

勾配磁気雑音に対応したアクティブ磁気シールドシステムの開発

國分 誠 石川 登
(技術研究所) (元技術研究所)

Development of Active Cancellation System for Gradient Magnetic Noise

by Makoto K okubunn and Noboru Ishi kawa

Abstract

This paper describes a method for decreasing the gradient magnetic noise in a specific area through the use of multiple magnetic noise detection sensors and cancellation coils. The invariable that decided by the position of the detection sensors and the cancellation coils controls the electric current of the cancellation coils. Analysis revealed the characteristics of the decreased magnetic noise and an experiment confirmed them. The sensors and coils can be arranged around a device to decrease its gradient magnetic noise.

概要

複数の磁気雑音検出センサとキャンセルコイルを用いて、所望エリア内の勾配磁気雑音を減衰する新たなアクティブ磁気シールドシステムを提案した。検出センサとキャンセルコイルの配置により制御定数を算出し、それを用いてキャンセルコイル電流を制御し、勾配磁気雑音を減衰できる解析モデルを考案した。解析モデルと同等の実験装置を製作し、周波数特性、距離特性、減衰分布特性を確認した。磁気シールドが必要な機器の周囲に磁気雑音検出センサおよびキャンセルコイルを配置することで、機器周辺の勾配磁気雑音を 5/100 に減衰させ、次世代半導体製造施設への対応が可能であることが確認できた。

§ 1. はじめに

半導体や液晶パネルの基板に用いられる回路のパターンを製造するリソグラフィ(露光)技術は、素子の高集積化に伴い線幅ならびに線間隔の微細化が進められており、製品品質や歩留まりの確保のために製造装置の設置環境の精密性がより必要になっている。近年、クリーン環境や振動環境などの精密環境技術の一つとして、特に研究開発段階のリソグラフィ技術に、磁気環境の制御技術が求められてきている。磁気環境の制御には、従来から、磁気シールドルームによるパッシブなシールド法が実施されてきた。また、磁気雑音を検出しキャンセルコイルにより逆位相の磁界を加えるアクティブなシールド法は、検出センサのある場所の磁気のみを打ち消すことが可能なため比較的小型の装置のシールドに利用が可能である。しかし、比較的大型の装置の使用環境においては、磁気雑音を除去したい空間に装置が存在するため、検出センサを装置周囲に設置することとなり、勾配磁気雑音をキャンセルできないなどの課題がある。

本報告では、半導体製造装置のような比較的大型の装

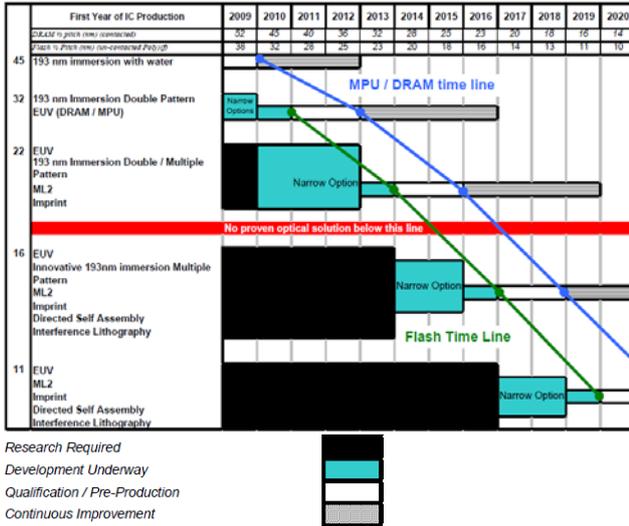
置に対応し、製造施設内で発生する不確定な磁気雑音のアクティブ磁気シールド法として、シールドエリアの周辺部に複数の磁気検出センサを配置し、同数の多段コイルを用いて、勾配磁気雑音を除去する手法を提案したので報告する。

§ 2. 半導体製造における磁気環境

半導体製造技術の中核となるリソグラフィ技術は近年までは「エキシマレーザ」を用いたリソグラフィ技術が使用されていたが、設計最小寸法がさらに極小化するに伴い、「液浸法(Immersion with water)」へと移行してきている。液浸法以降のリソグラフィ技術として、当面は「二重液浸法(Immersion Double Pattern)」が有望視されているが、それ以降のリソグラフィ技術は未確定の段階にあり、「EUV(Extreme Ultraviolet Lithography)」や「ML2(Mask Less Lithography)」などの研究開発が進められている。ML2の中で提案されている一手法である、電子線露光技術は、既に電子線描画技術がレチクルパターンの線描や特殊な半導体の少量生産などに適用され

