

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560264

研究課題名(和文)超音波瞬時振動数を用いたヒートシール多層薄膜構造の評価技術

研究課題名(英文)Evaluation technique of multilayered membrane of heat sealing based on instantaneous frequency of ultrasonic wave

研究代表者

井上 卓見 (INOUE, Takumi)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40274485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヒートシールは、表層 - 基材 - 接着層の3層からなるシール材を重ねて加圧、加熱して接着層を溶融し密閉する方法である。各層の厚さはミクロンオーダーであり薄い多層構造である。本研究では、ヒートシールに投射・反射した超音波パルスの瞬間的な振動数(瞬時振動数)に着目してシール強度を評価する手法を開発した。シール強度の変化に対し瞬時振動数が一定のパターンで変化しシール強度を評価できることを見出すとともに、瞬時振動数変化について解析的な取り扱いを行い、瞬時振動数がどのように変化するかを事前に予測することも可能とした。

研究成果の概要(英文)：Sealing materials for heat seal consist of surface, base and adhesive layers. Heat seal is a packaging technique to adhere the sealing materials in piles by heating. The sealing materials are thin multilayer structures because the thickness of each layer is micrometric order. In this study, an evaluation method of the sealing strength of heat seal is developed by means of an instantaneous frequency of an ultrasonic pulse, which is projected into the heat seal and reflects at the boundary of each layer. The sealing strength is evaluated by profile of the instantaneous frequency because it varies with a specific pattern according to the sealing strength. The variation of the instantaneous frequency can be expected before the evaluation by means of analytical and mathematical treatment of the instantaneous frequency.

研究分野：機械工学、機械力学・計測制御

キーワード：モニタリング 診断 超音波 信号処理 計測制御

1. 研究開始当初の背景

ヒートシールとは熱可塑性樹脂の面同士を加熱と押し付けによって溶着させる手法である。この接着手法は多層構造をしたフィルム状の材料同士を接着することが可能なため、食品や医薬品の袋状包装を密封するためによく用いられる。また、シール温度や加熱温度、加熱時間を適切に与えることで接着強度を制御できることも知られている。これを利用して、保管中の密封と使用時の容易な開封を実現する製造条件が検討されてきた。それと同時に、シール強度の評価手法も提案されている。直接的な方法として、接着強度を直接測定する剥離試験や、一定期間製品を保管して漏れの有無を調べる検査が挙げられる。ただし、剥離試験は破壊試験であり製品全てに適用することはできず、一定期間保管する方法では保管コストを無視できない問題がある。

2. 研究の目的

本研究では超音波の瞬時振動数を利用して接着強度を評価する手法を提案する。超音波パルスの振幅と位相が時間的に変化することに着目し、位相の時間変化率である瞬時振動数を算出して接着力の評価に利用する。瞬時振動数は、波形が持つ各瞬間の振動数を表すため、局所的な振動数変化をとらえやすい。また、ヒートシールからの反射のように複数のパルス波が重なった波形の瞬時振動数は、重なる前の波の瞬時振動数とは異なる形状に変化し、重なる波同士の時間差や振幅の大きさの影響を受ける。この性質に着目し、ヒートシールからの反射波の変化を捉え接着力評価を実現する。

3. 研究の方法

(1) 瞬時振動数を用いた評価手法

本研究で用いる超音波パルスは、図1に示すような4~6程度の波数を含むパルス状の粗密波である。本研究では、このような波をヒートシールの接着サンプルに投射し反射波を測定して瞬時振動数を求める。

本研究では超音波パルスの瞬時振動数を高い精度で求めるため、新たに複素ウェーブレット変換の位相情報を利用した計算法を提案する。まず、時間 t の関数である超音波波形 $u(t)$ を、振幅 $A(t)$ および位相角 $\phi(t)$ を用いて以下のように表す。

$$u(t) = A(t) \cos \phi(t) \quad (1)$$

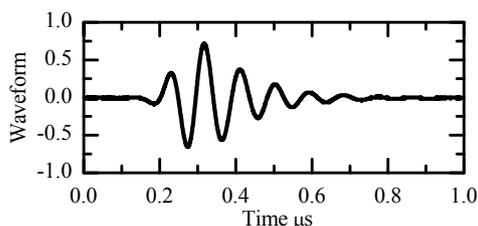


図1 超音波パルス波形の例.

