

# 圧電式センサを使用した 半導体製造プロセスにおける動的力の測定

## 概要

AI、5G、IoT、ADAS、AR/VR などの新しいアプリケーションは、半導体業界に様々な成長機会を生み出しています。こうした技術の採用が、パフォーマンスの向上に対する要求につながっています。業界では、微細化技術と先端パッケージング (AP) の利点を生かし、小型化と多機能化を同時に実現しようとしており、生産プロセスもますます複雑になっています。

半導体技術の進歩とデバイスの複雑化が進み、半導体パッケージングプロセスの監視・制御に対する要求が高まっています。プロセスの最適化は高い信頼性の前提条件となるもので、適切な材料を選択し、重要なプロセスパラメータを制御することで実現できます。現在、光学式センサと変位センサは電気的試験と共に、チップ検査とパッケージングプロセスの監視・制御に最も広く使用されている方法となっています。しかし、パッケージングプロセスの品質と歩留まりを維持し、さらに向上させるためには、プロセスを監視し、不良品を識別する方法を改善していく必要があります。

力は、デバイスの不具合を引き起こす物理量であるため、従来の測定方法では測定できない場合があるものの、ボンディング、ピックアンドプレース、封止成形などの製造プロセスの制御・監視においても同様に重要な役割を果たします。

動的力の圧電式測定技術を活用すれば、関与する力が弱い場合でも、高い分解能で力を監視・制御することが可能になります。早い段階で不良品を検出し、エラーを回避できるようになるため、半導体装置メーカーはより高度で正確な機械性能を実現できます。また、半導体業界の製造・パッケージング関連企業は、プロセスの見える化の改善、パフォーマンスの向上、品質管理コストの削減、プロセスデータのトレーサビリティなどのメリットを享受できます。

## 著者

### Robert Hillinger

Kistler Instrumente AG  
8408 Winterthur, Switzerland,  
robert.hillinger@kistler.com

## 目次

1. はじめに	2
2. 水晶圧電式力測定	3
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用	8
4. 結論	9

## 謝辞

サポートとインスピレーションを提供してくださった Kistler Instrumente AG の Matthias Giese、Bernd Rueeck、Felix Meier、Stefan Affeltranger、Stefan Schäfer 各氏に感謝の意を表します。

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

# 1. はじめに

現在、光学式センサと変位センサは電氣的試験と共に、半導体製造プロセスを監視・制御し、製品の品質を確保するために最も広く使用されている方法となっています。しかし、こうした従来型の測定方法では、プロセスを制御して高品質な製品を製造するために非常に重要なパラメータである機械的応力を検出することはできません。荷重は、ウェハの研削、研磨、CMP、ダイシング、剥離、ハンドリングなどのフロントエンドプロセスにおいて重要な要素であるだけでなく、リードフレームのスタンピング加工、ダイボンディング、ワイヤボンディング、フリップチップ、ウェハボンディング、熱圧着、焼結、ダイ選別、封止成形などのバックエンドプロセスに加えて、引張強度テストとテストハンドラを使用した選別、テーピング、テストにおいても重要となります。機械的応力などのプロセス力のばらつきは、上記すべてのアプリケーションで品質上の問題を引き起こす可能性があります。

あらゆる不具合に言えることですが、予防は最善のアプローチです。力を測定することで、プロセスの見える化、より詳細な監視、より厳密なプロセス制御が可能になり、工具の摩耗、材料の変更や挙動の変化、さらに半導体製造プロセスにおける機能不良によって引き起こされる機械的応力の過不足を回避できるようになります。

不良の種類：	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 目に見えない損傷</li> <li>● ダイクラック</li> </ul>
原因：	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 工具の摩耗</li> <li>● 反り</li> <li>● 材料の変更や挙動の変化</li> <li>● 設備の機能不良</li> </ul>
力測定により、次のことが可能：	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 工具の摩耗の評価・最適化</li> <li>● 様々な材料タイプの材料挙動と加工性の把握</li> <li>● 機械設備の把握・最適化</li> <li>● 力信号と特定の製品品質パラメータの関連付け</li> <li>● 力信号に基づく適応ループ制御による機械 / プロセスの制御</li> </ul>

