九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

超音波パルスの瞬時振動数を用いたヒートシールの非破壊接着力評価

井上，卓見
九州大学大学院工学研究院

門脇，廉
九州大学大学院工学研究院

森，健太
九州大学大学院工学研究院

https://hdl.handle.net/2324/7162475

出版情報：Transactions of the JSME (in Japanese). 82 (843), pp.16-00327, 2016-11-25. The Japan Society of Mechanical Engineers
バージョン：
権利関係：© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

Bulletin of the JSME
日本機械学会論文集
Transactions of the JSME (in Japanese)
Vol.82, No.843, 2016

超音波パルスの瞬時振動数を用いたヒートシールの非破壊接着力評価

井上 卓見[*1]，門脇 廉[*1]，森 健太[*2]

Nondestructive evaluation of seal strength of heat sealing using instantaneous frequency of ultrasonic pulse

Takumi INOUE[*1], Ren KADOWAKI[*1] and Kenta MORI[*2]
[*1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan
[*2] Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

Received 25 July 2016

Abstract
Heat sealing is a packaging technique for hermetic sealing of foods and medical supplies etc. Evaluation of seal strength is important to guarantee both airtightness and easiness to open which are conflicting requirements. There are few studies of nondestructive evaluation although conventional spot check with destructive evaluation costs a great deal. This study proposes a new nondestructive evaluation method for the seal strength with ultrasonic pulse. The proposed method focuses on instantaneous frequency of the ultrasonic pulse which is time varying frequency in waveform. This paper demonstrates that the instantaneous frequency is more effective to evaluate the seal strength than conventional indexes such as amplitude and arrival time of the pulse through experiments. The transmittance and reflectance on the welded boundary surface are supposed to vary depending on the seal strength because the welded condition does not affect only the seal strength but the characteristics on the welded boundary surface. We also analytically discuss the mechanism how the instantaneous frequency senses the change of the transmittance and reflectance on the welded boundary surface. Simulated instantaneous frequencies also vary according to the change of the transmittance and reflectance. This result indicates that our proposed method effectively senses the variation of the welded surface characteristics pertaining to heat strength.

Key words : Diagnostics, Signal processing, Ultrasound, Instantaneous frequency, Heat sealing, System identification

1. 緒　　言

ヒートシールとは，熱可塑性樹脂を加熱，加圧して溶着させる密封手法であり，食品や医薬品等の包装によく用いられる．図 1 に示すレトルト食品やカップ型容器はその一例である．ヒートシールには，大きく分けて密封性確保と易開封性の相反する 2 つの性能が要求される．なかでも図 1 のカップ型容器等はシール部を直接剥がして開封するため，両性能を満足する適切な接着力が求められる．密封性に関する瑕疵は，溶着時に混入した介在物や押し付け時に生じたシワによる剥離などが大部分であり，これらの検出については，赤外線(大和製罐株式会社, 2011)，電流値(Hsu and Chang, 2006)，X 線(Song et al., 2014)，超音波(Frazier et al., 2000, Chona et al., 2003)を用いる方法，偏光応力解析(Barnes et al., 2012)など多くの方法が提案されている．一方，開封の容易さ，すなわち適切な接着力に関しては, 溶着時の温度, 圧力, 時間と接着力との関係についての研究(Yuan and Hassan, 2007, Marouani, 2012)が行われており，特に，温度の影響が大きいことが指摘されてきた(Aithani et al., 2006, 菱沼, 2007)．そのため，温度制御を容易にするための添加剤に関する研究(Manias et al., 2009, Nase et al., 2013)や，適切な温度伝導のためのシール材厚さに関する研究(Lukas et al., 2012)等が報告されている．しかしながら，シール後の製品個々の接着力を非破壊で評価する研究はこれまでにほとんど報告例がない．わずかに超音波の振幅変化に着目した試み

No.16-00327 [DOI:10.1299/transjsme.16-00327], J-STAGE Advance Publication date : 1 November, 2016
[*1] 正員，九州大学大学院 工学研究院（〒819-0395　福岡県福岡市西区元岡 744）
[*2] 学生員，九州大学大学院 工学府
E-mail of corresponding author: takumi@mech.kyushu-u.ac.jp

© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

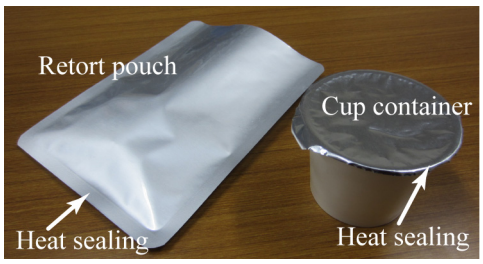

Fig. 1　Examples of heat sealing. Edge of retort pouch and lid of cup container are sealed by heat sealing.

(Pascall et al., 2002, Ayhan and Zhang, 2003)が見られる程度である．ヒートシールは，溶着時の温度等の条件により接着層間の境界面（溶着面）の溶融状態が異なることで接着力の違いが生じる．この境界面に投射された超音波は溶融状態によって透過・反射する量（振幅） が変化すると考えられ，上記研究はこの性質を利用した接着力評価の試みである．しかしながら，ヒートシールは表層，基材層，接着層等の薄い層が重なる多層構造であり，投射した超音波は溶着面以外の多数の境界面でも反射・透過を生じる．これらの多くの波が干渉して境界面を透過・反射する超音波の変化を不明瞭にするため，超音波の振幅変化に着目した上記試みは十分な接着力評価には至っていない．

これに対し本研究では，汎用の超音波探傷器で発生されるパルス状の超音波を用い，振幅変化ではなく瞬時振動数に着目するヒートシールの非破壊接着力評価手法を提案する．瞬時振動数とは振動や波動の瞬間的な振動数を表し，時間とともにその振動数が刻々と変化する様子を表現できる．ここでは，上述のように接着力の違いによって溶着面を透過・反射する超音波の振幅が変化すると考え，まず，簡単な 2 波の超音波パルスの干渉を例にとり瞬時振動数の特性を解析的に説明する．わずか 2 つのパルス波の相対的な振幅や時間差が変化しても，干渉波形からはそれらの変化が明瞭に見いだせない場合があること，一方，そのような場合でも瞬時振動数には明確な変化が現れることを示す．次に，溶着時の温度と時間を変化させて作成した異なる接着力のヒートシールサンプルに超音波パルスを投射し，内部で反射したパルス波を測定してその瞬時振動数を求める．ヒートシールの接着力によって反射波の振幅には大きな違いが現れないものの，瞬時振動数のパターンは有意に変化して接着力の評価が可能であることを示す．最後に，接着力によりヒートシール溶着面の透過波・反射波の振幅が変化する条件のもと，実験に用いた超音波パルスを数値的に干渉させて模擬的な反射波を求める．その瞬時振動数が実験と同様に変化することを示し，本手法の有効性と溶着面の透過・反射波の振幅が接着力に依存するという前提の妥当性を示す．

2.　超音波パルスの干渉と瞬時振動数の変化

2・1　瞬時振動数の数値計算法

図 2(a)に本件の実験で用いた超音波パルス波形を示す．5～6 周期程度の波を含むパルス状の粗密波である．本研究では，超音波パルス波形 $u(t)$ を時間 t とともに変化する振幅 $a(t)$ を持つ余弦波と考え，次のように表す．

$$u(t) = a(t)\cos\phi(t) \tag{1}$$

$\phi(t)$ は超音波パルスの位相角である．本研究で着目する瞬時振動数 $f(t)$ は，位相角 $\phi(t)$ の変化率として以下のように定義される．

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{\mathrm{d}\phi(t)}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

通常， $f(t)$ は時間とともに変化する関数となる．著者らは既報(井上他, 2015)において，実験から測定した超音波パルス波形に複素ウェーブレット変換を適用して瞬時振動数を精度良く求める方法を提案した．以下にその概略

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

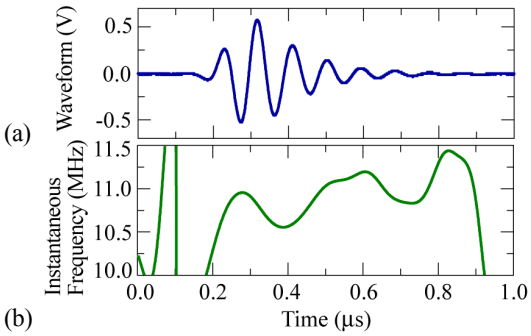

Fig. 2 Example of actual ultrasonic pulse wave. (a) Acquired waveform and (b) instantaneous frequency computed by numerical calculation with complex wavelet transform.

