

# 画像計測高精度化のための超音波定在波による空気揺らぎの抑制

○星 貴之 (名古屋工業大学)

早田 滋 (株式会社新川)

## Suppression of Air Disturbance by Ultrasonic Standing Wave for Improvement of Vision Sensing

○Takayuki Hoshi (Nagoya Institute of Technology)

Shigeru Hayata (Shinkawa Ltd.)

Bonding machines suffer from a problem that a wavering disturbance of air occurs due to heaters and decreases the accuracy of vision sensing for tool positioning. Previous solutions use airflow to clear out heated air from the light path or physical/airflow walls to separate heated air from background air. We propose a method that keeps the light path calm using ultrasonic standing wave. The fluctuation of air is suppressed in the structure of the standing wave.

**Keywords:** Bonding machine, Air disturbance, Vision sensing, Ultrasonic standing wave, Thermal convection, Refractive index.

### 1. はじめに

半導体製造業において、ワイヤボンダ等のボンダは IC を回路基板に接続する重要な役割を担う。近年の IC の微細化や回路の高密度化に伴い、より高い位置決め精度が求められるようになってきている。位置決めは主に画像計測によって行われる。作業領域内では IC や回路基板を 100~300℃のヒーター上で加熱する。様々な要因によって空気が揺らぐと、温められた空気が周囲の常温の空気と混ざり合い、光路上の屈折率が時間的に変動して画像計測の精度を低下させる。

この問題は陽炎(かげろう)と呼ばれ、解決法がいくつか試みられている。例えば、加熱された空気をエアブローによって光路から排除する[1][2]、カメラから IC までをカバー[3]やエアカーテン[4]で覆うことによって光路上の温められた空気が常温の空気と触れないようにする、などの方法がある。気流による方法ではボンディング面等が冷却されてボンダバリティが低下する、ワイヤにストレスがかかる、などの影響を考慮する必要がある。またカバーを設置する方法では、熱がカバーを伝わることによるカメラの熱膨張やカバー自体の共振が発生する可能性もあり、精度低下の要因となる。

本研究では、エアブローも、物理的なカバーも使用しない方法を提案する。ヒーターを直上からカメラで撮影する計測系において、その光路を横から挟むように超音波発信器と反射板を設置する。発信器から超音波ビームを照射し、入射波と反射波の重ね合わせにより定在波を生じさせる。定在波の中ではビーム方向に音圧の腹と節の周期構造が形成される。この構造が光路を横切る方向の空気の移動を抑制するため、光路上における空気の屈折率が変化しにくくなり、画像計測の精度を向上させることができる。

本稿ではまず位置決め精度の決定要因を整理し、陽炎対策の先行事例についてまとめる。次に、提案手法の原理を説明する。最後に検証実験の結果を報告する。

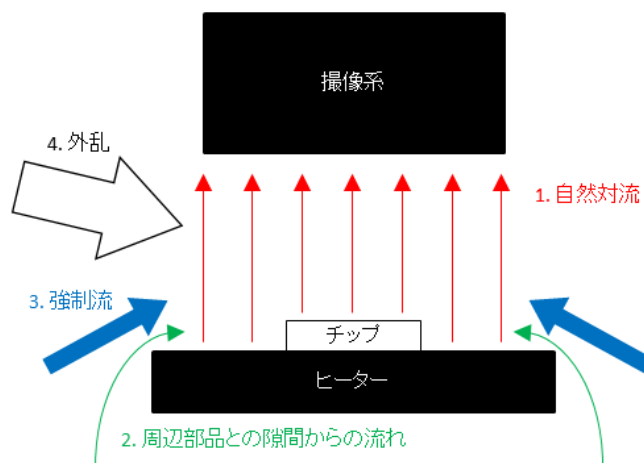


図1. 陽炎の発生要因。これらの要因により撮像系とチップの間の空気が揺らぎ、屈折率が時間的に変動する。

### 2. 位置決め精度を決定する要因

現在のボンダでは、実環境において  $3\sigma$  で  $2 \mu\text{m}$  のボンディング精度が達成されている。今後、IC の微細化や回路の高密度化に伴ってさらに高い精度が求められることが予測される。位置決め精度は、温度変化による撮像系や部品の変形、高速動作に起因する振動、ヒーターで熱せられた空気による陽炎など、様々な要因が複合的に影響する。本研究では、陽炎が単独で生じる影響を画像認識精度程度(1画素に相当する長さの10分の1程度)以下、すなわち  $0.1 \mu\text{m}$  程度以下に収めることを目標とする。

