精密位置決めにおける アクティブ除振装置の役割*

Roles of an Active Anti-Vibration Apparatus in Precision Positioning

涌井伸二**
Shinji WAKUI

Key words stepper, scanner, anti-vibration, precision positioning, air-spring, passive, active

1. 緒 言

通称ステッパと言われる半導体露光装置が主力製品であったとき、著者は民間企業の研究所に所属していた。このとき、ステージ2台の速度を同期的に駆動させようとして、位置も精密にコントロールするスキャナが次世代の露光装置になるかもしれない。ついては、このようなメカニカル制御の困難さについて資料を作成してほしいという相談を受けた。適切な数式をちりばめて相談の意向にそった悔恨の記憶がある。しかし、懐疑のスキャナが実際に動いているらしいと聞き、そして現物をみるに及んだときの技術者集団のエネルギーはすさまじい。短期間の内に、スキャナ露光装置は開発から製造の段階に入った。すなわち、ものにしたのである。また、液浸露光に関する公開特許があるとのことでこれを読んだ。原理原則は正しいのだろうが、液浸状態にある半導体ウエーハをどのように高速移動させるのかと思った。足が地に着いていないと噴飯した。しかるに、権威のあるロードマップでは次世代のF₂露光装置で実現すると予測した45nmノードのプロセスを、いまやArF露光装置で達成した。ArF液浸スキャナの登場である。実に恐ろしきは技術者の創意、ねばり、そして熱中である。

これら露光装置の中で、花形のメカニカル機構は半導体ウエーハを搭載して動き回る精密位置決めステージである¹⁾。そして、大型の構造体のふところ奥で、激しくしかも繊細に位置決めするこのステージの性能を確保するために、アクティブ除振装置を備える。構造物支持のために下部に取り付けられており、一見して黒子である。目立たな

い地味な存在で、なくてもよいとも思われる。しかし、性悪な技術者がこの装置の調整状態を故意に崩したとしよう。鏡のように磨かれた定盤上にあつて、壮麗なマイホームほどのお金がかかるステージの優美な疾駆はあっけなく乱される。本稿では、精密位置決めにとっての、このようなアクティブ除振装置の役割を述べる²⁾⁻⁵⁾。

2. 除振装置の役割と構造

2.1 構造

除振装置の機能を実現する支持脚の構造例を図1に示す。同図上段の支持脚は、鉛直方向に空気ばねを備え、これに対する空気供給量をオンオフ制御し、水平方向には中立プレートの両側に機械ばねを対向させて平衡位置を保つというパッシブタイプである。中段のアクティブタイプでは、鉛直および水平方向に空気ばねを、そして各方位の位置と加速度を検出するセンサを備える。これらセンサの出力に基づくフィードバック（以降、FBと略記）によって、各空気ばねの空気供給量を連続的に調整する。下段は磁気軸受を使ったアクティブであり、完全非接触を特徴とする。検査機器の除振に使用されている。これらの中で、精密位置決めの除振装置として現時点ではアクティブが用いられ、なかでも図1中段の採用が多い。このような支持脚を多数台使用して、構造体全体を支持する。

2.2 役割

除振装置の役割は、「除振」の名称が示すように外乱振動を除外することにある。一般的な除振装置には、例えば図2左側のように光学計測など静的な機器が搭載される。この場合、排除すべき振動は床のものだけである。床振動の除振台上への伝達をどれだけ減衰できるかが問題となる。したがって、特に、高価なアクティブを選択するまでもない。パッシブ除振装置を適用しておけば、ほとんどの場合十分である。

しかし、位置決めステージが搭載されている同図右のような場合、床振動に対する「除振」だけでは済まされない。同ステージの加減速連転によって、除振台を含めた構造物は打撃され、かつ駆動反力によって揺さられる。この

*原稿受付 平成18年12月19日

**正会員 東京農工大学大学院（東京都小金井市中町2-24-16）

涌井伸二

1979年信州大学大学院電子工学専攻修了。工学博士。1979年セイコー電子工業入社。磁気軸受の開発に従事。1989年キャノン入社。露光装置の開発に従事。2001年東京農工大学教授。振動制御の研究に従事。編著：「情報システムにおける制御」。

