

低周波 A E を用いたねじ転造工程の不良品検知 —低周波 A E センサの開発—

三好 英円*1, 平尾 友二*1, 平野 良典*2, 大家 好太郎*2

抄 録

切削や鍛造など、金属の摩擦や塑性変形が生じる部分では、AE (Acoustic Emission) と呼ばれる特殊な超音波が発生し、非破壊検査に利用されている。本研究では、PZT トランスデューサを使った簡易の AE センサを製作して、ねじの転造に伴いどのような AE 信号が捉えられるのか実験を行った。その結果、低周波 AE 波形が不良品の検知に有効であることが分かった。しかし、AE 信号は金属材料では一般に 100Hz 以上の周波数成分をもつ信号が多いとされることから、観測された低周波信号が AE 信号ではない可能性が生じた。PZT トランスデューサは、音や歪みなどの機械的信号を観測できるので、歪みゲージを使って同様の観測を試みたが顕著な変位は捉えられなかった。これらのことを踏まえ、耐久性や信頼性のある転造機用 AE センサを開発することとした。材質、形状や接着方法などを検討するとともに、市販の AE センサとの測定比較も行ったので報告する。

1 はじめに

ねじの成型は、六角成型打ち抜き（六角ボルトの頭形状の成型）、転造（ねじ山の成型）や先取り（先端のバリ取り R 加工）などの工程を経て行われる。それぞれの機械での処理能力が異なるため、当社ではこれらの工程間でワークの取り置きが行われているため、希に異なるサイズが混入することがある。

転造工程では、このような異サイズの混入やダイスの摩耗・取り付け不良などにより不良品が発生している。これを未然に防ぐ目的の検知機も市販されているが、当社による導入評価試験の結果、同社の品揃えに十分対応できなかった。

本研究の目的は、当社のような製造形態の工場でも適用でき、且つ、その品揃えに対応できる不良検知手法を確立することである。

なお、本研究は、平成 23、24 年度技術シーズ創出調査事業および平成 28 年度技術シーズ創出調査事業で実施したものである。

2 研究内容

2・1 ねじ転造中の A E 波形の観測

切削や鍛造など、金属の摩擦や塑性変形が生じる部分では、AE (Acoustic Emission) と呼ばれる特殊な超音波が発生し、金属材料では主として 100～

1000kHz の周波数領域に成分をもつ信号が多く放出され、非破壊検査における有用性が広く知られている。

本研究では、まず、AE の現状技術について調べ、実現の可能性を検討した。また、特許等の先行技術についても調べた。その結果、AE を使った非破壊検査は既に一部の企業などで実用化され、数件の特許が出願されていた。しかし、すべての事例が大学等との個別研究成果で汎用性が無く、特許も審査されることなく放棄され、同業他社などの業界に普及しているものも無かった。これらの調査結果から、AE を使った検査は、個別事案毎に最適化を要する特殊性や現場での調整が必要で、実用化には現場に即したノウハウが必要である。

そこで、手持ちの PZT トランスデューサを簡易の AE センサとして、ねじの転造を行う転造機（ローリングマシン）の複数箇所に取り付けて、転造に伴いどのような AE 信号が捉えられるのか実験を行うことにした。

PZT トランスデューサは、直径：30mm、厚さ：1mm、表裏にそれぞれ銀電極を有し、共振周波数：1.98MHz、Kp：65.7～65.9%、Cp：14110～14130pF の特性が似通ったものを選別し、インピーダンスアナライザ（HP 4194A）を用いて図 1 のような周波数特性を調べた。80kHz～1MHz にかけて共振点があいまいに認められるが、2MHz の共振点に比べるとイ