超音波波形の瞬時振動数 $f(t)$ (Hz)は、位相 $\phi(t)$ の時間変化率として定義される。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2)$$

超音波波形 $u(t)$ の瞬時振動数を計算するために、 $u(t)$ に対して次式に示す複素連続ウェーブレット変換 $(W_\psi u)(b, a)$ を行う。ここでのマザーウェーブレット $\psi(t)$ は、修正モルレーウェーブレットとする。

$$(W_\psi u)(b, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

$$\psi(t) = \exp \left(-\frac{t^2}{N} + i\omega_0 t \right)$$

“ $-$ ” は複素共役、 i は虚数単位を表す。 a, b はそれぞれウェーブレットのスケールパラメータ、シフトパラメータである。

本研究では、時刻 $t=b$ において最大となる複素ウェーブレット成分 $(W_\psi u)(b, \tilde{a}(b))$ の実部と虚部を用いて、 $t=b$ での位相角 $\phi(t=b)$ が次のように近似的に表されると考える。

$$\phi(t=b) \cong \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[(W_\psi u)(b, \tilde{a}(b))]}{\text{Re}[(W_\psi u)(b, \tilde{a}(b))]} \right) \quad (4)$$

瞬時振動数を求めたいすべての時間について式(4)の $\phi(t=b)$ を求め、式(2)の微分を数値的に実行して瞬時振動数 $f(t)$ を求める。これが本研究で提案する瞬時振動数の計算法である。

(2) 実験対象と実験装置

接着強度の異なる複数のヒートシールサンプルを用意し、提案した手法の有効性を検証する。サンプルの模式図を図2に示す。サンプルは幅10mmの2種類のフィルムからなり、先端の25mmが接着されている。図3(a)に接着前のヒートシールフィルムの断面図を、図3(b)に接着後の断面図を示す。フィルム1はポリエチレンテレフタレート(PET)、アルミニウム(Al)、ポリエチレン(PE)の3層構