陽炎の発生要因を図1に示す。空気の屈折率は温度に依存する。空気に揺らぎが生じると、ヒーターで熱せられた空気が周囲の常温の空気と混ざり合い、光路上の空気の屈折率が時間的に変動する。このときカメラで観察される映像は屈折率の変動のためゆらゆらと揺れ、位置決め精度を著しく劣化

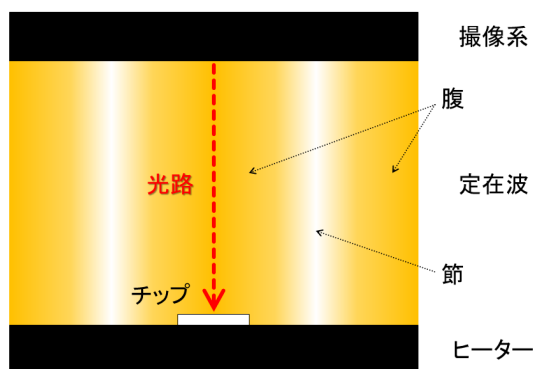


図 2. 定在波の腹に光路を通して観察の様子。

させる。空気に揺らぎを生じさせる要因としてはヒーターの熱によって生じる不規則な自然対流、部品の隙間からの空気の流入、酸化防止のため窒素などを吹き込む強制流、空調や作業員の動作によって生じる外乱、などがある。実環境においては、これらすべての要因が存在する中で陽炎による影響を  $0.1 \mu\text{m}$  程度以下に抑える必要がある。

### 3. 陽炎対策の先行事例

先行事例[1][2]は、エアブローによって温められた空気を光路から排除することにより、光路上の屈折率を一定に保つ方法である。この方法では低温の流れに触れて IC や回路基板表面の温度が低下することによるボンダビリティの低下や、ワイヤボンダの場合にはワイヤにストレスがかかって不具合につながる恐れがある。

一方、先行事例[3][4]は、温められた空気と周囲の常温の空気が触れないよう分離することにより、光路上の屈折率を一定に保つ方法である。事例[3]では光路を囲む物理的なカバーを設置している。この場合、カバーを介して熱が撮像素子全体に伝わり、熱膨張の影響を受けやすくなる。またカバーの共振も撮像素子に悪影響を与える可能性がある。事例[4]では、物理的なカバーの代わりにエアカーテンを用いている。気流であるため上述の方法と同様の影響がある。またコストの観点から、エアを大量に消費することも好ましくない。

### 4. 提案手法

本研究では、超音波の定在波を用いる方法を提案する。これによりエアブローも物理的なカバーも用いることなく光路上の空気を安定化する。

光路に対して垂直に超音波の平面波を照射する状況を考える。光路と平行かつ超音波の進行方向に垂直な反射板を配置することにより、入射波と反射波が重なり合って定在波が生じる。これは、超音波ビームと平行な方向に音圧の腹と節が周期的に繰り返す構造をもつ (図 2)。また超音波ビームの断面方向には分布をもたないため光路上の屈折率は一様である。

陽炎の発生要因が存在する場合でも、定在波はその構造を保つ強制力として作用することが期待される。文献[5]において、定在波の中では節と腹の間に置いた炎が腹 (粒子速度の節) に向かって流される様子が報告され、この対流が音響放射力に起因すると考察されている。すなわち、音響放射力が空気の揺らぎを生じる要因に対して十分に大きければ、周期構造が安定して保たれると考えられる。

なお音圧分布を操作して光学的計測に利用する研究としてはフェムト秒レーザーを用いて空中に仮想的な光ファイバを形成する研究[6]がある。高強度のフェムト秒レーザーパルスが空中を走るとき、周囲に衝撃波 (1 波長の音波) を発生する。4 本 (あるいは 8 本) のレーザーを平行に走らせることで、それらが囲む領域で衝撃波が重なり合い、高い音圧がレーザーに沿って細長く続く分布が形成され、数 ms 程度持続する。すなわち、中央において屈折率が高いという光ファイバと同様の構造をもつ。これを通して 100 m 程度離れた地点の微弱な信号を観測する。一方、本研究は、音響現象により空気の密度を操作する点では類似しているが、数 cm 程度の範囲で長時間安定に計測するという目的が異なる。