*1 電子技術担当、*2 (株) ヒラノファステック

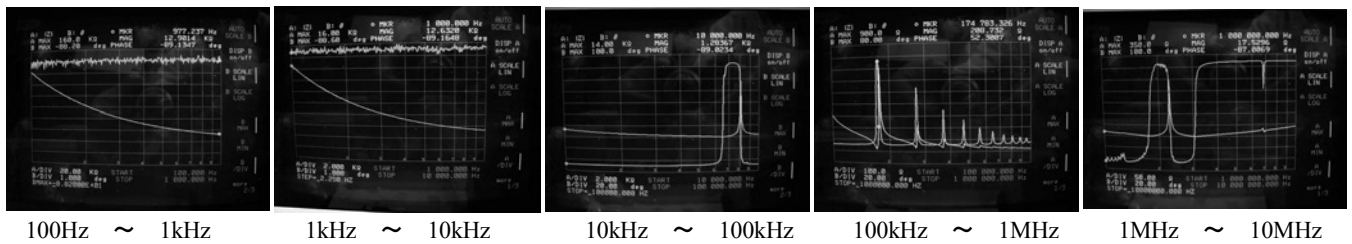


図1 PZT トランスデューサの周波数特性

ンピーダンスがかなり小さく、それ以外の周波数域ではほぼ平坦な特性を示していたことから、AE 信号の観測には問題ないものと考えられた。

また、現場環境は工業用油が多いことを考え、PZT トランスデューサを AW-30(粘性)程度の潤滑油に2ヵ月間浸して特性変化の有無についても調べ、形状や外観、電気的特性に変化が無いことを確認した。

簡易 AE センサは図2のように、表裏の電極に電線をはんだ付けし、5mm厚のフェライトゴムをバック材として金属プレートでねじ止めする構造とした。

ねじ山の成型を行う転造機は、斜めに溝の入った前後2枚のローリングダイスと呼ばれるねじ山加工用治具が取り付けられている。この2枚のダイスは、図3のようにねじを挟み込み、奥側のダイスが左右に並行スライドすることにより、挟み込んだねじの表面を斜めに入った溝で塑性変形させてねじ山を圧延成型（転造）する。

簡易 AE センサは、ねじの転造が行われるこのダイスに取り付けるのが最適であるが、ダイスは一定本数のねじを転造すると、摩耗限界に達して破損する交換部品であるため、これにセンサを取り付けると交換の度にセンサを付け直さなければならなくなる。一方、AE 信号は音波であるため、材質に大きな違いがなければ、接合部を通して伝搬するので、図3の Sen1~Sen3 ようにセンサの取り付けは、転造機本体の比較的広い平坦部を有する箇所とした。

実験では、AE センサから出ている電線を、アンプを介さずに直接オシロスコープ（Agilent DSO5014A）に接続して、ねじの転造に伴う励起電圧波形を観測した。その結果、図4のように、転造機の動作サイクルと簡易 AE センサの取り付け位置に応じた明確な繰り返し波形が観測された。