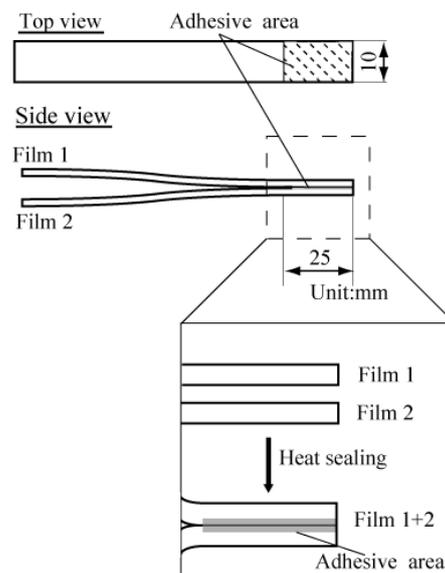


図2 ヒートシールサンプル

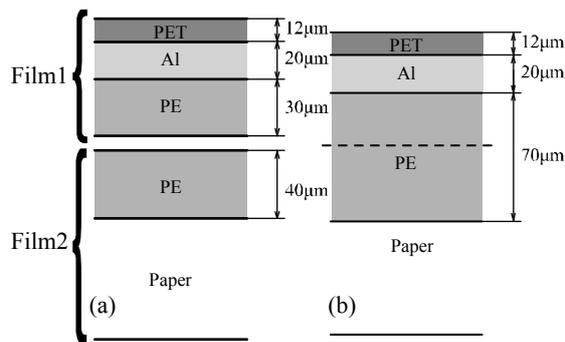


図3 ヒートシール断面 (a)接着前(b)接着後

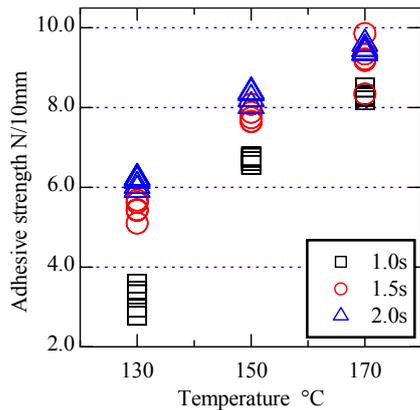


図4 ヒートシールサンプルの接着力

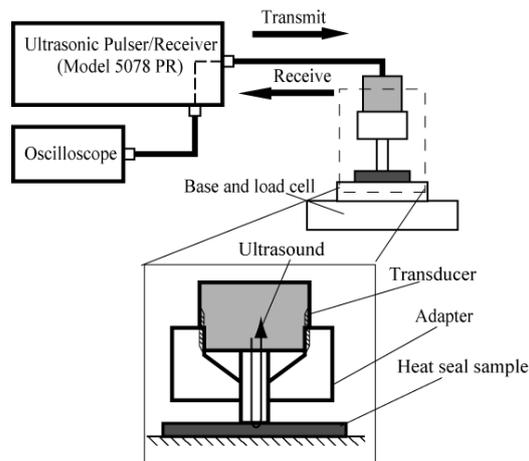
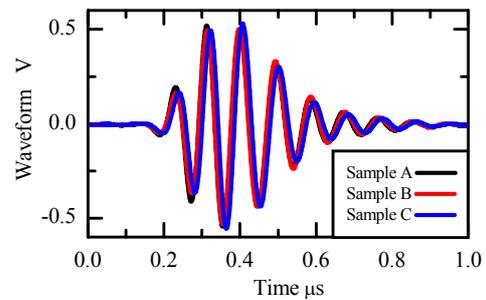


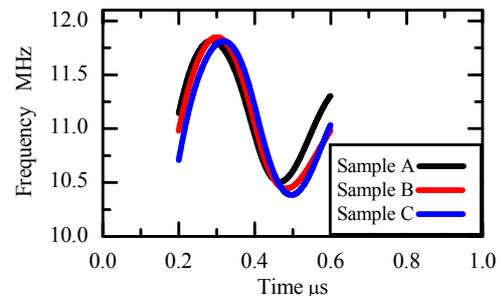
図5 実験装置

造を、フィルム2はPE、紙、PEの3層構造を持つ。両フィルムのPEが接着層である。

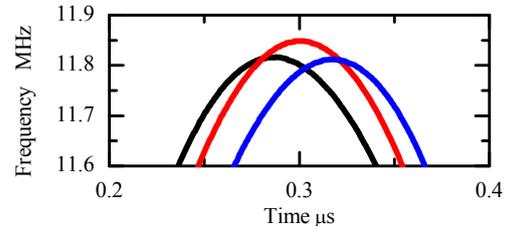
本研究では、上記のヒートシールサンプルを9種類用意した。接着強度の異なるサンプルを作成するため、加熱温度と加熱時間を各3条件の9種類与えている(加熱温度130, 150, 170°C, 加熱時間1.0, 1.5, 2.0 s)。また、接着時の圧力は 9.8×10^5 Paとし、全サンプルで共通とした。実験では、1つのシール条件につき5個のサンプルを用意し、合計45個のサンプルから超音波波形のデータを得る。また、サンプルに提案手法を適用した後、180°剥離試験を実施した。剥離速度は50mm/minとし、剥離するまでに得られた最大荷重を接着強度とした。図4に、剥離試験によって得られた全45サンプルの接着強度を示す。加熱温