を示す.

まず，超音波波形 $u(t)$ に次式に示す複素連続ウェーブレット変換 $\left(W_\psi u\right)(b,a)$ を行う.

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

マザーウェーブレット $\psi(t)$ にはガボールやモルレー等の複素ウェーブレットを用いる.“－”は複素共役を示す. 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．マザーウェーブレットの基本角振動数を ω_0 とすると，通常のウェーブレット変換では，時刻 $t=b$ において $\left(W_\psi u\right)(b,a)$ の大きさを最大とする a の値（$\tilde{a}(b)$ とする）から得た振動数成分 $\omega_0/\left(2\pi\tilde{a}(b)\right)$ を瞬時振動数とすることが多い．しかし，この方法では瞬時振動数の時間追従性が悪く精度的に劣ることがわかっている．これに対し著者らは，時刻 $t=b$ において最大となる複素ウェーブレット成分 $\left(W_\psi u\right)(b,\tilde{a}(b))$ 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した.

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

瞬時振動数を求めたいすべての時間について式(4)の $\phi(t=b)$ を計算し，式(2)の微分を数値的に実行して $f(t)$ を求める. これが著者らの提案した瞬時振動数 $f(t)$ の計算法である. この方法は $f(t)$ の時間変化に対する感度が高く，高精度の計算が可能となる(井上他, 2015). これにより求めた図 2(a)の超音波パルス波形の瞬時振動数を図 2(b)に示す．パルス波形の主要部（横軸およそ 0.2～0.7μs の範囲）では，瞬時振動数がおよそ 10.5～11.2 MHz の間で変動している様子が見てとれる.

2・2 パルス波の干渉と瞬時振動数変化の解析的考察

複数の超音波パルスが重なり互いに干渉すると，波形だけでなく瞬時振動数にも変化が生じる．この現象を，後述の図 4, 5 に示す 2 波の超音波パルス $u_1(t)=a_1(t)\cos\phi_1(t)$ および $u_2(t)=a_2(t)\cos\phi_2(t)$ の干渉を例にして解析的に考察する． $u_2(t)$ の位相角 $\phi_2(t)$ は $u_1(t)$ の位相角 $\phi_1(t)$ から $\theta(t)$ 遅れており， $\phi_2(t)=\phi_1(t)-\theta(t)$ であるとする．重なって互いに干渉した超音波パルス波形 $u_1(t)+u_2(t)$ は次のように表される.

$$\begin{gathered}u_1(t)+u_2(t)=a_1(t)\cos\phi_1(t)+a_2(t)\cos\phi_2(t)=a_1(t)\cos\phi_1(t)+a_2(t)\cos\left(\phi_1(t)-\theta(t)\right)=A(t)\cos\left(\phi_1(t)-\gamma(t)\right)\\ A(t)=\sqrt{a_1(t)^2+a_2(t)^2+2a_1(t)a_2(t)\cos\theta(t)},\qquad \gamma(t)=\tan^{-1}\frac{a_2(t)\sin\theta(t)}{a_1(t)+a_2(t)\cos\theta(t)}\end{gathered} \tag{5}$$

したがって，干渉波 $u_1(t)+u_2(t)=A(t)\cos\left(\phi_1(t)-\gamma(t)\right)$ の瞬時振動数は，位相角 $\phi_1(t)-\gamma(t)$ の変化率として，

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

$$
\begin{aligned}
f(t) &= \frac{1}{2\pi}\left(\frac{d\phi_1(t)}{dt} - \frac{d\gamma(t)}{dt}\right) \\
&= \frac{1}{2\pi}\left\{\frac{d\phi_1(t)}{dt} - \frac{1}{A(t)^2}\left[\left(\frac{da_1(t)}{dt}a_2(t) - a_1(t)\frac{da_2(t)}{dt}\right)\sin\theta(t) + \left(a_1(t)\cos\theta(t) + a_2(t)\right)a_2(t)\frac{d\theta(t)}{dt}\right]\right\}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

と表される．ここで振幅 $a_1(t), a_2(t)$ や位相角 $\phi_1(t), \phi_2(t)$ が解析的に与えられれば，2.1 節に示した複素ウェーブレット変換による数値計算に依らずとも，式(6)から干渉した超音波パルス $u_1(t)+u_2(t)$ の瞬時振動数が解析的に求められる．ここでは理想的な波形として，パルス波の振幅 $a_1(t), a_2(t)$ がガウス関数，瞬時振動数が一定値 $\left(d\phi_1(t)/dt\right)/2\pi = \left(d\phi_2(t)/dt\right)/2\pi = \omega_0/2\pi$ で表される例を用い，干渉後の超音波パルスの瞬時振動数を考える．$a_1(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2)$，$\phi_1(t) = \omega_0 t$ とすると，$u_1(t)$ は以下のように表される．

$$
u_1(t) = a_1(t)\cos\phi_1(t) = \exp\left(-t^2/2\sigma^2\right)\cos\omega_0 t \tag{7}
$$

一定の瞬時振動数が $\omega_0/2\pi = 10$ MHz であるときのパルス波形 $u_1(t)$ を図 3(a)に示す．ガウス関数の標準偏差は $\sigma = 0.7\times(2\pi)/\omega_0$（パルス波周期の 0.7 倍）とした．図 3(b)は瞬時振動数（一定値: 10 MHz）を示している．一方，$u_2(t)$ は振幅が $u_1(t)$ の α 倍で $u_1(t)$ から t_0 の時間遅れがあるとする．すなわち，

$$
u_2(t) = a_2(t)\cos\phi_2(t) = \alpha a_1(t-t_0)\cos\left(\omega_0(t-t_0)\right) = \alpha\exp\left(-(t-t_0)^2/2\sigma^2\right)\cos\left(\omega_0(t-t_0)\right) \tag{8}
$$

とする．このとき，二つのパルス波 $u_1(t), u_2(t)$ の位相差 $\theta(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t)$ は次のような一定値となる．

$$
\theta(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) = \omega_0 t - \omega_0(t-t_0) = \omega_0 t_0 \quad \text{(一定値)} \tag{9}
$$

式(7),(8)に示した $u_1(t), u_2(t)$ の干渉波 $u_1(t)+u_2(t)$ の瞬時振動数は，式(6)～(9)から次のように求められる．

$$
f(t) = \frac{\omega_0}{2\pi} - \frac{t_0}{2\pi\sigma^2}\frac{\alpha\beta(t)\sin\omega_0 t_0}{\alpha^2\beta(t)^2 + 2\alpha\beta(t)\cos\omega_0 t_0 + 1}, \qquad \beta(t) = \exp\left(t_0(2t-t_0)/2\sigma^2\right) \tag{10}
$$

