## feature

振動制御

# 空間分解能の限界を拡張する 効果的な振動制御

シルビア・タン

科学的、工学的処理や製品のサイズが縮小するにつれ、高パフォーマンス、振動フリーなプラットフォームへの需要が高まっている。シリコンフォトニクス、マイクロマシニング、超分解能顕微鏡という特殊分野において、分野特有の振動制御プラットフォームの必要性が脚光を浴びている。

技術的な進歩によって、極小の対象物を観察、操作、製造できるようになった。これらの対象物やサイズの例として、ナノメートルスケールの導波構造、生きた細胞、タンパク質(分子足場)がある。このようなミニチュアな規模における研究と技術では、振動制御プラットフォームを含む、全システムのデザインにおける精度かつ許容値の進展が必要とされる。

製造や試験において、超高分解能を必要とする3つのチャレンジングな分野、すなわちシリコンフォトニクス、マイクロマシニング、超分解能顕微鏡では、最終製品や加工で障害となりうる振動を消滅させるようデザインされた振動制御プラットフォームが要求される。

### シリコンフォトニクス: 空気圧式と同調ダンパー

シリコンフォトニクスとは、光学プラットフォームとしてシリコン(Si)を使うフォトニクスシステムの分野である。従来のフォトニクスの装置とは異なり、シリコンフォトニクスの部品は非常に多層で小さく、ナノメートルスケールの分解能でチップ上で製造される。光コネクタ、リング共振器、フィルタ、モジュレータなどのデバイスは、様々な種類の高分解能なリソグラフィ手法

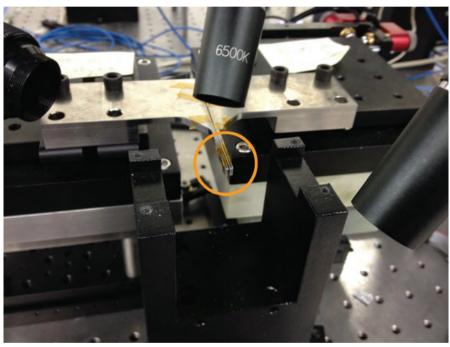


図1 フィンガープローブに設置される光ファイバ(円)。複数のファイバの整列が100nm以下の精度で可能になる。

を使用して製造され、その後は厳しい 物理的許容値の下で試験され、キャラ クタリゼーションされる。

他の工学的キャラクタリゼーションと比べ、試験装置や光源はしばしば同一のチップに位置していない。これは、チップから、またはチップへの光を正確に、散乱なしに誘導するためであり、チップの機能性を適切に評価できる。もし超小型な導波デバイスがチップ上で製造されれば、厳しい空間分解能を維持するファイバ結合が必要となる。

「振動制御はわれわれにとって非常に 重要だ」と、シリコンフォトニクスの チップデザインやソリューションのリ ーディングプロバイダーの一社である 米マコム社 (MACOM)のR&D統合フ ォトニクス・ソリューションズのダイレ クターであるリッチ・グルジボウスキ氏 (Rich Grzybowski)は述べる。「分解 能が約100nmまで下がると、試験装置 に影響する震動源が多くなる」。

マコム社の試験装置のいくつかには、格子結合器にファイバアレイが面

放線に光結合したものが含まれている。この装置では、通常は空間許容値が $1\mu$ mであるため、分解能や振動制御の必要性は致命的ではない。

他の分野では、チップの端で様々なテーパーやファイバに結合するエッジ結合をマコム社では使用する。このエッジ結合が、10nmから約100nmの要素によって許容値を減らす。試験中のこの側面において、試験アレイにごく接近している状態で、床面、卓上器の装置のスタック、人々の歩行や会話による微小な振動を減らすことが、全ての結合効率を維持するために非常に重要だ(図1)。

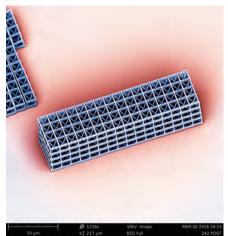
この分野向けに、マコム社のチームは米ニューポート社(Newport)の空気圧式除振装置(加圧下で空気またはガスを必要とする振動絶縁装置)S-2000Aと同調質量ダンパー(TDM)のテーブルトップST-UT2を使用する。

ニューポート社のS-2000Aのような空気圧式除振装置には巨大な体積のチャンバがあり、床の振動を除去するために正確な自動再水平機能(0.25mm)をもつ。10Hzでは、床からの振動の約99パーセントが除去される。

従来のゴム・エラストマ除振装置や 物理的なスプリング除振装置という他 の選択肢では、このタイプの結合分野 で必要とされる空間分解能を得るため の、十分な除振効率に到達できない。

空気圧式除振装置では2Hzで使用するのに対して、ゴム・エラストマ除振装置では素材自身を振動吸収材として使用しており、25Hz以上で除振する。ゴム・エラストマ除振装置による振動減少量では、サブミクロンの配置要求には一般に十分ではない。

