テラヘルツ波を用いたフレキシブルパッケージに生じる 微小欠陥の実時間検出*

森 田 康 之^{*1}, Adrian DOBROIU^{*2}
大 谷 知 行^{*2}, 川 瀬 晃 道^{*2,*3}

Real-Time Inspection Using a Terahertz Technique to Detect Micro-Leak Defects in the Seal of Flexible Plastic Packages

Yasuyuki MORITA^{*4}, Adrian DOBROIU,
Chiko OTANI and Kodo KAWASE

^{**}RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198 Japan

A method to detect production faults in flexible plastic packages using terahertz (THz) radiation is presented. Relying on the large difference between the absorption coefficients of plastic and water (for water-filled channel defects), and on the refraction index difference between plastic and air (for air-filled channel defects) our technique consists of focusing and scanning a THz beam on the sealed area of the package, followed by the detection of the transmitted signal. We tested our THz system on defects simulated by water-filled and air-filled round channels imbedded in polyethylene films, with diameters ranging 10 to 100 μm . The detection limit (the minimum size of a detectable defect) depends on the conveying speed; this relationship is determined and analyzed. The results show that our THz system has the potential of being applied in an actual production line for real-time inspection.

Key Words: Nondestructive Inspection, Diagnostics, Industrial Machine, Electromagnetic Measurement, Terahertz Radiation, Flexible Plastic Package, Micro-Leak, Defect, Detection, Heat-Seal

1. ま え が き

テラヘルツ波(THz 波)は, 周波数がおおよそ 0.3~10 THz の領域(波長: 30~1000 μm)を指す。この領域はミリ波と赤外線の上に位置するため, 電波と光波の両方の性質を兼ね備えた特殊な電磁波である。すなわち THz 波は, 電波のようにプラスチック・ビニール・乾燥食品・粉体・セラミック・木材・繊維・骨・脂肪など様々な物質を透過し, かつ光波のようにレンズやミラーで空間を自在に取り回すことが容易であるため, 新たなイメージング光源としての期待も大きい¹⁾。また, 波長が数百 μm と電波に比べて短く, 多くのイメージング用途にとって必要十分な空間分解能が得られるため, 種々の応用が進展しつつある^{2)~4)}。

その一つの応用例として, 本論文ではフレキシブルパッケージの欠陥検出について述べる。食品や薬品の包装に使用されているフレキシブルパッケージは,

自動充填機を用いて厚さ数十 μm の薄いラミネートフィルムをヒートシールして製作される。このフレキシブルパッケージは, ボトル容器などのリジッドパッケージに比べて材料の使用量が少なく減肉化でき, 使用後も折りたたんで捨てることのできる利点をもつ。したがって, 省資源・減容化の観点から有効な包装形態として年々需要が増加しており^{5)~9)}, フレキシブルパッケージの製造の高速化による高生産性が求められている。しかし生産の高速化が進むにしたがい, ヒートシール部の不良(シール不十分, しわの発生, 内容物の巻込み)が多数発生している¹⁰⁾。これらの不良は, フレキシブルパッケージの耐久性を損なうばかりでなく, 液漏れや細菌などの不純物の混入を引き起こすため, 衛生的にも重要な課題となっている。現在, フレキシブルパッケージのシール不良を検査する方法には, (1) 目視試験, (2) CCD カメラと画像処理による検出, (3) 真空チャンバーによる圧力検査, (4) ヒートシール部の引張り試験などがある^{11)~13)}。しかし(1)は信頼性が低いこと, (2)は不透明パッケージに適用できないこと, (3), (4)は高速生産化に不向きであることなどの問題が挙げられ, 生産ライン上において最適な検査システムが望まれている。