式(10)から，干渉前のパルス波 $u_1(t)$ および $u_2(t)$ では一定値 $\omega_0/2\pi$ であった瞬時振動数が，干渉後は右辺第 2 項の $\beta(t)$ によって時間とともに変化することがわかる．

ここで，振幅比 α および時間遅れ t_0 が瞬時振動数 $f(t)$ に与える影響を考える．図 4(a)に $u_1(t)$（黒）と 3 種類の振幅比［$\alpha = 0.25$（青）, 0.35（赤）, 0.50（緑）］を持つ $u_2(t)$ を示す. 時間遅れは一定値 $t_0 = 0.035$μs とする. 図 4(b)には $u_1(t)$

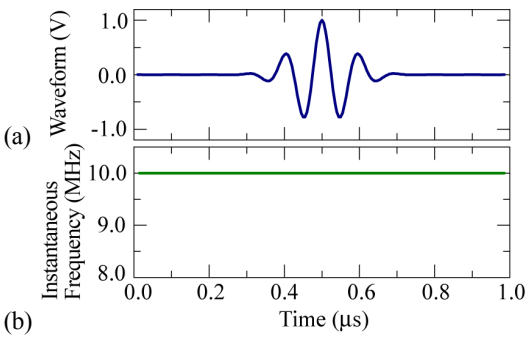

Fig. 3 Analytical pulse wave to interpret variation of instantaneous frequency according to wave interference. (a) Amplitude of waveform is prescribed Gaussian function and (b) instantaneous frequency is constant 10MHz.

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

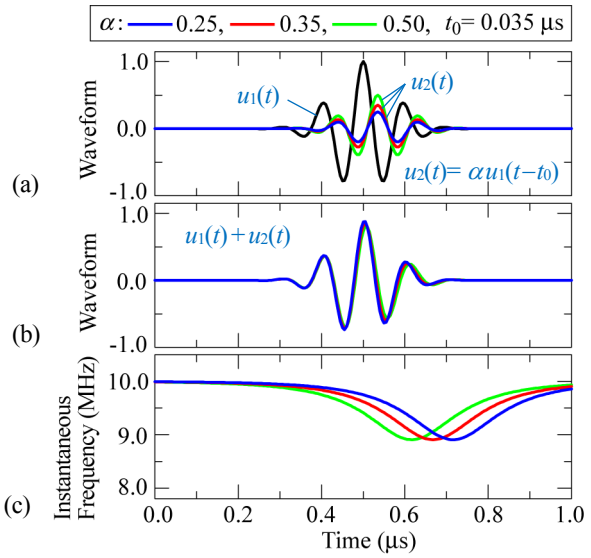

Fig. 4 Interference of pulse waves $u_1(t)$ and $u_2(t)$. (a) Pulse waves $u_2(t)$ are different in amplitude ratio α to $u_1(t)$, $\alpha = 0.25$ (blue), 0.35 (red), 0.50 (green). (b) Superposed waveforms are difficult to be discriminated but (c) their instantaneous frequencies change from constant to showing minimum values, which lie clearly different positions in time.

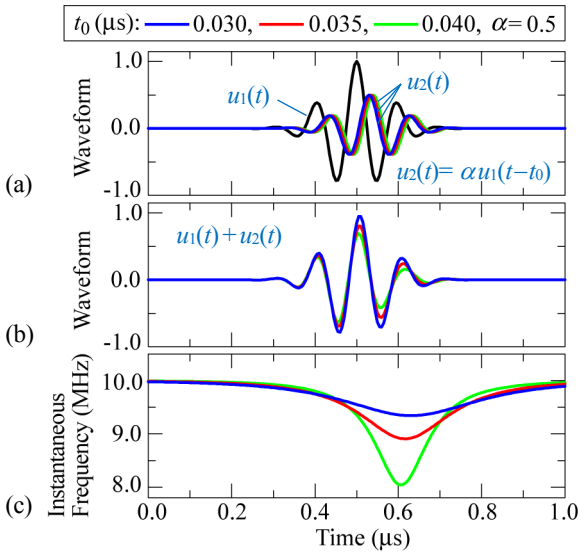

Fig. 5 Interference of pulse waves $u_1(t)$ and $u_2(t)$. (a) Pulse waves $u_2(t)$ are different in delay time t_0 (μs) for $u_1(t)$, $t_0 = 0.030$ (blue), 0.035 (red), 0.040 (green). (b) Superposed waveforms show some differences in amplitude, on one hand (c) their instantaneous frequencies show significant differences in minimum value.

とそれぞれの $u_2(t)$ の干渉波 $u_1(t)+u_2(t)$ の波形を，図 4(c)には式(10)から求めたこれらの干渉波の瞬時振動数を示す．図 4(b)に示す 3 つの干渉波の違いは明瞭でなく，$u_2(t)$ の振幅の違いを波形から見出すのは難しい．一方，図 4(c)の瞬時振動数は極値を持つ形に変化しており，$u_1(t)$ に対する $u_2(t)$ の振幅比 α が大きくなるにつれ，極値が現れる時間が早くなる様子がわかる．同様に，図 5(a)に $u_1(t)$（黒）と，3 種類の時間遅れ［t_0 (μs) = 0.030（青），0.035（赤），0.040（緑）］を持つ $u_2(t)$ を示す．振幅比は一定値 $\alpha = 0.5$ とする．図 5(b)に干渉波 $u_1(t)+u_2(t)$，図 5(c)にこれらの瞬時振動数を示す．ここでは図 5(b)の干渉波にも時間遅れ t_0 の違いによる振幅の差が多少見られるものの，図 5(c)の瞬時振動数では t_0 の違いによって極値の深さが大きく変化しており，図 5(b)の波形よりも敏感に t_0 の変化を捉えている．また，t_0 が大きくなるにつれ極値が現れる時間も早くなっている．このように，わずか 2 波の干渉においても相対的な振幅や時間遅れの変化が干渉後の波形からは判別しづらい例があり，そのような場合でも，瞬時振動数，特に極値の動きに着目するとそれらの変化を明確に見出せることがわかる．

式(10)に示される瞬時振動数 $f(t)$ が極値を示す時間 $t = t_p$ は次式を満たす．

$$\left.\frac{df(t)}{dt}\right|_{t=t_p} = -\frac{t_0^2}{2\pi\sigma^4}\left.\frac{\alpha\beta(t)\sin\omega_0 t_0(1-\alpha^2\beta(t)^2)}{[\alpha^2\beta(t)^2+2\alpha\beta(t)\cos\omega_0 t_0+1]^2}\right|_{t=t_p} = 0 \tag{11}$$

すなわち，$\alpha^2\beta(t_p)^2 = 1$ であり，式(10)に示した $\beta(t)$ の定義から，t_p と $t = t_p$ における瞬時振動数 $f(t_p)$ は，

$$t_p = \frac{t_0}{2} - \frac{\sigma^2}{2t_0}\ln\alpha^2, \qquad f(t_p) = \frac{\omega_0}{2\pi} - \frac{t_0}{2\pi\sigma^2}\frac{\pm\sin\omega_0 t_0}{2\pm 2\cos\omega_0 t_0} \tag{12}$$