簡易 AE センサから得られた変位波形が転造機などの動作タイミングに相当するののか、より明確に確

認するために転造機のワーク投入チャックに近接スイッチを取り付けた。その結果、ねじがダイス間に入り込んでから排出されるまでの区間を特定した。

図4に示す最も変化の大きい波形を例にとると、ねじがダイスに入り込んでから約60msの間は波形が滑らかであることから、ねじに負荷はほとんどかかっていないと考えられ

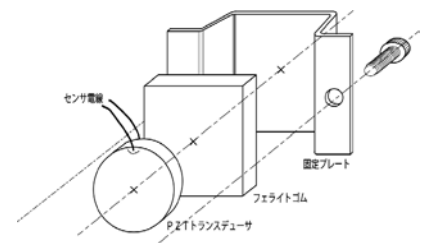


図2 簡易 AE センサの構造

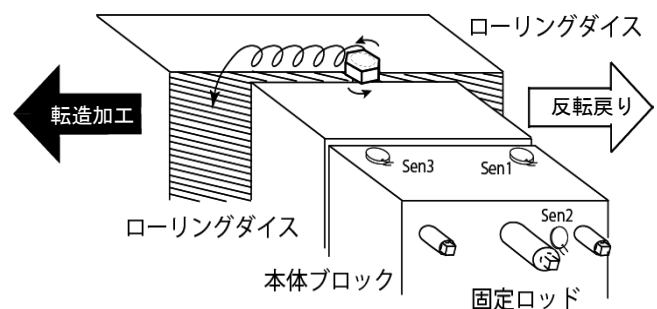


図3 簡易 AE センサの取り付け箇所

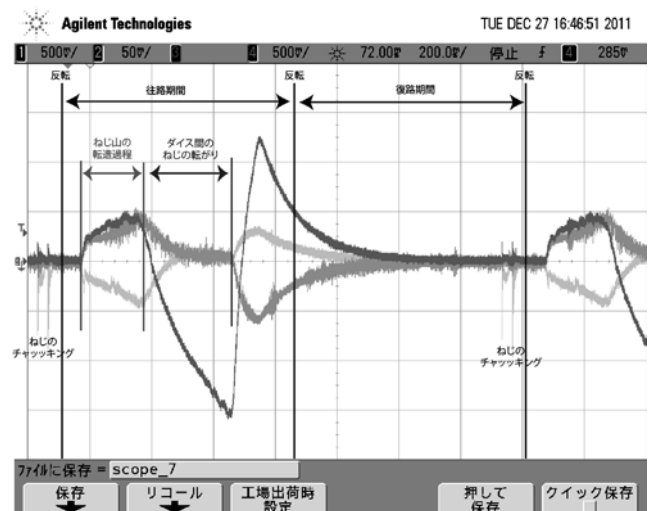


図4 簡易 AE センサを使った計測結果

る。その後、ねじに圧力がかかり塑性変形を始めるに従って変位が増加している。転造が完了してねじ山が成型されてしまうとねじがダイスの溝に沿って単に転がるだけとなることから、変位は急激に反転減少し、ねじが排出されると変位がまた急激に反転増加し、その後緩やかに減少し元に戻る過程が見て取れる。

さらに、本研究の目的である異なるサイズを意図的に混入させた場合でも、図5のように、転造過程における変位の差異も明確に観測することができた。

観測された波形は、周波数が極めて低いことから、当初想定していた AE 信号とは異なる。PZT トランスデューサは、機械的振動を電気的信号に変換する素子で、音や歪みなどの機械的信号を観測することが出来る。そのため、簡易 AE センサを取り付けた近傍に長さ 100mm の歪みゲージをそれぞれ直交するように2枚ずつ図6のように4カ所(CH1~CH4a)に貼り付け、平面の伸縮歪みの計測を行った。歪みゲージの出力はブリッジ(共和電業 DB-120C-3R)を介して、データロガー(共和電業 EDS-450A)に取り込み、パソコンでグラフ化して波形を観測した。データロガーの入力は4ch しかないので、実験では、CH1~4 と CH1a~4a の2回に分けて測定した。図7に歪みゲージで観測した歪み量の変化の一部を示し

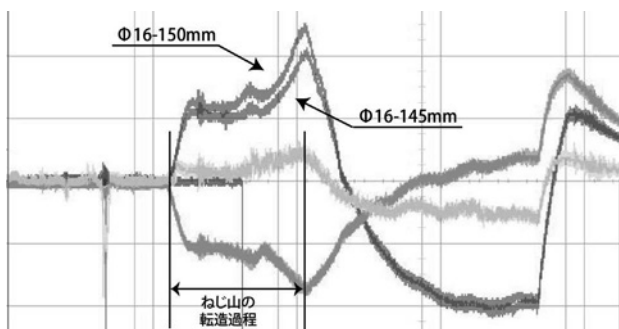


図5 φ16 長さ 145mm と 150mm の波形の差異

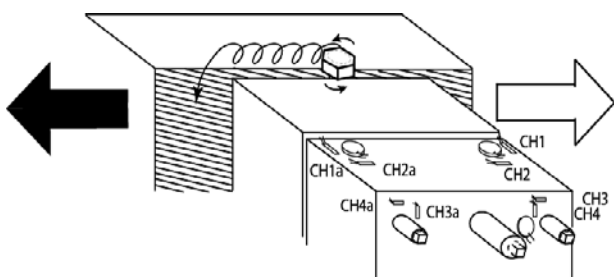


図6 歪みゲージの取り付け位置

た。結果は、観測された歪み量は僅かに変化がみられる箇所があるが、タイミング的には転造中ではなくダイスが反転する際に転造機にかかる負荷による歪みであった。

このことから、簡易 AE センサで観測された波形は、転造機本体の伸びなどの歪み変形によるものではなく、ねじの転造に伴う音響的変位であると推定された。

2・2 低周波AEセンサの開発

簡易 AE センサによる観測結果から、AE によるねじの転造不良を検出することが可能であることが判明した。そこで、取り外しが可能で耐久性のある転造用 AE センサを開発することとし、合わせて市販されている AE センサについても評価することとした。また、転造機への取り付け方法についても検討

