発表] (計 14 件)

① 佐伯弥, 齋藤敦史, 平澤一樹, 物理・化学センサ統合システムによる居住者の行動把握に関する研究, 電子情報通信学会2009年総合大会 (2009年3月20日), 愛媛大学。

② 佐藤裕, 宇都宮登雄, 高戸谷健, スマートボルトによる複合材/金属せん断機械継手におけるボルト緩みの検出, 日本機械学会関東支部第15期総会講演会 (2009年3月7日), 茨城大学。

③ 宇都宮登雄, 佐藤裕, 齋藤敦史, 大関雄一郎, 半谷禎彦, 表面ひずみ測定による回転曲げの疲労損傷検出, 日本機械学会関東支部第15期総会講演会 (2009年3月6日), 茨城大学。

④ 平澤一樹, 佐伯弥, 齋藤敦史, 室内環境モニタリングシステムによる居住者の局所的な活動把握, 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2008年12月6日), 長良川国際会議場。

⑤ 佐伯弥, 齋藤敦史, 複数センサによる室内環境モニタリングを用いた居住者の行動把握, 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2008年12月6日), 長良川国際会議場。

⑥ 宇都宮登雄, 桑水流理, 村田陽三, 半谷禎彦, 北原総一郎, 吉川暢宏, 内部鑄巣群を有するADC12の軸力と回転曲げ疲労強度の関係, 日本鑄造工学会第153回全国講演大会

(2008年10月25日), 金沢工業大学。

⑦ W. Saeki, K. Hirasawa and A. Saitoh, Recognition of Residential Daily Activities Using Multi-Sensor System for Monitoring of Indoor Environment, THE IEEE 25TH SENSOR SYMPOSIUM 2008 (2008/10/23), 沖縄コンベンションセンター。

⑧ 宇都宮登雄, 桑水流理, 村田陽三, 半谷禎彦, 北原総一郎, 吉川暢宏, アルミ合金ダイカストの疲労強度に及ぼす内部鑄造欠陥群の影響, 日本機械学会材料力学カンファレンス M&M2008 (2008年9月16日), 立命館大学。

⑨ 宇都宮登雄, 齋藤敦史, 佐伯弥, 佐藤裕, 発振回路法による疲労損傷検出への適用性, 日本機械学会2008年度年次大会 (2008年8月6日), 横浜国立大学。

⑩ 佐伯弥, 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 発振回路法によるひずみ計測と損傷モニタリングへの応用, 平成20年電気学会全国大会 (2008年3月19日), 福岡工業大学。

⑪ 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 佐藤裕, 薄膜型荷重センサの開発, 山梨講演会(日本機械学会関東支部, 精密工学会) (2007年10月20日), 山梨大学。

⑫ 八幡真純, 岡村宏, 宇都宮登雄, 齋藤敦史, 佐伯弥, 発信回路を用いたひずみ計測による疲労損傷検出の可能性, 山梨講演会(日本機械学会関東支部, 精密工学会) (2007年10月20日), 山梨大学。

⑬ 富澤和紘, 佐藤裕, 宇都宮登雄, 高戸谷健, 金属の塑性を考慮した複合材/金属の力学的挙動, 2006年度年次大会 (2006年9月20日), 熊本大学。

⑭ 石井宏明, 佐藤裕, 宇都宮登雄, 大下健太, 竹山俊成, スマートボルトの多列ファスナ継手構造健全性モニタリング機能の検討, 第48回構造強度に関する講演会 (2006年7月28日), 神戸ポートピアホテル。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇都宮 登雄 (UTSUNOMIYA TAKAO)
芝浦工業大学・先端工学研究機構・教授
研究者番号: 60176978

(2) 研究分担者

齋藤 敦史 (SAITOH ATSUSHI)
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 30280994

佐藤 裕 (SATO YUTAKA)
宇宙航空研究開発機構・総合技術開発本部・主幹研究員
研究者番号: 30196282

(3) 連携研究者

なし