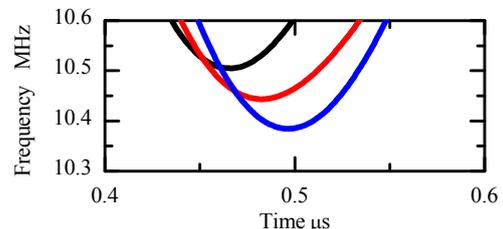
(a)超音波パルス反射波形



(b)超音波パルスの瞬時振動数



(c)瞬時振動数極大値の拡大図



(d)瞬時振動数極小値の拡大図

図6 実験結果の例

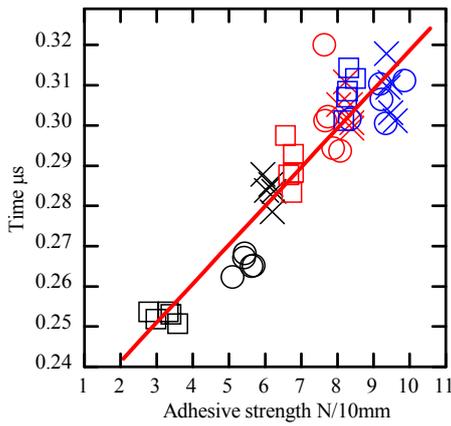
度が高いほど、また、加熱時間が長いほど接着力が大きいことがわかる。

図5に実験装置の構成図を示す。探触子には超音波の投射領域を絞るとともに、投射時のノイズと測定反射波を分離するためのアダプタを取り付けている。

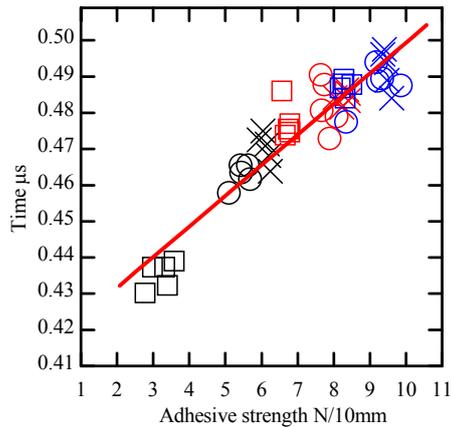
4. 研究成果

(1) 実験結果

図5の装置を用いて各サンプルからの反射波を測定した。図6(a)に、代表的な波形として、接着条件と接着力の異なる3つのサンプルから得られた測定波形を示す。黒は加熱温度130°C, 加熱時間2.0sのサンプルA, 赤は同150°C, 1.5sのサンプルB, 青は同170°C, 1.5sのサンプルCから得られた波形を表す。サンプルA, B, Cの接着力は、それぞれ5.94, 7.88, 9.22 N/10mmである。振幅や位相の違いはほとんどないため、時間波形から接着力の



(a) 接着力と極大値の時刻



(b) 接着力と極小値の時刻

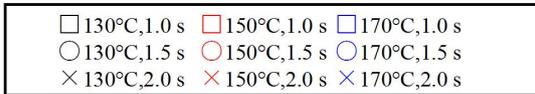


図7 接着力と極値の時刻

違いを読み取ることは難しい。

図 6(a)の測定波形に対し瞬時振動数の計算を行った。図 6(b)に測定波形の主要部分が持つ瞬時振動数を示す。瞬時振動数は $0.3\mu\text{s}$ で極大値、 $0.5\mu\text{s}$ 付近で極小値を持つ形状を示す。この二つの極値は、接着力ごとに値や現れる時間が異なっている。図 6(c)に、 $0.3\mu\text{s}$ に現れている極大値近傍の拡大図を示す。サンプル A からサンプル C への変化をみると、極大値が遅れて現れている。同様に図 6(d)に、 $0.4 \sim 0.5\mu\text{s}$ に現れている極小値近傍の拡大図を示す。サンプル A からサンプル C への変化をみると、極小値が遅れて現れている。これに着目して、すべてのサンプルの瞬時振動数の極値の挙動と接着力との関係を図 7 に示す。図 7(a)に接着力と極大値の現れる時間の関係を、図 7(b)に接着力と極小値の現れる時間の関係を示す。ほとんどのサンプルにおいて、接着力が高いほど瞬時振動数の極大値や極小値の現れる時刻が遅れている。また、図 7(a)の接着力と極大値の現れる時間の相関係数は 0.928 、図 7(b)の接着力と極小値の現れる時間の相関係数は 0.941 であり、極値の現れる時間と接着力の間には強い相関がある。