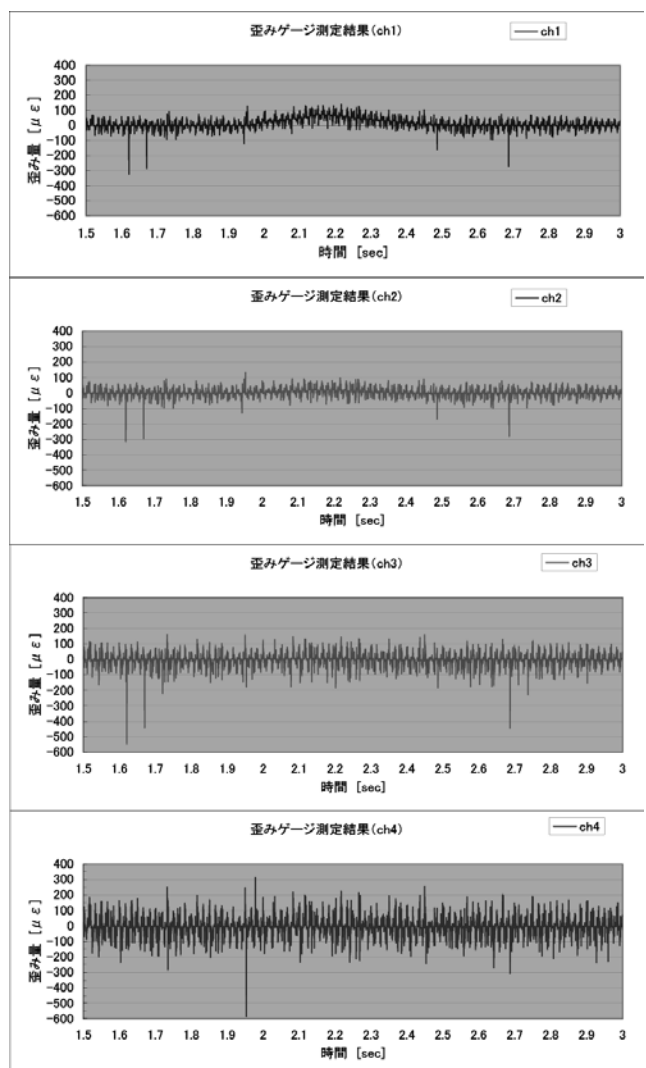


図7 歪みゲージを使った計測結果

した。

実験するセンサは、耐久性を保つためにトランスデューサを覆う密閉構造とし、取り外しが可能とするために転造機と接する部分はステンレス (SUS) プレートとした。

まず、SUS プレートの板厚を 0.2, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0mm の 5 種類用意し、形状を正方形板、円形板の 2 パターンとした。PZT トランスデューサとの接着も、エポキシ系とシアノアクリレート系の 2 パターン用意し、可能な限り密着するよう加圧して接着した。バック材は、なし、5, 10mm で比較した。

実験の結果、板厚に 2 乗逆比例して計測感度が低下する傾向が認められた。このことから板厚が薄い方が有利ではあるが、単純に利得の問題であることから、信号を増幅することで解決出来る問題であった。板形状は、図 8 のように計測される低周波信号波形や感度がその形状によって異なる結果となったが、信号波形から特徴抽出して、不良品を検出することへの影響は少ないものと判断された。ただし、正方形板では板厚以上に感度が低下し、ノイズ比率も増大したことから、円形板が望ましいと考えられる。なお、図 8 の比較図は時間軸のタイミングが一致していない点に留意されたい。