表 1: プロセス力のばらつきの影響

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

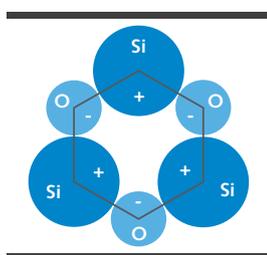
## 2. 水晶圧電式力測定

### 2.1 圧電効果

この技術は、機械的負荷に応じて電荷信号を生成する水晶などの圧電 (PE) 材料をベースとしています。

圧電式センサは、様々な方法で機械に組込むことができます。作用する力の方向と水晶の結晶軸に対する方向に応じて、圧電効果は縦方向 (力の方向)、(力に対して) 横方向またはせん断方向に発生します。圧電式力センサは 0 ~ 1200kN の範囲に対応できるように設計されており、剛性が高いため固有振動数が高くなります。このため、急激な力の変化にも非常に良好に反応できるだけでなく、測定可能な範囲も広がります。

無荷重状態の水晶



荷重をかけた水晶

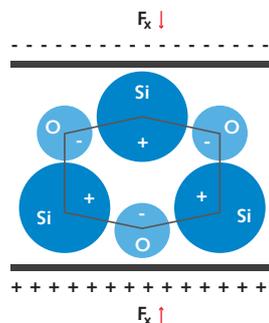


図 1: 縦方向の圧電効果の原理

図 2 に示すように、ピコクーロン単位の電荷変位はニュートン単位の印加力に直線的に比例します。この直線性により、様々な桁 (0 ~ 10N、0 ~ 100N、0 ~ 100kN) での測定が可能です。感度は、力と生成される電荷 (校正によって計算) の比率です。これは産業用チャージアンプを介してアナログ信号 (0 ~ 10V など) やデジタル信号に変換できます。水晶は剛性が高いため、測定のばらつきは非常に小さくなります。

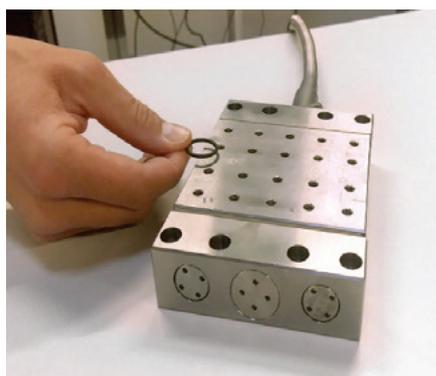


図 3: 力と電荷 (単位: pC)

図 3 に示す実験は、最大 10kN の測定範囲で、圧電式センサの上に O リングをセットして実施しました。図 4 に示す測定結果から、関与する力が非常に小さい場合でも、圧電式センサはわずかな力の変化を検出できていることがわかります。

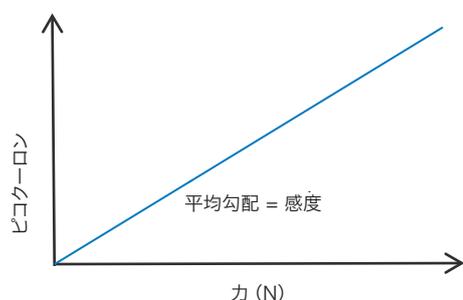


図 2: 力と電荷 (単位: pC)

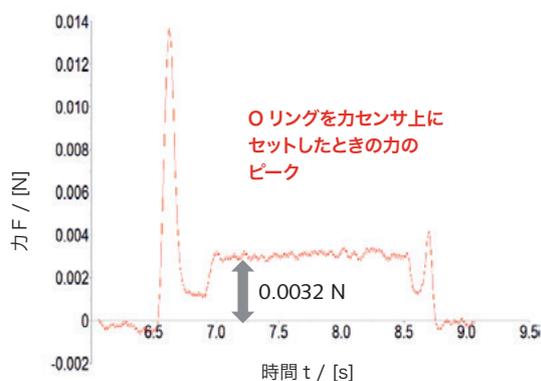


図 4: センサが O リングからの衝撃力を感じ

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

## 2.2 力測定方法の比較

一般的な力センサの多くは、弾性要素またはバネ要素に基づいています。例えば歪ゲージセンサは、金属の電気抵抗変化を利用して静的 / 動的プロセスの力を測定するセンサです。その動作は、ワイヤが伸縮する時にワイヤに加わる歪みに比例してワイヤの電気抵抗が変化するという物理効果に基づいています。そして、高感度を実現するには変形が不可欠です。表 2 は、圧電技術と歪ゲージ技術の主な特徴について、半導体プロセスの要件に関連して比較したものです。