となる．$f(t_p)$ の±の複号は α の正負に依存する．式(12)から，瞬時振動数の極値が現れる時間 t_p には振幅比 α と時間遅れ t_0 の両者が影響するのに対し，$t = t_p$ における瞬時振動数 $f(t_p)$ には t_0 のみが影響することがわかる．図 4 および図 5 に示した結果はこの性質をよく表している．したがって，干渉前の波形の振幅変化，すなわち α の変化を見るには，極値が現れる時間 t_p に着目する必要がある．

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

以上のように，図 3 に示した解析的なパルス波形による 2 波の干渉では，瞬時振動数およびその極値が式(10)および式(12)に従って変化することが示された．ヒートシールに投射された超音波パルスは，接着境界面を透過・反射する際の振幅が溶着状態（接着力）によって変化すると考えられ，本章で示した瞬時振動数の変化，特に極値が現れる時間にその影響が現れると予想される．本研究ではこの性質を利用してヒートシールの非破壊での接着力評価を試みる．ただし，実際の超音波パルス波の瞬時振動数は図 2(b)に示した一定値でなく，ヒートシール内での反射も多数になり干渉する波の数もそれに伴い増加する．このような場合でも，干渉したパルス波が接着力評価の指標として有効に機能するか第 3 章以降で検討する．

3. 超音波パルスの瞬時振動数を用いたヒートシールサンプルの接着力評価

3・1 ヒートシールサンプルと接着力

本章では，接着力が異なるヒートシールサンプルを用意して超音波パルスを投射し，反射パルス波の瞬時振動数から接着力評価が可能であるか実現可能性を調べる．実験に用いたヒートシールサンプルを図 6 に示す．サンプルは 2 種類のヒートシール素材フィルム 1 とフィルム 2 の端部を接着したものである．サンプル形状はフィルム 1, 2 ともに幅 10 mm，長さ 150 mm であり，図 6(a)に示すように端部の 25 mm を加熱，圧縮して接着した．サンプルは実験後すべて 180°剥離試験（後述の図 7(a)参照）により接着力を評価するため，試験器にそのまま設置できるようこのような形状とした．図 6(b)にフィルム 1 と 2 の断面の模式図を示す．フィルム 1 は，アルミニウム（Al, 20 μm 厚）の基材層にポリエチレンテレフタレート（PET, 12 μm 厚）の表層とポリエチレン（PE, 30 μm 厚）の接着層がコーティングされた 3 層構造，フィルム 2 は，紙（Paper, 370 μm 厚）の基材層に PE（40 μm 厚）の接着層がコーティングされた 2 層構造である．図 6(c)のように各フィルムの接着層である PE を加熱，加圧してシールする．ヒートシールは接着時の加熱温度が高いほど，加熱時間が長いほど，また圧縮力が大きいほど接着力が大きくなることが知られている．本研究では，3 通りの加熱温度（130 °C, 150 °C, 170 °C）を用い，それぞれの温度に対して 3 通りの加熱時間（1.0 s, 1.5 s, 2.0 s）でサンプルを製作した．接着時の圧縮力は一定値 0.98 MPa とした．したがって，シール条件は 3（加熱温度）×3（加熱時間）＝9 通りある．また，各シール条件に対して 5 個ずつのサンプルを製作しており，合計のサンプル数は 9×5＝45 となる．

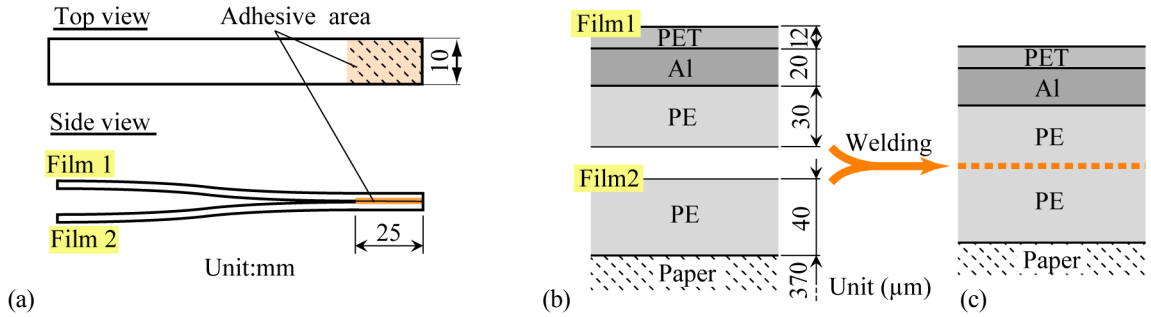

Fig. 6 (a) Overview of heat seal sample, edges of film 1 and 2 are heat sealed. (b) Adhesive layer of both films, seals are heated in 3 temperatures 130, 150, 170 °C and 3 press times 1.0, 1.5, 2.0 sec then (c) PE layers are welded.

これらのサンプル群について，次の 3.2 節に示す超音波パルスの投射実験を行った後，それぞれのサンプルのシール強度を 180°剥離試験により測定した．180°剥離試験では，図 7(a)に示すように 180°に開いたサンプル端部を引っ張り 50mm/min の速度でシール部を剥離させる．その際に加えられたシール幅 10 mm あたりの最大引張り力が接着力と定義される．本研究でのサンプルのシール幅は 10 mm であり，測定した最大引張り力がそのまま接着力となる．図 7(b)に測定した接着力を示す．加熱温度が高いほど，かつ加熱時間が長いほど接着力が大きいことがわかる．ただし，加熱温度が上がるほど加熱時間による接着力の差は小さくなっている．

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

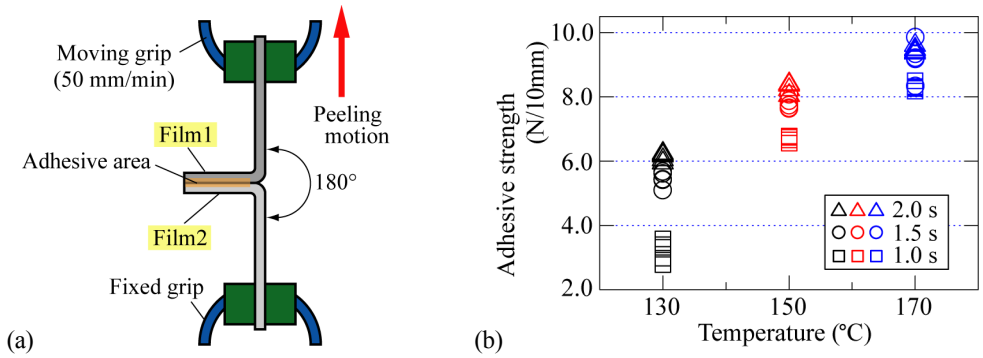

Fig. 7 (a) 180° peeling test, heat seal sample are opened 180° and one opposite side of seal area in film 1 are pulled at 50mm/min in speed. Maximum load in peering are defined as seal strength. (b) Measured seal strength of samples, which increase as heating temperature higher and press time longer.