SUS プレートと PZT トランスデューサとの接着に

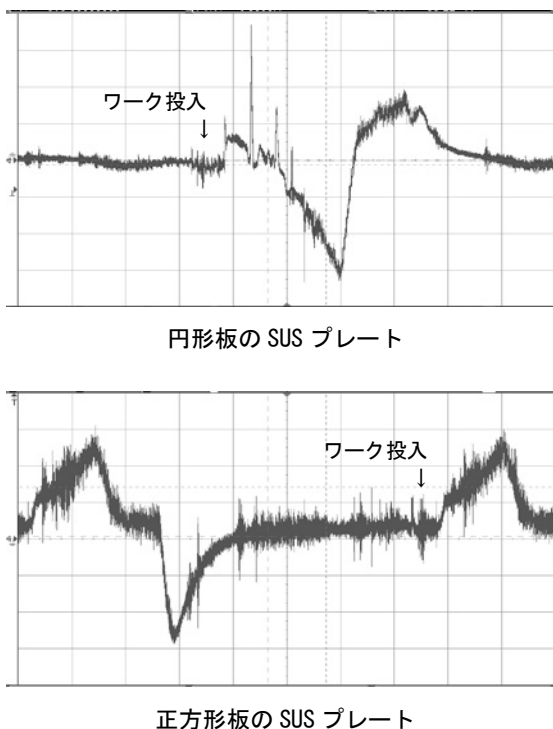


図 8 形状の異なる SUS プレートでの観測波形

については、エポキシ系とシアノアクリレート系での差異はなく、バック材についても有無や厚みに関して、ほとんど違いは無かった。

一方、転造機との接着方法の検討では、エポキシ系とシアノアクリレート系の接着剤を使う方法と、磁石で密着させる方法および治具でねじ止めする方法について比較した。治具でねじ止めする方法は、簡易 AE センサで試したとおり、計測結果は良好であったが転造機本体への加工が必要で、取り付け場所を選ぶことから現実的でない。磁石で密着させる方法は、図 9 のようにセンサの外周にリング状の磁石を取り付けて転造機に密着させたが、密着度の調整が困難で満足な計測結果は得られなかった。接着剤を使った方法は、共に良好な結果が得られた。取り外しも考慮すると、溶剤での接着剤の除去が容易なシアノアクリレート系接着剤を使う方が良いと考えられる。また、接着剤を使った場合の取り外し性は、板厚が 1mm 以下の場合には、取り外しの際の衝撃や曲げ圧などにより PZT トランスデューサが割れてしまったことから、3mm 以上の板厚が必要であった。

次に密閉構造とするため、転造機との接合部の板厚を 3mm とし、図 10 左のような下部が円筒凹型(上部は方形)で上部が凸型の金属蓋の構造のセンサ、図 10 中のような SUS 外装を被せ SUS プレートとはコーキング剤を介し密閉されている方形構造のセンサ、図 10 右のような下部が U 字型に SUS 板を曲げた構造で上部の SUS 外装とはねじで結合している方形構造のセンサの 3 種類について、外装のない円形板のセンサと比較した。

図 11 に結果を示した。波形の振幅(正負)方向が逆転していたり、変化のタイ

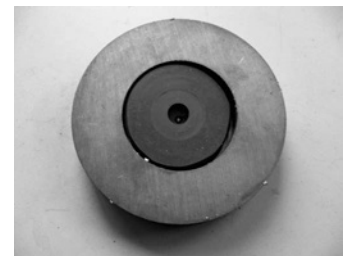


図 9 リング型磁石



図 10 実験に使用した密閉構造のセンサ

ミングがずれていたりするのは、4種類のセンサを同時に取り付けて計測したため、音源とセンサの位置関係がずれていることによる。図10中のセンサは、転造機と接合している SUS プレートと外装金属が接していないため、外装無しの場合と同様、比較的計測結果が良好であった。図10右のセンサは、転造機と接合している SUS プレートがU字型をしている上、外装金属とねじ止め結合しているため、感度の低下（振幅が小さく）とノイズ比率の増大（高周波成分が大きい）を生じた。図10左のセンサでは、特徴的な低周波成分がほとんど観測されず、ほとんどが高周波成分となっている。これは、金属ブロックを円筒凹型にくり抜いた構造の上、凸型の金属蓋がバック材を介して内部の PZT トランスデューサを抑えていることが影響したものと考えられた。

本研究で捉えようとしている転造に伴い発生する AE 信号は、音響信号であるこのため、音源と離れた場所でも伝搬してきた信号を捉えることが出来る。音の伝搬は、均一な物質内では距離の2乗で減衰するがその減衰率は材質の音速と密度に依存し、その積を音響インピーダンスという。接合面では反射・減衰を生じるが、その量は音響インピーダンスの差異に依存する。このため、センサは音源であるダイスではなく、接合している転造機本体に取り付けても、材質の似通った鉄系であるため音が伝わりやすく、計測することが出来る。実験したセンサの転造機と接する部分が SUS プレートとなっているのも、この点と耐食性を考慮したためである。

