

研究内容報告

平成 29 年度磁力制御と自重で高精度位置決めを可能にする磁気浮上式微動テーブルの開発補助事業

5. 2 軸可撓支持微動テーブルの開発と微動性能評価

(1) . 2 軸可撓機構テーブル微動装置の製作

1 軸微動を 2 軸微動に発展させた 2 軸可撓機構テーブル微動装置を新たに構築した. 図 1 に可撓機構と微動原理を示す. (a)は微動が生じる前の初期状態を表す. 可撓機構は円弧切欠きの弾性ヒンジを施した 4 本のビームで構成される. ビーム 1~4 は A2017, C5191, SUS304 の 3 種類を交換可能で互いに端部をボルト結合しており, 厚み×全長=6×400, 切欠き厚み=1 である. また, ビーム 1, 2 の中央部を固定支持, ビーム 3, 4 は中央部をストラットで結合し, ビーム 3, 4 の外側中央部とストラットの中央両側面には永久磁石 (ネオジム磁石: 以下 PM と称する), 上部にテーブルを設置している. PM A~D は $\phi 30$ で厚み $t=2, 1$ (磁束密度: 40mT, 79mT) の 2 種類を用いる. 予め $t=2$ が取付けてあり, $t=2: 1$ 枚の場合と $t=2$ に $t=1$ を吸着させた $t=2+1: 2$ 枚の場合で磁力を生じさせる. (b)は PM B に対して適当な間隔で電磁石 (以下 EM と称する) を対向設置した場合に, 異極間に作用する吸引力で B 側に微動 (X 軸微動) する様子を模式的に示す. (c)は同様に C 側に微動 (Y 軸微動) する様子を示し, 各々逆方向に吸引力を作用させれば A, D 側に微動する. また, 可撓機構は各軸に対して対称構造であるため幾何形状的には軸間干渉は生じない.

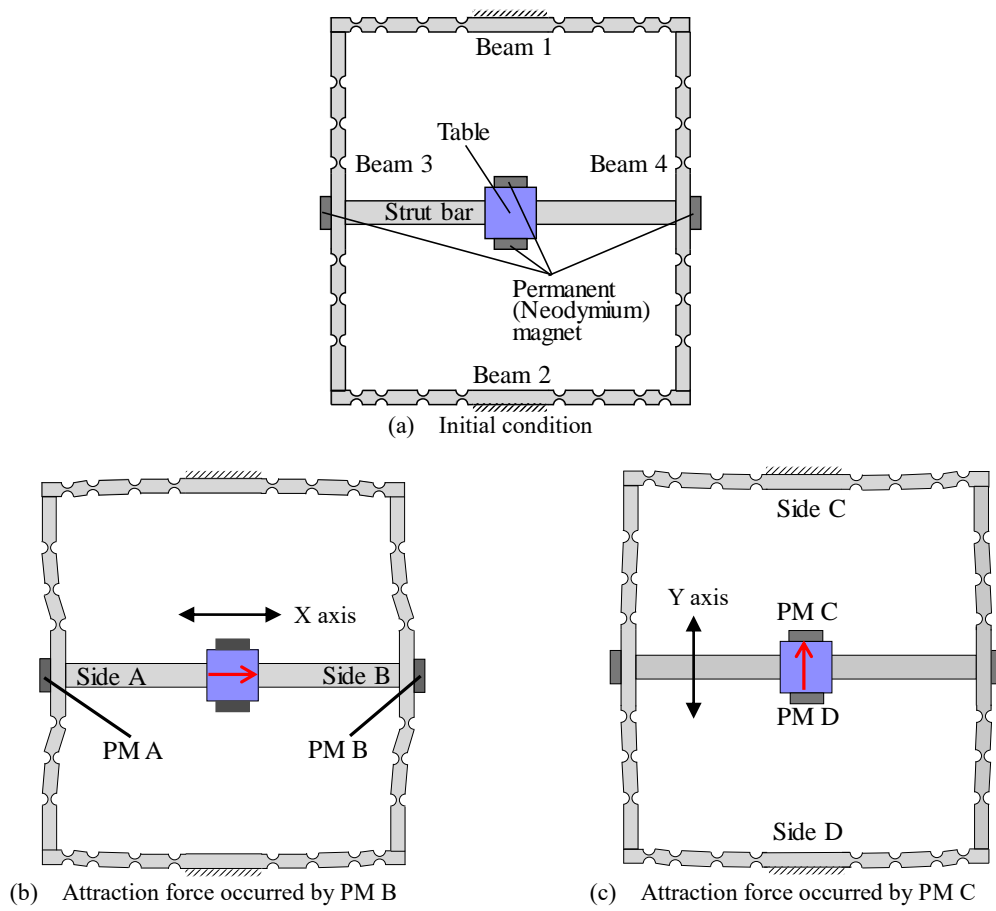


図1 テーブル微動と可撓機構

(2) . 印加電流, 吸引力に対する出力変位の見積

1軸可撓機構と同様に電磁吸引力の校正を行った。あわせて可撓機構の剛性解析を行い、印加電流～吸引力～出力変位の三者間の関係を見積もった。電磁石は新たに4つ製作した。なお、印加電流と吸引力の関係は理論的に予測し難いためEM、PMの磁極間隔と吸引力の関係を実験的に求めた。図2はPMの厚み t と磁極間隔Gapがそれぞれ $t=2+1$, Gap=0.2(最大吸引力)および $t=2$, Gap=5(最小吸引力)での印加電流と吸引力の関係を示す。印加電流の最大は発熱を考慮して2Aとした。はじめの電流増減時に0Aに戻しても吸引力はゼロにならず残留磁気によるヒステリシスが表れるが、以降、増減を繰り返す過程ではヒステリシスは表れず、2Aでの吸引力は残留磁気分小さくなった。なおGapを ∞ にした後に試験すると1章、図2の特性が再現した。図2は各軸の吸引力とテーブル変位の関係をCATIAで解析した結果であり、変位の大小はヤング率：A2017<C5191<SUS304に倣っている。なお、剛性の違いからX軸とY軸の変位は異なっている。当結果と図2の結果を用いると図3で示す各軸の印加電流に対する微動変位を見積もることができる。

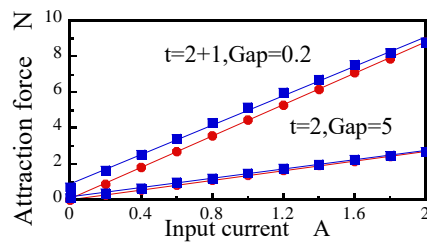


図2 印加電流と吸引力の関係

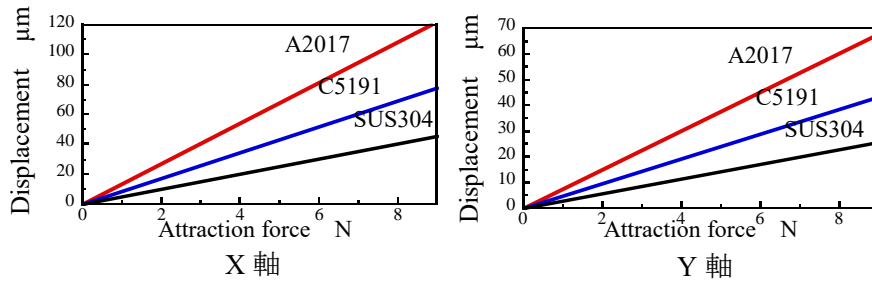


図3 可撓機構の剛性見積

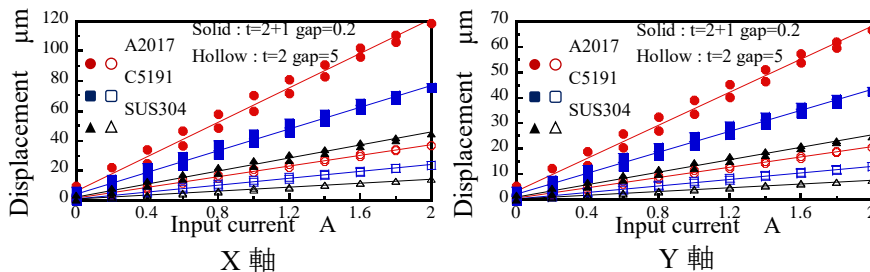


図4 印加電流と変位の関係 (見積)

(3) . 磁極間隔調整による吸引力制御と変位計測

EM と PM は X, Y 軸に対して各々2対設置し, EM A~D (心棒: S45C, 線材: 銅, $\phi 0.4$, 330 巻, 磁極面径 $\phi 25$) は直動ステージで磁極間隔を調整できる. つまり, 図 5 に示すように Gap X1, X2 および Y1, Y2 を個別で設定できるため例えば $X1 < X2$, $Y1 < Y2$ とすると図 1 で示す B および D 側ではストロークは小さいが高分解能変位の位置決め, A および C 側ではその逆の特性が生じる. さらに両者を連係させることで長ストロークと高分解能位置決めを容易に両立できる. 図 6 は EM A~D の駆動および変位計測システムを示す. EM への電流は直流安定化電源で印加し, 外部電圧 (ファンクションジェネレータ) 制御によって各々の磁力を個別に調整できる. 変位は X, Y, Z 各軸方向に対して静電容量型変位計で計測し, PC でデータを取得する.

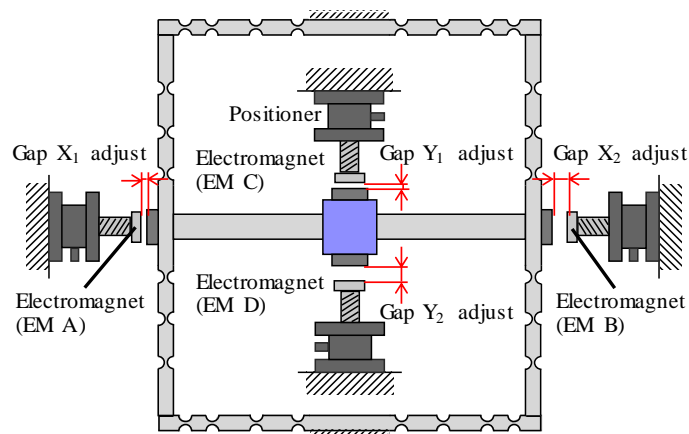


図 5 磁極間隔の調整

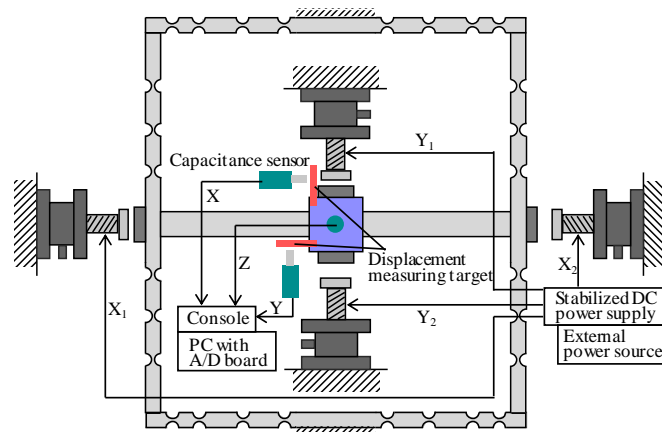


図 6 駆動と計測システム

(4) . 2軸微動テーブル試験装置

図7に試験装置を示す。可撓機構は基板上に設置した支持板にビーム1, 3を接続して基板には接触しない状態で支持している。ストラット中央には側面にPM取り付け部を兼ねたテーブルを取り付けており、上部には変位測定用ターゲットを設けている。なお、PM C, D間は互いの磁力が影響しないように間隔を空けている。装置はゴム式の除振台上に搭載している。

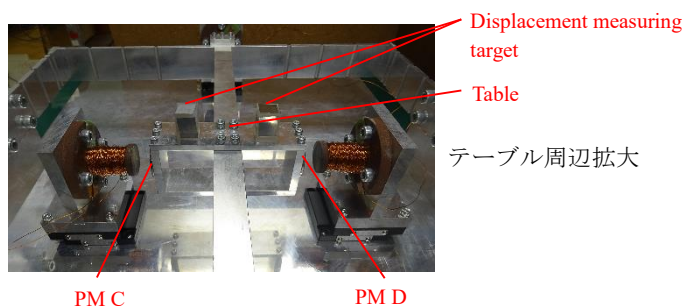
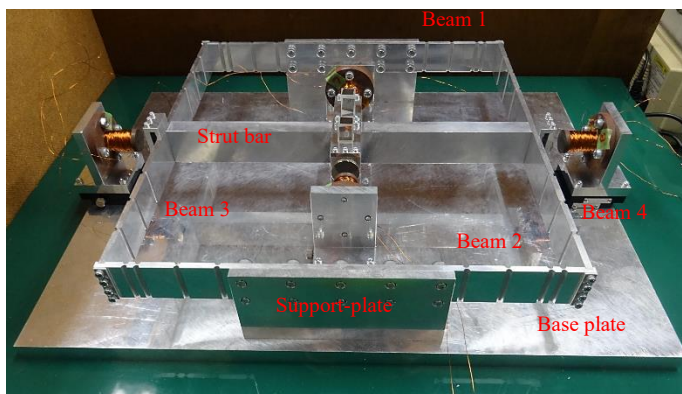


図7 試験装置

(5) . 微動特性

可撓機構に A2017 を設定し, X 軸, Y 軸に対して長ストローク, 高分解能および両者を連係させた場合の微動特性を以下に示す.

○ 長ストローク微動

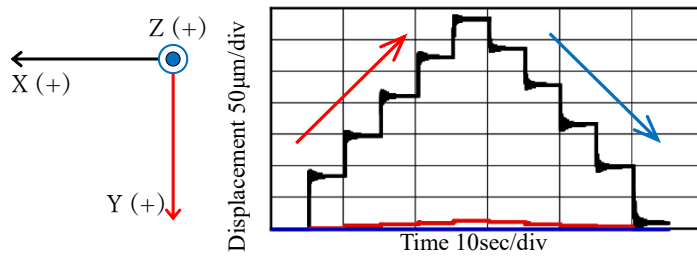
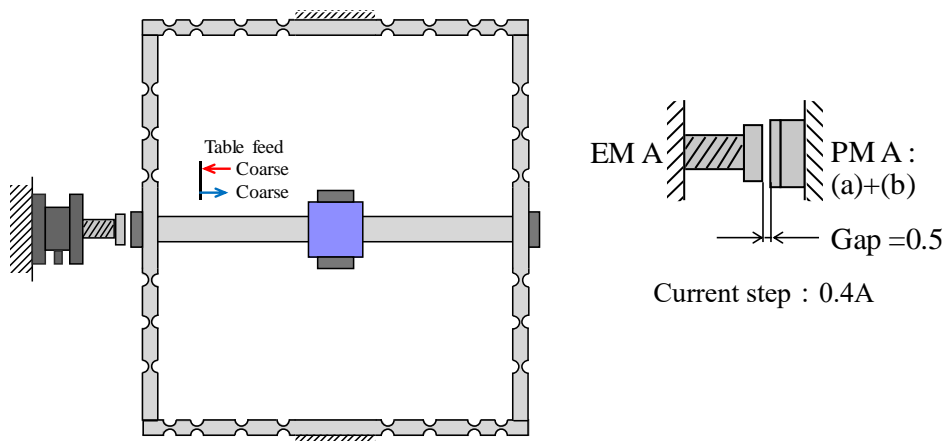
3 軸座標を図 8(a)左下のように定義したときの X 軸微動の結果を示す. 図 8(a)右下は最大吸引力を与えるために図 8(a)上のように EM A, PM A と Gap を設定した場合の 0.4A×5 ステップの応答である. Gap : 0.2 で最大吸引力が得られるが電流を大きくすると EM A と PM A が接触するため 0.5 としている. 電流変化に追従したステップ応答を観察でき, 約 340 μ m の最大変位を得た. なお(2)で説明した見積では 113 μ m であり, 約 3 倍となった. また, Z 軸干渉はほぼゼロだが Y 軸干渉が X 軸変位の 4%程度発生した. 同様に 3 軸座標を図 8(b)左下のように定義したときの Y 軸微動の結果を示す. 図 8(a)右下は図 35(a)上のように EM A, PM A と Gap を設定した場合の 0.4A×5 ステップの応答である. 最大変位は約 160 μ m であり, 見積変位 : 68 μ m の約 2.4 倍となった. また, X 軸干渉が Y 軸変位の約 3%程度発生した.

○ 高分解能微動

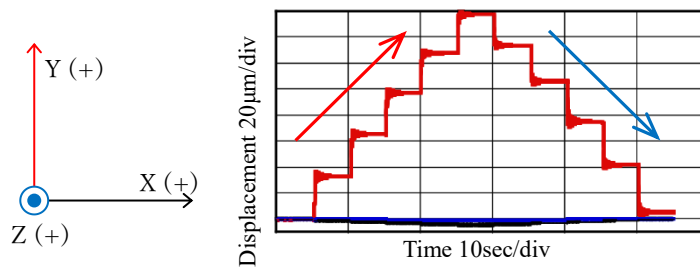
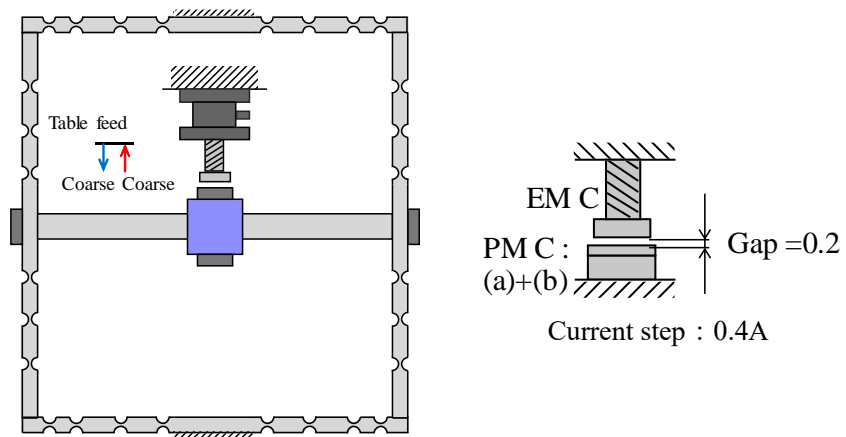
3 軸座標を図 9(a)左下のように定義したときの X 軸微動の結果を示す. 図 9(a)右下は最小吸引力を与えるために図 35(a)上のように EM A, PM A と Gap を設定した場合の応答である. 印加電流は階段状変位を観察できる限界の 2mA とした. 1 ステップ変位は約 85nm であった. 同様に 3 軸座標を 図 9(b)左下のように定義したときの Y 軸微動の結果を示す. 図 35(b)右下は図 9(b)上のように EM A, PM A と Gap を設定した場合の応答であり, X 軸微動と同じ設定である. 1 ステップ変位は約 40nm であった.

○ 連係微動

図 10 に X 軸で長ストロークと高分解能の両者を組合せた連係微動の結果を示す. 3 軸座標は図 8, 9 の X 軸微動と対応する. 図 10(a)上に長ストロークの EM A, PM A と Gap および高分解能の EM B, PM B と Gap 設定条件を表す. 長ストロークが 0.4A×5 ステップの増加, 高分解能が 2mA×5 ステップの減少をさせた. 下図より両者の連係微動を観察でき, 長ストローク, 高分解能ともにそれぞれを単独で微動させた図 8, 9 とほぼ等しい最大変位と 1 ステップ変位を認めた. 図 11 は同様に Y 軸での結果を示す. X 軸微動と同じく連係微動を観察できる. なお高分解能微動では単独と異なり印加電流を 3mA とした. 2mA では階段状変位を観察できなかったためである. そのため長ストロークの最大変位は単独とほぼ同等だが, 1 ステップ変位は約 56nm となった.

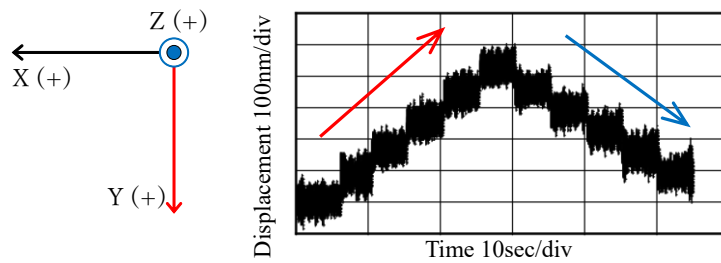
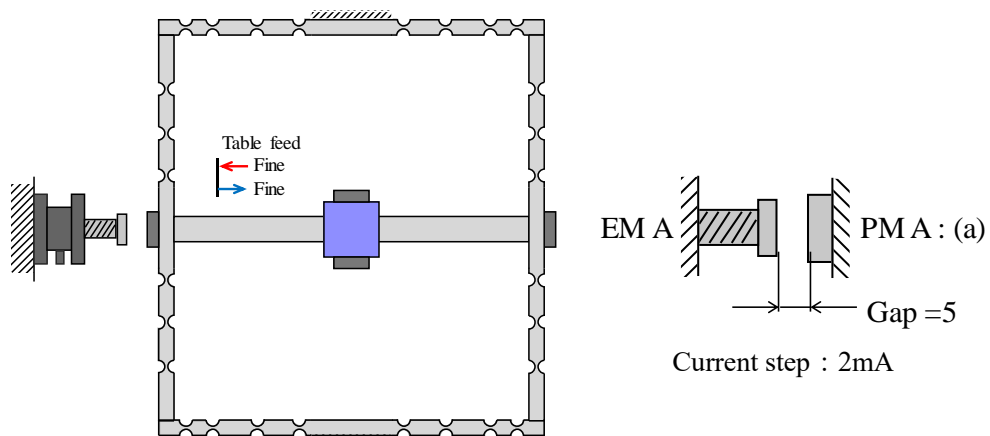


(a) X 軸微動

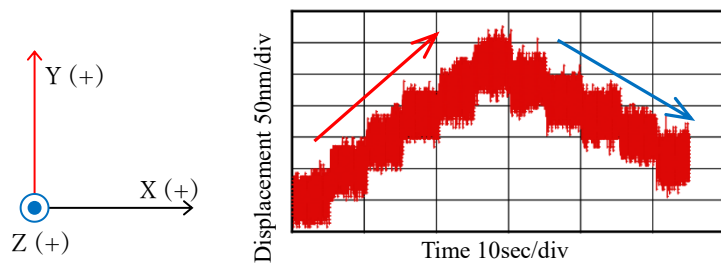
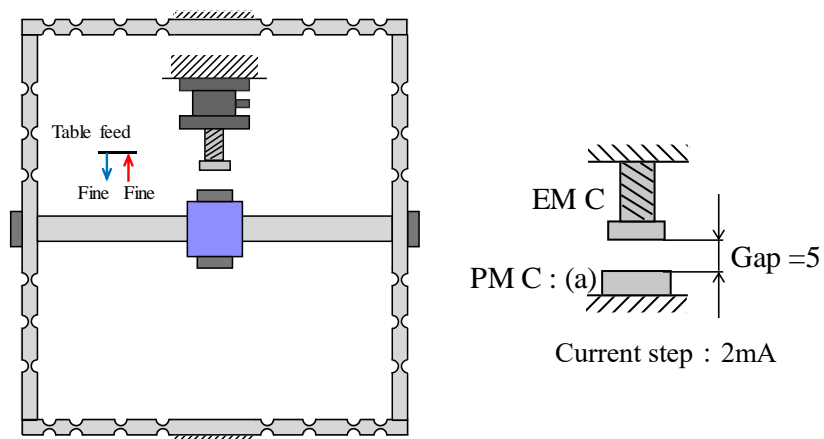


(b) Y 軸微動

図 8 テーブル微動と磁極設定およびステップ応答 (長ストローク)



(a) X 軸微動



(b) Y 軸微動

図9 テーブル微動と磁極設定およびステップ応答 (高分解能)

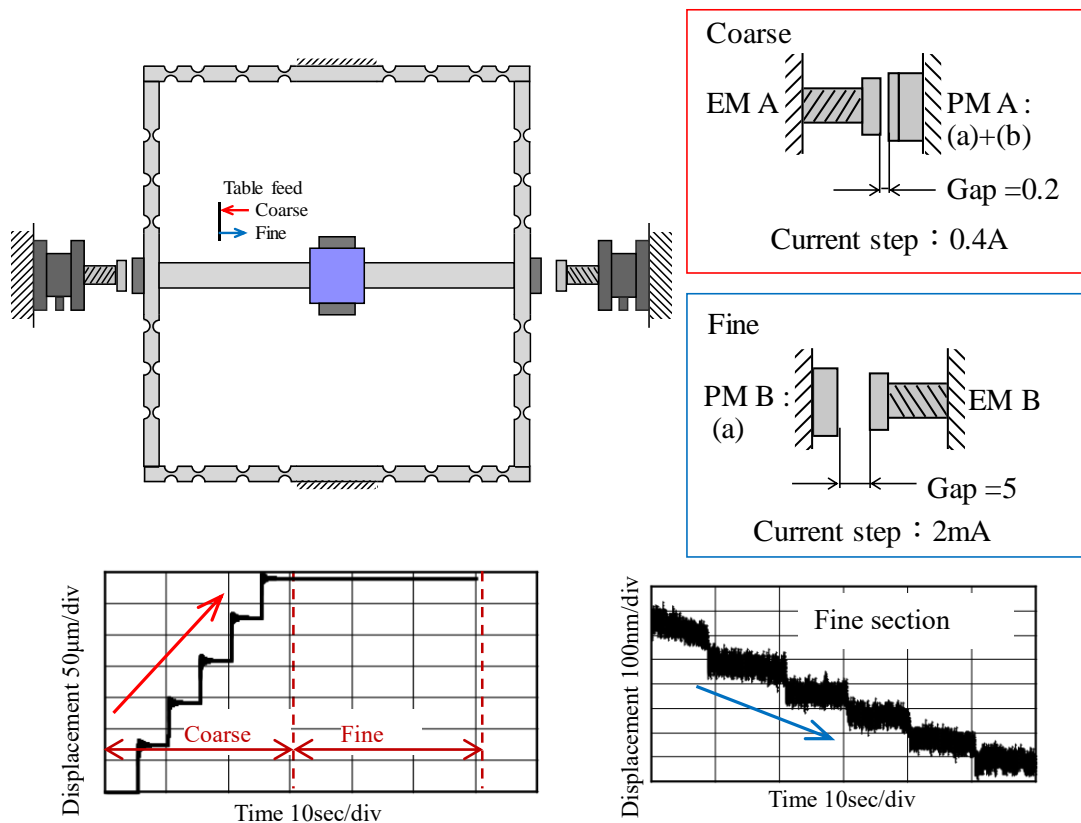


図 10 テーブル微動と磁極設定およびステップ応答 (X 軸：連係微動)