モータの電流は、力の測定に広く使用されるもう 1 つの方法の基礎となります。例えばこの方法でアクチュエータにかかる力を決定する場合、モータの入力電流に基づいて力の値を計算します。ただし、モータの電流をもとに力を計算する場合は、電力損失や機械の様々な動作モードにより、誤差が比較的大きくなったり、測定の不確かさが生じたりすることがあります。とはいえ、精度要件が低く、アプリケーションが適切であれば、この技術はコスト効率の優れたソリューションとなります。

## 2.3 圧電式測定システム

図 5 は、産業用測定システムを示したものです。圧電式センサが力を測定し、チャージアンプが変換処理を行い、測定された力に等しい電気信号をプログラマブルロジックコントローラ (PLC) や産業用 PC に送信します。



図 5: チャージアンプとプログラマブルロジックコントローラを組合わせた圧電式力センサ

プロセス監視用ハードウェア / ソフトウェアを活用し、波形 (力 / 時間または変位) に基づいて製造ステップの品質を確認・評価することもできます。また、波形評価を個々の監視タスクに適応させるために判定項目 (EO) を使用できます。このアプローチにより、製造ステップ全体を確認し、部品の良否を判断できるようになります。

### 2.3.1 圧電式センサの選択

圧電効果は、1 つまたは複数の力成分 (x、y、z) を測定するために使用されます。1 成分力センサとプレスフォースセンサは、半導体アプリケーションで広く使用されています。特定のアプリケーション要件と利用できる取付けスペースに応じて、製品の選択、取付

主な特徴	圧電式	歪ゲージ
非常に動的な測定	✓	✓ キャリア材料の剛性による制限あり
微小な力の変動の測定	✓	✓ 測定範囲が固定されているため大幅な制限あり
センサのコンパクトさ	✓	✓ より多くのスペースが必要
静的測定	✓ 一定期間では可能	✓
温度の影響	✓ 温度耐性が高い	✓ 温度変化を補正しやすい
精度 - 直線性 - ヒステリシス	✓	✓ キャリア材料の特性による制限あり
長寿命	✓	✓ クリープ効果により寿命が短くなる

表 2: 力測定機能の比較

けオプション、カスタマイズソリューションについて圧電式センサのサプライヤーに確認し、アプリケーションに最も適したセンサを選択してください。

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

1 成分力センサを設置する場合、高い剛性を実現するために常に機械的にプリロードする必要があります。これにより広い周波数範囲を確保できます。プリロードは、使用可能な測定範囲の20%～70%です。

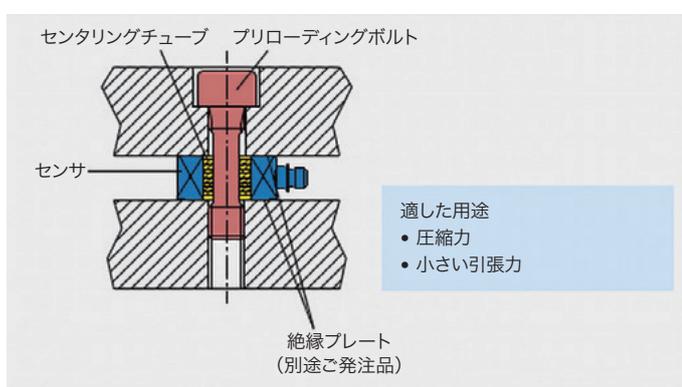


図6: プリローディングボルトを使用した取付け

図7cに示すプレスフォースセンサのようなプリロード済センサは取付けが容易で、再校正は不要です。図8は、カスタマイズしたプリローディングキットと力センサを組合わせて使用し、センサに真空を通して例を示しています。

