

学術論文

静圧浮揚する基板に作用する超音波振動板からの 非接触搬送力に関する実験的検証

Experimental verification on non-contact thrust force on levitating board using ultrasonic vibrating plate

磯部 浩巳^{*1} (正員)

Hiromi ISOBE (Mem.)

In recent years, the size of plane substrates and semiconductor wafers has increased. As conventional contact transportation systems composed of, for example, carrier rollers, belt conveyers, and robot hands carry these longer and wider substrates, the increased weight of substrate results in increased potential for fracture. A non-contact transportation system is required to solve this problem. New non-contact transportation system combining acoustic viscous and aerostatic forces to provide damage-free transport is proposed. The substrate, levitated by air aerostatic force, is dragged by thrust force generated by oscillating plate with ultrasonic flexural standing wave placed over the substrate. In this paper, the characteristics of the thrust force were investigated experimentally and comb-shape oscillating plate was investigated to improve the thrust force.

Keywords: non-contact transportation, ultrasonic vibration, flexural standing wave, aerostatic force.

1 緒言

近年、液晶ディスプレイやプラズマディスプレイパネルなど平面基板や半導体ウェハの大型化が急速に進んでいる。例えば、第 8 世代液晶パネル用マザーガラスの基板サイズは 2200 × 2400 mm に達している。その一方で、液晶パネル、有機 EL 用ガラス基板の軽量化、バックライトの低電力化、画質の高精細化、高視野角化、タッチパネルでの高感度化を目指し、薄肉化が進んでいる。すなわち、基板が大型化する一方で、その厚さは薄くなるために、基板はますます脆く、壊れやすくなっている。その上、回路集積化技術の進歩により、基板やウェハの清浄度の管理は、より厳しくなっている。これら製造工程において、従来の搬送ローラによる接触式搬送では、基板面積の拡大や薄肉化による破損、汚損の可能性が高まり、搬送ローラの保守管理に対する要求がより厳しいものになる。また、非接触式パレット方式による搬送においても、基板の大型化に伴ってパレットサイズを対応させなければならない。そのために、新たな非接触搬送技術の開発が望まれている。

これまでに、さまざまな非接触搬送方法が研究開発されており、静電力を用いた技術[1]、音響粘性流を利

用して基板懸架力と搬送力を発生させる技術[2]が提案されている。前者では真空中での利用が可能であることは大きなメリットである。しかし、静電引力を利用しているために、搬送対象を浮揚させる系は不安定であり、安定化のためのオン・オフ制御システムなどのさまざまな手法が報告されている。また、後者では搬送路・基板間の圧縮性流体を媒体としているので、外部から流体を導入する必要がなく、クリーンな環境を実現できる優れた手法である。しかし、音響放射圧もしくは圧縮性スクイーズ効果による負荷容量は接触式や静電容量式に比べて 1 桁以上も低い。

そこで本研究では、空気静圧力と超音波たわみ定在波振動の組み合わせにより基板に与えた非接触作用力を利用する非接触搬送手法を提案[3, 4]してきた。本手法では、基板が下方から圧縮空気による静圧力で浮揚し、その上方にわずかの隙間を介して配置するたわみ定在波振動する平板から発生した力を利用して非接触搬送を実現する。静圧力で浮揚させることで、系は安定であり、浮揚に関しての安定化制御は不要である。また、基板の面積が大きくなった場合でも、面積にほぼ比例する空気静圧力によって十分な浮揚力を得られることが本手法の大きなメリットである。本研究では基板に与えた非接触作用力について実験的な検証を行って、非接触搬送技術への適用するための基礎研究を行った。そして、非接触作用力を向上させるための振動板の設

連絡先： 磯部 浩巳, 〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1, 長岡技術科学大学工学部機械系,
e-mail: isobe163@mech.nagaokaut.ac.jp