スプリング除振装置は騒音、衝撃、 振動の伝達を減少させるために機械分 野で広く使われている。ニューポート



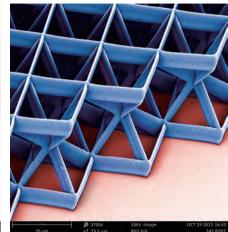


図2 スマートテーブル上で作製されたミニチュアな格子構造の走査型電子顕微鏡 (SEM)色付けイメージで示す。

社のVIBe除振装置のようなものは、特殊なデザインによって8Hzあたりの低さで作動できる。しかしながら、交通や建物の揺れに囲まれることで生じる低周波数の振動によく動作する空気圧式除振装置と比較すると、VIBeの物理的な除振装置では8Hz以下を除振せず、通常のシリコンフォトニクス分野で必要となる空間分解能を維持するのに十分ではない。

テーブルトップでは、卓上の振動によって生じるレーザビームの照準ミスを防ぐために、強く固定され、正確なTMDがある光学テーブルが使われる。TMDとは、最も効率がよいパッシブダンピング(除振)手法で、主要な共振モードの周波数のダンピングを集約させる。

ニューポート社のTMD技術(米国特許8857585)では油を使わず、代わりに特許を取得した質量スプリング構造を用いて、より高いダンピング性能、より正確で簡単な周波数同調を実現する。他の広帯域なダンピング手法と比較すると、TMDはダンピング性能を10倍以上に向上させる。広帯域のダンピングテーブルは、広い周波数帯にわたって中等度の振動エネルギー量を吸収または消失させるが、特定のテーブル共振

を標的としないため、1µm以下の安定性を要する分野では適さない。これらのTMDテーブルによって、マコム社はフォトニック集積回路(PIC)やL-PICブランドの製品を開発、試験するときに必要な光学試験台を構成できる。

# マイクロ加工: 空気圧式とアクティブダンピング

分解能の限界を押し上げる他の分野に、レーザで直接書き込むマイクロ加工・マイクロマシニングがある。超高速のレーザシステムが開発されたことで、高分解能で3次元(3D)のマイクロ加工技術が新興しており、より小型デバイスが作られている。

ニューポート社の技術・アプリケーションセンター (TAC)では、主要サイズが約100nmでトポロジー制約にとらわれない3D構造物を加工するために、科学者は二光子重合 (TPP)を用いる。3D加工処理では超高レベルの安定性と精度が求められるため、この種の分野では振動制御が欠かせない(図2)。

「全てのシステムの安定性で重要な部分は、振動制御プラットフォームだ」と、TACスタッフの科学者トマーゾ・バルダッチー二氏(Tommaso Baldacchini)

## • feature 振動制御

は話す。「加工処理中の振動を制御することで、明確に定義したエッジや高品質な構造物を作り出せる」。光感受性の素材でレーザビームの焦点を集めるために開口数の高い対物レンズを使うときや、重合の強度閾値をちょうど超えるレーザ強度で動作させるととに、100nmの半径寸法のTPPボクセル(3Dの体積ピクセル)が容易に形成される。自身を支えることができる連続高分子網目を形成する複雑な3Dマイクロ構造物は、これらのボクセルを慎重に重ねることで作られる(図3)。

あらかじめ決められた方法で重合されたボクセルの重複を可能にした書き込みは、コンピュータ制御のステージまたはガルバノミラーを使うことで実現する。それぞれの場合、振動制御はTPP処理で要求される精度レベルを保証するのに欠かせない。これは、微小な光学部品を合成するためにTPPを使う場合に、特に当てはまる。なぜなら、表面の粗さや素材の密度均一性を正確に制御しなければならないためだ。

ここで、複雑なミニチュア構造を作るために、空気圧式サポートとニューポート社のアクティブ除振台スマートテーブルが欠かせない。光学テーブル

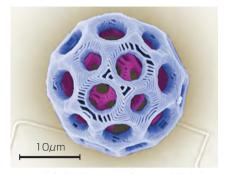


図3 自身を支えることができる連続高分子網目を形成するために、ポリマーのボクセルを慎重に重ねることで作られた3Dマイクロ構造物のSEM色付けイメージ。

であるスマートテーブルでは振動センサを使い、卓上の振動を感知、そして内部アクチュエータを用いてリアルタイムにダンピングする。パッシブダンピングテーブル(広帯域なダンピングテーブルや同調ダンピングテーブル)と比較して、アクティブダンピングデーブルでは、40~550Hzのより広い周波数帯で、より速く反応し、より正確にリアルタイムに除振する。

アクティブダンピングは、広い周波 数帯で全てのシングル共振ピークを減 少させるため、パッシブダンピングよ りもパワフルだ。極細の分解能の移動 ステージにおけるレーザ直接書き込み では、SmartTable はより速い修正時間 で、より効率的なダンピング性能をもつ。このシステムは、ワンタッチでペイロード分散に対する共鳴ピークを見つけて自動で無効にする適切な同調性能もあり、卓上の周波数のモニタリングや振動データのストリーミング、収集性能もある。

#### 超分解能顕微鏡:アクティブ除振

1873年、エルンスト・アッベ氏(Ernst Abbe)は、光回折がどのようにして光 学顕微鏡の分解能を制限するかを記述 する式を導いた。より高い分解能を得 るため、この物理的障壁をどう避ける かを革新的な科学者が研究し始めるま で、この制限は約1世紀にわたって立 ちはだかった。

2014年、回析限界を回避したとしてエリック・ベツィグ氏(Eric Betzig)、シュテファン・W・ヘル氏(Stefan W. Hell)、ウィリアム・モーナー氏(William Moerner)にノーベル化学賞が授与された。彼らの成果により、光学顕微鏡は今やナノ世界をさらなる高分解能でのぞき込むことができる。

除振やダンピングは、ナノメートルスケールの顕微鏡に必須である。イメージングシステムにおける共通の震動源

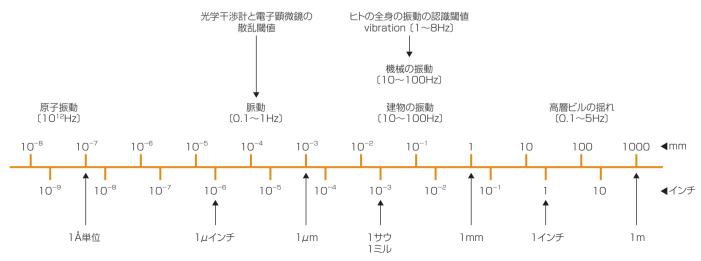


図4 広いスペクトルにわたって様々な異なる震動源が認められる。



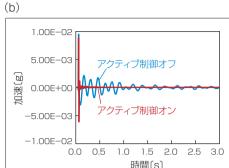


図5 アクティブ除振作業台 Guardian (a)は6 自由度のアクティブ除振装置、かつ進歩した様式の除振卓上という特徴をもち、10kHzのサーボ速度で、1.5Hzの振動を10倍抑制する(b)。

には、機械源と音響源が含まれる。特に、セントラル冷暖房ユニット(HVACシステム)、低温インキュベータ、遠心分離器、人々の会話や歩行、建物の揺れ、近隣道路の交通が、弊害となる振動としてよく観察される(図4)。これらの震動源の多くが、実験中に同一の部屋で存在することはないだろうから、検出して取り除くことが困難だ。

環境によって起きる振動を減少させるために、空気圧式サポートや低コストでフレキシブルな合成高分子の除振パッドを含め、様々な技術が適用されうるが、超分解能イメージングで要求される非常に厳しい安定性(理想的な分解能はしばしば100nm以下である)には、アクティブ除振装置が必要だ(1)。

空気圧式除振法と比べ、アクティブ 除振装置は0.5Hzほどの低さの環境由 来の振動を除振するため、リアルタイ ムに多自由度で振動を感知し、電磁ア クチュエータまたは圧電アクチュエー タを用いてこれらの振動を即座に抑制 する。ニューポート社の新しい作業台 Guardianのようなアクティブ除振システムは、0.5Hz周辺からの振動を除振し、全ての6自由度で非常に高い効率を維持する。

VIBe除振装置の上に乗せると、Guardian内のアクティブモジュールは 1.5Hzの振動を10倍減少させる。このシステムは高精度、低騒音の電磁振動センサ(0.1Hzの低さから感知する)を用いて、サブヘルツ、超低騒音の制御システムへ電気信号を通す。制御システムは、信号へ高性能なフィルタリングと調節を適用する。処理された振動は、その後アクチュエータに送達され、10kHzほどの高さのサーボ機構速度で振動を抑制する。

アクティブ除振によって卓上に届く 振動を大きく減らすことができ、超分 解能イメージを描画するための非常に 安定な土台となる(図5)。作業台表面 のダンピング技術の進歩と組み合わせ て、このような作業台は、将来さらな る高分解能の分野を実現する基礎的な 構成要素として機能するだろう。

### 参考文献

(1) J. Fisher, "Is vibration control really necessary for microscopy," BioPhotonics (Jul/Aug. 2010).

#### 著者紹介

シルビア・タンはニューポート社の振動制御の製品マーケティングマネージャー。 e-mail: sylvia.tan@newport.com URL: www.newport.com

LFWJ

## **在庫品**と **特注品**の オプティクス

設計から試作、そして大量生産まで



Craig Ament 光学コーティングエンジニア 米国本社



完全な設計データを公開



在庫品のパーツを用いて 試作品を素早く構築



特注の組み立てにも対応する 垂直統合された製造資源