3・2 ヒートシールサンプルに対する超音波パルス投射実験

図 6(c)に示したように，ここで用いたヒートシールサンプルは 5 層構造であり，PE 溶着面の状態が接着力によって異なると考えられる．接着力が大きいと PE 同士は十分に溶融した後凝固しており，溶着面を透過する超音波の透過率は高い（反射率は低い）と思われる．逆に，接着力が小さいと溶着面を透過する超音波の透過率は低い（反射率は高い）．これらのサンプルにフィルム 1 の表層（PET）側から超音波パルス波を投射し，内部で反射したパルス波を測定してその瞬時振動数から接着力の評価が可能であるか実験を行う．

図 8 に実験装置の概略図を示す．コントローラからの信号で，超音波探触子（Transducer）から超音波パルス波がアダプターを介してヒートシールサンプルに投射され，サンプル内部で反射したパルス波が再びアダプターを介して超音波探触子に受信されてオシロスコープ内に記録される．超音波探触子とサンプル間のアダプターは，超音波パルス波の投射と受信の間に遅延時間を設けるためである．これにより，超音波パルス波の投射時に探触子自身が発する振動やノイズと，サンプル内部で反射したパルス波を完全に分離して記録することができる．また，超音波探触子は治具に固定されたマイクロメーターによって徐々にサンプルに押し付けられ，サンプルの下に設置した荷重計（Load gauge）が 0.4 N を示したところで押し付けを止めて実験を行った．0.4 N の押付け力は，サンプルをできるだけ変形させず，かつ安定的にパルス波形が観測できる値として設定した．

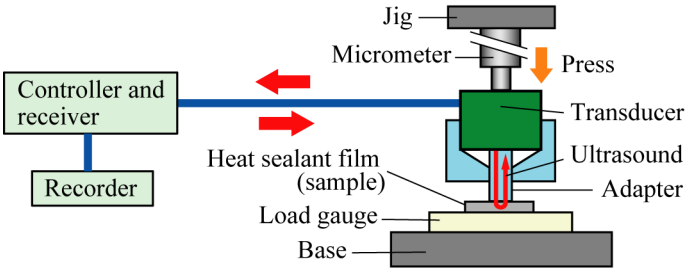

Fig. 8 Experimental apparatus. Transducer sends ultrasonic pulse wave and receives interfering pulses reflected at some boundary layers in heat seal sample. Adapter is attached in order to make delay line to separate received pulses from noise burst in pulse generation. Transducer is slowly pressed by micrometer. Pressing force is monitored by load gauge and kept in constant value 0.4N.

45 個のサンプルを代表して 3 つのサンプルに対する結果を図 9 に示す．各サンプルの接着力は 5.9（黒），7.9（赤），9.2（青）N/10mm である．図 9(a)に示す測定された超音波パルス波形は，サンプルによって振幅，位相がわずかに異なるものの大きな違いは見られず，これらの波形から接着力を評価するのは難しい．一方，2･1 節に示した複素ウェーブレット変換を利用する方法により求めたこれらの波形の瞬時振動数を図 9(b)に示す．0.3 μs 付近にある瞬時振動数の極大値および 0.5 μs 付近にある極小値が，接着力が大きくなるにつれ時間的に遅れていることがわかる．これらの違いは図 9(a)における波形の違いより明確である．図 9(c)に極大値（図 9(b) I の領域）の拡大図，

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

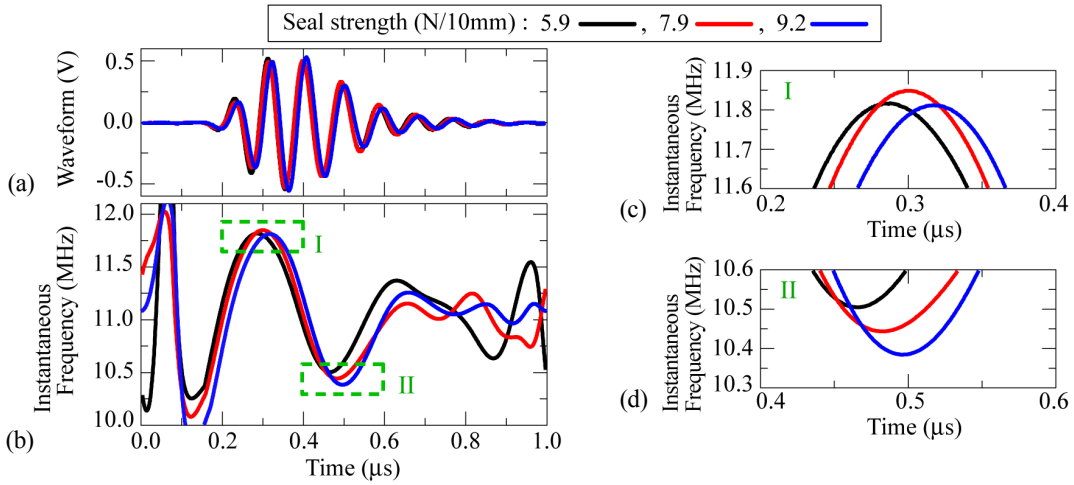

Fig. 9 Representative experimental results on seal strength (N/10mm) 5.9 (black), 7.9 (red) and 9.2 (blue). (a) Waveforms of observed ultrasonic pulse where few differences are found on seal strength. (b) Instantaneous frequency of ultrasonic pulse waves, (c) enlarged figure of maximum values [area I in (b)] and (d) minimum values [area II in (b)] of instantaneous frequency. Maximum and minimum values are delayed as seal strength increase.

図 9(d)に極小値（図 9(b) II の領域）の拡大図を示す．ともに接着力が大きくなるにつれ極値が遅れることが明確に見てとれる．瞬時振動数の値（縦軸の値）も変化しているが，図 9(c)の極大値は接着力に対して一様に変化しておらず，第 2 章での議論通り接着力の評価には極大値あるいは極小値が現れる時間が有効だといえる．このことをさらに確認するため，45 サンプルすべてについて接着力と極大値が現れる時間の関係を図 10(a)に，接着力と極小値が現れる時間の関係を図 10(b)に示す．横軸が接着力，縦軸が極大値，極小値が現れる時間を示す．接着力が大きくなるにつれ極大値，極小値ともに時間的に遅れていくことがわかる．図 10(a)の接着力と極大値の時間の相関係数は 0.93，図 10(b)の接着力と極小値の時間の相関係数は 0.94 であり，ともに強い相関がある．したがって，ヒートシール内での反射により多数のパルス波が干渉した受信波形においても，その瞬時振動数，特に瞬時振動数の極値が現れる時間に着目することでおおよその接着力が推定できる．

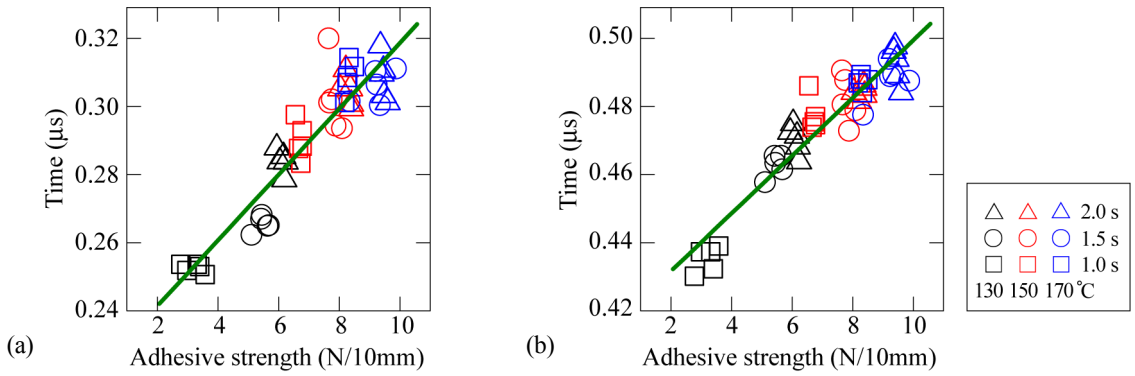

Fig. 10 Relationship between seal strength and (a) time show maximum values, (b) minimum values. Strong correlations, correlation coefficient of (a) 0.93 and (b) 0.94, are found.