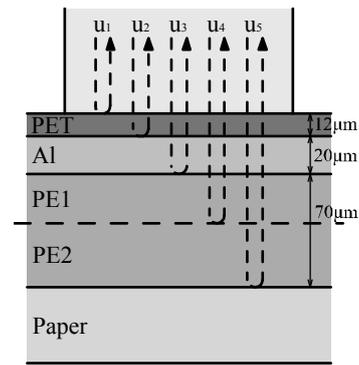


図8 超音波の反射経路

(2) 反射波のシミュレーション

瞬時振動数の極値の変化について、そのメカニズムおよび接着力との関係を、数値シミュレーションを通して考察する。サンプル投射された超音波は、各層の境界で反射が起き、図 8 に示す経路を通って返ってくると考えられる。ヒートシールサンプルから得られる反射波 $u(t)$ は、フィルム各境界面での反射波を $u_1(t) \sim u_5(t)$ と定義すると、次のように各波の重ね合わせで表せる。

$$u(t) = \sum_{n=1}^5 u_n(t) \quad (5)$$

アダプタ先端からサンプルに対して入射する波を $u_0(t)$ とすると、各境界面での反射波 $u_n(t)$ は $u_0(t)$ がシール各層の境界で反射、透過することで生じる。ここでは、反射波 $u_n(t)$ を入射波 $u_0(t)$ に対する振幅比 A_n と時間遅れ t_n を用いて以下のように表す。

$$u_n(t) = A_n u_0(t - t_n) \quad (6)$$

A_n は各境界面での音波の反射率と透過率から計算できる。入射波 $u_0(t)$ は図 5 の実験装置を用いて実験的に求めた。

密度 ρ_1 、音速 c_1 である媒質 1 から密度 ρ_2 、音速 c_2 の媒質 2 に音波が入射するとき、反射率 R および透過率 T は以下のように表される。

表1 音速と密度

Material	c (m/s)	ρ (10^3kg/m^3)
Acryl	2730	1.19
PET	1950	1.35
Al	6420	2.69
PE	1950	0.90

表2 反射率 R と透過率 T

Medium1	Acryl	PET	PET
Medium2	PET	Acryl	Al
R	-0.105	0.105	0.735
T	0.895	1.105	1.735

Medium1	Al	Al	PE
Medium2	PET	PE	Al
R	-0.735	-0.816	0.816
T	0.265	0.184	1.816

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (7)$$

表1に示すフィルム各層の材質の密度 ρ と音速 c から、各境界における反射率と透過率を求め表2に示す。各境界面での反射波 $u_n(t)$ の時間遅れ t_n は、図8に示す各フィルムの厚さと表1の音速から計算される。結果を表3に示す。

反射波 $u_1(t) \sim u_5(t)$ の入射波 $u_0(t)$ に対する振幅比 A_n は、PE1とPE2の境界での反射率を R_4 、透過率を T_4 、PE2と紙の境界での反射率を R_5 とすると、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} A_1 &= R_{Ac-PET} \\ A_2 &= T_{Ac-PET} \cdot R_{PET-AI} \cdot T_{PET-Ac} \\ A_3 &= T_{Ac-PET} \cdot T_{PET-AI} \cdot R_{AI-PE} \cdot T_{AI-PET} \cdot T_{PET-Ac} \\ A_4 &= T_{Ac-PET} \cdot T_{PET-AI} \cdot T_{AI-PE} \cdot R_4 \cdot T_{PE-AI} \cdot T_{AI-PET} \cdot T_{PET-Ac} \\ A_5 &= T_{Ac-PET} \cdot T_{PET-AI} \cdot T_{AI-PE} \cdot T_4 \cdot R_5 \cdot T_4 \cdot T_{PE-AI} \cdot T_{AI-PET} \cdot T_{PET-Ac} \end{aligned} \quad (8)$$