^{*1}長岡技術科学大学

計を試みた。

2 非接触作用力の発生原理

本研究においては、空気静圧力と超音波たわみ定在波振動により基板に作用する非接触の力を組み合わせで、基板を搬送するスラスト力を与える。スラスト力の発生原理の概略を Fig. 1 に示す。空気静圧力により浮揚している平面基板の上方片側にたわみ定在波振動する振動板を配置すると、基板が水平方向に送り出される現象が起きる。基板を送り出す力は、振動による力の水平成分と空気静圧力の水平成分より構成されると考えられる[4]。基板と振動板のすき間が周期的に変動することで、周囲圧力よりもすき間内圧力の時間平均値が高くなるスクイーズ効果が発生する。原理的に、すき間の時間平均値に対する振動振幅が大きいほど発生圧力は高くなるので、図中では振動板のたわみ形状に対応した圧力分布を模式的に示している。このスクイーズ圧力によって、基板には下方への押し付け力が作用し、基板が傾くことで、空気静圧力の水平分力が

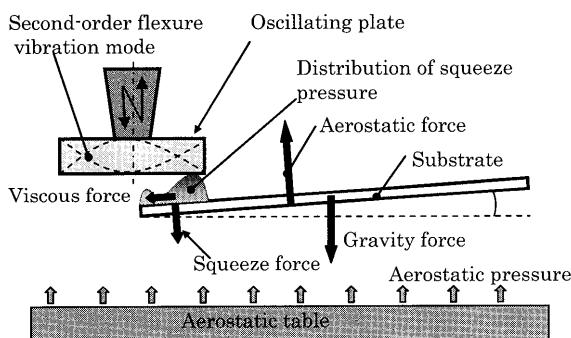


Fig. 1 Principle of thrust force generation.

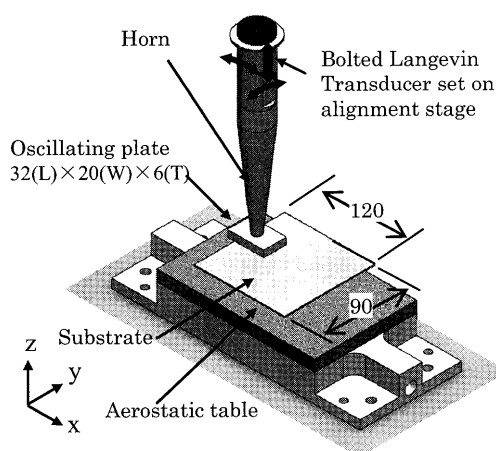
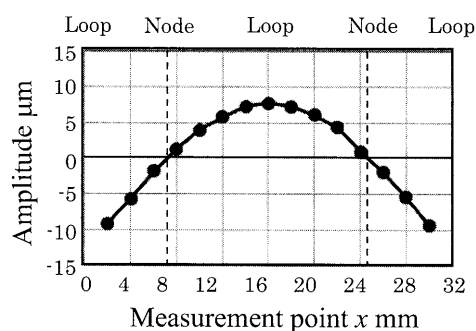
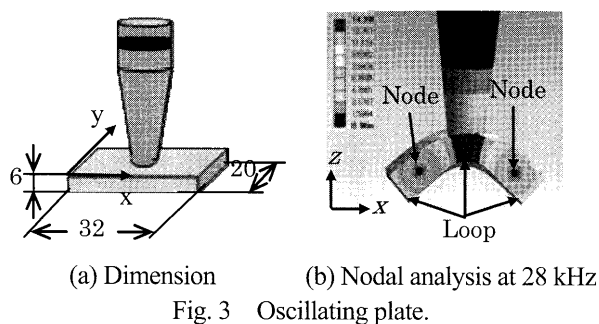


Fig. 2 Experimental setup for thrust force measurement.

発生する。また、基板の傾斜によって、振動板と基板間のすき間はくさび状になり、スクイーズ圧力の分布に偏りが生じるため、ポンプ作用[5]が生じ、ポアズユ流れによって基板には粘性力が作用する。以上、基板に作用する水平方向の力（スラスト力）は空気静圧力の水平分力とポンプ作用による粘性力によるものと考えられる。