本研究では，接着力の違いにより溶着面を透過･反射する超音波パルスの振幅が変化するとの前提に立っており，上記の実験結果は 2･2 節の議論，特に，干渉前の超音波パルスの相対的な振幅変化が，瞬時振動数の極値の現れる時間に影響する図 4 の結果と類似の性質を示している．ただし，2･2 節では 2 波のみの解析的なパルス波の干渉を扱ったのに対し，実験では図 6(c)に示した各層の境界で生じる多数の反射パルスが干渉する．したがって，このような場合でも溶着面を透過･反射するパルス波の振幅変化によって，瞬時振動数の極値が実験と同様に変化するか確認する必要がある．次の第 4 章では，数値的に実験を再現することで実験結果の有効性を裏付ける．

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

4. 基本パルス波形の重ね合わせによる実験の再現

図 11 にヒートシールに対する超音波の投射と内部での代表的な反射の様子を模式的に示す. 探触子からアダプターを介してヒートシールサンプルに投射されるパルス波を $u_0(t)$ とし，ここでは $u_0(t)$ に対し 5 つの層の境界で反射するパルス波 $u_1(t)\sim u_5(t)$ を代表的な反射波として取り扱う. 探触子に受信される反射パルス波 $u(t)$ はこれらの 5 波が重なり干渉したものとする. $u_k(t)$ $(k=1,\cdots,5)$ は $k-1$ 番目層と k 番目層の境界で反射したパルスを表す. $u_k(t)$ は各層を反射あるいは透過する際に振幅が変化し，さらに各経路の長さが異なるため，探触子に受信されるタイミングに時間差が生じる．すなわち，各層での反射波 $u_k(t)$ および受信反射波 $u(t)$ は次のように表される.

$$u_k(t)=A_k u_0(t-t_k)\,, \qquad u(t)=\sum_{k=1}^{5}u_k(t) \tag{13}$$

A_k および t_k は，それぞれ投射波 $u_0(t)$ に対する反射波 $u_k(t)$ の振幅比および時間遅れである． A_k は各層間の境界でのパルス波の反射率，透過率から求められる．図 12 に示す $k-1$ 番目の層から k 番目の層への入射に対する反射率 $R_{k-1,k}$ および透過率 $T_{k-1,k}$ は，境界への入射音圧 p_i に対する反射音圧 p_r および透過音圧 p_t との比でそれぞれ定義され， k 番目層の密度 ρ_k およびパルス波の伝播速度（音速）c_k から次のように求められる.

$$R_{k-1,k}=\frac{p_r}{p_i}=\frac{\rho_k c_k-\rho_{k-1}c_{k-1}}{\rho_k c_k+\rho_{k-1}c_{k-1}}\,, \qquad T_{k-1,k}=\frac{p_t}{p_i}=\frac{2\rho_k c_k}{\rho_k c_k+\rho_{k-1}c_{k-1}} \tag{14}$$

式(14)における反射率 p_r/p_i および透過率 p_t/p_i は，入射パルス波の振幅に対する反射パルス波および透過パルス波の振幅比と考えてよい． $p_r/p_i<0$ の場合，入射と反射パルスの位相が逆であることを示す．また，式(14)から $1+R_{k-1,k}=T_{k-1,k}$ の関係があることがわかる．表 1 に各層の ρ_k, c_k の値を示す．Acryl, PET は試料を用いて実測し，Al, PE は文献(東京天文台編, 1985)から引用した．これらの値を用いて計算した反射率 $R_{k-1,k}$ ，透過率 $T_{k-1,k}$ を表 2 に示す．紙（paper）層は音速 c_5 が不明であるが，紙の音速は PE と大きく異なると思われるため，PE と紙の間では全てのパルス波が反射されると仮定して $R_{4,5}=1.0$ とした．PE と紙の間では同位相の反射（固定端反射）になることがわかっており， $R_{4,5}$ の符号は正となる．また， k 番目層から $k-1$ 番目層への逆向きの入射に対する反射率 $R_{k,k-1}$ および透過率 $T_{k,k-1}$ は，式(14)から以下のように求められる.

$$R_{k,k-1}=-R_{k-1,k}\,, \qquad T_{k,k-1}=1+R_{k,k-1}=1-R_{k-1,k} \tag{15}$$

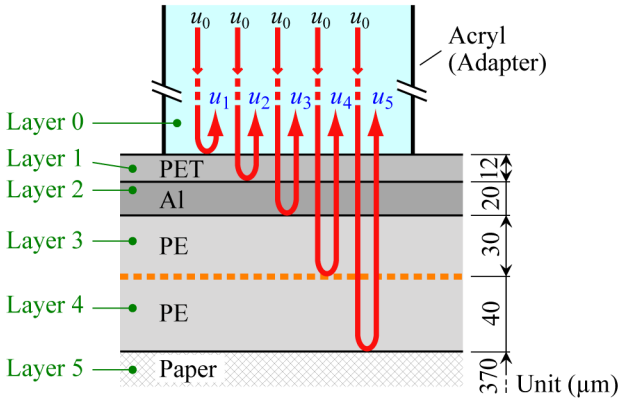

Fig. 11 Typical reflected pulses u_1~u_5. Incident pulse wave u_0 reflects at layer boundaries. Amplitude of reflected and transmitted pulse waves u_4 and u_5 at bonding boundary are supposed to change according to heat seal strength.

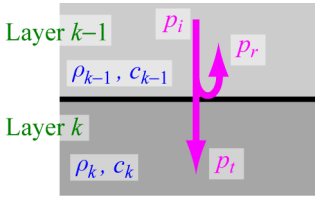

Fig. 12 p_i, sound pressure of pulse wave entering k-th layer from k–1-th layer. p_r and p_t, that of reflected and transmitted pulse wave at boundary k and k–1-th layer, respectively.

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

Table 1　Density and sound velocity

Material	ρ (kg/m^3)	c (m/s)
Acryl	1190	2730
PET	1350	1950
Al	2690	6420
PE	900	1950

Table 2　Reflectance and transmittance between k and k–1-th layer

Layer k–1	Layer k	$R_{k-1,k}$	$T_{k-1,k}$
Acryl	PET	-0.105	0.895
PET	Al	0.735	1.735
Al	PE	-0.816	0.184
PE	Paper	1.0	2.0

一方，接着境界面である 3 番目層と 4 番目層の境界での反射率 $R_{3,4}$ と透過率 $T_{3,4}$ は，両層の物性が同一であるため式(14)を直接適用すると $R_{3,4}=0$, $T_{3,4}=1$ となり，すべての超音波が境界を透過することになる．これは，境界面が完全に接着された状態を意味する．逆に，まったく接着されていなければすべての超音波は境界で反射され $R_{3,4}=-1$, $T_{3,4}=0$ となる．非接着時の境界での反射は自由端反射であるため反射率 $R_{3,4}$ の符号は負となる．本研究では，接着境界面の状態は完全接着と完全非接着の間にあり両者が混在しているとみなす．すなわち，接着力が大きいほど完全接着の領域が多く存在し，小さいと完全非接着の領域が多いと考える．そこで接着境界面での反射率を $R_{3,4}=-0.9, -0.7, -0.5, -0.3, -0.1$ の 5 つの値に設定し接着力の変化に対応させる．$R_{3,4}=-0.9$ が最も接着力が小さく $R_{3,4}=-0.1$ が最も大きい．対応する透過率は $1+R_{3,4}=T_{3,4}$ の関係から $T_{3,4}=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ となる．