PE層と紙の境界では、ほぼ100%の波が反射すると考え、反射率 $R_5=1$ とする。一方、PE層同士の境界での反射率 R_4 および透過率 T_4 は、接着層を挟む媒質が同一であるため式(7)から算出できない。ここでは、PE境界での反射率・透過率は境界面の接着状態に依存する考え、反射率は接着力が弱いほど絶対値が大きく、透過率は接着力が弱いほど絶対値が小さくなるとする。具体的には、PE境界面での反射率 R_4 を接着力が弱い順に $R_4 = -0.9, -0.7, -0.5, -0.3, -0.1$ 、対応する透過率を $T_4 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ とする。これらの条件順に対応する反射波をWave(A)~Wave(E)と表し、式(8)から求めた振幅比を表4に示す。

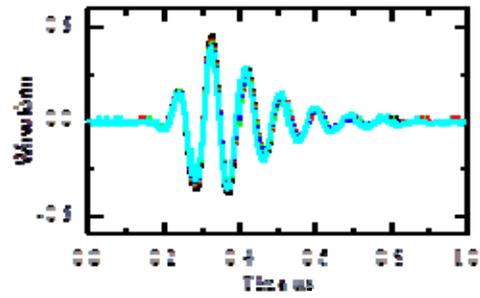
表3 反射波の時間遅れ

t_1 (ns)	t_2 (ns)	t_3 (ns)	t_4 (ns)	t_5 (ns)
0.0	12.5	18.5	49.3	90.3

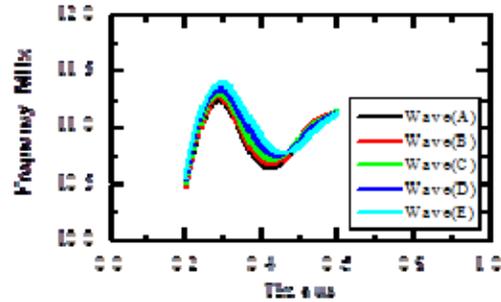
表4 反射波の振幅比

	Wave(A)	Wave(B)	Wave(C)
A_1		-0.105	
A_2		0.727	
A_3		-0.370	
R_4	-0.9	-0.7	-0.5
A_4	-0.137	-0.106	-0.076
R_5		1	
A_5	0.002	0.014	0.038

	Wave(D)	Wave(E)
A_1		-0.105
A_2		0.727
A_3		-0.370
R_4	-0.3	-0.1
A_4	-0.046	-0.015
R_5		1
A_5	0.075	0.123



(a)波形



(b)瞬時振動数

図9 基本パルス波の重畳による実験の模擬

表4の振幅比を式(5),(6)に代入し、作成した合成波 $u(t)$ を図9(a)に示す。数値シミュレーションの結果でも、時間波形から条件の違い(R_4 の違い)を見分けることは難しい。図9(b)に瞬時振動数を示す。瞬時振動数をみると0.3 μ s付近で極大値が、0.45 μ s付近で極小値が現れており、強い接着力を模擬したシミュレーションほど瞬時振動数の極値の時刻が遅れている。この傾向は実験結果と同じ傾向である。つまり、境界面での接着力の変化は反射波の振幅に影響し、瞬時振動数の極値の移動を引き起こすと考えられる。

(3) まとめと今後の課題

- ① これまで取り扱われていなかったヒートシールの接着力評価について、ヒートシールに投射した超音波パルスの反射波の瞬時振動数から接着力評価を行う方法を提案した。
- ② 接着力の異なるサンプルに対して提案した手法を適用した。反射超音波パルスの瞬時振動数の極値の動きから、ヒートシールの接着力評価が実現できることを示した。
- ③ 超音波パルス波を重ね合わせて多層のヒートシール内で反射した超音波パルスを模擬した。接着面での超音波の透過率・反射率の変化によって瞬時振動数の極値が変化することを再現し、実験の有効性を確認した。
- ④ 本研究の適用範囲は図2に示した短冊状のサンプルである。実際にはパウチ、容器の縁など様々な形状でヒートシールが用いられており、実際の製品への適用が今後の課題となる。

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2件）

- ① Takahiro Nakano and Takumi Inoue,
Estimation of Inner State Using Instantaneous
Frequency of Ultrasonic Wave, Theoretical and
Applied Mechanics Japan, 査読有, 2012,
Vol.60, PP.135-142.
- ② Daiki Yanagihara, Takumi Inoue, Takahiro
Nakano, Tatsuya Oda and Kazuhisa Omura,
Estimation of Seal Strength on Heat Sealing by
Ultrasound, APVC2013, 15th Asia Pacific
Vibration Conference, 査読有, 2013, No.
M2_303B_5.