3 非接触作用力実験装置

空気静圧テーブルと超音波たわみ定在波振動している振動板の組み合わせによって基板に作用するスラスト力を測定するための実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。空気静圧テーブルは多孔質セラミックス製で、平面度 0.01 mm 以下に仕上げられている。テーブル上面は、水準器(JIS A 級、感度 0.02 mm/m)を用いて、0.1 mm/m 以内にレベルングを実施した。静圧テーブルから噴き出した圧縮空気で基板に静圧力を与える。振動ユニットの構造は振動源となるボルト締めランジュバン振動子（本多電子製 HEC-2528P2BF）、振動振幅を拡大するためのコンカルホーン、および矩形振動板が連結されて構成される。振動子の共振周波数は 28 kHz、直径は 25 mm、ホーンは半波長の長さを持ち、大端部直径φ25、小端部直径φ8 で、理論振動拡大率は 2.85 である。振動板は CAE による振動モード解析により、振動子の共振周波数 28kHz において、1 次の曲げ振動モードを有する形状とした。搬送対象とする基板サイズは、一辺が 100 ~ 500 mm 程度であり、基板と振動板間のすき間は 0.1 mm ~ 0.5 mm 程度である。また、粘性力が慣性力に比べて十分に大きく、すき間からの流体の流入出を無視できるピストンシリンダモデルにおいては、スクイーズ効果は、すき間に対する振動振幅が大きいほど高くなる[6]。これらを考慮すると、低次モードの振動振幅に比較して、高次モードの振動振幅は小さく、十分なスクイーズ効果が得られないと考えられる。また、スクイーズ効果による押しつけ力（スクイーズ圧力の時間平均値×振動板面積）を大きくするために振動板面積を必要以上に大きくすることも、振動振幅を減少させる。これらを考慮して設計された振動板の概略図と FEM による振動モード解析の結果を Fig. 3 に示す。材質は A5052 で、大きさは 32(L) × 20(W) × 6(T)とした。解析の結果、長手たわみ方向に 1 次曲げモードを有し、両端と中央部が振動振幅が最大となる腹になる。振動子への印加電圧 200 V_{pp}、駆動周波数 28 kHz のとき、レーザドップラー振動計



(小野測器製 LV-1710) を用いてたわみ方向に振動振幅の測定をした。長手たわみ方向に振動板の振動振幅の分布を Fig. 4 に示す。負号は、振動板中央部の振動と逆相であることを意味している。振動振幅の分布から、解析結果と同様に、長手たわみ方向に 1 次の曲げ振動モードを有し、両端と中央部は腹となり、8 mm と 24 mm 付近が振動振幅がゼロとなる節になることを確認できた。また、腹部の振動振幅は 10 μm 程度であるので、すき間に対する振動振幅比は 0.1 程度となる。これは、スクイズ効果を発生させるには十分な振幅比[6]である。

4 基礎実験

4.1 スラスト力測定

静圧によって浮揚している基板の上面片側にわずかなすき間を介して配置されたたわみ振動が基板に与えるスラスト力 F_t の測定を行った。測定方法を Fig. 5 に示す。基板に取り付けた柔軟な糸の張力をロードセルによって測定して、これをスラスト力とする。使用した基板は大きさ $90 \times 120 \times$ 厚さ 0.7 mm、質量 19.7 g のガラス基板である。実験の条件は、ランジュバン振動子への印加電圧を 600 V_{pp}、静圧テーブルに流入する空気流量を 16 l/min、振動板と静圧テーブル上面のすき間を 1.1 mm とした。基板を水平方向に 2 mm 間隔で移動させて、移動量 δ とスラスト力の関係を測定

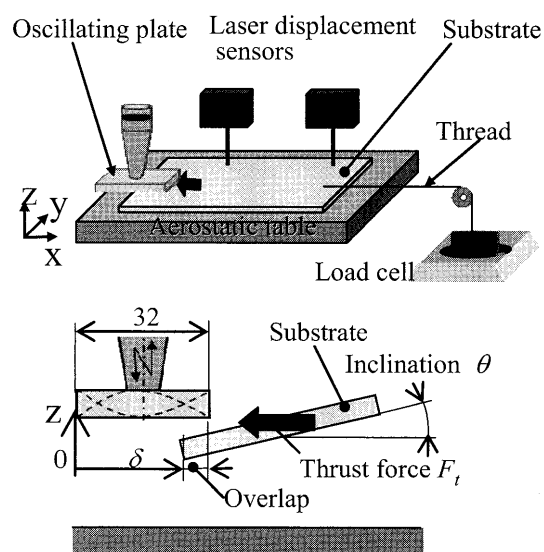
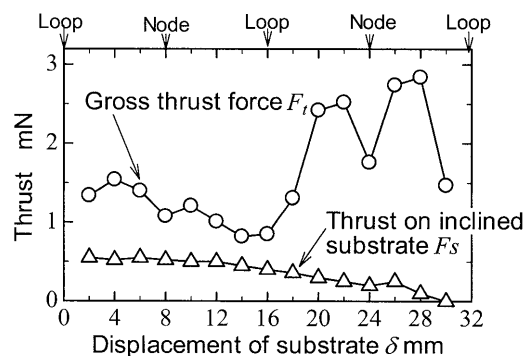


