超音波を利用した微小径孔の脱水に関する研究（第1報）*

-脱水の観測-

高崎 正也** 遠藤 崇訓*** 水野 毅**

Ultrasonic Dewatering in Minute Holes (1st Report)
- Observation of Dewatering Phenomenon -

Masaya TAKASAKI, Takanori ENDO and Takeshi MIZUNO

Abstract: Printed-circuit boards are widely used for miniaturizing electronic equipments. According to the demand, diameter of holes in the boards is decreasing. There is a problem in their fabrication processes, in which they should be cleaned in water. After the cleaning process, water remains in the small holes. The remained water contains chemical material and/or dusts and might cause damage of the boards in the future. Conventionally, air pressure has been used to remove the water in the boards. But the method is not valid for holes that have bottoms inside neither for much smaller holes. Heating could be an alternative method, but this method might leave chemical material in the water and cause deflection of the board. In this research, a new dewatering method has been proposed. The method utilizes standing wave of ultrasonic wave in air. An experimental apparatus was organized to observe the ultrasonic dewatering and consisted of an ultrasonic transducer and a reflector. Proposed dewatering was observed successfully. The sound pressure in the standing wave was measured by a microphone. A condition for successful dewatering was discussed with reference to the distribution of the sound pressure.

Key words: printed circuit board, via, dewatering, sound pressure, ultrasonic atomization, capillary wave

1. 緒 言

近年、我々の身の回りの電子機器は高性能化に向かって著しく進歩発展している。さらにその中でも小型電子機器は多機能で、且つより小型であることが強く求められている。それに伴い高密度配線が可能であり、小型化、及び軽量化を図ることができる多層プリント基板の需要が急増している。プリント基板は近年加工精度が向上し、導体配線が微細化され、多層化技術が進歩したことから、ほとんどの小型電子機器に利用されている。プリント基板ではビア（via）と呼ばれる孔によって層間接続がなされている。図1に示すように、ビアには、全層を貫通するスルーホールビア（through-hole via、貫通孔）、貫通せずに特定の層間のみを接続するブラインドビア（blind via、有底孔）等といったものが存在する。ビアの径は機器の小型化に伴ってより小径なものが求められており、現在ではビアの種類によって直径 $50\mu\text{m} \sim 2\text{mm}$ のものが一般的となっている。

プリント基板を機器に利用するにあたって、基板の洗浄過程が必要となる。プリント基板に限らず、基板材料が製品となる過程で、洗浄は不可欠なものとなっており、各種プロセス処理や電子・光学部品の信頼性において悪影響を及ぼす汚れを除去すると共に、表面状況を均質にすることによって電子・光学部品の特性や生産性、及び信頼性の向

上ははかられている。

この洗浄過程後においてプリント基板のビアの中に水が溜まり、製品の故障の原因となるといった問題が生じている。これまでは基板に風圧を与えることによって水を飛散させていたが、小径のビアの場合では、水の表面張力の影響が大きくなり、風圧での脱水が困難になる。また、ブラインドビアに溜まった水は、空気が通過しないことから風圧での脱水は難しい。

この問題を解決するためには非接触で、且つ瞬間的に脱水を行うことが生産ラインにおいては望ましい。ここで、基板を加熱することによって、水を気化させる方法が脱水方法の一つとして考えられるが、熱の影響によって基板が変形し、層間剥離を生じる可能性がある。また、水を気化させることによって、水に含まれていた塵埃や化学物質といった不純物がビアに残るといった問題が生じてしまうため、

Fig. 1 Cross sectional view of a printed circuit board

* 原稿受付 平成 23 年 8 月 12 日

** 正 会 員 埼玉大学大学院（埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）

*** 埼玉大学大学院

Fig. 2 Principle of ultrasonic dewatering

熱処理は脱水方法として適切とは言えない。そこで、超音波を利用した脱水方法の検討を行った。

本研究では、プリント基板のビアのような微小径孔内部に残留した水の除去に超音波による音圧を利用することを提案した。空气中を伝搬する超音波を利用することで非接触、且つ基板に熱を与えることなくビアに溜まった水を飛散させ、水と同時にそこに含まれる不純物も除去することができる。空中超音波による高い音圧を効率良く得るために、超音波振動子と反射板を利用して定在波を形成して利用した。定在波中に設置された基板の貫通孔・有底孔に溜まった水が飛散し脱水される様子を撮影した。また、超音波振動子と反射板によって形成される定在波の音圧分布を計測し、脱水が観察される条件の検討を行った。

2. 脱水原理

プリント基板のビアのような微小径孔に残留した水滴の脱水の原理として、以下に示す2種類の現象に着目した。

2.1 キャピラリー波による霧化現象

キャピラリー波は表面張力波とも呼ばれ、波長は短波長で表面張力の影響を強く受けるといった特徴がある。超音波振動子で発生させた超音波を液体中に入射すると、液表面にはキャピラリー波が発生し、表面の周辺を反射の境界として表面に干渉波が起こる。液表面での液体の衝突、引きちぎり合うエネルギーによる力が表面張力に勝り、液体を微粒子化して空中に飛散させる。この現象は超音波霧化¹⁾として広く知られている。この現象を利用した超音波加湿器やネブライザ等は広く普及しており^{2)~4)}、この原理を応用した研究も多岐に及んで行われている^{5)~7)}。

本研究の提案では、空气中に励振された超音波の定在波の一部が微小径孔の内部に残留した液体中に入射する。図2(a)に示すように液表面にキャピラリー波が発生し、超音波霧化現象と同様の現象により、孔内の液体を孔外へ飛散させることができると考えられている。

2.2 超音波の音圧による飛散現象

流体媒質中に励振した超音波において、定在波が形成された場合、音波の波長の1/2の間隔で超音波振動における振動速度の節点が存在する。この節点は音圧の圧力差が最も大きい点であると考えられ、その急激な圧力差による力が発生する。この力は音響放射圧によるものであると考えら

Fig. 3 Basic configuration of ultrasonic dewatering

Fig. 4 Ultrasonic transducer

れる。非接触で力を発生させることができるため、この力を利用した研究は多岐に及んで行われている⁸⁾⁹⁾。

本研究の提案において、内部に液体が溜まった貫通孔が節点付近に存在した場合、図2(b)に示すように音圧によって生じる力が液体に作用する。その力が液体の表面張力に勝ることで、液滴となって液体をビアの外へ押し出し、飛散させる現象が発生すると考えられている。

3. 実験装置

実験装置の基本構成を図3に示す。超音波振動子としてランジュバン型振動子、基板として1.6mm厚のガラスエポキシ基板、反射板として5mm厚のアルミ板を使用した。ここで振動子面の中心を原点とし、水平方向をx、垂直方向をy、音波の進行方向をzとした。

3.1 超音波振動子

超音波霧化を想定した場合、実用化されているものの多くは液体に直接超音波を励振する方法が採られており、その励振周波数はメガオーダーのことが多い。しかし、本研究では空气中を伝わる超音波を利用するため、空气中の音波の伝搬減衰による影響が液体中と比較して大きい。このことを考慮すると、キロオーダーの周波数帯の音波を励振することが望ましいため、28 kHzの共振周波数をもつボルト締めランジュバン型振動子を使用した。本研究で使用した振動子を図4に示す。ボルト締めランジュバン型振動子は直径30mm、長さ90.6mmのステンレス製丸棒に締結されている。振動の節である丸棒の中心部を支持した。以下の実験では、図中右側の振動面から超音波振動が放射され、この面が図3に示すように基板や反射板と対向する。

Fig. 5 Configurations for experiments

Fig. 6 Measured acoustic pressure with the change of distance between transducer and reflector (20.0°C)

3.2 定在波の利用

より音圧の高い音場を効率良く形成するために、反射板を使用し、適切な間隔で設置された振動子と反射板の間に基板を設置することで、定在波音場内で脱水を行うことができる。こうすることで、振動子から放射された超音波を基板に照射するのみの場合と比して高効率で脱水を行えることが期待される。この際、空気固有音響インピーダンスは反射板の材質として考えられる金属材料や有機材料等の固体と比較した場合、著しく小さいため、反射板の材質における反射効果の差は無視できる。

また、定在波を形成する場合、振動子、基板、及び反射板の位置関係が非常に重要となる。したがって、それぞれを治具で固定し、基板、及び反射板の位置を自動ステージを用いて設定できる状態で以下の実験を行った。

3.3 共振周波数の追従

ランジュバン型振動子を使用するにあたって、熱等の影響による共振周波数の変化に伴う振幅の減衰を抑制するため、共振周波数追従システム¹⁰⁾を使用した。これは共振周波数における、電圧に対する電流の位相がある定数になるというを利用し、振動子に印加される電圧、及び流れる

電流を観測し、観測した位相差と共振周波数での位相差との差分をフィードバックすることで駆動周波数を更新し、共振周波数の追従を行うシステムである。

3.4 音圧の測定

音圧の測定にはコンデンサマイクを用いた。本研究で用いた超音波振動子の駆動周波数は可聴域よりも高いが、音波の強さを測定することが可能であることを実験的に確かめ、音響校正器を用いて当該周波数における係数 Pa/V を取得して計測結果を圧力 Pa とした。

4. 音圧測定実験

4.1 定在波の形成条件

振動子と反射板の間隔の変化に対する音圧変化を測定することで、定在波が形成される条件を調べた。実験構成を図 5 (a) に示す。音圧測定は $\phi 6\text{mm}$ のコンデンサマイクを用いて行い、振動子への印加電圧はコンデンサマイクの感度を考慮して $3V_{p-p}$ とした。振動子とコンデンサマイクの距離を自動ステージによって 1mm とし、振動子と反射板の間隔を z 方向に変化させたときの音圧変化の様子を図 6 に示す。

音圧が極大となるときの定在波が形成されると考えられ、その間隔は 6.4mm となり、振動子の駆動周波数と空気の音速から求められる音波の波長の約 $1/2$ となった。したがって、適切な振動子と反射板の間隔は空气中を伝搬する超音波の波長に依存する。駆動周波数は振動子の共振周波数であり、印加電圧や振動子温度に依存する。また、空気の温度・湿度によって音速は変化する。例えば、室温が 10°C 変化し、駆動周波数が 200Hz 変化したとすると、波長は 0.3mm 変化する。これらの条件の変化に応じて間隔を調整し、最大の音圧が得られるようにする必要がある。以下の各実験の前に、振動子-反射板の距離をあらかじめ調整して音圧が最大となるようにした。また、音圧は振動子と反射板の間隔が狭いほど大きくなる傾向が見られたため、二つの間隔を狭くすることで水の飛散効果が高まることが期待される。

4.2 定在波中の音圧分布

定在波中の音場の状態を把握するため、定在波中の音圧分布を測定した。実験構成を図 5 (b) に示す。4.1 で述べたように、振動子と反射板の間隔を最適化した状態で振動子とコンデンサマイクの位置を xz 方向に変化させ、音圧分布を測定した。その結果を図 7 に示す。

z 方向に約 6.5mm 間隔で音圧の極大点が観測され、定在波が形成されていることが確認できる。そのときの音圧は振動子から反射板方向に近づくほど大きくなる傾向が見られた。また、 x 方向において振動面の半径である 15mm より外側の領域では内側の領域に比べ、音圧が著しく小さくなった。そのため、振動面の大きさと高音圧が得られる領域には関係性があり、脱水を行う際に考慮しなければならない。

4.3 貫通孔背後の音圧測定

貫通孔背後の音圧を測定し、定在波中での孔内部の音圧を知ることで、脱水時における音圧分布の影響を調べることができる。そこで、図 5 (c) のように振動子面とは反対側の貫通孔出口にコンデンサマイクを設置し、基板の位置を xz 方向に変化させ、音圧分布を測定した。測定結果を図 8 に示す。

音圧の極大は非常に急峻であり、 x 方向においては振動面

Fig. 7 Acoustic pressure distribution in standing wave (21.6°C)

Fig. 8 Acoustic pressure distribution behind the through-hole via (24.8°C)

の1/2程度の領域に現れることが分かった。また、振動子からの距離が近いほど音圧が大きくなる傾向が見られた。この傾向は4.1で測定した、振動子と反射板の間隔の変化に対する音圧変化の様子と同等であり、基板が反射板として機能していると考えられる。

5. 脱水実験

5.1 脱水の観測

貫通孔を有する基板と有底孔を有する基板を用意し、孔に水を充填させて、実際に脱水が行われる様子を観察した。高速度カメラを用い、2000frame/sの速度で撮影・記録した。有底孔の脱水を行う際には孔の向きによって結果が異なると考えられるため、孔の向きを振動子側に向けた場合と反射板側に向けた場合に分けて実験を行った。また、脱水を行うためには高音圧を基板に与える必要があると考えられるため、振動子への印加電圧は150V_{p-p}とした。前述のように、定在波が得られるように振動子と反射板の距離を調整し、図8で音圧の極大が見られた位置に用意した基板を挿入し（図3に示す構成）、z軸方向に基板をわずかに動かしながら、以下の観測を行った。

貫通孔の脱水の様子を図9(a)に示す構成にて撮影した。記録した画像を図10に示す。貫通孔に溜まった水がそのまま水滴として押し出されるように基板外に飛散していった。これは定在波の節点における音圧の急激な圧力差による力

Fig. 9 Experimental configuration for dewatering observation

が液体の表面張力に勝ることで生じる、飛散現象であると考えられる。

有底孔の脱水を試みたところ、孔が振動子側に向いているときに脱水が観測された。その様子を図9(b)に示す構成にて撮影した。記録した画像を図11に示す。ビアの水は細かい粒状となって弾け飛ぶように基板外に飛散していく様子が観測された。これはキャピラリー波による霧化現象であると考えられる。一方、孔を反射板側に向けた場合、脱水は観測されなかった。その理由として、基板と衝突した音波のほとんどが反射し、十分な音波が基板内を透過しないことが考えられる。したがって、有底孔の脱水を行う際は孔を振動子側に向ける必要があるといえる。

5.2 脱水領域

用意した基板の孔に水を充填し、前節の構成において基板の位置(z軸方向)と孔の位置(x軸方向)を変化させながら脱水現象を観察した。貫通孔及び有底孔それぞれの脱水が観測された位置を図12に示す。定在波内での脱水の可否を示している。

図8と図12から貫通孔及び有底孔における脱水は高音圧を得ることができる領域、つまり振動速度の節点付近において行われていることが確認できる。また、有底孔は貫通孔と比較して脱水が起こりにくい傾向が見られた。さらに、脱水可能な領域も重ならなかった。これは、有底孔では孔内の液滴に入射する超音波をできる限り強くする必要があるのに対して、貫通孔では節点付近の音圧差を利用して液滴を孔外に押し出すため、基板と節点の最適な相対関係が異なるためと考えられる。2種類のビアが混在する基板において脱水を行う際はこれら傾向を考慮する必要がある。

6. 結 言

本研究では、プリント基板のビアのような微小径孔内部に溜まった水の除去方法として空中超音波を利用した方法を検討し、以下の結果を得た。

- (1) より高効率で脱水を行うため、反射板を用いて定在波を形成することを提案した。その領域の音圧分布を測定した。
- (2) スルーホールビアにおける脱水は超音波の音圧による押し出しが、ブラインドビアにおける脱水はキャピラ

Fig. 10 Dewatering in through-hole via

Fig. 11 Dewatering in blind via

Fig. 12 Dewatering area

リー波による霧化現象がそれぞれ観測された。

- (3) 本研究における実験構成ではブラインドビアにおける脱水はビアを振動子側に向けた場合のみ観測された。
- (4) 脱水が観測される位置を調べたところ、定在波中で高音圧が得られる領域において脱水が観測されることを確認した。

今後、形成された定在波中の貫通孔・有底孔それぞれの位置と脱水可否の特性を詳細に把握していく。

謝 辞

研究を進めるにあたり、株式会社都ローラー工業にご協力頂きました。感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) R. J. Lang: Ultrasonic Atomization of Liquids, Journal of Acoustical Society of America, **34**, 1 (1962) 6.
- 2) M. B. Denton and D. B. Swartz: An Improved ultrasonic Nebulizer System for the Generation of High Density Aerosol Dispersions, Review of Scientific Instruments, **45**, 1 (1974) 81.
- 3) 千葉近: 超音波振動による液体の微粒化, 日本機械学会論文集 (B編), **45**, (1979) 294.
- 4) N. Maehara, S. Ueha and E. Mori: Influence of the Vibrating System of a Multipinhole-plate ultrasonic nebulizer on its Performance, Review of Scientific Instruments, **57**, 11 (1986) 2870.
- 5) M. Kurosawa, T. Watanabe, A. Futami and T. Higuchi: Surface Acoustic Wave Atomizer, Sensors and Actuators A, **50**, (1995) 69.
- 6) A. Lal and R. M. White: Micromachined Silicon Ultrasonic Atomizer, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, (1996) 339.
- 7) J. Kim, Y. Yamagata, M. Takasaki, B. Lee, H. Ohmori and T. Higuchi: A Device for Fabricating Protein Chips by using a Surface Acoustic Wave Atomizer and Electrostatic Deposition, Sensors and Actuators B, **107**, (2005) 535.
- 8) 小塚晃透, 辻内亨, 三留秀人, 福田敏男: 多電極振動子を用いた音場制御による非接触マイクロマニピュレーション, 日本機械学会論文誌 (C編), **65**, (1999) 3650.
- 9) T. Iwamoto and H. Shinoda: Tactile Display Using Acoustic Radiation Pressure Scanning, Trans. Virtual Reality Society Japan, **11**, 1 (2006) 77.
- 10) 丸山裕, 高崎正也, 久田見明範, 水野毅: 診断機能を備えた超音波スケラの開発, 日本機械学会論文集 (C編), **72**, (2006) 2731.