一方、金属と空気とでは音響インピーダンスは大きく異なるため、ほとんど伝搬することなくその境界で反射して戻って来てしまう。このため、前述の円形版 SUS プレートと正方形版 SUS プレートとの比較では、円形版の方が良好な計測結果となった。同様の理由から、ねじで外装と結合して複雑な形状となった図10右のセンサよりも、音響インピーダンスが異なるコーキング剤を介して外装と接合している図10中の方が、計測結果が良かった。形状が複雑である点では、図10左と図10右は大差ないものと考えられるが、計測結果は大きく異なる。その理由は、上部金属蓋がバック材を介して PZT トランスデューサを抑えているためと推定し、追加の実験を行った。

新たに図12右のように、円筒形お椀型の SUS ケースの内側に PZT トランスデューサを貼り付け、バック材は付けずに内部に樹脂コーキングを充填し密閉したセンサと、図10左を改造して3mm厚のバック材と約37gの重りを内部に詰めて蓋をしたセンサの比較実験を行った、その結果、新しく作った円筒形お椀型のセンサでは図11の外装無しに近い波形が計測された。このことから、PZT トランスデューサを抑えるバック材側の重みが計測波形に影響したと言える。また、計測された波形は、当所想定していた100Hz以上であり、一般的に言われている AE 波形と考えられる。従って、このセンサを使うと、金属疲労などによる刃工具の寿命推定（ここでは、ダイス寿命の推定）などにも用いることが出来ると考えられた。

次に市販の AE センサを用いた測定実験を行った。使用した AE センサは(株)NF回路設計ブロック社製の AE-901A-OP 及び AE-905A-OP である。測定結果を図13に示した。観測された波形は、図11内の図10左のセンサの観測波形に酷似しており、高周波成

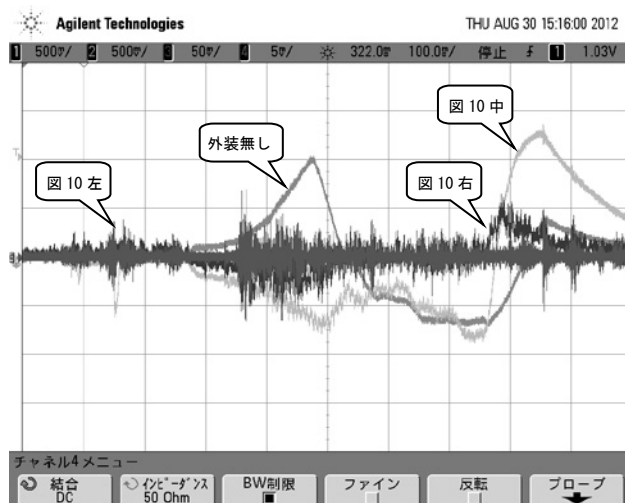


図11 異なる密閉構造のセンサによる計測結果

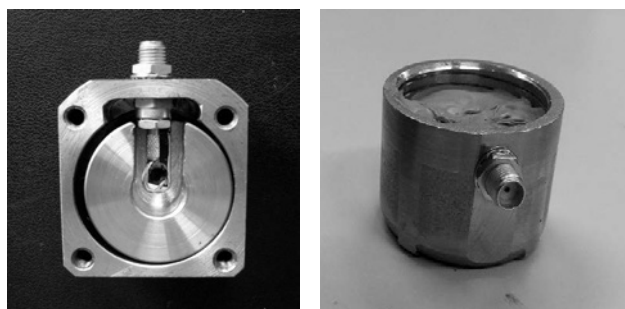


図12 円筒凹型センサ

分のみが強調された波形となっていた。このことから、本研究の目的であるねじの良品・不良品を検知するセンサとしては使えないことが分かった。理由として、市販の AE センサの仕様が 10kHz 以上であったためと考えられる。

しかし、10kHz 以下を計測出来る AE センサは、市販されていないことから、円形板の SUS プレートにバック材無しで PZT トランスデューサを接着したものに、円筒形の樹脂外装で蓋をする図 14 のような構造のセンサを自作することとした。円形板の SUS プレートは、加工の関係で厚さ 3mm と 5mm の 2 種類、樹脂外装はジュラコン、MC ナイロン、布ベークライトの 3 種類を用意した。完成したセンサの外観を図 15 に示した。作製したセンサで実験を行った結果、すべてのセンサで図 16 のような転造に伴う低周波の変位を観測することが出来た。ただ、布ベークライトは安価ではあるが吸湿性などの点で問題があることから外装はジュラコンか MC ナイロンが良いと思われた。