このように決定した反射率，透過率を用いると，投射波 $u_0(t)$ に対する反射波 $u_k(t)$ の振幅比 A_k は $A_1=R_{0,1}$, $A_2=T_{0,1}R_{1,2}T_{1,0}$ 等と表され，一般的に表記すると以下のようになる．

$$A_1=R_{0,1}\,, \qquad A_k=\left(\prod_{p=1}^{k-1}T_{p-1,p}\right)\cdot R_{k-1,k}\cdot\left(\prod_{p=1}^{k-1}T_{p,p-1}\right) \quad (k\geq 2) \tag{16}$$

式(16)から求めた A_k を表3に示す. 5つの値に設定した接着境界面の反射率 $R_{3,4}$, 透過率 $T_{3,4}$ が影響する A_4 と A_5 が，これらの値に従って 5 つの値となる．すなわち，図 11 の反射パルス波 $u_1(t)\sim u_5(t)$ のうち， $u_4(t), u_5(t)$ のみが接着力によって振幅が変化すると考える．

式(13)の t_k は，形式上 $u_0(t)$ に対する $u_k(t)$ の時間遅れとして定義したが，受信パルス $u(t)$ は $u_1(t)\sim u_5(t)$ の和であるため，最も早く受信される $u_1(t)$ に対する時間遅れとして t_k を扱っても問題ない．そこで， $t_1=0$ とし，図 11 に示す各層の厚さと表 1 に示す音速 c_k から t_k を求めた．結果を表 4 に示す．また，基準となる投射パルス波 $u_0(t)$ は，アダプターをヒートシールサンプルから離してアダプター底面のみで反射したパルス波をもとに実験的に測定した．図 2 に示したパルス波形が $u_0(t)$ である．

この $u_0(t)$ に対し表 3 の A_k と表 4 の t_k を用い，式(13)から数値的に受信される反射パルス波 $u(t)$ を求めた．結果を図 13 に示す．図 13(a)が $u(t)$ であり 5 種類の反射率・透過率に対応して 5 つの波形がある．図 13(b)には複素ウェーブレット変換を用いて求めた各波形の瞬時振動数を示す. 図 13(a)の波形にはほとんど差が見られないのに対し，図 13(b)の瞬時振動数は接着境界面での反射率が小さいほど，すなわち，接着力が高いと模擬した状態ほど瞬時振動数の極値の時間が遅れることがわかる．これは実験結果と定性的に同一である．極大値（図 13(b)I の領域）および極小値（図 13(b)II の領域）の拡大図をそれぞれ図 13(c)および(d)に示す．接着力に従って極値が移動する様子が詳細に示される．ただし，図 10 に示した実験結果では，極大値，極小値ともに同程度の範囲（約 0.07μs）で

Table 3　Relationship between reflectance at adhesive surface and amplitude of reflected pulse

$R_{4,5}$	Seal strength	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
-0.9	Weak	-0.105	0.727	-0.370	-0.137	0.002
-0.7	↕				-0.106	0.014
-0.5					-0.076	0.038
-0.3					-0.046	0.075
-0.1	Strong				-0.015	0.123

Table 4　Time delay

k	t_k (μs)
1	0.0000
2	0.0125
3	0.0185
4	0.0493
5	0.0903

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

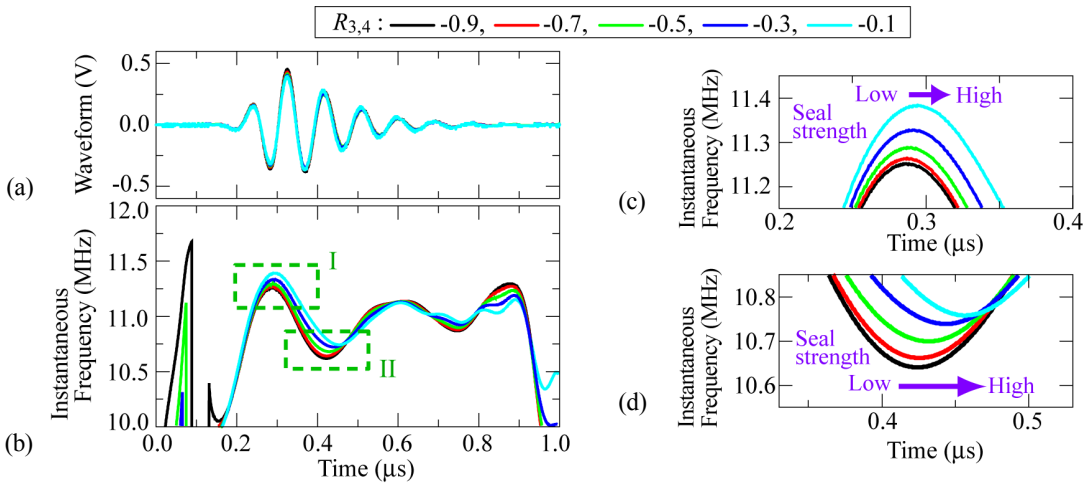

Fig. 13 Numerical results of superposed ultrasonic pulse waves. (a) Waveforms of where few differences are found on seal strength. (b) Instantaneous frequency, (c) enlarged figure of maximum values [area I in (a)] and (d) minimum values [area II in (a)] of instantaneous frequency. Maximum and minimum values are delayed as decrease of $R_{3,4}$ which simulates increasing of seal strength.

変化しているのに対し，数値計算では図13(d)の極小値の変化が図13(c)の極大値の変化より大きい結果となった．また，図 13(c), (d)の瞬時振動数の極大値，極小値は接着力が大きいほど高くなっており，図 9(c),(d)の実験結果とは異なる．これらの数値計算と実験との違いは，実際のヒートシールでは各層の厚さにある程度ばらつきがあること，図 11 に示した反射経路以外の反射波の影響，さらに，数値計算では接着力によって変化しないと考えた反射パルス波 $u_1(t) \sim u_3(t)$ にも，加熱と圧着の際に何らかの変化が生じた可能性等が考えられる．ただし，3 章の実験の本質である接着力が大きいほど極値の時間が遅れる現象は明確に再現されている．このことは，溶着面の反射率・透過率が接着力に従って変化することを示すとともに，この性質を極値の時間変化として見出す提案手法の有効性を裏付けているといえる．

5. 結　　言

密封性確保と易開封性の相反する 2 つの性能を満たす接着力が求められるヒートシールに対し，超音波パルスを投射して得られた反射波の瞬時振動数から非破壊で接着力を評価する方法を提案した．

(1) 多層構造のヒートシールに投射した超音波パルスは各層の境界で反射し，これらが重なって干渉した波形が反射波として測定される．わずか 2 波の干渉においても，パルス波の振幅や時間差の相対的な変化が干渉した波形からは見いだせない場合があること，そのような場合でも干渉した波形の瞬時振動数には振幅や時間差の変化によって明確な変化が現れることを解析的に示した．

(2) 溶着時の温度と時間を変化させて異なる接着力のヒートシールサンプルを作成し，提案した手法を適用した．接着力によって反射パルス波の振幅には大きな違いが現れないものの，瞬時振動数の極値が現れる時間が有意に変化し接着力の評価が可能であることを示した．

(3) 接着力によりヒートシール溶着面の透過・反射するパルス波の振幅が変化する前提のもと，実験に用いた超音波パルスを数値的に重ねて模擬的な反射波を求め，瞬時振動数が実験と同様に変化することを示した．これにより上記前提の妥当性と本手法の有効性が示された．

本研究は，科学研究費補助金（基盤研究(C)，24560264）および東罐興業株式会社の協力により行われた．関係各位に謝意を表す．

文　　献

Aithani, D., Lockhart, H., Auras, R. and Tanprasert, K., Heat sealing measurement by an innovative technique, Packaging Technology and Science, Vol.19, No.5 (2006), pp.245–257.