Fig. 5 Measurement apparatus for thrust force.



した結果を Fig. 6 に示す。ここで、測定されたスラスト力は F_t で示され、後述される基板の傾斜に起因するスラスト力を F_s で示されている。スラスト力は基板の移動量すなわち基板と振動板のオーバーラップ量によって変化することがわかった。そして、基板の移動量が 26 ~ 28 mm の範囲でスラスト力が最大となり、本実験条件において、2.8 mN だった。また、Fig. 4 の振動板の振幅分布に関係し、基板端面が節線に一致したときには、スラスト力はその前後に比べて小さくなる傾向が見られた。また、基板位置によって推進力が変化する原因を確認するため、基板の移動量と、基板の傾きおよび基板と振動板間の中央部すき間を測定した。基板の傾きは、静圧テーブル上面に対する傾きであり、レーザー変位センサ(KEYENCE 製 LK-H027K) を 2 台用いて、基板が着地している状態から浮上している状態になったときの変位量を測定し、三角法で算出した。

基板と振動板のすき間は、2 台のレーザー変位センサの読み取り値の平均値から算出した。基板の傾きの測定結果を Fig. 7 に示す。移動量がゼロの時、すなわち振動板の全面が基板上にあるときに、最も傾斜角が大きい。一方、移動量が大きくなってオーバーラップが減るにしたがって、傾きは減少していく。基板と振動板間のすきま (Fig. 8) は、移動量が大きくなるほど、狭くなっていく。これは、基板と振動板のすきま空間に発生したスクイーズ圧力と作用面積の積が基板の押し付け力として作用して、基板が傾くためだと考えられる。また、基板の傾きが減少すると、静圧力の水平分力も減少するが、一方でスラスト力は増加している。したがって、基板には傾斜角の増加に伴って減少する力が作用していることを意味する。

上述では、振動板の発生するスクイーズ圧力によって基板を押しつけて傾斜させた。傾斜面に対して静圧力が作用するので、水平方向分力が基板に作用する。ここでは基板上におもりを載せて傾斜させ、空気静圧力の水平方向分力のみを測定した。Fig. 9 におもりの質量に対する傾斜角度の変化およびスラスト力の変化を示す。これより、おもりの質量増加にともなって、傾斜は大きくなった。また、静圧テーブルへ供給する流量が多くなると、傾斜も大きくなる。そして、傾斜角にともなって、スラスト力も増加する。ここでは、流量 20 l/min における傾斜角度から、理論的な水平方向分力 ($=m_a \tan \theta$, ただし m_a : 基板とおもりの質量の和) も示す。これより、ガラス基板の傾斜によって、理論に一致した分力が発生することがわかる。これは、流量 30, 40 l/min においても、理論と実験の差は 10 % 以内であった。そこで、Fig. 7 で示された傾斜角から、水平方向分力 F_s を算出して、前述の Fig. 6 中に併記した。これより、振動板の半分以上が基板を覆っているグラフの左半面 (移動量 $\delta = 0 \sim 16$ mm) においては、基板の傾斜面に作用する空気静圧力のスラスト力が、全スラスト力の 30 ~ 50 % を占めている。しかし、移動量が 16 mm 以上になると、スクイーズ力は次第に減少し、基板を傾けられなくなり、空気静圧力によるスラスト力も減少する。

4.2 スラスト力に影響するパラメータの検証

スラスト力に影響するパラメータは静圧テーブルに流入する空気流量、振動板と静圧テーブル上面との間隔、振動板の振動振幅などが考えられる。より大きなスラスト力を得る条件を見出すために、これらのパ

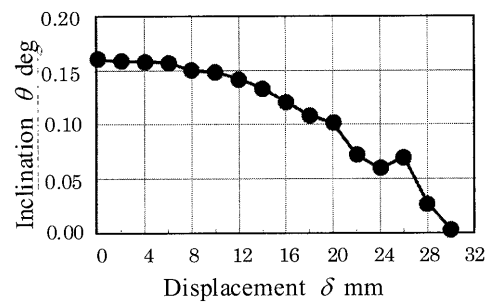


Fig. 7 Variation of inclination of substrate.