## 5. 検証実験

提案手法によって陽炎の影響が抑制されることを確認する実験を行った。以下、今回の実験に用いた超音波装置を紹介し、実験系について説明し、実験結果を報告する。

### 5.1 超音波装置

強力な超音波を照射する装置として今回の実験では汎用の超音波集束装置[7]を採用した。これは一辺 17 cm の矩形領域内に 285 個の超音波振動子 (T4010A1, 日本セラミック株式会社製, 共振周波数 40 kHz, 直径 1 cm) を配列したものである。内蔵された FPGA が各振動子に応じた駆動信号を生成することで空間中の任意の位置に超音波焦点を形成する。焦点における音圧の最大値は 2585 Pa RMS である。焦点位置は 0.5 mm 刻みで指定可能である。

矩形の振動子アレイを用いたとき、焦点面に生じる超音波の音圧分布はほぼ sinc 関数に従うことが理論的に導かれている。メインローブ (焦点) の直径  $w$  [m] は次式で表される。

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (1)$$

ここで波長  $\lambda$  [m] は波長 (40 kHz の場合 8.5 mm),  $R$  [m] は焦点距離,  $D$  [m] は矩形振動子アレイの一辺の長さ (今回は 17 cm) である。例えば焦点距離  $R = 20$  cm のとき焦点径  $w = 20$  mm となる。また焦点は超音波の進行方向に数 cm の焦点深度をもち、その区間では焦点径の太さの超音波ビームと考えてよい。

### 5.2 実験系

構築した実験系を図 3 に示す。ヒーター、チップ、撮像素子

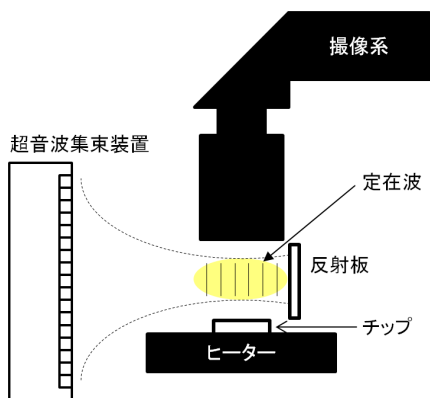


図 3. 構築した実験系. 超音波装置と反射板を用いて, チップとカメラの間に定在波を形成する.



(a) 超音波なし (b) 超音波あり

図 4. シュリーレン法による空気の密度分布の可視化.

からなる. CCD カメラ (STC-RHB33PCL, センテック株式会社製) を鏡筒 (6 倍) に取り付け, 画像計測に用いた. ヒーターの温度は 300°C に設定した. なお今回は提案手法の実現可能性の確認を目的として, 実環境における陽炎の発生要因のうち自然対流のみを扱う.

超音波装置と反射板を向い合せにし, カメラの光路を挟むように設置した. 超音波装置から反射板までの距離を 160 mm とし, 焦点距離を 140 mm に設定して実験を行った.

### 5.3 シュリーレン法による定在波の観察

赤外線レンズシュリーレン装置 (LSC-80-IR, ネオアーク株式会社製) を高画素化した装置で定在波を可視化した. 超音波を照射しない場合 (図 4 a) には不定形の空気の揺らぎが見られる. 一方, 照射した場合 (図 4 b) には腹 (明) と節 (暗) の縞模様が確認できる. この縞模様は時間とともに揺らぐ様子も観察されたが, 腹と節の位置はほぼ不変であった.

定在波の音圧の腹は, 反射板から  $n\lambda/2$  ( $n$  は整数) の距離に生じる. 反射板から光路までの距離を 15.3 mm に設定したとき  $n=3$  番目の腹が光路に重なるように生じた. このことから超音波の波長は  $\lambda = 10.2$  mm, 音速は 408 m/s と計算される. 気温  $t$  [°C] の空気中の音速が  $331.5 + 0.6 t$  [m/s] で計算できることから, ヒーターによって温められた空気は  $t = 127.5^\circ\text{C}$  程度になっていると推測される.