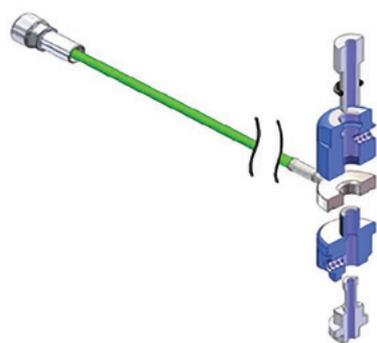


図7: お客様固有のセンサ

圧電式センサは精密機器であるため、正確に設置して取付けた場合にのみその精度を引き出し、維持することができます。圧電式センサが備える剛性と高い固有周波数を活かして非常に動的な力を測定できるよう、取付け面は平らで剛性があり研磨されていること、そして力が均一に分散されることが必要となります。

<p>a</p>	<p><b>1 成分力センサ(ワッシャ型)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 全体の高さが低いため、限られたスペースでの設置に最適</li> <li>• 力センサを組込んだ経験のあるお客様向けの低コストのオプション</li> <li>• 設置：ネジまたは素子を使用したプリロードが必要</li> <li>• 正確な測定を保證するために設置後に再校正を実施</li> </ul>
<p>b</p>	<p><b>1 成分力センサ - 水晶圧電式フォースリンク(プリロード済)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• センサがすでにプリロードされているため簡単に設置可能</li> <li>• 再校正が不要なのですぐに測定可能</li> <li>• お客様固有の仕様にも対応可能</li> <li>• 寸法</li> </ul>
<p>c</p>	<p><b>水晶圧電式 1 成分フォースリンク、プレスフォースセンサ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• コンパクトサイズ</li> <li>• フォースリンクがプリロードされているため簡単に設置可能</li> <li>• 再校正が不要なのですぐに測定可能</li> <li>• 柔軟に取付け可能</li> </ul>

図8: 半導体アプリケーションに使用される各種センサ

### 2.3.2 チャージアンプの選択

測定システムにはチャージアンプも含まれます。チャージアンプはセンサからの電荷信号をそれに比例した電圧、電流またはデジタル信号に変換します。アプリケーションに適したチャージアンプの選び方は、様々な基準によって異なります。主な選択基準は次のとおりです。

- チャンネル数
- 測定範囲
- 測定タイプ(静的 / 動的)
- アナログまたはデジタル信号出力
- 周波数範囲

### 2.3.3 ケーブルの選択

圧電式力センサとチャージアンプは高絶縁ケーブルで接続する必要があります。屈曲時に摩擦電荷をほぼ発生しない低ノイズ同軸ケーブルを使用することもできます。

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

## 2.4 測定時に考慮すべき事項

### 2.4.1 分解能

分解能は、測定システムが測定結果の特性における微小な変化を検出し、忠実に示す能力のことです。圧電式センサはその性質上、高い分解能を実現します。AD コンバータのノイズと、PLC および / または産業用 PC でのリアルタイムの後処理計算が主な制限事項となります。1N のような低い力では測定がより難しくなりますが、産業用アプリケーションでも 0.01N 未満の分解能を達成することが可能です。

### 2.4.2 繰返し精度

繰返し精度は「連続する測定の精度」と定義できます。ほぼ変化しない条件下で連続して行った複数の測定値の間のばらつきのことです。この要件は、荷重負荷を精度よく維持する必要のある、反復される同一の製造プロセスにおいて、より重要となります。圧電式測定システムには、各測定サイクル <オペレート> の前に <リセット> で電荷を放電できるため、ゼロ点を再決定しやすいというメリットがあります。このため、ドリフトや時間の経過による変化（温度など）によって引き起こされる外部の影響によるエラーを基本的に回避できます。産業向けの圧電式測定システムの場合、フルスケール出力の 0.1% 未満の繰返し精度が想定できます。

### 2.4.3 測定結果に影響を与える要因

圧電式力測定が半導体製造プロセスで用いられる効果的な測定方法であることは長年にわたり証明されています。とはいえ、最良の測定システムであっても、測定結果に影響を与える要因は存在します。これらの要因は、表 3 に示すように、測定システム、使用環境・設置条件、データ処理という 3 つのカテゴリに分類できます。