図1 支持脚の構造

図2 アクティブ除振装置の役割

とき、構造体は計測および位置決めの基準であるため、打撃による振動および駆動反力に起因した揺れを抑えなければステージのパフォーマンスは維持できない。つまり、「除振」に加えて「制振」の十分な機能も併せ持つ必要がある。さらに、周辺部から構造体の平衡位置を頼りにして導かれるものがある。そのため、振動に対する素早い制振機能のほかに、平衡位置を維持する定位性も要求される。

3. 露光装置の中の除振装置

市販のアクティブ除振装置と、露光装置の中で使用される同除振装置の差異について説明する。これによって、精

図3 パッシブとアクティブの比較

密位置決めにとってのアクティブ除振装置の特異性を明らかにする。

3.1 パッシブとアクティブの比較

アクティブではセンサの情報に基づいてアクチュエータを制御する。そのため、パッシブよりも優位でなければならないし、そのはずである。何が優位かを、図3の除振率の周波数応答を参照して説明する。まず、同図上段は機械系の素の特性である。共振ピーク以降はロールオフしており、斜線の領域は0 dB以下である。この床振動低減の領域を除振域と称する。しかし、共振ピークを放置したままでは、床振動を増幅するのでこの抑制をはかる。同図左側のパッシブでは粘性要素を付加して共振ピークを抑圧する。このとき、高域折点が低域へ移動するので除振域を狭める。一方、アクティブの場合、共振ピーク抑制のためにスカイフックの減衰を付与する。これを使ったとき、同図右側のように除振域を狭めない特徴がある。

このように、除振率で比較のとき、原理的にはパッシブに対してアクティブの方が優位である。しかし、現実には、床振動を加振源とする除振率の実測を行ったとき、ほとんどの場合、高域折点を明確に視認できない。構造体の高周波振動は高精度の位置決めにとって問題とはなるが、除振率における高域折点の高低を問題視する以前に、ロールオフ特性上には様々な共振ピークの発現がある。これらの対処の方が位置決めにとっては深刻である。つまり、パッシブとアクティブの除振率に関する優劣は、位置決め応用の場面では、位置決め性能の差異には結びつかない。注意すべきは、アクティブの設計に不備があるとき、パッシブよりも性能は簡単に劣化することである。例えば、サーボ形加速度センサのノイズ除去、および同センサ自身の機械共振を抑制するためにローパスフィルタを介している。この折点を低くせざるを得ない場合、すなわち帯域が意外に狭い加速度の検出帯域をさらに狭めてFBのとき、除振率のロールオフ特性はパッシブに比較して劣化する。また、空気ばねへの供給空気量を操作するサーボバルブはトルクモータであり、このインダクタンスは大きい。この遅れを補償しない駆動回路を用いた場合、除振率におけるロールオフ特性はパッシブのそれに比較して膨らむ。すなわち、除振域を狭める。このように、アクチュエータとセン

表1 除振装置の種類, 使用アクチュエータ, そして開発元

種別	アクチュエータ	開発元
パッシブ	空気アクチュエータ	専門メーカー, 露光装置メーカー
	空気アクチュエータ	専門メーカー, 露光装置メーカー
	電磁アクチュエータ	露光装置メーカー, 建設会社
アクティブ	空気+電磁アクチュエータ	露光装置メーカー
	ピエゾアクチュエータ	専門メーカー
	空気+電磁+ピエゾアクチュエータ	建設会社
	電歪アクチュエータ	研究
	磁気軸受アクチュエータ	プラントメーカー+建設会社

サとこれらを使ったコントローラを備えるアクティブでは, 製造工程数を増やし, かつコスト増となるにもかかわらず, 除振率でみるとパッシブと遜色なく, 不適切な設計を行うと劣化を招くことさえある。しからば, 何故そのようなアクティブを使用するのであろうか。それは, 6自由度の姿勢および振動を調整範囲で自在に操作できることにある。位置決めステージが高速移動したとき, 構造体はこの移動方向とともにヨーイングおよびピッチング振動を起こす。これら振動に対して, パッシブでは放置となる。アクティブの場合には積極的に調整が行える。これによって, 位置決め性能は好ましいものとなる。また, 原因と結果の関係が明白な現象に対しては, フィードフォワード(以下, FFと略記)が採用できる。例えば, ステージ移動反力FF⁶⁾や地動FF⁷⁾などがある。前者では, 空気ばねのほかに電磁モータ(例えば, Voice Coil Motor)を装着させて, これに速い振動の強制的な制振を任せる。定常的にも, 空気ばねを使った減衰付与よりも, 電磁モータによる方が高周波域の共振に対してよく減衰がかかる。