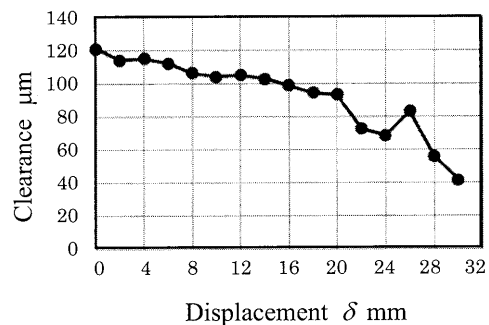
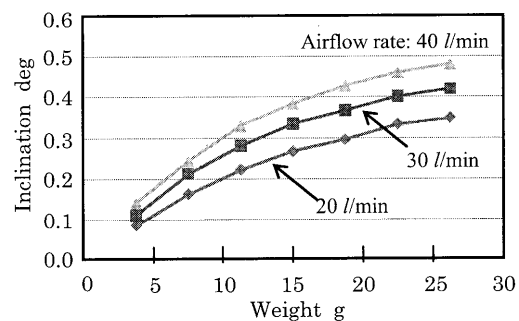
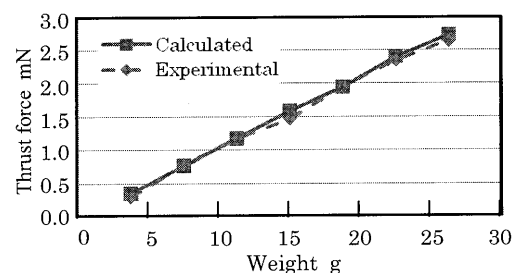


Fig. 8 Clearance between substrate and oscillating plate



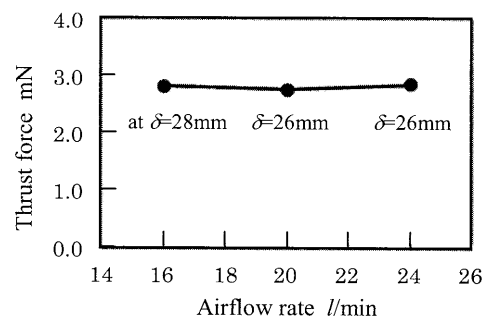
(a) Inclination of substrate by unbalance weight.



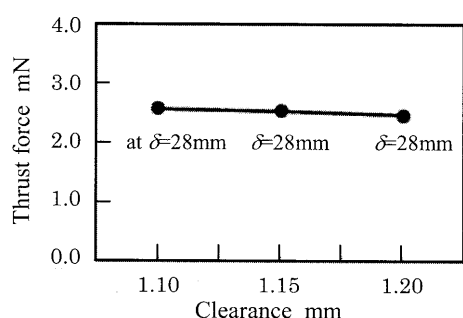
(b) Thrust force generation by unbalance weight.

Fig. 9 Thrust force caused by aerostatic force.

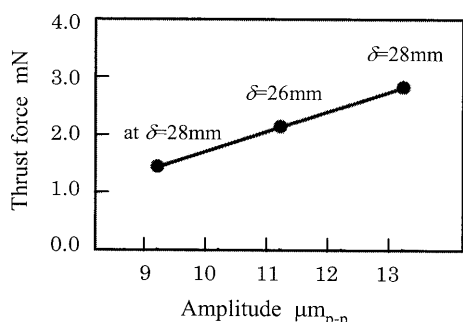
ラメータと、移動量 $\delta = 0$ mm から 32 mm の範囲内での最大スラスト力の関係を検証した。基板は大きさ $90 \times 120 \times$ 厚さ 0.7 mm, 質量 19.7 g のガラス基板を使用した。基準条件としては、空気流量を 16 l/min, 振動板と静圧テーブル上面の間隔 1.1 mm, 振動振幅を



(a) Air flow rate.