〔学会発表〕（計9件）

- ① 柳原大希, 井上卓見, 中野貴裕, 小田達也,
超音波の瞬時振動数によるヒートシールの
接着力評価, Dynamics and Design
Conference 2012, 査読なし, 2012, No. 625.
- ② 中野貴裕, 井上卓見, 超音波パルスの瞬時
振動数を用いた物体内部に存在する境界
面の評価, 第11回 評価・診断に関するシ
ンポジウム, 査読なし, 2012, PP.11-15.
- ③ 池田翔輝, 廣重勇太, 井上卓見, 大村和久,
超音波瞬時振動数によるボルトの緩み検
出, Dynamics and Design Conference 2013,
査読なし, 2013, No. 523.
- ④ 池田翔輝, 廣重勇太, 井上卓見, 大村和久,
超音波瞬時振動数を利用したボルトの緩
み評価, 日本機械学会九州支部 鹿児島講
演会, 査読なし, 2013, PP.201-202.
- ④ 西地喜章, 池田翔輝, 井上卓見, 大村和久,
重畳超音波パルスの振幅比変化と瞬時振
動数に関する解析的考察, 第12回 評価・
診断に関するシンポジウム, 査読なし,
2013, PP.93-102.
- ⑤ 近藤千紘, 西地喜章, 井上卓見, 大村和久,
重畳超音波パルスの瞬時振動数に関する
解析的考察, 日本機械学会九州学生会 第
45回卒業研究発表講演会, 査読なし, 2014,
PP.173-174.
- ⑥ 西地喜章, 池田翔輝, 井上卓見, 大村和久,
重畳超音波パルスの振幅比変化と瞬時振
動数に関する解析的検討, 日本機械学会九
州支部第67期総会・講演会, 査読なし,
2014, No.922.
- ⑧ 近藤千紘, 宮木啓介, 井上卓見, 門脇廉,
重畳超音波パルス瞬時振動数の数値解析,
日本機械学会九州支部 大分講演会, 査読
なし, 2014, 2E1.
- ⑨ 宮木啓介, 井上卓見, 門脇廉, 西地喜章,
近藤千紘, 大村和久, 重畳超音波パルスの
瞬時振動数に関する解析的検討, 第13回
評価・診断に関するシンポジウム, 査読な
し, 2014, PP.87-91.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計3件）

名称：Nondestructive testing method and device
発明者：井上卓見
権利者：国立大学法人九州大学
種類：特許
番号：US Patent (Application No. 13/387872)
出願年月日：平成24年4月12日
国内外の別：国外（アメリカ合衆国）

名称：可撓性フィルム材から成る被検体の接
着部の検査方法
発明者：藤田萩乃, 齊藤充由, 西塚秀彦,
井上卓見
権利者：東洋製罐株式会社, 国立大学法人九
州大学
種類：特許
番号：特願 2013-077163
出願年月日：平成25年4月2日
国内外の別：国内

名称：筒状成形品の検査方法
発明者：藤田萩乃, 齊藤充由, 西塚秀彦,
井上卓見
権利者：東洋製罐株式会社, 国立大学法人九
州大学
種類：特許
番号：特願 2013-086019
出願年月日：平成25年4月2日
国内外の別：国内

○取得状況（計1件）

名称：非破壊検査方法及び装置
発明者：井上卓見
権利者：国立大学法人九州大学
種類：特許
番号：特許第5105384号
出願年月日：平成21年7月31日
取得年月日：平成24年10月12日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://dynamic.mech.kyushu-u.ac.jp/ken.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
井上卓見 (INOUE Takumi)
九州大学大学院・工学研究院・教授
研究者番号：40274485

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし