

平成21年度補正予算事業戦略的基盤技術高度化支援事業

「(hp (ハーフピッチ) 32nm世代の半導体検査技術に
対応した高速・高精度位置決め及び走査技術の開発)」

研究開発成果等報告書

平成22年9月

委託者 東北経済産業局
委託先 財団法人あきた企業活性化センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	7
1-3 成果概要	9
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	10
第2章 平成21年度研究内容及び成果	10
2-1 高速・高精度SPM用X-Yステージの開発	10
2-1-1 X-Yステージの構造解析	10
2-1-2 X-Yステージ100 μ m Rev.1	12
2-1-3 X-Yステージ100 μ m Rev.2	13
2-1-4 X-Yステージ500 μ m Rev.1	13
2-1-5 X-Yステージ500 μ m Rev.2	13
2-1-6 X-Yステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計	14
2-1-7 X-Yステージ用コントローラ設計製作と実用化設計	14
2-1-8 X-Yステージコントロールソフトウェアの設計と実用化	15
2-2 高速・高精度SPM用Zステージの開発	15
2-2-1 Zステージの構造解析	15
2-2-2 Z5 μ mステージの製作と評価	16
2-2-3 Z5 μ mステージの実用化設計と評価	16
2-2-4 Z5 μ mステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計	17
2-2-5 Z5 μ mステージ用コントローラ設計製作と実用化設計	17
2-2-6 Z5 μ mステージコントロールソフトウェアの設計と実用化	17
2-3 高速・高精度SPM用X-Y-Zステージシステムの実用化	17
第3章 全体総括	18
3-1 全体総括	18
3-2 今後の課題	20

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景

近隣アジアの諸外国の半導体メーカーが、生産設備の高度化により国際的な競争力を高めている。そのため我が国では、更に半導体の付加価値を高める為、高精度な半導体検査装置の開発が望まれている。このような半導体検査装置のキーテクノロジーは、高速で高精度な位置決め技術にあると考える。本戦略的基盤技術高度化支援事業で行う研究開発は、変位拡大機構と圧電素子を用いたアクチュエータと、非接触変位センサを用いたフルクロズドループのコントロールシステムにより、従来技術より 25 倍の面積まで走査範囲を広げ、同様に 2000 倍の高速化が図られた位置決めのための基盤技術を確立する事を目的とする研究開発であり、半導体検査用の X-Y ステージと周辺機器を開発し、位置決めシステムとしての商品開発を目指す。

2) 研究目的及び目標

現在、多くの走査プローブ顕微鏡では、円筒型のステージが適用されている。円筒の長さを変える事で、動作範囲を拡張できるなど利点もあるが、構造上、回転モーメントが発生し、Z 方向の変動 (BOW) への影響が顕在化してきている。また、現在半導体ウェハ検査では、ウェハ全体をレーザ顕微鏡で観測し、異常部分を限定してから SPM を用いて再度詳細に観察している。しかし、現行のステージの走査速度は通常 1 ライン 1 秒で、ライン数の増加にしたがって検査時間が増加し、半導体製造工程内の検査には不向きとなっている。そのため、広い走査範囲を有しながら平面状で高速に操作するステージは未だに開発されていない。

本研究で提案する新規技術は、平行リンクを介して X 軸と Y 軸のアクチュエータに連結することで、 θ 軸 (X-Y 平面に垂直な Z 軸回り) 周りの変動が抑制されるステージを開発し、高速で高精度な走査動作を実現する。

そこで、下記のテーマに基づき研究開発を行う。

① 高速・高精度 SPM 用 X-Y ステージの開発

500 μ m 平方の走査面積で 1 スキャン 2.5ms の速度、0.1nm の位置決め精度を有する X-Y ステージを実現する。

② 高速・高精度 SPM 用 Z ステージの開発

500 μ m 平方の走査面積で 1 スキャン 2.5ms に高速化した X-Y ステージの動作に適応し、最大可動距離は 5 μ m、真直度 0.05nm、最大走査速度を 40 μ m/s、制御帯域 2kHz で試料表面と探針間を追従制御する Z ステージを実現する。

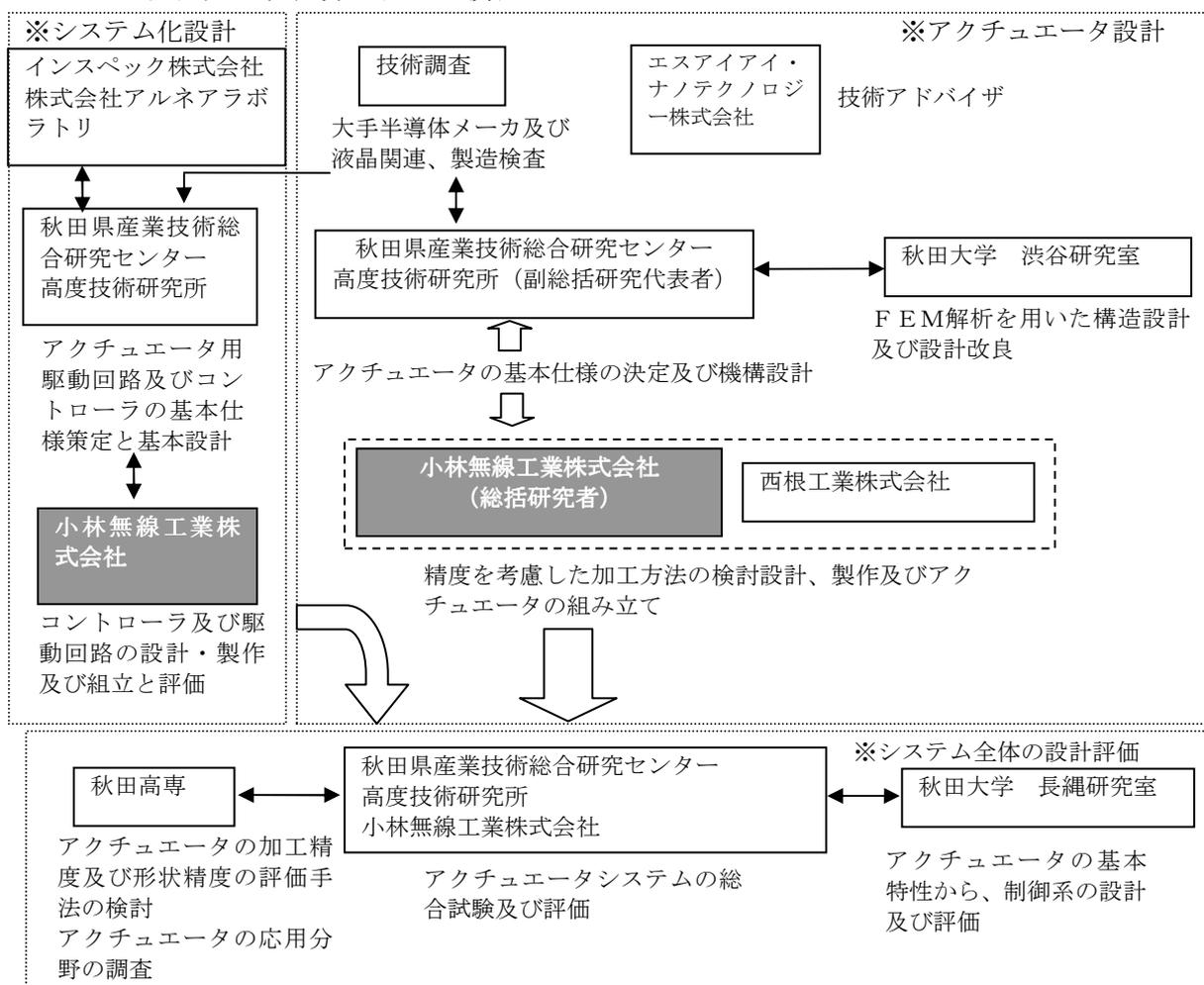
③ 高速・高精度 SPM 用 X-Y、Z ステージシステムの実用化

500 μ m 平方の走査面積で 1 スキャン 2.5ms の速度、0.1nm の位置決め精度を有する X-Y ステージと、X-Y ステージの動作に連動し、最大可動距離 5 μ m、真直度 0.05nm、最大走査速度を 40 μ m/s、制御帯域 2kHz で試料表面と探針間を追従制御する Z ステージを組み合わせた X-Y、Z 機構に駆動アンプやコントローラを組み合わせた高速・高精度位置決めシステムを実現する。

3) 実施内容

研究開発の流れ

<再委託先の役割分担及び連携図>



①-1~③-1の研究開発を実施し、その成果を搭載した高速・高精度 SPM 用 X-Y-Z ステージシステムを構築する。

当該装置を構築するため、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 1、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1、Z5 μ m ステージ装置 Rev. 1、Z5 μ m ステージ装置 Rev. 2 を小林無線工業が設計し、西根工業株式会社が製作する。

製作した装置については、小林無線工業株式会社に導入し、秋田県産業技術総合研究センター開放研究室に設置して同社が使用する。

①-1 : X-Y ステージの構造解析

(秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学)

500 μ m 平方の走査面積で 1 スキャン 2.5ms の速度、0.1nm の位置決め精度を有する X-Y ステージの構造などの基本仕様を策定する。

基本仕様を有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を用いて構造解析し、高速且つ高精度で制御性の良い最適なステージ構造を確立する。

秋田県産業技術総合研究センター高度技術研究所は X-Y ステージの基本仕様を策定する。

秋田大学は解析精度向上の為の構造解析を行う。

上述の研究を実施するため、秋田大学に Femap with NX Nastran Basic Bundle を導入し、同大学が使用する。

①-2 : X-Y ステージの製作と評価

(小林無線工業株式会社、西根工業株式会社、秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学、独立行政法人国立高等専門学校機構秋田工業高等専門学校)

FEM による構造解析の結果を踏まえ、機械加工図や工程図を作成し X-Y ステージ本体部の加工を行う。次に、加工された X-Y ステージに圧電素子や減衰機構を組み込み、X-Y ステージ 100 μ m 装置 Rev. 1 の試作を行い、初期目標値である最大走査速度 5.0ms、制御帯域 500Hz が達成できているか評価する。

次に、試作された X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 1 の結果を元に、FEM を用いた構造の見直しを図り、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2 の試作を行い、最大走査速度 1 スキャン 2.5ms、制御帯域 1 KHz が達成できているか評価する。

尚、X-Y ステージ 100 μ m 装置は、ワイヤー放電等による一体加工を行っているため、改良を行うのであれば溶接等の加工が必要となるが、溶接における熱衝撃による寸法制度の問題もあり、装置に対しての加工は困難である。そのため、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 1 の性能評価の結果を元に、新規に X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2 を製作する。

秋田大学は、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 1、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2 の構造解析を行う。

秋田県産業技術総合研究センターは、秋田大学での FEM による構造解析の結果を踏まえて改良点を検討する。

秋田高専は、小林無線工業株式会社と連携し性能を評価する。

小林無線工業株式会社及び西根工業株式会社は、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 1、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2 を製作し、性能を評価する。

上述の研究を実施するため、Solid Works Premium、レーザ干渉変位計、デジタルオシロスコープ、LCR メータ、ダイナミックシグナルアナライザを小林無線工業株式会社に導入し、秋田県産業技術総合研究センター開放研究室に設置して同社が使用する。

①-3 : X-Y ステージの実用化設計と評価

(小林無線工業株式会社、西根工業株式会社、秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学、独立行政法人国立高等専門学校機構秋田工業高等専門学校)

X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2 で得られた結果を元に、動作領域を拡大した基本仕様を策定し、FEM による構造解析の結果を踏まえて加工検討を行いながら、機械加工図や工程図を作成して、X-Y ステージの加工を行う。次に、加工された X-Y ステージに圧電素子や減衰機構を組み込み、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1 の試作を行い、初期目標値である、最大走査速度 5.0ms、制御帯域 500Hz が達成できているか評価する。

次に、試作された X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1 の性能評価や、FEM を用いた構造の見直しを図り、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 2 の試作を行い、最大走査速度 1 スキャン 2.5ms、制御帯域 1kHz が達成できているか評価する。

尚、X-Y ステージ 500 μ m 装置は、ワイヤー放電等による一体加工を行っているため、改良を行うのであれば溶接等の加工が必要となるが、溶接における熱衝撃による寸法制度の問題もあり、装置に対しての加工は困難である。そのため、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1 の性能評価の結果を元に、新規に X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 2 を製作する。

秋田大学は、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 2 の構造解析を行う。

秋田県産業技術総合研究センターは、X-Y100 μ m ステージ装置 Rev. 2 で得られた結果を元に実用化仕様を策定する。

秋田高専は、小林無線工業株式会社と連携し性能を評価する。

小林無線工業株式会社及び西根工業株式会社は、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 1、X-Y500 μ m ステージ装置 Rev. 2 を製作し性能を評価する。

上述の研究を実施するため、Solid Works Premium (再掲)、レーザ干渉変位計 (再掲)、デジタルオシロスコープ (再掲)、LCR メータ (再掲)、ダイナミックシグナルアナライザ (再掲) を小林無線工業株式会社に導入し、秋田県産業技術総合研究センター開放研究室に設置して同社が使用する。

①-4 : X-Y ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計

(小林無線工業株式会社)

X-Y ステージをサブナノメートルの位置決め精度を有しながら 100 μ m 平方の領域を高速に走査するために不可欠な低ノイズ型の駆動アンプ {小信号入力 (0.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~10kHz)、大信号入力 (2.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~3kHz)、出力ノイズ 0.5mVrms} の設計、製作及び評価を行う。また、製作機で得られた結果をベースとして実用化設計及び実用機の開発を行う。

小林無線工業株式会社は、駆動回路の設計及び X-Y ステージ用駆動アンプを製作開発し、実用化設計及び実用機の開発を行う。

①-5 : X-Y ステージ用コントローラの設計製作と実用化設計

(小林無線工業株式会社)

サブナノメートルの位置決め精度を有しながら 100 μ m 平方の領域を高速に走査するために X-Y ステージに不可欠なコントローラのハードウェアを動作させる基本ソフトウェアと、制御パラメータを設定する入出力関連のソフトウェアを開発する。

コントローラとしては、ハードウェアとソフトウェアが連携し、サーボ帯域を 100kHz、入出力の分解能を入力 : 20 ビット、出力 20 ビット、演算速度を 1500MFLOPS、RAM を 8GB の目標値で設計、製作及び評価を行う。また、製作機で得られた結果を応用し、ベースとしながら実用化設計を行う。

小林無線工業株式会社は、X-Y ステージ用コントローラの製作開発及び実用化設計を行う。

①-6 : X-Y ステージ用コントロールソフトウェアの設計と実用化

(小林無線工業株式会社、秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学)

サブナノメートルの位置決め精度を有しながら 100 μ m 平方の領域を高速に走査するため、制御系 CAD ソフトウェア (MATLAB) を用いて X-Y ステージのモデル化を行い、制御特性のシミュレーションを行いながら、位置決め精度 0.1nm (3σ) を実現するため、コントローラのハード部に搭載する制御ソフトウェアを製作する。

秋田大学は、X-Y ステージのモデル化を行い制御特性のシミュレーションを行う。

小林無線工業株式会社及び秋田県産業技術総合研究センターは、コントローラのハード部に搭載する制御ソフトウェアを製作する。

上述の研究を実施するため、ファンクションジェネレータを秋田大学に設置し、同学が使用する。

②-1 : Z ステージの構造解析

(秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学)

最大可動距離 $5\mu\text{m}$ 、真直度 0.05nm 、最大走査速度を $40\mu\text{m}/\text{s}$ 、制御帯域 2kHz で試料表面と探針間を追従制御する Z ステージの構造などの基本仕様を策定する。

基本仕様を有限要素法 (FEM : Finite Element Method) を用いて、搭載される X-Y ステージの X 軸及び Y 軸方向の動作や応答性を阻害する要因などを明らかにし構造の最適化を図る。

秋田県産業技術総合研究センターは、Z ステージの基本仕様を策定する。

秋田大学は、解析精度向上の為に構造解析を行う。

上述の研究を実施するため、秋田大学に Femap with NX Nastran Basic Bundle (再掲) を導入し、同大学が使用する。

②-2 : Z ステージの製作と評価

(小林無線工業株式会社、西根工業株式会社、秋田県産業技術総合研究センター、独立行政法人国立高等専門学校機構秋田工業高等専門学校)

FEM による構造解析の結果を踏まえて加工検討を行いながら、機械加工図や工程図を作成して、Z ステージ本体を加工し、圧電素子や減衰機構を組み込み、Z ステージ Rev. 1 を製作する。次に、製作された $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 1 を最大可動距離 $5\mu\text{m}$ 、Z 軸方向の真直度 0.1nm 、最大走査速度 $20\mu\text{m}/\text{s}$ 、制御帯域 1kHz が達成できているか性能を評価する。

秋田県産業技術総合研究センターは、秋田大学での FEM による構造解析の結果を踏まえて改良点を検討する。

秋田高専は、小林無線工業株式会社と連携し性能を評価する。

小林無線工業株式会社及び西根工業株式会社は、 $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 1 を製作し性能を評価する。

上述の研究を実施するため、Solid Works Premium (再掲)、レーザ干渉変位計 (再掲)、デジタルオシロスコープ (再掲)、LCR メータ (再掲)、ダイナミックシグナルアナライザ (再掲) を小林無線工業株式会社に導入し、秋田県産業技術総合研究センター開放研究室に設置して同社が使用する。

②-3 : Z ステージの実用化設計と評価

(小林無線工業株式会社、西根工業株式会社、秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学、独立行政法人国立高等専門学校機構秋田工業高等専門学校)

$Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 1 で得られた結果を元に実用化仕様を策定し、FEM による構造解析の結果を踏まえて加工検討を行いながら、機械加工図や工程図を作成して、Z ステージの本体加工を行う。

次に、Z ステージに圧電素子や減衰機構を組み込み、 $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 2 を製作し、最大可動距離 $5\mu\text{m}$ 、Z 軸方向の真直度 0.05nm 、最大走査速度 $40\mu\text{m}/\text{s}$ 、制御帯域 2kHz が達成できているか性能を評価する。

尚、 $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置は、ワイヤー放電等による一体加工を行っているため、改良を行うのであれば溶接等の加工が必要となるが、溶接における熱衝撃による寸法制度の問題もあり、装置に対しての加工は困難である。そのため、 $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 1 の性能評価の結果を元に、新規に $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 2 を製作する。

秋田大学は、 $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 2 の構造解析を行う。

秋田県産業技術総合研究センターは、 $Z5\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev. 1 で得られた結果を元に実用化仕様を策定する。

秋田高専は、小林無線工業株式会社と連携し性能を評価する。

小林無線工業株式会社及び西根工業株式会社は、 $25\mu\text{m}$ ステージ装置 Rev.2 の製作を行い、性能を評価する。

上述の研究を実施するため、Solid Works Premium (再掲)、レーザ干渉変位計 (再掲)、デジタルオシロスコープ (再掲)、LCR メータ (再掲)、ダイナミックシグナルアナライザ (再掲) を小林無線工業株式会社に導入し、秋田県産業技術総合研究センター開放研究室に設置して同社が使用する。

②-4 : Z ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計

(小林無線工業株式会社)

X-Y ステージ用駆動回路の製作結果を踏まえ、最大変位量が $5\mu\text{m}$ で、走査時に探針と試料間の隙間をサブナノメートルの精度で一定に保つ Z ステージを高速に動作するために不可欠な低ノイズ型の駆動アンプ {小信号入力 (0.5Vpp にて -3dB) の周波数特性 ($\text{DC}\sim 5\text{kHz}$)、大信号入力 (2.5Vpp にて -3dB) の周波数特性 ($\text{DC}\sim 2\text{kHz}$)、出力ノイズ 0.1mVrms } の設計、製作及び評価を行う。また、製作機で得られた結果をベースとしながら実用化設計及び実用機の開発を行う。

小林無線工業株式会社は、駆動回路の設計及び Z ステージ用駆動アンプを製作開発し、実用化設計及び実用機の開発を行う。

②-5 : Z ステージ用コントローラの設計製作と実用化設計

(小林無線工業株式会社)

最大変位量が $5\mu\text{m}$ で、走査時に探針と試料間の隙間をサブナノメートルの精度で一定に保つ Z ステージを高速に動作するために不可欠な変位計測装置を動作させる基本ソフトウェアと、制御パラメータを設定する入出力関連のソフトウェアを開発する。コントローラとしては、ハードウェアとソフトウェアが連携し、サーボ帯域を 100kHz 、入出力の分解能を入力: 20 ビット、出力 20 ビット、演算速度を 1500MFLOPS 、RAM を 8GB の目標値で設計製作を行う。また製作機をベースに実用化設計及び実用機の開発を行う。

小林無線工業株式会社は、X-Y ステージ用コントローラの製作開発及び実用化設計を行う。

②-6 : Z ステージ用コントロールソフトウェアの設計と実用化

(小林無線工業株式会社、秋田県産業技術総合研究センター、国立大学法人秋田大学)

サブナノメートルの位置決め精度で、 $5\mu\text{m}$ の垂直動作を高速で高精度に動作させ、光てこによる検出信号を元に高速な走査動作時において、探針と試料間の隙間を一定にするため、制御系 CAD ソフトウェア (MATLAB) を用いて Z ステージのシミュレーションを行いながら、位置決め精度 0.1nm (3σ) を実現するためのコントローラのハード部に搭載する制御ソフトウェアを製作する。

秋田大学は、Z ステージのモデル化を行い制御特性のシミュレーションを行う。

小林無線工業及び秋田県産業技術総合研究センターは、コントローラのハード部に搭載する制御ソフトウェアを製作する。

③-1 : X-Y, Z ステージのシステム設計及び実用化

(小林無線工業株式会社、国立大学法人秋田大学、秋田県産業技術総合研究センター)

$500\mu\text{m}$ 平方の走査面積で 1 スキャン 0.5ms の速度、 0.1nm の位置決め精度を有する X-Y ステージと、X-Y ステージの動作に連動し、最大可動距離 $5\mu\text{m}$ 、真直度 0.05nm 、最大走査速度を $40\mu\text{m/s}$ 、制御帯域 2kHz で試料表面と探針間

を追従制御する Z ステージを組み合わせた X-Y、Z 機構に駆動アンプやコントローラを組み合わせた高速・高精度位置決めシステムを実現する。

そのために、駆動アンプとコントローラとの組み合わせ技術、位置決めシステムを設計開発するとともに、コントローラのソフトウェアの最適化を行う。

秋田大学は、X-Y-Z ステージのコントローラの制御手法を確立し、高精度な位置決めシステムを実現する。

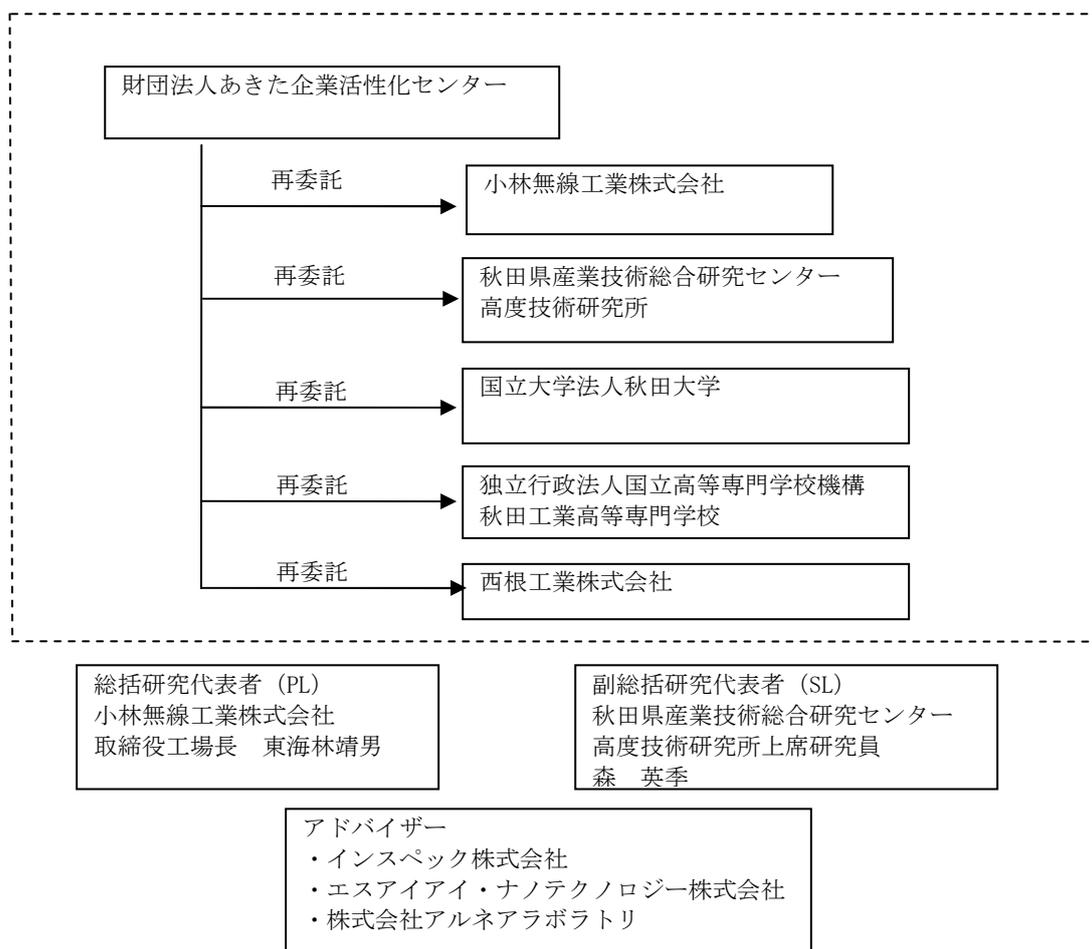
秋田県産業技術総合研究センターは、Z 軸の応答による反力の影響を考慮した X-Y-Z ステージを製作設計する。また、X-Y-Z ステージの特性を秋田大学と連携して検証し、高精度な位置決めシステムを実現する。

小林無線工業株式会社は、X-Y-Z ステージに、駆動アンプやコントローラを組み込んだシステム設計を行う。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】

財団法人あきた企業活性化センター

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松橋 亨	技術支援グループ 研究プロジェクト推進担当 サブリーダー	④-2
阿部 秀樹	技術支援グループ 研究プロジェクト推進担当 副主幹	④-2 ④-3 ④-4
特別任用職員	技術支援グループ 研究プロジェクト推進担当 スタッフ	④-2 ④-3 ④-4

【再委託先】

小林無線工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
東海林靖男	取締役工場長	①-2, 3 ①-2, 3 ③-1、④-1
江藤 真人	アクチュエータ課	①-2, 3 ②-2, 3 ③-1
高橋 悟	アクチュエータ課 課長	①-4, 5, 6 ②-4, 5, 6 ③-1
伊藤 晃喜	製造二課 課長	①-2, 3 ②-2, 3 ③-1
佐々木 豊	製造一課 係長	①-2, 3 ②-2, 3 ③-1

秋田県産業技術総合研究センター

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
森 英季	上席研究員	①-1, 2, 3 ②-1, 2, 3 ③-1
櫻田 陽	研究員	①-6 ②-6 ③-1

国立大学法人秋田大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
渋谷 嗣	工学資源学部 教授	①-1, 2, 3 ②-1, 3
長縄 明大	工学資源学部 准教授	①-6 ②-6 ③-1

独立行政法人国立高等専門学校機構秋田工業高等専門学校

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
宮脇 和人	機械工学科 准教授	①-2, 3 ②-2, 3

西根工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
吉田 香	工場長	① -2, 3 ②-2, 3

1-3 成果概要

“高速・高精度 SPM 用 X-Y ステージ(Nano-Motion Stage) の開発”では、 $100\mu\text{m}$ と $500\mu\text{m}$ 平方の平面内を高速に走査することを目標とし、初めに FEM (Finite Element Method: 有限要素法) を用いた構造解析により、最大変位量、共振周波数、振動モード、変位に伴うステージの回転や bow (弧: SPM 用ステージの走査動作において、試料の傾きやステージの縦真直の変化によって試料表面の凹凸とは関係なくプローブによって検知される上下変動で、直線の傾きとして補正できないもの。お椀形状や S 字形など 2 次や 3 次などで近似される曲線を一般に描く。) に着目し、SPM に要求される機械特性を有する適切な形状を決定し、次に加工図面を作成してから加工を行い、積層型圧電素子を組み込んでから基本特性の評価試験を行った。基本特性の解析結果と実験結果との間の誤差が 5% 未満であれば、位置フィードバックを有する制御系を構成し、Open-loop 特性やステップ応答試験と X 軸と Y 軸の相関と高精度な平面内移動を検証するため、各軸に正弦波と余弦波信号を駆動アンプで増幅して印加し、リサーチユ円の半径の大きさを精度確認、歪方で平面内の位置決め精度を評価した。本研究開発では、初めに X-Y ステージ $100\mu\text{m}$ Revision 1 を構造解析により設計検討してから製作と性能評価の段階に進み、Revision 1 の問題点、課題や変更点を抽出し、実用化を鑑みながら同様なプロセスで Revision 2 の試作評価を行った。次に得られた結果を判断材料に走査範囲を 5 倍、移動面積では 25 倍まで拡大した X-Y ステージ $500\mu\text{m}$ Revision 1 の試作評価を行った。この場合も X-Y ステージ $100\mu\text{m}$ Revision 1, 2 の開発過程と同様に問題点、課題や変更点を抽出し、また実用化を鑑みながら同様なプロセスで Revision 2 を試作し総合評価を行った。

X-Y ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計では、精密位置決めの際となる出力ノイズを 1mVp-p 以下のレベルに達することが確認され、歪も $0.03\%/50\text{mV}$ と良好な結果が得られた。

X-Y ステージ用コントローラの設計製作と実用化設計では、DSP を用いて演算速度で 1350GFLOPS を達成し、プログラム作成で最も重要な file system の構築を完了した。

X-Y ステージコントロールソフトウェアの設計と実用化では、 $100\mu\text{m}$ 仕様の X-Y ステージで実験した結果、Open-loop におけるゲイン交差周波数が X 軸: 1.14kHz , Y 軸: 1.16kHz 、 $5\cdot\text{m}$ までの立ち上がり時間が両軸共に $120\mu\text{s}$ となった。

“高速・高精度 Z ステージの開発”では、ゲイン交差周波数が 30kHz 、 $5\mu\text{m}$ までの立ち上がり時間 0.5ms となった。

最終的な“高速・高精度 SPM 用 X-Y-Z ステージシステムの実用化”では、X-Y ステージ、および、Z 軸ステージで得られた成果を統合し、各軸の動作や相間性を確認した。 $5\mu\text{m}$ 仕様の NMA を搭載した状態で X-Y ステージ $500\mu\text{m}$ Revision 1 は、 $10\mu\text{m}$ の目標値に対して 0.2ms の立ち上がり時間を達成し、最終目標をクリアすることができた。

今回の事業成果としてはアドバイザーであるエスアイアイ・ナノテクノロジー(株)との合同実験により、特に X-Y ステージ $100\mu\text{m}$ 仕様の Nano-Motion Stage の製品化に向けての道筋が見えて来たところである。

秋田県の中小企業は大手メーカーの下請け業務が中心で新技術による新製品の開発能力が不足していたが、本事業により、秋田県内の企業と県の公設研究機関、大学、高専などの様々な研究機関が連携することで、コストと精度をバランスさせた X-Y-Z ステージの商品化が現実的になった。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人あきた企業活性化センター（最寄り駅：JR東日本奥羽本線秋田駅）
〒010-8572 秋田県秋田市山王三丁目1番1号
TEL：018（860）5624 FAX：018（860）5704
技術支援グループ 研究プロジェクト推進担当 サブリーダー 松橋 亨

第2章 平成21年度研究内容及び成果

現在のSPMはプローブの共振周波数の影響もあるが、走査速度は1ライン1秒程度であり、走査範囲も100 μm 平方のものが主流となっている。しかし現状の観察速度では生産ラインに入れた検査や半導体ウェハに露光、エッチングされたパターンを大きな範囲で測定することはできない。そのため、積層型圧電素子と変位拡大機構を組み合わせたNano-Motion Actuatorを2つ直交配置し、同一なX-Y平面上を高速に走査できるSPM用Nano-Motion Stageとプローブもしくは、ステージ自身を昇降するZ軸用Nano-Motion Actuatorを提案する。

1. 100 μm 平方の走査面積で1スキャン2.5msの速度、ゲイン交差周波数1kHz、0.1nmの位置決め精度を有するNano-Motion Stage
2. 500 μm 平方の走査面積で1スキャン5msの速度、ゲイン交差周波数500Hz、0.1nmの位置決め精度を有するNano Motion Stage
3. 最大変位5 μm 、真直度0.05nm、最大速度40 $\mu\text{m/s}$ 、ゲイン交差周波数2kHzのZ軸用Nano-Motion Actuator
4. X-Y-Zステージを上記の組み合わせで構成し、駆動アンプやコントローラ及び制御ソフトウェアを含めたシステム化を図り、軸間の相関や干渉を考慮しながら、各軸単体における機械特性を3軸で実現した。

2-1 高速・高精度SPM用X-Yステージの開発

2-1-1 X-Yステージの構造解析

半導体検査装置に対応した高速・高精度位置決め及び走査に構造において必要な要件は、目的とする走査範囲を確保できること、高精度位置決めの制御性を確保できるように摩擦などの非線形性が小さいこと、また、高速に動作できるように十分な剛性を有する必要がある。図1はX-Yステージの基本的な機構のモデルを示している。図において、ステージをX軸、Y軸の2方向に駆動するために平行な板バネを配置している。この板バネはステージが回転しないで平行に移動するように平行リンクとしての役割を持っている。また、どのような走査位置に置いてもX軸、Y軸方向にステージに張力を作用させて、運動を安定に保持するために矩形の安定化支持バネを用いる。拡大機構を用いてPZT圧電素子の微小な変位を拡大したアクチュエータをX軸、Y軸に配置している。PZTの変位拡大機構はリンクと弾性ヒンジの位置関係をA:Bとすることにより、理想的な拡大変位 \tilde{u}_m は次のように与えられる。

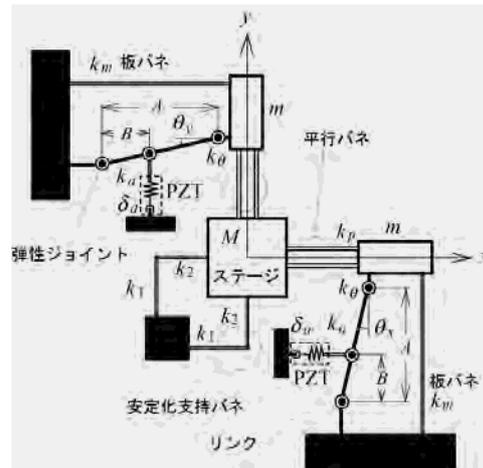


図1 XYステージの概略モデル

$$\tilde{u}_m = \frac{A}{B} \delta_a \quad (1)$$

図 1 に示した概略モデルに基づいて走査範囲 100 μm ステージの設計を行った。図 2 は X-Y ステージ 100 μm のソリッドモデルを示したものである。

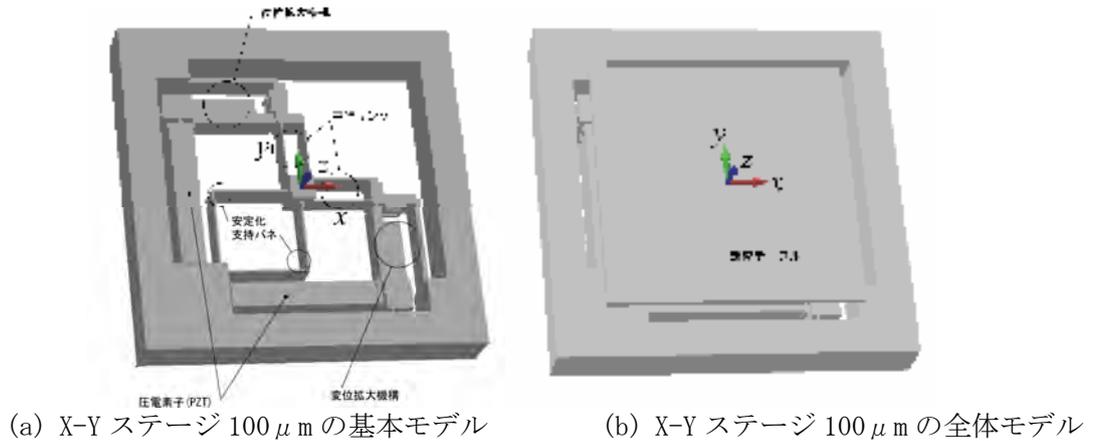


図 2 X-Y ステージ 100 μm のソリッドモデル

図 2(a) はステージの基本構造部分であり、図 2(b) は基本構造部分に 50mm×50mm の大きさの走査テーブルを組み合わせた全体モデルである。図 2(a) に示すように中央のステージを X 軸、Y 軸の 2 方向に平行リンクを介して駆動する。運動を安定に保持するために矩形の安定化支持バネを用いる。X 軸、Y 軸の二軸に配した圧電素子は PZT 圧電セラミックスを積層したものであり、その寸法は、5mm×10mm×30mm である。圧電素子は無負荷時において印加電圧 150V に対して 27.5 μm 程度の伸びが期待できる。変位拡大機構は、拡大率 6.2 として設計されている。この構成の特徴は、X 軸、Y 軸の 2 方向が対称な構造を構成していることである。

ソリッドモデルから有限要素モデルを作成し、有限要素解析によって X-Y ステージ 100 μm をシミュレーションによって性能を評価した。ここで、ステージ本体の材質は Ti 合金 (Ti-6Al-4V) とした。図 3 はステージの周囲を拘束し、X 軸方向を駆動する圧電素子に電圧 150V を印加したときのステージの X 軸変位の分布を示したものである。中央のステージ中心における変位は 113 μm であり、目標の 100 μm を超える変位が得られている (図 3(a))。走査テーブルを組み合わせた全体モデルにおいてもテーブル中央の変位は、基本モデルと同様の変位が得られている。

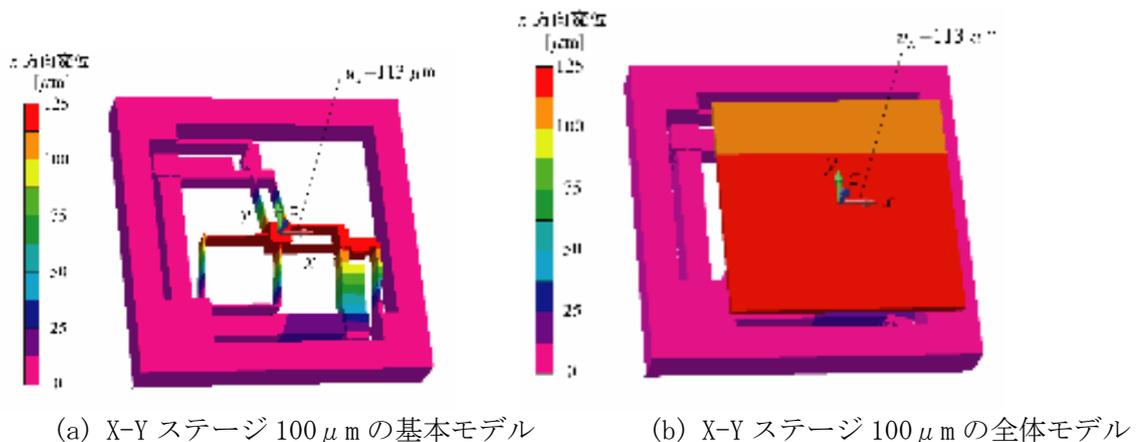


図 3 X-Y ステージ 100 μm の X 方向変位 (電圧 150V)

X-Y ステージ 100 μm タイプの制御性能の指針を得るために、固有値解析を行った。固有値解析で固有振動数と各モードの変形形状を得ることができる。図4には、1次から3次モードまでの固有振動特性を示している。最低次の1次モードの共振周波数は2.4 kHzである。変形分布を示す色は全変位を示している。ピンクの部分の変位ゼロの部分であり、周囲の固定部分がピンクの色を示している。モード特性は、1次から3次までがおおよそX-Y平面内の変形が示されている。

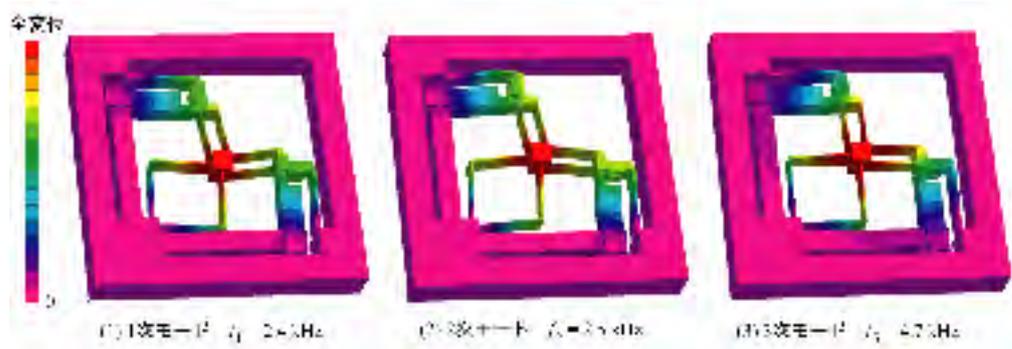


図4 X-Y ステージ 100 μm の固有振動特性

2-1-2 X-Y ステージ 100 μm Rev. 1

本研究では、半導体検査装置に利用する精密位置決め機構の高精度化を目指している。設計手法としては FEM による構造解析の結果を踏まえ、機械加工図や工程図を作成し X-Y ステージ本体部の加工をおこなった。

図5に最大変位が 100 μm の試作したナノモーション・アクチュエータを示す。組立に際しては、複数の軸を駆動させる必要があるため、今回は特に圧電素子を駆動させるための配線処理等に考慮した。また、圧電素子をステージに取り付ける際に用いた接着剤の硬化温度管理を行いながら X-Y100 μm Stage Rev. 1 の組み立てを行った。組立工程では圧電素子を接着する際に、ステージと圧電素子の相互の部品でマイクロンオーダーでの厳しい寸法管理が必要であった。また、炉を用いて 120° C での接着剤を硬化させ徐冷する工程が必要のため、組立時間を短縮する工夫が必要であった。試作品の評価に関しては、初期目標値である、最大走査速度 1 スキャン 5.0ms、制御帯域 500Hz を確認した。

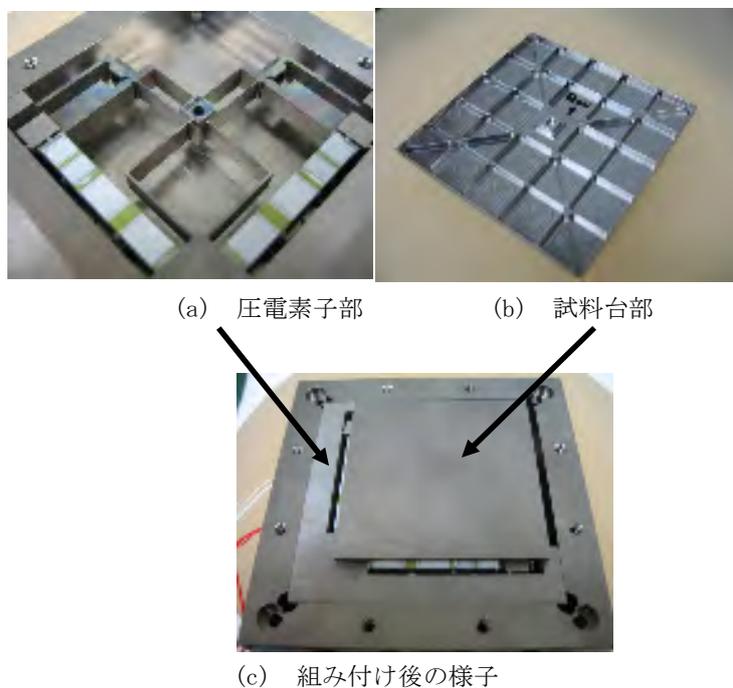


図5 X-Y100 μm Stage Rev. 1

2-1-3 X-Y ステージ 100 μ m Rev. 2

X-Y ステージ 100 μ m 装置 Rev. 1 の評価・検証結果に基づき、圧電素子を接着することにより生じる変形や、圧電素子の取り付け位置による特性の変化等の検証ができる事を目的とし、圧電素子をねじにて固定できるように改良したステージを作成する。構造解析結果に基づいて3Dモデルを作成し、形状の確認を行いながら加工図面を作成した。(図6) 試作品の評価に関しては、初期目標値である、最大走査速度1スキャン2.5ms、制御帯域1kHzを確認した。

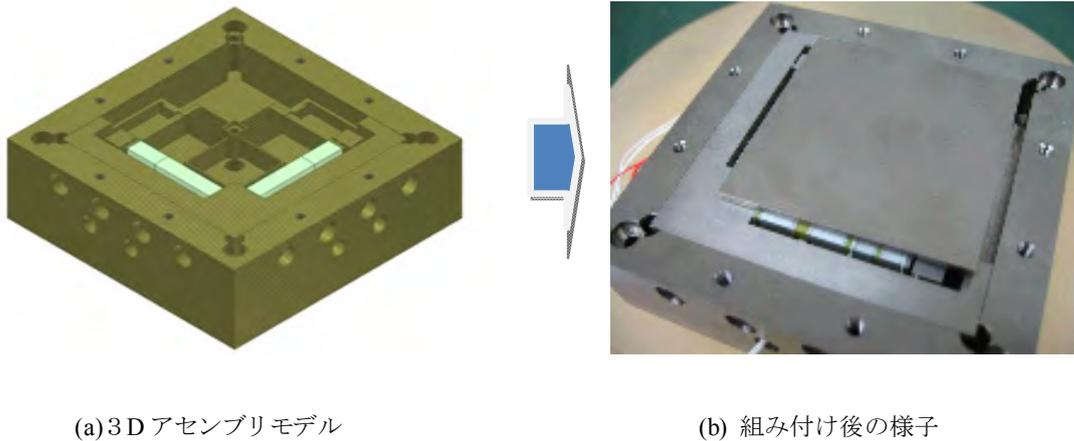


図6 X-Y100 μ m Stage Rev. 2

2-1-4 X-Y ステージ 500 μ m Rev. 1

X-Y 100 μ m ステージ装置 Rev. 2 で得られた結果を元に、動作領域を500 μ m拡大したX-Y ステージ 500 μ m Rev. 1 の基本仕様を策定し、FEMによる構造解析の結果を踏まえて、機械加工図や工程図を作成して、X-Y ステージの加工をおこなった。加工したX-Y ステージに圧電素子と減衰機構を組み込み、図7に示すようにX-Y500 μ mステージ装置 Rev. 1 の試作を行い、初期目標値である、最大走査速度1スキャン5.0ms、制御帯域500Hzを確認した。

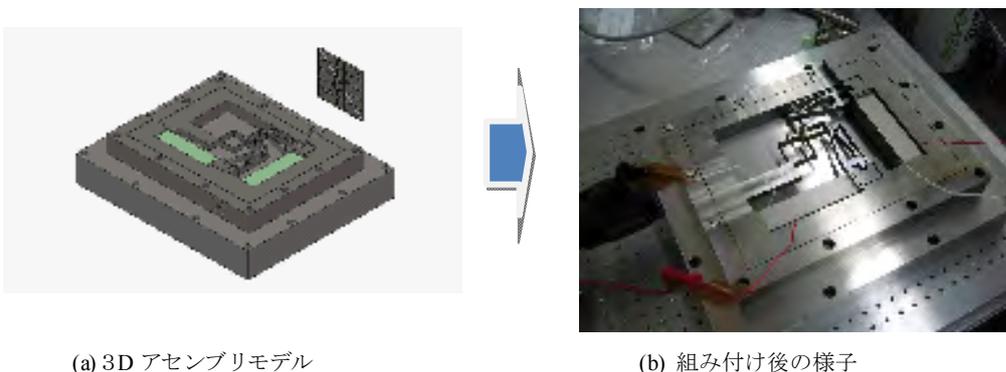
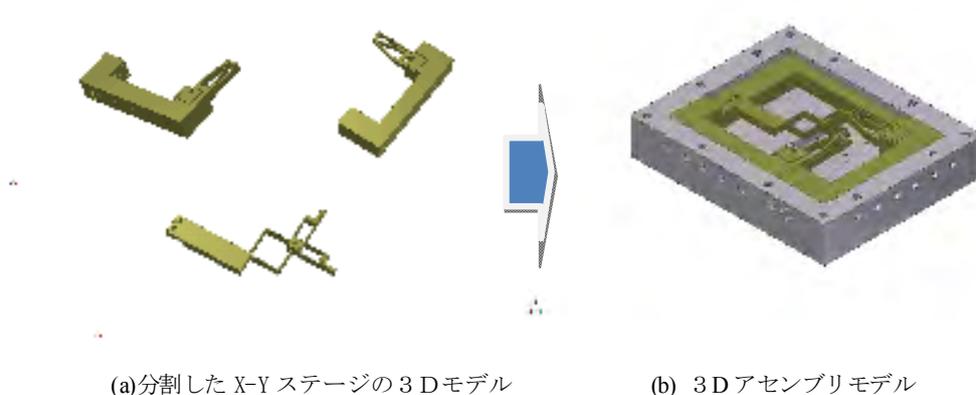


図7 X-Y500 μ m Stage Rev. 1

2-1-5 X-Y ステージ 500 μ m Rev. 2

X-Y500 μ m Stage Rev. 1 の評価・検証結果を参考に、ステージを要素毎に分け、問題を把握しやすくすることを目的とし、それぞれのパーツ毎に分割したステージを作成する。構造解析結果に基づいて3Dモデルを作成し、形状の確認を行いながら加工図面

を作成した。また、図8に示すように、実際に圧電素子を組み込んだ状態を想定し部品の干渉チェックを行うためアッセンブリモデルの作成し検証を行い製品を製作した。試作した X-Y500 μm Stage Rev. 2 の評価を用い、初期目標値である、最大走査速度 1 スキャン 2.5ms、制御帯域 1kHz の動作を確認した。



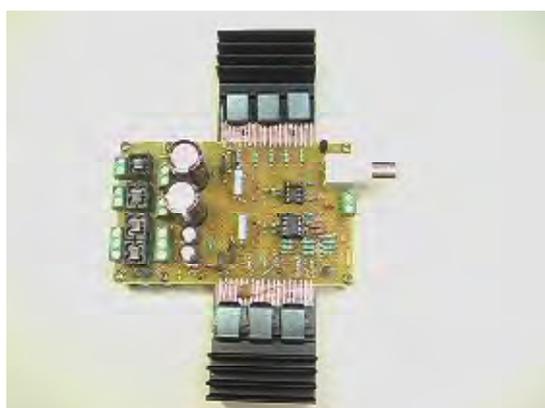
(a)分割した X-Y ステージの 3Dモデル

(b) 3Dアセンブリモデル

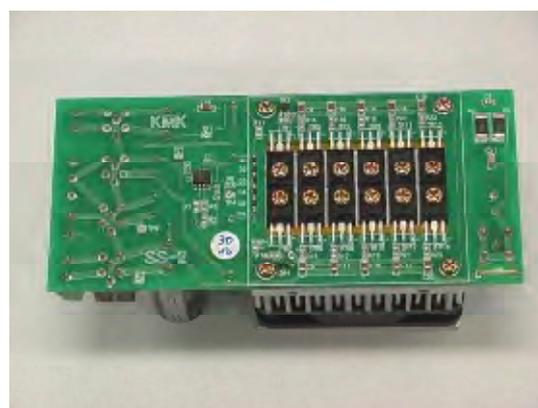
図8 X-Y500 μm Stage Rev. 2

2-1-6 X-Y ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計

アンプの分解能の理論限界値を定量的に求め、また、現在のところ主流の回路方式である A B 級リニア・パワーアンプ構成で、理論限界に近いノイズ性能を達成し、製品化のための実用設計を実施した。試作した X-Y ステージ用駆動アンプを図9に示す。アンプの評価に関しては、X-Y ステージをサブナノメートルの位置決め精度を有しながら 100 μm 平方の領域を高速に走査するために不可欠な低ノイズ型の駆動アンプ {小信号入力 0.5Vpp にて-3dB} の周波数特性 (DC~10kHz)、大信号入力 (2.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~3kHz)、出力ノイズ 0.5mVrms} を確認した。



(a)ユニバーサル基板での試作



(b) プリント基板での試作

図9 試作した X-Y ステージ用駆動アンプ

2-1-7 X-Y ステージ用コントローラ設計製作と実用化設計

0.1nm の分解能で高速な制御性を有するため、高速で高分解能な D/A、A/D と DSP で構成されるローコストな制御回路を開発した。本研究で採用した米国テキサス・インスツルメンツ社の DSP (TMS320C6713) は、アドバンスト VLIW アーキテクチャ「VelociTITM」を採用した浮動小数点 DSP である。300MHz の周波数動作で 1800MFLOPS の性能を実現し、高速浮動小数点演算処理が可能である。また、豊富なペリフェラルを搭載しているため、

システムサイズ、消費電力およびコストの低減が実現した。

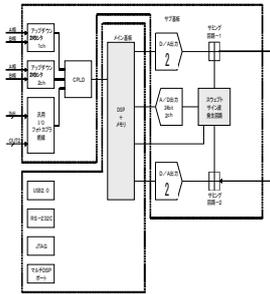


図10コントローラブロック図



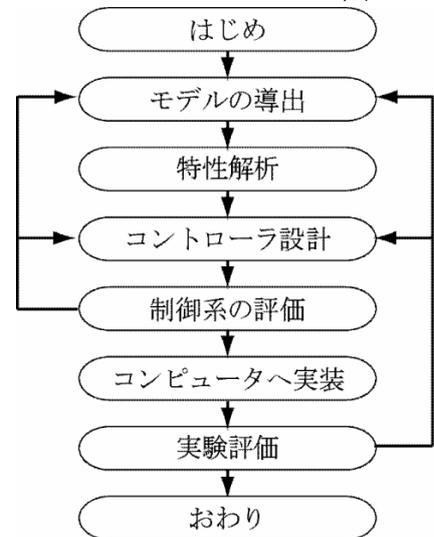
図11メイン基板の外観

2-1-8 X-Yステージコントロールソフトウェアの設計と実用化

図12

一般に制御系設計は、制御対象のモデルを導出することから始められる。しかし、本 $100\mu\text{m}$ X-Yステージの場合、その運動方程式を導出することは困難であるため、 $100\mu\text{m}$ X-Yステージの周波数特性を測定し、その結果から制御系設計に用いるモデルを導出し、そのモデルを用いて制御系を設計する。

制御系には、業界で広く用いられ、現場技術者にも理解しやすい実用的な連続時間PIDコントローラを用いて高精度位置決め性能を向上させる方法について検討を行った。PIDコントローラでは、コントローラに含まれる3つのゲイン（比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲイン）の決め方により、制御性能は決まってしまうが、その方法は試行錯誤しているのが実情である。そこで、本事業では、特許出願中の方法（長縄、平元、森、渋谷：PID制御装置及びそのPID制御系の制御要素を設定する方法、特許出願番号：2006-6309、公開番号：2007-188322）図12



制御系設計の流れにより、3つのゲインを決定した。設計したコントローラを用いた場合の制御系の評価には、制御系設計用CADソフトウェアMATLABを使用して、開ループ伝達関数の周波数応答、閉ループ伝達関数の周波数応答、ステップ応答による立ち上がり時間、遅れ時間の評価などを行った。つぎに、設計したコントローラをDSP (Digital Signal Processor) に実装するため、離散時間伝達関数に変換する必要がある。一般に、離散時間伝達関数を求める方法には、ゼロ次ホールドを用いた方法、双一次変換、連続時間系と離散時間系の伝達関数の極とゼロ点を対応させる方法など、様々な方法がある。しかし、上記で述べた特許出願中のコントローラ設計法は、X-Yステージが持つ共振特性を相殺するように設計しているため、この特性を消失しないようにプレワーブ法を用いた離散化を行った。

2-2 高速・高精度 SPM 用 Z ステージの開発

2-2-1 Z ステージの構造解析

半導体露光装置用ナノモーション・アクチュエータの概略を図1に、また、試作したアクチュエータの写真を図2に示している。このアクチュエータは基本的には電圧を印加すると微小な伸びを発生する積層型圧電素子を利用し、高速・高精度な微動アクチュエータとして利用するものである。積層型アクチュエータの主成分PZTセラミックスは大変もろい材料である。実用可能なアクチュエータとして適用するためには、PZT積層

型圧電素子に引張り、せん断、曲げが作用しないように外力に対して保護する構造体が必要であり、外側の部分はその構造支持体となっている。

試作したアクチュエータの外形寸法は幅 9.5mm、長さ 17mm、厚さ 7mm である。また、PZT の積層型圧電アクチュエータの寸法は幅 3.5mm、長さ 6mm、厚さ 6.2mm である。半導体露光装置用ナノモーション・アクチュエータは PZT の積層型圧電アクチュエータの微少な変位を効率よく出力でき、また、せん断や曲げなどの外力を避けるように、図 1 のスリット部は伸びに対してのみ変形を許す形態を採用している。スリット部の構造を最適な形状に設計するために有限要素解析による検討を行った。

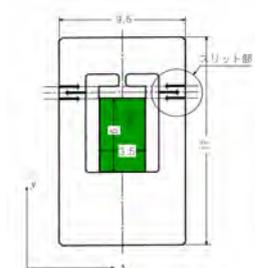


図 1 アクチュエータの概略図

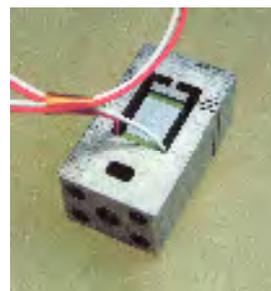


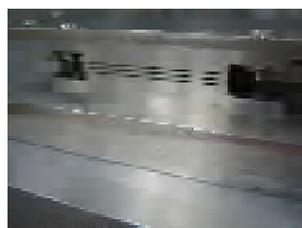
図 2 試作アクチュエータの写真

2-2-2 Zステージの製作と評価

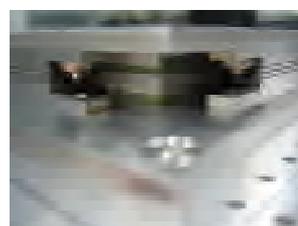
FEM による構造解析の結果を踏まえて加工検討を行いながら、機械加工図や工程図を作成して、Z ステージ本体を加工した。次に、図 13 に示すように圧電素子や減衰機構を組み込み、Z ステージ Rev. 1 を製作した。本ステージの評価に関して、最大可動距離 $5\mu\text{m}$ 、最大走査速度 $20\mu\text{m}/\text{s}$ 、制御帯域 1kHz が達成できていることを確認した。ただし、Z 軸方向の真直度 0.1nm は未達成である。



(a) 組み付け後の様子



(b) スプリング部詳細



(c) 圧電素子部詳細

図 13 Z $5\mu\text{m}$ Stage Rev. 1

2-2-3 Zステージの実用化設計と評価

SPM は金属等の表面観察から始まり、摩擦力、吸着力、弾性、硬度など観察以外の試験機として多様な計測に用いられている。高精度で高分解能な試料表面の観察では、カンチレバー先端の探針の高さを制御しながら試料表面を走査する。そのため、カンチレ

バー部のみが駆動する Z ステージが有用である。この Z ステージは可動される質量を必要以上に大きくしないことで高い応答性を得ることができる。このカンチレバー部のみを駆動するナノモーション・アクチュエータは、弓なり形状の 3 組の板バネにより構成されている。構造解析を行ったところ、スリットタイプと同様に圧電素子への外部からの反力を受けずに材料の許容応力値以下で、圧電素子の伸び方向のみに 10 μm 以上の変位が発生したことを確認した。また、共振周波数も 2 kHz 以上であった。スリットタイプは設計上のバネ定数を実現するために、スリット幅やスリット厚さの寸法管理が厳しい。しかし、本構造は図面形状としては一見複雑であるが、NC 装置を用いることで容易に加工できるため、製品としてのコストダウンが可能である。この様な Z 5 μm Stage の構造解析結果に基づいて 3D モデルを作成し、形状の確認を行いながら加工図面を作成し、圧電素子や減衰機構を組み込み、Z ステージ Rev. 2 を製作した。本ステージの評価に関して、最大可動距離 5 μm 、最大走査速度 40 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、制御帯域 2 kHz が達成できていることを確認した。ただし、Z 軸方向の真直度 0.05 nm は未達成である。

2-2-4 Z ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計

Z ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計の研究成果は、X-Y ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計の研究成果と同質であるため、X-Y ステージ用駆動アンプ一軸分を適用とし、報告書への記載は省略する。

2-2-5 Z ステージ用コントローラの設計製作と実用化設計

Z ステージ用コントローラ設計製作と実用化設計の研究成果は、X-Y ステージ用コントローラ設計製作と実用化設計の研究成果と同質である。Z ステージ用コントローラもアンプと同様に軸間の制御性能を合わせるため、X-Y 軸と共通のものを適用とし、報告書への記載は省略する。

2-2-6 Z ステージコントロールソフトウェアの設計と実用化

Z ステージコントロールソフトウェアの設計と実用化の研究成果は、X-Y ステージコントロールソフトウェアの設計と実用化の研究成果と同質であるため、報告書への記載は省略する。

2-3 高速・高精度 SPM 用 X-Y、Z ステージシステムの実用化

500 μm 平方の走査面積で 1 スキャ 0.5 ms の速度、0.1 nm の位置決め精度を有する X-Y ステージと、X-Y ステージの動作に連動し、最大可動距離 5 μm 、最大走査速度を 40 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、制御帯域 2 kHz で試料表面と探針間を追従制御する Z ステージを組み合わせた X-Y-Z 機構に、駆動アンプやコントローラを組み合わせた図 1-4 に示す高速・高精度位置決めシステムを実現した。

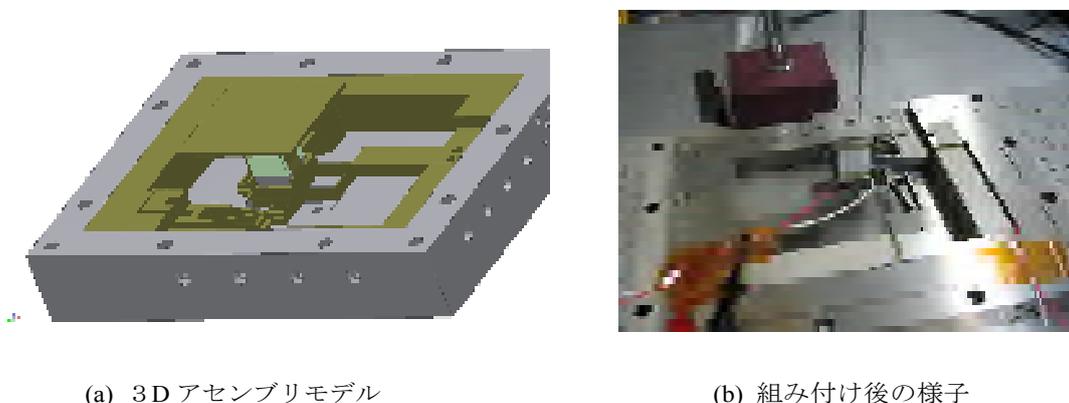


図 1-4 X-Y-Z Stage

第3章 全体総括

3-1 全体総括

本事業が採択されてから早一年が経過しようとしている。その間にもフラッシュメモリの高密度化や急速な低価格化、また演算を司る CPU や MPU においては高速化、複数のコアによる分散処理、低発熱や小型化など、半導体産業だけを見ても技術の高度化は目まぐるしいものがある。半導体の微細化の指針である hp(ハーフピッチ：半導体の配線幅と配線間の距離を足した値の 1/2 の距離を微細化の指針とするもの。) のトレンドも既に 32nm から 22nm に向かって猛進しており、SPM(Scanning Probe Microscopy)の観察技術を活用した半導体の検査、特に露光後にエッチングされた回路パターンの不良解析をオンラインで行いたいという要求は日増しに高まっているものと予想される。

(1) X-Y ステージの構造解析と製作と評価について(2-1-1、2-1-2、2-1-3、2-1-4、2-1-5)

第2章の2-1でまとめた“高速・高精度 SPM 用 X-Y ステージ(Nano-Motion Stage)の開発”では、100 μm と 500 μm 平方の平面内を高速に走査することを目標とし、初めに FEM (Finite Element Method：有限要素法)を用いた構造解析により、最大変位量、共振周波数、振動モード、変位に伴うステージの回転や bow(弧：SPM 用ステージの走査動作において、試料の傾きやステージの縦真直の変化によって試料表面の凹凸とは関係なくプローブによって検知される上下変動で、直線の傾きとして補正できないもの。お椀形状や S 字形状など 2 次や 3 次などで近似される曲線を一般に描く。)に着目し、SPM に要求される機械特性を有する適切な形状を決定し、次に加工図面を作成して加工を行い、積層型圧電素子を組み込み基本特性の評価試験を行った。

基本特性の解析結果と実験結果との間の誤差が 5%未満であれば、位置フィードバックを有する制御系を構成し、Open-loop 特性やステップ応答試験と X 軸と Y 軸の相関と高精度な平面内移動を検証するため、各軸に正弦波と余弦波信号を駆動アンプで増幅して印加し、リサージュ円の半径の大きさで精度確認、歪方で平面内の位置決め精度を評価した。本研究開発では、初めに X-Y ステージ 100 μm Revision 1 を構造解析(2-1-1)により設計検討してから製作と性能評価(2-1-2)の段階に進み、Revision 1 の問題点、課題や変更点を抽出し、実用化を鑑みながら同様なプロセスで Revision 2 の試作評価(2-1-3)を行った。次に得られた結果を判断材料に走査範囲を 5 倍、移動面積では 25 倍まで拡大した X-Y ステージ 500 μm Revision 1 の試作評価(2-1-4)を行った。この場合も X-Y ステージ 100 μm Revision 1、2 の開発過程と同様に問題点、課題や変更点を抽出し、また実用化を鑑みながら同様なプロセスで Revision 2 を試作し総合評価(2-1-5)を行った。

仕様：X-Y100 μm ステージ Rev. 1

- ・最大走査速度 5.0msec 達成
- ・制御帯域 500kHz 達成

仕様：X-Y100 μm ステージ Rev. 2

- ・最大走査速度 2.5msec 達成
- ・制御帯域 1kHz 達成

仕様：X-Y500 μm ステージ Rev. 1

- ・最大走査速度 5.0msec 達成
- ・制御帯域 500kHz 達成

仕様：X-Y500 μm ステージ Rev. 2

- ・最大走査速度 2.5msec 達成
- ・制御帯域 1kHz 達成

(2) 駆動アンプの設計製作と実用化設計について(2-1-6、2-2-4)

X-Y ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計(2-1-6)では、精密位置決めのためとなる出力ノイズを 1mVp-p 以下のレベルに達することが確認され、歪も 0.03%/50mV と良好な結果が得られた。

Z ステージ用駆動アンプの設計製作と実用化設計(2-2-4)は、対象とするアクチュエータに適用した積層型圧電素子の電気特性が許容範囲内だったので、X-Y ステージ用駆動アンプの一軸分を適用した。

仕様：X-Y100 μ m ステージ駆動アンプ

- ・小信号入力 (0.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~10kHz) 達成
- ・大信号入力 (2.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~3kHz) 達成
- ・出力ノイズ 0.5mVrms 達成

仕様：X-Y500 μ m ステージ駆動アンプ

- ・小信号入力 (0.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~10kHz) 達成
- ・大信号入力 (2.5Vpp にて-3dB) の周波数特性 (DC~3kHz) 達成
- ・出力ノイズ 0.5mVrms 達成

※最大ストローク時のステップ応答には対応できていないため達成率は 65%

(3) コントローラの設計製作と実用化設計について (2-1-7、2-2-5)

X-Y ステージ用コントローラの設計製作と実用化設計 (2-1-7) では、DSP を用いて演算速度で 1350GFLOPS を達成、プログラム作成で最も重要な file system を構築した。

Z ステージ用コントローラの設計製作と実用化設計 (2-2-5) も同様に軸間の制御性能を合わせるため、他の軸と共通のものを適用した。

仕様：X-Y ステージコントローラ

- ・サーボ帯域 100kHz 達成
- ・入出力分解能 20 ビット 達成
- ・演算速度 1500MFLOPS 達成
- ・RAM8GB 達成

仕様：Z ステージコントローラ

- ・サーボ帯域 100kHz 達成
- ・入出力分解能 20 ビット 達成
- ・演算速度 1500MFLOPS 達成
- ・RAM8GB 達成

(4) コントロールソフトウェアの設計と実用化 (2-1-8、2-2-6)

X-Y ステージコントロールソフトウェアの設計と実用化 (2-1-8) では、100 μ m 仕様の X-Y ステージで実験した結果、Open-loop におけるゲイン交差周波数が X 軸：1.14kHz、Y 軸：1.16kHz、5 μ m までの立ち上がり時間が両軸共に 120 μ s となり、100 μ m 平方を走査するステージとしては大変高速な特性を有することが確認できた。また直径 10 μ m のリサージュ円を 1Hz、10Hz、100Hz と 10 倍ずつ速度を上げて描いた場合にも速度によって真円が崩れることなく、高速で高精度な平面位置決めが可能なことが示された。

Z ステージコントロールソフトウェアの設計と実用化 (2-2-6) では、Open-loop におけるゲイン交差周波数：1.14kHz、5 μ m までの立ち上がり時間は 1.4ms であった。

仕様：X-Y ステージコントロールソフトウェア

- ・位置決め精度 0.1nm (3 σ) 達成

仕様：Z ステージコントロールソフトウェア

- ・位置決め精度 0.1nm (3 σ) 達成

(5) Z ステージの構造解析と製作と評価について (2-2-1、2-2-2、2-2-3)

2-2 でまとめた“高速・高精度 Z ステージの開発”では、X-Y ステージ 100 μ m を搭載して Z 方向に 10 μ m 変位させるタイプのものと同様にステージに対向するように固定側に配置され、SPM のプローブ及びセット治具を搭載し、走査に合わせて表面の形状に対して高速な応答が求められるタイプの 2 種類のアクチュエータを開発した (2-2-1、2-2-2、2-2-3)。X-Y ステージ搭載タイプでは Z 軸方向に最大変位：11.7 μ m、共振周波数：4.2kHz を実現し、当初の目標仕様を大幅に超えることができた。

仕様：Z5 μ m ステージ Rev.1

- ・最大可動距離 5 μ m 達成
- ・Z 軸方向の真直度 0.1nm 未達成
- ・最大走査速度 20 μ m/s 達成
- ・制御帯域 1kHz 達成

※真直度の評価方法が確立できていないため達成率は 80%

仕様：Z5 μm ステージ Rev. 2

- ・最大可動距離 5 μm 達成
- ・Z 軸方向の真直度 0.05nm 未達成
- ・最大走査速度 40 $\mu\text{m/s}$ 達成
- ・制御帯域 2kHz 達成

※ 真直度の評価方法が確立できていないため達成率は 80%

(6) 高速・高精度 SPM 用 X-Y、Z ステージシステム設計及び実用化について(2-3)

2-3 でまとめた“高速・高精度 SPM 用 X-Y-Z ステージシステムの実用化”では、2-1 と 2-2 で得られた成果を統合し、各軸の動作や相間性を確認した。また、シミュレーションでは、5 μm 仕様の NMA を搭載した状態で X-Y ステージ 500 μm Revision 1 は、10 μm の目標値に対して 0.2ms の立ち上がり時間を達成し、最終目標をクリアできた。

仕様：X-Y、Z ステージシステム

- ・(X-Y)1 スキャン 0.5msec 達成
- ・(X-Y)0.1nm の位置決め精度 達成
- ・(Z) 最大可動距離 5 μm 達成
- ・(Z)真直度 0.05nm 未達成
- ・(Z)最大走査速度 40 $\mu\text{m/s}$ 達成
- ・(Z)制御帯域 2kHz 達成

※真直度の評価方法が確立できていないことや、各要素を組み合わせたシステムとしての検証が必要なため、実施計画に対する達成率は 50%。

本事業実施中にアドバイザーであり、かつ、国内最大手の SPM 製造メーカーであるエスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社より新たに示された、新機種ステージ装置の仕様に対し、クリアしなければならない最重要特性である「bow 特性 (Z 方向の弧の動き)」に関しては、共同実験を経て、10nm レベルまで改善することができたが、要求仕様 5nm 以下をクリアすることができなかった。これは、アクチュエータの動特性を考慮した制御性能などが含まれるが、実用化に際しては今後の課題となる。

実用化に向けては、参画機関が連携し、新たな開発目標の設定と継続的な技術開発を実施することで早期の実用化を目指す。

3-2 今後の課題

アドバイザーであるエスアイアイ・ナノテクノロジー(株)との合同実験の成果として、特に X-Y ステージ 100 μm 仕様の Nano-Motion Stage の製品化に向けての道筋が、やっと見えて来たところである。しかし SPM も以前のような非常に高価な装置ではなく、大学等の教育機関や公設の試験期間でも一般的な観察装置となっている。そのため、従来にはない位置決め精度を持っていたとしても価格は従来通りといった厳しい面も見られる。そのため、高精度化と低コストを両立させることが、実用化に向けての一つのハードルと言って良いと思われる。また実用化においてシステム化は不可欠であり、駆動アンプやコントローラとそのソフトウェアが副次的に重要となる。この中にはステージや Z 軸側のアクチュエータの位置を測定する変位計も必要となる。しかしナノメートル以下のレベルで安定に計測する変位計は現状複数あるが、SPM で採用するには高価であったり、大きさが合わなかったりと次世代のスペックを考えた場合、システム化を完結することはできていない。そのため SPM に特化しコストと精度をバランスさせた位置フィードバック用センサの開発が急務と考える。