(b) Clearance between oscillating plate and table.



(c) Oscillating amplitude of plate.

Fig. 10 Variation of thrust force.

11.2 μm_{p-p} とし、流量が変化したときの最大スラスト力の変化(Fig. 10(a))はほとんど見られなかった。図中の数字は、最大スラスト力が得られた移動量 δ である。同様に、振動板と静圧テーブル上面の隙間が変化したときも(Fig. 10(b)), 最大スラスト力はほとんど変化しなかった。一方、振動板の振動振幅が増加したとき(Fig. 10(c)), 最大スラスト力も比例して増加することが分かった。

4.3 厚さの異なる基板によるスラスト力の比較

基板端部には、主に空気がすきまから流れ出す際に物体端部の流れによって生成される渦とすきま内に空気が吸い込まれる際に生じる端部に沿う流れによって負圧が生じる[7]。物体を引き戻す力は負圧力を物体厚

さ方向に積分することで求められ、物体の端面厚さに関係する。本研究において基板端部に負圧力が作用しているかを検証するために、厚さの異なる基板を使用して推進力を測定した。ガラス基板は 90 × 100 × 厚さ 0.3 mm (6.7 g), 厚さ 0.55 mm (12.1 g), 厚さ 0.7 mm (16.1 g) の三種類を使用した。実験の概略を Fig. 12 に示す。振動板に対する基板の移動量 $\delta = 22$ mm, 振動板の振動振幅 11.2 μm_{p-p} とした。ここでは、基板が傾斜することによるスラスト力を発生させないために、振動板と対抗する位置にカウンターウェイトを載せて基板を水平状態にして実験を行った。振動板と基板の隙間は、いずれも 100 μm になるように振動板の高さ方向の位置を調整した。実験の結果、スラスト力は、三種類のガラス基板に対していずれも 1.8 mN となった。これより、本研究で取り扱う基板厚さの範囲では、基板端面に作用する空気の慣性による負圧の影響は無視できることが分かった。

5 スラスト力向上振動板の設計

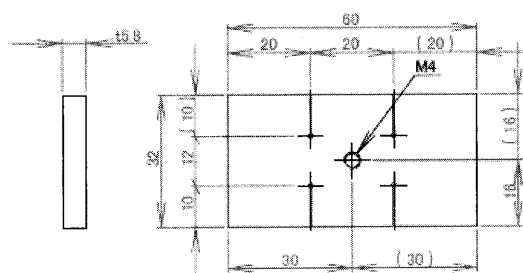
前章までに、振動板の振幅を増やすことでスラスト力向上が期待できることがわかった。しかし、振幅を大きくするために振動子への印加電圧振幅を大きくすることは、振動系の発熱、熱膨張による共振周波数ドリフトや応力過大による振動板の破損などに原因となる。そこで、ここでは、基板を下方へ押しつけるスクイーズ応力の作用面積を増やすことにより、スラスト力を向上させる。ここでは前章までの振動板に比べて作用面積が三倍となり、スラスト力も三倍となる振動板の設計を目標とする。CAE による振動モード解析の結果を Fig. 11 に示す。駆動周波数近傍において幅方向の曲げモードが励振されるのを防ぐために、スリットを設けて振動状態を独立させた。

5.1 振動振幅特性の比較

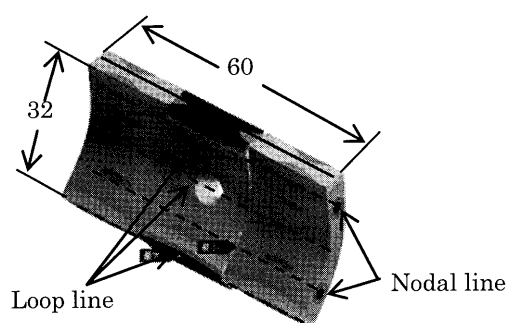
前章までの振動板と比較するために、印加電圧 200 V_{p-p} , 駆動周波数が 28 kHz における振動振幅の分布をレーザドップラー振動計で測定した結果を Fig. 11 に示す。前章までの振動板と同様に、X 軸方向に 1 次曲げモードを有し、両端と中央部は腹となり、そして、8 mm と 24 mm 付近が振動の節となることを確認できた。ただし、最大振動振幅は従来振動板の 70% 程度となった。

5.2 スラスト力特性の比較

実験条件として、振動子への印加電圧を 600 V_{p-p} , 静



(a) Dimension.