* 原稿受付 2004 年 8 月 2 日。

^{*1} 正員, 理化学研究所(☎ 351-0198 和光市広沢 2-1) [現: 九州大学応用力学研究所]。

^{*2} 理化学研究所。

^{*3} 東北大学大学院農学研究科(☎ 981-8555 仙台市青葉区堤通 雨宮町 1-1)。

E-mail: morita@riam.kyushu-u.ac.jp

そこで新しい手法として、超音波を用いた検査システムの開発が O'Brien らによって行われている⁴⁴⁻⁴⁶。この検出システムは、不透明パッケージにおいても微小な欠陥の検出を可能としている。しかしながら、パッケージを液浸し検査を行う必要があり、高速生産性および生産ラインとの相性が問題となることが示唆される。

今回、われわれは THz 波を用いた新しい非破壊検査システムの開発を行った。THz 波は種々のプラスチックフィルムを透過し、さらに水溶液に高い感度をもっている(水の吸収係数: 176 cm^{-1} at 0.6 THz)。そのため、パッケージの液漏れなどの検出に最適と考えられる。本研究では、微小欠陥を THz 波システムで検出することにより、本機の有効性を検証した。欠陥は、液漏れ・空気漏れを想定した直径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ の微小チャンネルを作製した。そして、実際の生産ラインの送り速度と検出可能な微小欠陥サイズの関係性を明らかにし、本システムが新しい検出手法として十分に応用できる可能性を示した。

2 実験方法

2・1 試験片の作製方法 本研究では、二種類のヒートシール用プラスチックフィルムを使用した。一つは、ナイロン(N)とポリエチレン(PE)の積層フィルムである(図 1 (a)参照)。フィルムの厚さは 70

μm (N: $23 \mu\text{m}$, PE: $47 \mu\text{m}$)、色は無色透明である。PE 層がヒートシールされ、N 層は機械的強度を与えている。もう一つは、低密度ポリエチレン(LDPE)の単層フィルムである。厚さは $80 \mu\text{m}$ 、白色の不透明フィルムである。

欠陥である微小チャンネルは、直径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ の範囲で $10 \mu\text{m}$ ごとに用意した。作製手法は O'Brien ら⁴⁴⁻⁴⁶にしたがひ、次のような方法をとった。(1) 作製する微小チャンネルと同じ直径のタングステン線を準備する(直径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$)。 (2) 二枚のプラスチックフィルムでタングステン線を挟み、タングステン線と垂直な方向にヒートシールを行う。このとき、ヒートシールには卓上型ヒートシーラー(シール温度: 115°C)を使用した。 (3) 大気中で数分間冷却した後、タングステン線を引き抜く。引き抜いた後は、タングステン線と同じサイズの微小チャンネルが作製されている。図 1 (b)に試験片の形状を示す。灰色の領域がヒートシールを行った箇所であり、中央に微小チャンネルがある(破線参照)。水充填チャンネルの場合には黒色の領域に水が充填され、空気充填チャンネルの場合には空気が充填される。チャンネルの直径が小さくなるにしたがい、水を充填させることが困難となるため、顕微鏡を使用し充填の有無を確認した。THz 波による欠陥検出は、微小チャンネルを含む点 A から点 B をスキャンすることにより行った。ここで、ヒートシール部での THz 波の透過率は、両方のプラスチックフィルムともに 0.6 THz で約 90% であった。

(a) The package layer structure showing the channel defect.

(b) Schematic of a water-filled test sample.

Fig. 1 Transparent sample with a channel defect.

BWO: backward wave oscillator; ITO: glass plate with an indium/tin oxide layer; PM1, 2, 3, 4: off-axis parabolic mirrors (focal lengths 150, 75, 75, 100 mm, respectively); PS: pyroelectric sensor.

Fig. 2 Defect inspection system using THz radiation.

Fig. 3 Transmission optical microscope image of a fabricated water-filled channel defect 10 μm in diameter.

2.2 検査システム 試作した THz 波による検査システムを図 2 に示す。システムは、後進波管 (BWO: Backward-Wave Oscillator)、軸外放物面鏡、高速一軸自動ステージ、検出器、低雑音増幅器、パーソナルコンピュータから成る。図中の豆電球は光学調整に使用される。後進波管から出た 0.6 THz (波長: $\lambda = 500 \mu\text{m}$) の CW は、ガラス基板上の ITO (Indium Tin Oxide) で反射され、軸外放物面鏡 PM1 (焦点距離: $f = 150 \text{ mm}$) に向かう。ここで、ITO は THz 波を反射し、

光学調整用の可視光を透過する特性をもっているため使用した。PM1 を反射した THz 波は平行光となり、軸外放物面鏡 PM2 ($f = 75 \text{ mm}$) により焦点を結ぶ。焦点でのビーム径は、半値全幅で 0.55 mm であった。焦点位置に高速一軸自動ステージに取り付けた試験片を設置し、ヒートシール部に沿ってスキャンを行った (図 1 (b) の点 A から点 B)。この自動ステージは、実際の生産ラインを仮定したものであり、ライン速度 (スキャン速度) を $1 \sim 800 \text{ mm/s}$ の範囲で任意に設定することができる。ライン速度 800 mm/s は、実際の適用を考えた場合にも十分に高速であると言える。試験片を透過した THz 波は、軸外放物面鏡 PM3 ($f = 75 \text{ mm}$)、PM4 ($f = 100 \text{ mm}$) を反射し、検出器に入射する。得られた THz 波の信号は、低雑音増幅器でフィルタリングおよび増幅され、パーソナルコンピュータで表示・記録される。

3. 実験結果

3.1 水充填微小チャンネルの検出 図 3 は作製した水充填微小チャンネルの一例を示している。チャンネルの外形を明確にするため、水には黒色インクを混合した。しかし実験を行う際には測定結果への影響を避けるため、水のみを充填した。作製された微

Fig. 4 Transmitted THz signals for fabricated water-filled channel defects.

Fig. 5 Transmission optical microscope image of a fabricated air-filled channel defect 30 μm in diameter.

小チャンネルのサイズは 10 μm で、作製に使用したタングステン線の直径と等しい。これは、2・1 節に述べた微小チャンネルの作製方法が有効であり、チャンネルのサイズを制御できることを示している。

測定手順は次のようにした。(1) スキャン速度 800 mm/s で、チャンネルサイズ 100 μm の試験片の測定を行う。(2) 検出が可能な場合、チャンネルサイズを 100 μm から 90 μm へと 10 μm 小さくし、同じスキャン速度で測定を行う。このようにサイズを下げっていく

ことにより、800 mm/s における検出可能な最小チャンネルサイズを得ることができる。(3) 次にスキャン速度を 750 mm/s に減速し、同様の実験を行った。そして、50 mm/s ごとのスキャン速度で測定を行うことにより、各速度での検出可能な最小チャンネルサイズが得られる。

図 4 に測定結果の一例を示す。検出器の特性により得られる信号は透過 THz 波強度の微分形である。すなわち、微小チャンネルの検出による THz 波の強度変化のみを捉えるようになっている。図 4(a)の矢印が示すように、スキャン速度 800 mm/s、チャンネルサイズ 100 μm の場合には、容易に検出することができる。次に、チャンネルサイズ 40 μm においても、SN 比は低下するが同じスキャン速度で検出できている(図 4(b)の矢印参照)。ノイズには、低周波から高周波まで様々な成分が含まれている。低周波成分は、フィルムであるためにヒートシール部がわずかに波打ち曲がっていること、ヒートシールの厚さが均一でないことが原因である。また高周波成分は、試験片作製時に生じるヒートシール部の微細な網目状の凹凸パターンの影響によるものと考えられる。しかしながら、欠陥である微小チャンネルを示す信号は、振幅・周波数

Fig. 6 Transmitted THz signals for fabricated air-filled channel defects.

Fig. 7 Reflective optical microscope image of a water-filled channel defect fabricated inside a white opaque package using a 100- μ m diameter wire.