3.2 組み立てと実装

表1は除振装置の種類, 使用のアクチュエータ, そして開発元をまとめたものである。

まず, 除振台上の搭載物が静的なもの, 例えば光学計測機器であるとき, ほとんどの場合, パッシブの使用で計測に必要な仕様は満たす。そして, 過去のg線やi線露光装置の時代にあつては, パッシブが使用されていた。しかし, ICのデザインルールの微細化にともないアクティブの採用が主流となっている。3.1節で既述のように, アクティブであることを積極的に活かさねば, 位置決め性能を確保できないからである。

次に, 開発元を参照すると, 除振装置をセットとして開発・販売することを業とする専門メーカー, 半導体工場建屋の設備に付加価値をつけたい建設会社, そして露光装置メーカーの3パターンがある。アクティブ除振装置は機能完結のユニットであり, 専門メーカーが製品を供給している。したがって, これを購入して, 露光装置に組み込めばよいと考えられる。しかし, 露光装置メーカーの場合, 除振装置を構成する空気ばね, 電磁モータ, サーボバルブ, 振動センサなどの要素部品は部品メーカーから購入する。そして, 精密位置決め構造体に組み込む。あるいは, 露光装置用の特別仕様の支持脚ユニットを購入し, 自前でこれを精密位

置決め構造体に組み込む。この全体形状が特異のためである。それは, 専門メーカーが提供する直方体の除振台形状とは明らかに異なる。そして, 構造体の幾何的形狀と素性を踏まえて, 位置決め起因した振動および床振動を排除する設計と調整を行う。最終的には, 良品のICが製造できねばならない。そのため, 露光装置メーカー自身がアクティブ除振装置のコントローラ開発を行い, 精密位置決めを含むトータルの性能を満たすようにしている。

なお, 上述のように, 空気アクチュエータ, VCM, および各種センサを構造体と一体のものとして組み立てる考え方がある。この場合, 構造体の姿勢および振動制御を好適に設計・調整できる余地はある。しかし, 不具合発生時の対応は煩雑になる。一方, 図1の支持脚をユニットとする考え方がある。ユニット単体の試験および品質管理が可能のため, 生産管理のうえでは都合がよい。ユニット単体で空気ばねの破裂や各種センサの不具合などが生じた場合, これを不良品として排除すればよいからである。あるいは構造体に組み込み後の総合検査で不良が発現したときには, ユニット交換の処置がとれる。

3.3 改良行為

ICのデザインルールの微細化を進展させるためには, いままで無視してもよかったレベル小の振動も, そして構造物にとっては高周波数の振動も排除していかなければならない。そのため支持脚の機構変更が行われ, 同時に構成部品に対して厳しい要求が課される。また, 除振装置に新しい機能を付加するために新規なアクチュエータやセンサの追加が行われている。なかなか, うるさいのである。

図1中段を参照して, 初期の支持脚には機械ばねが組み込まれていた。同ばねは振動伝達の部材そのものであり, かつ自身もサージング振動を起こす振動源である。現在は, これを排除している。具体的に, 空気ばねを対向させ, これらをプッシュプル駆動している⁸⁾。加速度センサに対しては, 高帯域化がはかれている。この種の加速度センサはサーボ形であり, 本来は計測用で帯域は狭かったのである。また, 渦電流式あるいは静電容量式の変位センサに対する仕様も厳しい。位置分解能, ノイズの量, そして電源投入からの出力安定時間にまで過剰とも思える数値仕様を課す。さらに, 空圧系の応答性の緩慢さを補うために, 空気ばねとともに電磁モータを装備させて, 高周波数の振動に対応させている。そして, 圧力センサを追加して, 空気ばねの内圧をFBすることが行われている⁹⁾。