Ayhan, Z. and Zhang, Q.H., Evaluation of heat seal quality of aseptic food containers by ultrasonic and optical microscopic imaging, European Food Research and Technology, Vol.217, No.4 (2003), pp.365–378.

© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

Barnes, M., Dudbridge, M. and Duckett, T., Polarised light stress analysis and laser scatter imaging for non-contact inspection for heat seals in food trays, Journal of Food Engineering, Vol.112, No.3 (2012), pp.183–190.

Chona, R., Suh, C.S. and Rabroker, G.A., Characterizing defects in multi-layer materials using guided ultrasonic waves, Optics and Lasers in Engineering, Vol.40 (2003) ,pp.371–378.

Frazier, C.H., Tian, Q., Ozguler, A., Morris, S.A. and O'Brien, W.D., High contrast ultrasound images of defects in food package seals, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.47, No.3 (2000), pp.530–539.

菱沼一夫, ヒートシールの基礎と実際 : 高信頼性 : 溶着面温度測定法:MTMS の活用 (2007), pp.5–8, 幸書房.

Hsu, C.-L. and Chang K-S., Evaluation of the integrity of aseptic packages containing various filling products, International Journal of Food Science and Technology, Vol.41, No.9 (2006), pp.1061–1066.

井上卓見, 中野貴裕, 門脇廉, 超音波パルスの瞬時振動数を用いた物体内部の接触境界面評価, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.832 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00420.

Lukas, M., Langguth, P., Hausler, H. and Hagels, H., Influences of heat seal lacquer thickness on the quality of blister packages, European Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol.45, No.1–2 (2012), pp.150–157.

Manias, E., Zhang, J., Huh, J.Y., Manokruang, K., Songtipya, P. and Jimenez-Gasco, M.M., Polyethylene nanocomposite heat-sealants with a versatile peelable character, Macromolecular Rapid Communications, Vol.30, No.1 (2009), pp.17–23.

Marouani, S., Investigation of the resistance welding of multilayers aluminum-coated polymer complexes used as envelopes of vacuum insulation panels, Materials & Design, Vol.36 (2012), pp.546–556.

Nase, M., Bach, S., Zankel, A., Majschak J.-P. and Grellmann, W., Ultrasonic sealing versus heat conductive sealing of polyethylene/polybutene-1 peel films, Journal of Applied Polymer Science, Vol.130, No.1 (2013), pp.383–393.

Pascall, M.A., Richtsmeier, J., Riemer, J. and Farahbakhsh, B., Non-destructive packaging seal strength analysis and leak detection using ultrasonic imaging, Packaging Technology and Science, Vol.15, No.6 (2002), pp.275–285.

Song, Y.S., Gera, M., Jain, B. and Koontz, J.L., Evaluation of a non-destructive high-voltage technique for the detection of a pinhole leaks in flexible and semi-rigid packages for foods, Packaging Technology and Science, Vol.27, No.6 (2014), pp.423–426.

東京天文台編, 理科年表(1985), p.488.

大和製罐株式会社, 赤外線を使用した容器のシール不良検査方法, 特開 2011-117865 (2011).

Yuan, C.S. and Hassan, A., Effect of bar sealing parameters on OPP/MCPP heat seal strength, eXPRESS Polymer Letters Vol.1, No.11 (2007), pp.773–779.

References

Aithani, D., Lockhart, H., Auras, R. and Tanprasert, K., Heat sealing measurement by an innovative technique, Packaging Technology and Science, Vol.19, No.5 (2006), pp.245–257.

Ayhan, Z. and Zhang, Q.H., Evaluation of heat seal quality of aseptic food containers by ultrasonic and optical microscopic imaging, European Food Research and Technology, Vol.217, No.4 (2003), pp.365–378.

Barnes, M., Dudbridge, M. and Duckett, T., Polarised light stress analysis and laser scatter imaging for non-contact inspection for heat seals in food trays, Journal of Food Engineering, Vol.112, No.3 (2012), pp.183–190.

Chona, R., Suh, C.S. and Rabroker, G.A., Characterizing defects in multi-layer materials using guided ultrasonic waves, Optics and Lasers in Engineering, Vol.40 (2003) ,pp.371–378.

Frazier, C.H., Tian, Q., Ozguler, A., Morris, S.A. and O'Brien, W.D., High contrast ultrasound images of defects in food package seals, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.47, No.3 (2000), pp.530–539.

Hishinuma, K., The basis and practice of heat seal :High reliability : Application of MTMS (2007), pp.5–8,Koushobou (in Japanese).

Hsu, C.-L. and Chang K-S., Evaluation of the integrity of aseptic packages containing various filling products, International Journal of Food Science and Technology, Vol.41, No.9 (2006), pp.1061–1066.

Inoue, T., Nakano, T. and Kadowaki, R., Evaluation of internal boundary surface using instantaneous frequency of ultrasonic pulse, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.832 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00420.

Lukas, M., Langguth, P., Hausler, H. and Hagels, H., Influences of heat seal lacquer thickness on the quality of blister

 © 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers

packages, European Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol.45, No.1–2 (2012), pp.150–157.

Manias, E., Zhang, J., Huh, J.Y., Manokruang, K., Songtipya, P. and Jimenez-Gasco, M.M., Polyethylene nanocomposite heat-sealants with a versatile peelable character, Macromolecular Rapid Communications, Vol.30, No.1 (2009), pp.17–23.

Marouani, S., Investigation of the resistance welding of multilayers aluminum-coated polymer complexes used as envelopes of vacuum insulation panels, Materials & Design, Vol.36 (2012), pp.546–556.

Nase, M., Bach, S., Zankel, A., Majschak J.-P. and Grellmann, W., Ultrasonic sealing versus heat conductive sealing of polyethylene/polybutene-1 peel films, Journal of Applied Polymer Science, Vol.130, No.1 (2013), pp.383–393.

Pascall, M.A., Richtsmeier, J., Riemer, J. and Farahbakhsh, B., Non-destructive packaging seal strength analysis and leak detection using ultrasonic imaging, Packaging Technology and Science, Vol.15, No.6 (2002), pp.275–285.

Song, Y.S., Gera, M., Jain, B. and Koontz, J.L., Evaluation of a non-destructive high-voltage technique for the detection of a pinhole leaks in flexible and semi-rigid packages for foods, Packaging Technology and Science, Vol.27, No.6 (2014), pp.423–426.

Tokyo Astronomical Observatory ed., Chronological Scientific Tables (1985), p.488, Maruzen Co., Ltd (in Japanese).

Yamato can manufacturing Co., Ltd., Seal failure inspection method for container using infrared light, Japanese patent disclosure 2011-117865 (2011).

Yuan, C.S. and Hassan, A., Effect of bar sealing parameters on OPP/MCPP heat seal strength, eXPRESS Polymer Letters Vol.1, No.11 (2007), pp.773–779.

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00327]
© 2016 The Japan Society of Mechanical Engineers