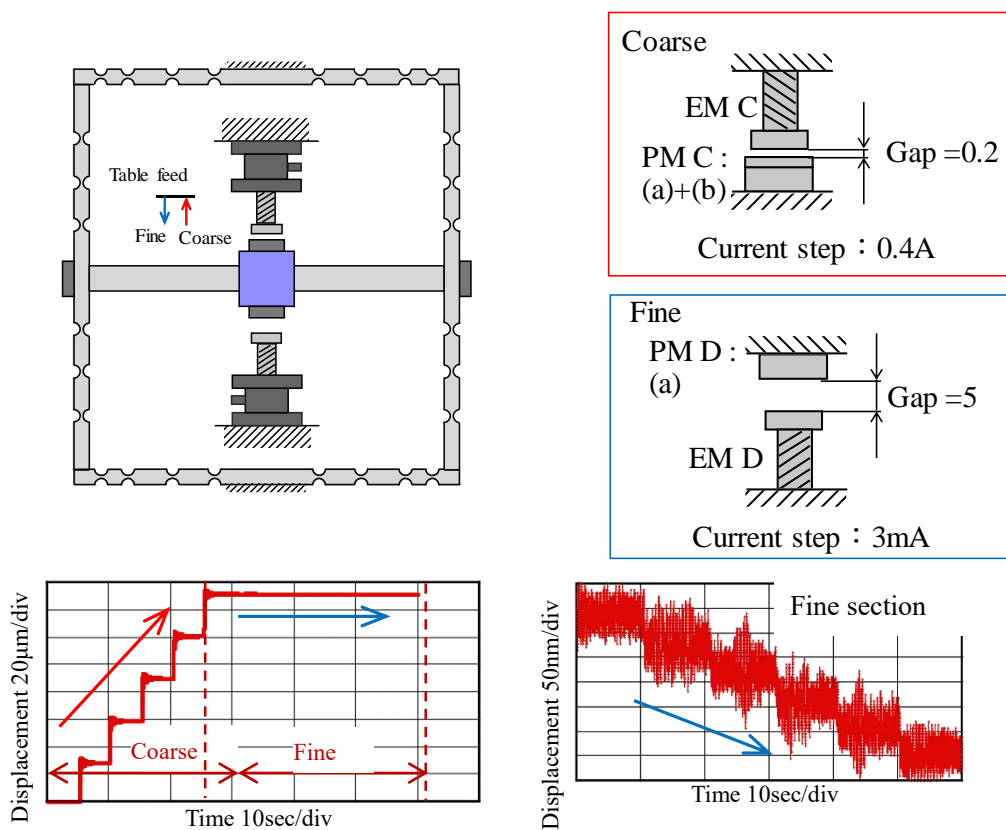


図 11 テーブル微動と磁極設定およびステップ応答 (Y 軸：連係微動)

○ X 軸, Y 軸微動結果の考察

X 軸, Y 軸微動ともに解析による見積よりも大きい変位となった。この理由はビーム 1, 2 固定支持部やビーム 1~4 端部結合部の変形が考えられる。ただし、前者については支持部の変位はほぼゼロであった。その他に各ビームサイズの誤差、特に切欠き厚みの誤差が大きく影響すると考えられる。2 章で述べたように幾何形状では軸間干渉は生じないが、実際は最大変位の 3~4% で生じている。これはビームごとに若干の形状差があると推察され、変位が見積より大きくなる一因でもあると考える。また、連係の高分解能微動において X 軸微動では 1 ステップ目が完全に整定しておらず、Y 軸微動では印加電流を大きくした分だけ単独微動より 1 ステップ変位が大きくなる。これらの理由は長ストロークの吸引力が影響していると考えられる。