3.4 制御系の構造

空圧式アクティブ除振装置の原理的な制御系の構成を図4に示す⁸⁾。位置センサの出力を位置FB補償に導いて除振台を目標位置に定位させる制御構造上のメインループのほかに, 加速度センサの出力を K_D , K_P , K_I により調整する振動FB補償がある。順番に, 質量, 減衰, そしてばねを操作できる。制御構造上はマイナーループであるが, アクティブ除振装置の機能にとってはメインとなる。大型の構造物には複数台の支持脚を用いるので, 支持脚ごとに

に至っているからである。そして、筆者の過去の経験ではあるが、スカイフックの剛性の付与を強めて除振率を良好にしたとき、次第に相対位置の変動が顕著になる、すなわち定位性が劣化する。そして、図 6 右側は、床振動の加速度を検出し、この振動の伝達パスを電氣的に模擬した FF 信号を生成して、床振動を打ち消す方法である。この原理は明白であり、市販の製品には搭載済みである。しかし、半導体露光装置への適用にあたっては泥臭い注意が必要である。それは床振動計測用の加速度センサの設置に関する。支持脚を配置するフレーム構造が柔なこと、および支持脚周辺部の機器群の差異に起因して、支持脚ごとに異なる局所振動がある。つまり、床振動を代表する剛な箇所を見出すことは困難である。ステージ位置決めに寄与する地動 FF の実装を望むならば、支持脚ごとかつこの直近に加速度センサを装着するという大掛かりなものとなろう。

図 6 以外にも除振率の低減方法の種々の取り組みはある。一般的に、低固有値化と称する。例えば、空気ばね剛性は文献 12) の方法でキャンセルできる。また、スカイフックの FB を用いて、機械的な剛性をキャンセルあるいは質量付加を行って低固有値化できる。さらには、圧力微分 FB の導入により、等価的に補助タンクを設けたと同じ効果が得られる。すると、空気ばね素材の剛性が目だってくるので、これを下げるためゴム素材の薄膜化がなされている。しかし、ステージの駆動によって空気ばねは常時動かされるので、破裂事故を招かない耐久性が要求される。単純かつ確実な方法は、ステージの大型化による構造体の大型化、すなわち重量増大に期待することであろう。安定性に不安を残す制御的な手練手管を使うよりも、支持重量の増加は安定な固有振動数の低下をもたらす。

4. 結 言

精密位置決めの主役はステージである。一方、アクティブ除振装置は、同ステージを含めた大重量の構造体を支える力持ちという黒子である。しかし、実に繊細な姿勢および振動制御をさせている装置であり、精密位置決めにとっては大事なパートナーと言える。

参 考 文 献

- 1) 柴崎祐一：半導体露光装置における精密位置決め技術，機械設計，**50**, 8 (2006) 36.
- 2) 涌井伸二：半導体露光装置の制御，日本機械学会誌，**103**, 977 (2000) 250.
- 3) 涌井伸二：ステッパにおける精密位置決めステージの現状と将来，精密工学会誌，**67**, 2 (2001) 202.
- 4) 涌井伸二：高速・高精度位置決め技術の実相，機械設計，**48**, 12 (2004) 20.
- 5) 涌井伸二：半導体露光装置における精密位置決め技術開発の実相，機械設計，**50**, 8 (2006) 18.
- 6) キヤノン：アクティブ除振装置，露光装置およびデバイス製造方法，特開 2000-47735，(2000).
- 7) 岩井功，間山武彦，涌井伸二：低次な適応フィルタを用いたアクティブ除振装置への床振動フィードフォワード制御，電気学会論文集 D，**116**, 10 (1996) 1077.
- 8) 特許機器(株)：除振台の水平位置の維持と水平振動の除振方法並びにその回路，特許第 2673321 号，(1997).
- 9) キヤノン：能動的除振装置，特許第 3286201 号，(2002).
- 10) 涌井伸二：能動的除振装置への 4 軸完全な非干渉化制御の適用，電気学会論文集 D，**113**, 12 (1993) 1485.
- 11) ニコン：支持装置とその製造方法およびステージ装置並びに露光装置，特開 2004-079630，(2004).
- 12) 涌井伸二，伏島千鶴：空圧式除振装置に対する正帰還を用いた圧力フィードバックの高帯域化，日本機械学会論文集 C，**72**, 719 (2006) 2219.