(b) Modal analysis at 27.6 kHz.

Fig. 11 New oscillating plate.

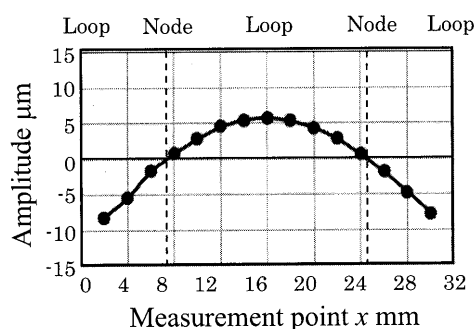


Fig. 12 Variation of amplitude of oscillation.

圧テーブルに流入する空気流量を 20 l/min, 振動板と静圧テーブル上面の隙間を 1.1 mm とし, 最大スラスト力を測定し, 振動板の比較を行った。その結果, 前章までの幅 20 mm の振動板での最大スラスト力は 2.8 mN であったのに対し, 作用面積を 3 倍にした振動板は 3.8 mN となった。これより, 最大スラスト力が 1.3 倍程度向上したが, 作用面積に比例しなかった。Fig. 12 その原因として, 振動振幅の低下や幅が広がったことによるスクイーズ圧力の低下が考えられる。

6 結 言

空気静圧力と超音波たわみ定在波振動の組み合わせにより基板に非接触で与えるスラスト力について,

実験的に検証した。

- (1) スラスト力が基板と振動板のオーバーラップ量によって変化し, その変化は振動板の振動振幅分布に関係していた。オーバーラップ量が 4 ~ 6 mm の範囲で, 最大スラスト力は約 3 mN であった。
- (2) スラスト力は, 振動振幅に比例して増加することがわかった。
- (3) 厚さの異なるガラス基板のスラスト力の比較実験から, スラスト力は基板端面の負圧からの影響は受けていないことがわかった。
- (4) 作用面積を増やすことにより, スラスト力向上振動板の設計を試みた結果, スラスト力を 1.3 倍に向上できた。

謝辞

本研究の一部は, 関東経済産業局 平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業シーズ発掘試験の援助を受けて行われた。

(2011 年 4 月 1 日受付, 2011 年 9 月 5 日再受付)

参考文献

- [1] 山下典理男, 山本晃生, 樋口俊郎, 保井秀彦, 400 mm シリコンウェハの非接触静電浮上, 精密工学会誌 Vol. 71, No. 3, pp. 342-346, 2005.
- [2] 橋本芳樹, 小池義和, 上羽貞行, 音波浮揚を利用した非接触物質搬送, 信学技報, US93-67, p. 25, 1993.
- [3] 磯部浩已, 超音波音響粘性力と空気静圧を組み合わせた非接触基板搬送路(第一報)-非接触ガイド機能の開発-, 精密工学会, Vol. 77, No.4, pp. 433-437, 2011.
- [4] 渡邊 拓, 磯部浩已, 超音波振動を利用した非接触ハンドリング装置によるフラットパネルの搬送(第3報)-基板に作用する力の釣り合いを考慮した把持力に関する数値解析-2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 841-842, 2010.
- [5] H.Takada, S.Kamigaichi and H.Miura, Characteristics of Squeeze Air Film Between Nonparallel Plates, Journal of Lubrication Technology, Vol. 105 January, 1983.
- [6] 小野京右, 圧縮性スクイーズ膜に関する基礎的研究、潤滑, Vol. 29, No. 9, p. 589, 1976.
- [7] 吉本成香, 山崎友美, 戸田和之, 宮武正明, 超音波振動を利用した非接触チャックに関する研究(浮上物体に加わる保持力の発生要因について), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 73, No. 728, p. 1208, 2007.