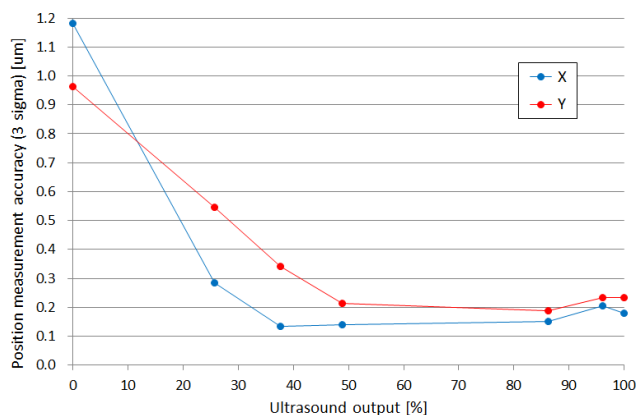


図 5. 実験結果. 超音波出力と位置推定のばらつきの関係.

### 5.4 超音波強度と陽炎抑制効果の関係

定在波の腹に光路を通して観察したとき陽炎の影響が抑制されるかどうかを検証する実験を行った. 手順を以下に示す. まずチップ上に描かれたマーカの位置推定を行う. 推定値は画像の X, Y 方向それぞれについて得られる. これを 200 ms 間隔で 200 回行う. 陽炎の影響により推定値は毎回異なる値をとる. これらの推定値のばらつきを  $3\sigma$  で評価する.

今回使用した超音波装置は, 駆動波形の PWM 制御によって出力音圧を変えることができる. この機能を用いて, 陽炎の影響による推定値のばらつきが超音波出力によってどのように変化するかについても調べた.

実験結果を図 5 に示す. 超音波を照射しない場合には  $3\sigma$  で 1  $\mu\text{m}$  程度のばらつきがあったが, 超音波を照射した場合には 0.2  $\mu\text{m}$  程度まで抑制されることが確認された. また超音波出力 50~100% の区間で, 抑制効果はほぼ同様であった.

### 6. おわりに

本研究では, ボンダの位置決め精度を劣化させる陽炎に対して, 新たに超音波の定在波を用いた抑制法を提案した. それは定在波の腹と節の周期構造が空気の揺らぎを妨げる効果を利用するものである. 実験系を構築し, 提案手法の検証を行った.

実験の結果, 提案手法によって位置推定のばらつきが  $3\sigma$  で 1  $\mu\text{m}$  程度から 0.2  $\mu\text{m}$  程度まで抑制されることが確認された. しかしこれは目標の 0.1  $\mu\text{m}$  に届いていない. また自然対流のみの環境での結果であり, 実環境においてはさらにばらつきが大きくなることが予測される. 陽炎の抑制効果を高めるためには超音波のビーム径やチップとの接し方など条件の調整が必要と考えられる.

また超音波出力を変えて行った実験により, 50%程度の出力でも 100%と同様の抑制効果を示すことが分かった. 出力が小さくて済むということは, 実環境に組み込む際に超音波装置の小型化が可能である. また今回の実験では考慮しなかった陽炎の発生要因に抗するための余力とみなすこともできる.

今後、陽炎の抑制効果を高めることのできる条件を洗い出し、位置推定のばらつきを  $0.1 \mu\text{m}$  以下に抑える。そして超音波装置に求められる性能やサイズを確定させ、実環境に組み込むことのできる装置を開発する。

**謝辞** 実験は松木雄介氏（株式会社新川）の協力を得て実施された。感謝の意を表し、ここに記す。

### 参考文献

- [1] ローム株式会社: ワイヤボンダ, 特許第 3392254 号, 2003.
- [2] 株式会社カイジョー: ワイヤボンディング装置, 特許第 5254427 号, 2013.
- [3] 株式会社新川: ワイヤボンディング装置, 特許第 2981973 号, 1999.
- [4] 松下電器産業株式会社: 画像収集装置, 特開 2005-98775, 2005.
- [5] 田辺光昭: 微小重力場における音場を利用した熱対流の生成, 第 23 回 JAXA 宇宙利用シンポジウム発表論文集, pp. 80-83, 2007.
- [6] E.W. Rosenthal, N. Jhaji, J.K. Wahlstrand, and H.M. Milchberg: Collection of remote optical signals by air waveguides, *Optica*, vol. 1, no. 1, pp. 5-9, 2014.
- [7] 星貴之: 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 7, pp. 543-552, 2014.