1. 測定システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 感度</li> <li>• ヒステリシス</li> <li>• 直線性</li> <li>• 分解能</li> <li>• 繰返し精度</li> <li>• ケーブル絶縁</li> <li>• ドリフト</li> <li>• リセット / オペレートのジャンプ</li> <li>• アンプのノイズ</li> <li>• 信号伝搬遅延</li> <li>• 温度</li> </ul>
2. 使用環境・設置条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 温度</li> <li>• 湿度</li> <li>• EMC</li> <li>• 機械振動</li> <li>• ケーブル(長さ、曲げ、動き)</li> <li>• 力の分流</li> <li>• 力の伝達</li> <li>• 同レベルの生産性</li> <li>• 曲げモーメント</li> <li>• アンプのウォームアップ時間</li> <li>• エイリアシング効果(サンプリングレート)</li> </ul>
3. データ処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 使用するフィルタ</li> <li>• 丸め誤差</li> <li>• アナログ入力カード、PLC、産業用 PC などのデータ収集機器の精度</li> </ul>

表 3: 測定結果に影響を与える要因

表 3 には、圧電式測定システムを使用する際に考慮すべき特に重要な 2 つの要素（ドリフト、リセット / オペレートのジャンプ）が含まれます。測定される力に関係なく、 $\pm 0.05 \text{ pC/s}$  のドリフトが発生すると想定できます。つまり、測定の期間を考慮する必要があります。必要に応じて補正を検討する必要があります。 $\pm 2 \text{ pC}$  のリセット / オペレートのジャンプにも同じことが当てはまり、これを（評価システムなどによって）減算することができます。

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

#### 2.4.4 良好な測定結果を得るためのベストプラクティス

表 4 に示した適切な測定のためのプラクティスは、適切な測定システムを選択するのに役立ちます。この表には、半導体プロセスの用途に力測定を組込むためのアドバイスも含まれています。

- 測定装置のサプライヤーに問い合わせ、アプリケーションに関するアドバイスを求める
- 測定システムの選択・設計・設置については測定装置のサプライヤーの推奨に従う
- 測定中の加速を避ける、またはその影響を克服するための対策をとる
- 測定中の温度変化を避ける、またはその影響を克服するための対策をとる
- ケーブルの絶縁と配線を適切に行う
- リセット / オペレートの最適な測定サイクルを定義する
- maXYmos 評価システムまたは PLC を使用してリセット / オペレートのジャンプを補正する
- 絶対測定の代わりに相対測定の使用を検討する(圧電式センサの優れた繰返し精度を活かす)
- 部分範囲校正を使用する
- エイリアシング効果を考慮する
- どのセンサが最適か尋ねる
- 測定の不確かさの計算にはセンサとアンプのテスト証明書を使用する
- 認定ラボ(DAKKS など) に校正を依頼する
- 絶対測定精度を高めるために現場校正を行う

表 4: 適切な測定のためのプラクティス

#### 2.4.5 インライン測定

インライン測定は、半導体装置の機械構造体に力センサを取付けて実施します。チャージアンプとプロセス評価ユニットを組み合わせると、以下を実現できるようになります。

- 重要な物理的変数としての力に基づいた監視・制御
- 力の記録と製品の合否判定
- 収集された工程データに基づくプロセスの最適化
- 製造品目ごとのトレーサビリティ



図 9: 測定システムと評価システム

統合インライン測定により製造ステップ全体や製品で力を測定でき、大量生産品の自動検査を実現できるようになります。

#### 2.4.6 オフライン測定 - 機械の力の健全性のチェック

機械軸の力の値を定期的にチェックする場合は、オフライン測定を手動で実行します。この方法で力測定を行う際には、図 10 に示すように、力センサが機械構造体に組み込まれた校正キットを使用します。反りを測定するには、工作機械の平行度を測定できるように、機械構造体に少なくとも 3 個の力センサを取付ける必要があります。

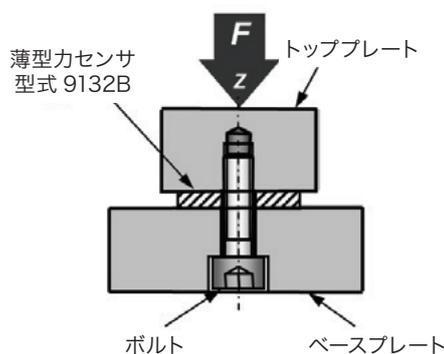


図 10: 機械構造体へのセンサの組み込み

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
4. 結論

## 3. 半導体プロセスにおける力測定の応用

半導体業界全体で、圧電式力測定技術を用いているアプリケーションの数は着実に増加しています。この技術はこれまで、主に機械のチェック（校正）や高精度のワイヤボンディング、ウェハ研削・研磨に使用されてきました。しかし圧電技術は現在、多くの半導体製造プロセスにおいて重要な物理的変数である力を監視・制御するために広く利用されています。表5は、様々な半導体アプリケーションと、