3 まとめ

本研究では、PZT トランスデューサを使った簡易の AE センサを製作して、ねじの転造に伴いどのよ

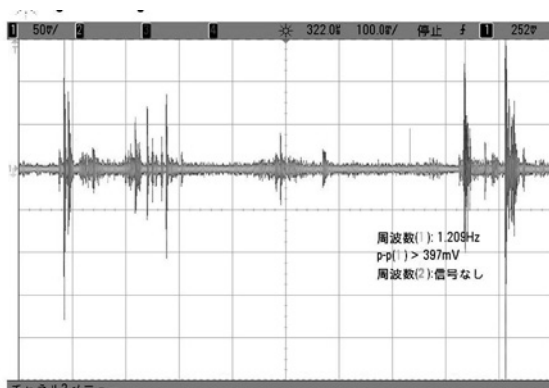


図 13 市販の AE センサでの観測波形

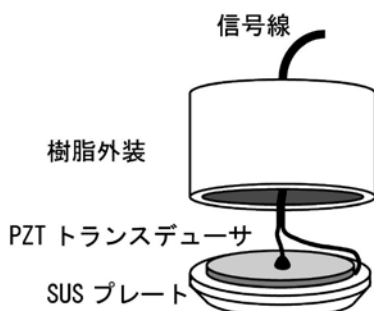


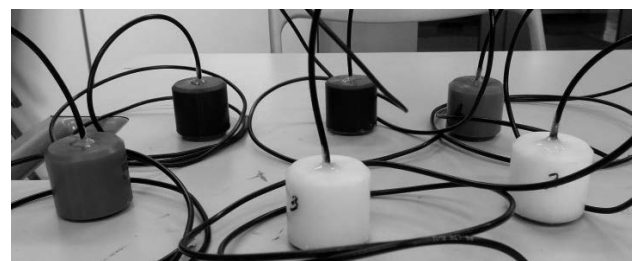
図 14 作製したセンサの構造

うな AE 信号が捉えられるのか実験を行った。その結果、低周波 AE 波形が不良品の検知に有効であることが分かった。また、歪みゲージを使った検証実験から、この信号が確かに AE 信号であることも確認した。しかし、このような低周波 AE を観測出来るセンサは市販されていないことから、耐久性や信頼性のある転造機用 AE センサを開発することとした。材質、形状、構造や接着方法などについて検討した結果、満足できるセンサを開発することができた。

本研究の最終目標は、不良品の検知装置の開発にある。今後、A/D 変換素子内蔵の安価なワンチップマイコンを用いた信号処理装置などを開発し、今回開発した低周波 AE センサと組み合わせることで、目標を達成できるものと考えている。

参考文献

- 1) 仲佐博裕. アコースティック・エミッションの理論と実際. (株) 地人書館. 1944, ISBN4-8052-04761.
- 2) (株) 富士セラミック. 圧電セラミック テクニカル・ハンドブック. (株) 富士セラミック.



白：ジュラコン、青：MCナイロン、茶色：布ベークライト

図 15 作製したセンサの外観

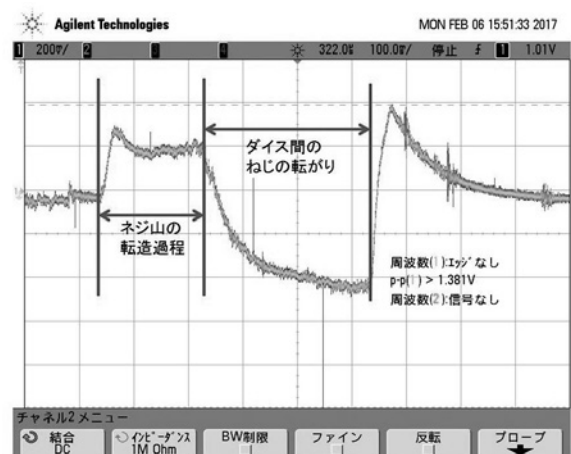


図 16 作製したセンサで観測した波形