ともにノイズとは大きく異なるため、明確に区別することができる。図 4 (c)の結果は、スキャン速度 800 mm/s では、サイズが 20 μ m のチャンネルを検出できないことを示している。同サイズのチャンネルは、スキャン速度が 450 mm/s まで減速すると、検出可能である(図 4 (d)の矢印参照)。

3・2 空気充填微小チャンネルの検出 作製した空気充填微小チャンネルの一例を図 5 に示す。輪郭が直線で明確であることは、空気充填チャンネルも適切に作製されていることを示している。

図 6 に計測結果の一例を示す。注目に値することは、空気充填チャンネルにおいても検出が可能であるという点である。すなわちこの結果は、THz 波を用いた検査システムが、液体の充填されたフレキシブルパッケージの不良(液漏れ)のみでなく、全てのフレキシブルパッケージのシール不良を検出できることを示している。

SN 比は、水分による吸収がなく、チャンネル部での THz 波の回折・屈折のみによる信号変化を検出す

るため、水充填チャンネルより低下している。しかし図 6 (a)に示すように、スキャン速度 800 mm/s では、100 μ m が検出可能である。チャンネルサイズが 70 μ m の場合には、ノイズと同じ周波数となるが、振幅がノイズと異なるため区別することが可能である(図 6 (b)の矢印参照)。しかしチャンネルサイズが 50 μ m になると、SN 比が著しく低下し、検出できなかった(図 6 (c)参照)。同サイズのチャンネルは、スキャン速度 600 mm/s で検出可能であった(図 6 (d)参照)。

3・3 不透明パッケージ 図 7 に白色の LDPE で作製した水充填微小チャンネルを示す。チャンネルサイズは約 100 μ m である。水に黒色インクを混合しているため、微小チャンネルの存在を知ることができる。しかし、充填液が無色透明な場合や空気充填チャンネルの場合には、目視試験などの従来の検査方法で検出することは困難である。ポリエチレンなどのプラスチックフィルムの透過率は、THz 波帯域ではほぼ一定である。また顔料などを加え、可視域で不透明化した図 7 のようなプラスチックフィルムも、THz 波帯域での計測には影響を与えない。

不透明な白色パッケージを THz 波で測定を行った結果を図 8 に示す。ここで、チャンネルサイズは 50 μ m であり、(a)は水充填微小チャンネル、(b)は空気充填微小チャンネルの結果である。いずれの場合ともに微小チャンネルを検出することが可能であり、フレキシブルパッケージの透明・不透明に依存しないことを示している。

3・4 スキャン速度と最小検出チャンネルサイズの関係 本研究により得られたスキャン速度と検出可能な最小チャンネルサイズの関係を図 9 に示す。

横軸はスキャン速度を表しており、実際の生産ライン速度に対応する。縦軸は今回試作した THz 波による非破壊検査システムで検出可能な最小チャンネルサイ

Fig. 8 Transmitted THz signals for fabricated channel defects inside opaque packages.

Fig. 9 Relation between the speed of the linear stage and the size of the smallest detectable channel defect.

ズである。水充填・空気充填微小チャンネルの結果ともに、最小二乗法により直線近似した。同じスキャン速度に対する最小検出サイズは、水充填チャンネルのほうが小さくなった。これは、水分による THz 波の吸収の影響が、反射・屈折の影響より信号の変化に対して顕著であることを意味している。

ここで、近年研究開発が著しい超音波による検出システムとの比較を行う。文献(18)に示す超音波システムは、スキャン速度 1 mm/s において、直径 38 μm の空気充填微小チャンネルの検出を可能としている。THz 波を用いた本システムでは、同じスキャン速度 1 mm/s においては直径 10 μm のチャンネルが、また同じチャンネルサイズ 38 μm に関しては約 400 mm/s のスキャン速度で検出可能である。すなわち本システムが他の先端的な手法に比べて、高速かつ高分解能な性能を有することを示している。一般的に、実用の検出システムを開発するにあたっては 50 μm の欠陥に対する検出が保証されれば十分であると言われている¹⁹。水充填チャンネルの場合には、本研究で行った全ての速度範囲で条件を満足する。また、空気充填チャンネルの場合には、スキャン速度が 600 mm/s 以下に限られるが、実際の生産ラインでは十分な速度であると言える。

4. ま と め

プラスチックフィルム製のフレキシブルパッケージの欠陥検出に THz 波を用いた新しい非破壊検査システムの開発を行った。欠陥と仮定した直径 10~100 μm の水充填および空気充填微小チャンネルを作製し、それらを検出することにより本システムの検査能力の評価を行った。結果として、スキャン速度と検出可能な最小チャンネルサイズの関係を明らかにし、システ

ムの有効性を実証した。このような生産ラインの高速スキャンに対応するようなシステムの開発、さらにはスキャン速度に対する検出可能な最小欠陥サイズを詳細に評価した報告は、我々の知る限りない。したがって、このような観点からも、今回開発した THz 波による非破壊検査システムは、実際に応用できる可能性を十分にもっており、フレキシブルパッケージの信頼性を高めるものであると言える。

文 献

- (1) 川瀬見道・伊藤弘昌, 応用物理, 71-2, (2002), 167-172.
- (2) Kawase, K., Ogawa, Y., Watanabe, Y. and Inoue, H., Optics Express, 11-20, (2003), 2549-2554.
- (3) Mittleman, D. M., Gupta, G., Neelamani, B., Baraniuk, R. G., Rudd, J. V. and Koch, M., Applied Physics B, 68-6, (1999), 1085-1094.
- (4) Ferguson, B. and Zhang, X. C., Nature Materials, 1-1, (2002), 26-33.
- (5) Siegel, P. H., IEEE. T. Microw. Theory, 50-3, (2002), 910-928.
- (6) 大須賀弘, 食品包装用フィルム, (1994), 17-36, 日報.
- (7) Floros, J. D. and Gnanasekharan, V., Advances in Aseptic Processing Technology, (ed. by Singh, R. K. and Nelson, P. E.), (1992), Elsevier Applied Science, New York.
- (8) Lampi, R. A., Advance Food Research, (ed. by Chichester, C. O., Mrak, E. M. and Stewart, G. F.), 23, (1997), Academic Press, New York.
- (9) Steffe, J. F., Williams, J. R., Chinnan, M. S. and Black, J. R., Food Technology, 34, (1980), 39-43.
- (10) 鎌田幸彦・島本聡・二瀬克規・青木博之, 日本実験力学会第 1 回研究発表講演論文集, (2001), 245-248.
- (11) 中井英一, 包装システム化事典, (1995), フジテクノシステム.
- (12) Harper, C. L., Blakistone, B. S., Litchfield, J. B. and Morris, S. A., Trends in Food Science & Technology, 6, (1995), 336-340.
- (13) 梅崎栄作, 二瀬克規, 機構論, No.02-1, (2002), 171-172.
- (14) Raum, K., Ozguler, A., Morris, S. A. and O'Brien, Jr. W. D., IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics Freq. Control, 45-1, (1998), 30-40.
- (15) Ozguler, A., Morris, S. A. and O'Brien, Jr. W. D., J. Food Sci. 63, (1998), 673-678.

- (16) Frazier, C. H., Tian, Q., Ozguler, A., Morris, S. A. and O'Brien, Jr. W. D., IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics Freq. Control, 47-3, (2000), 530-539.
 - (17) Tian, Q., Sun, B. S., Ozguler, A., Morris, S. A. and O'Brien, Jr. W. D., IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics Freq. Control, 47-3, (2000), 635-643.
 - (18) Shah, N. N., Rooney, P. K., Ozguler, A., Morris, S. A. and O'Brien, Jr. W. D., J. Food Prot. 64-9, (2001), 1392-1398.
 - (19) Yam, K. L., Plastic Package Integrity Testing Assuring Seal Quality, (ed. by Blakistone, B. A. and Harper, C. L.), Chap.17, (1995), Institute of Packaging Professionals, Herndon, VA.
-