それらに圧電式力測定技術を使用することで得られる特長、利点と付加価値を示したものです。

	製造プロセスのステップ	力測定の組み込み		
		特長	利点	付加価値
フロントエンド	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 研磨</li> <li>• 研削加工</li> <li>• CMP</li> <li>• ダイシング</li> <li>• ラミネーション</li> <li>• デラミネーション</li> <li>• ハンドリング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ウェハ研磨ヘッドなどによるダウンフォースの精度と制御の向上</li> <li>• ラミネーションおよびピックアンドブレース時にかかる力の監視</li> <li>• 重要な生産工程における力のトレーサビリティ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 平坦度の評価や過負荷の検出ができる</li> <li>• 機械部品の摩耗を特定できる</li> <li>• ウェハ研磨、研削、洗浄、ダイシング中に一貫したパフォーマンスを確保できる</li> <li>• ウェハの不良率を低減できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 機械性能の向上（速度や精度など）</li> <li>• 品質向上&amp;コスト削減</li> </ul>
バックエンド	<ul style="list-style-type: none"> <li>• リードフレームのスタンピング加工</li> <li>• ダイボンダ</li> <li>• ワイヤボンダ</li> <li>• フリップチップ</li> <li>• ウェハボンディング</li> <li>• 熱圧着</li> <li>• 焼結</li> <li>• ダイ選別</li> <li>• 封止成形</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 力測定を使用したフルループボンディングヘッド制御によるボンディング精度の向上</li> <li>• ボンディングやピックアンドブレースプロセス中などにかかる力の監視</li> <li>• 型内圧の監視</li> <li>• 重要な生産工程における力のトレーサビリティ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ボンディングおよびピックアンドブレース中に、重要な物理的変数である力を許容範囲内に維持できる</li> <li>• 平坦度、平行度をチェックできる</li> <li>• 機械部品の摩耗を特定できる</li> <li>• ダイの不良率を低減できる</li> </ul>	
検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 引張強度検査装置</li> <li>• 選別とテーピング</li> <li>• テストハンドラ（ピックアンドブレース、ターレット）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 接合力のチェック</li> <li>• ピックアンドブレースプロセス中の力の監視</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不良品を特定できる</li> <li>• プロセスの安全性を確保できる</li> </ul>	

表 5: 力測定が必要となる半導体製造プロセス

1. はじめに
2. 水晶圧電式力測定
3. 半導体プロセスにおける力測定の応用
- 4. 結論**

## 4. 結論

半導体製造プロセスにおける現在の複雑さは今後さらに増していくと予想されており、ウェハ、パッケージング、検査プロセスの品質向上と歩留まり改善を実現する新たな方法が求められています。圧電式動的力測定技術は、半導体プロセスでの測定の要件を最適な方法で満たす次のような様々な利点をもたらします。

- 非常に動的な測定に対応できる
- 微小な力でも高い分解能と繰返し精度を実現
- 高い剛性 – 摩耗なし – 長寿命
- 小型のセンサ

また、力測定を通じて機械的応力と工程のばらつきを可視化でき、不良品を特定しやすくなります。

このアプローチは以下に役立ちます。

- より高い品質の実現(不良率の低減)
- 機械性能の向上(速度や精度など)
- 重要なプロセス変数である力の測定データを活用したプロセスの改善

2024 年 11 月作成

## 日本キスラー合同会社

本社：〒 222-0033  
神奈川県横浜市港北区  
新横浜 3-20-8  
ベネックス S-3 2F  
(045) 471-8620

キスラーグループの製品は、様々な知的財産権によって保護されています。詳細については [www.kistler.com](http://www.kistler.com) をご覧ください。キスラーグループには、キスラーホールディング AG と、ヨーロッパ、アジア、南北アメリカ、オーストラリアのすべての子会社が含まれます。

キスラーグループのお近くの拠点は URL から検索いただけます：  
[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

# KISTLER

measure. analyze. innovate.