ていることから、技術的な成熟度や微細化の点では優位にあるが、描画速度など量産化の点では劣るとされていた。しかし近年 MEB(Multi Electron Beam) ML2 などの量産化技術が提案され次世代リソグラフィ技術として期待されている。国際半導体ロードマップ(ITRS)¹⁾を表-1に示す。2020年に期待される設計最小寸法は、0.01 μm と想定されている。

表-1 ITRS 設計最小寸法ロードマップ



一方、建物の内部に存在する磁界発生源としては、電気室や給配電線等の電力設備、エレベータや扉等の磁性体の移動、機器の運転や人荷の移動に伴う振動等に起因した磁界の変動などが想定される。一例としてエレベータから生じる環境磁気雑音を図-1に示す。建物内部に発生する各種の磁気雑音の大きさは、発生源の容量ならびに発生源からの離隔距離に依存する。電子線露光装置を設置する際に、当該装置や各種機器の設置場所を留意して磁界発生源からの離隔距離を確保することにより、磁気雑音を低下させることが可能である。想定される環境磁気雑音発生源からの接近距離を数m~20m程度と想定すれば、それらの設計的な配慮により、磁気雑音は約0.1 μT 程度に抑えることが可能である²⁾。

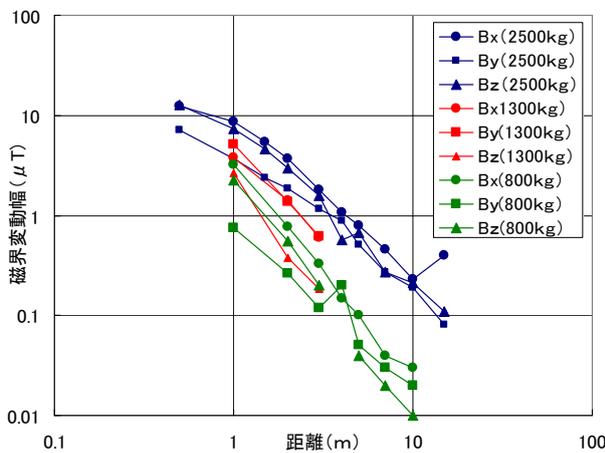


図-1 建物内の磁気雑音の一例(エレベータの移動)

これら環境磁気雑音が、電子線露光機器の精度に及ぼす影響を確認するために、磁気雑音の許容値を検討した。図-2に示すように、電子線は磁界中を進行すると、ローレンツ力を受けて偏向する。磁界による電子線の移動量 d は、加速電圧 V_0 とワーキングディスタンス WD (作動距離)、磁束密度 B (電子線の進行方向に直角な面内の成分)によって決まり、(1)式で表される。

$$d = \frac{B \cdot WD^2}{2} \sqrt{\frac{e}{2mV_0}} \quad (1)$$

e は電荷素量($1.60217733 \times 10^{-18}$ クーロン)、 m は電子の静止質量($9.10938188 \times 10^{-31}$ kg)である。(1)式において、加速電圧を50kV、 WD を0.1mと仮定すると、0.01 μm の寸法精度を確保するために許容される磁界変動は0.015 μT となる。将来的には、0.005 μm レベルの加工精度が予定されており、その際には磁界変動は0.0075 μT 以下に低減させることが必要である。

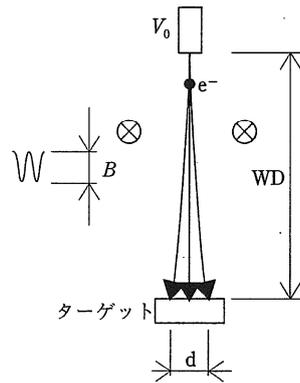


図-2 電子線の移動量

§ 3. 原理とシールド効果の解析

3.1 原理

従来のアクティブ磁気シールド法は、ヘルムホルツコイルに同一の電流を流し、検出センサで検出した磁気雑音と等強度で逆位相の磁界を加えることにより、磁気雑音をキャンセルさせていた。検出センサ付近では磁気雑音を効果的にキャンセルさせることは可能である。しかし、磁気雑音の大きさは発生源からの距離の一乗~三乗に反比例して減衰する³⁾。そのため、磁気雑音の発生源が近傍にある場合、検出センサ付近における磁気雑音の大きさは発生源からの影響を大きく受ける。それに対して、ヘルムホルツコイルによりキャンセルできる磁界の大きさは、シールド領域内ではほぼ一定なため、検出センサから離れた領域では、磁気雑音をキャンセルすることは難しい。

今回検討したアクティブ磁気シールド法は、キャンセ

ルコイルを4段に配置し、キャンセル領域内に同数の検出センサを用いる手法である。キャンセルコイルおよび検出センサの構成を図-3に示す。

4個の検出センサで測定された磁気雑音 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 とその磁気雑音を消去するためにキャンセルコイルに流す電流 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 の組合せを想定する。4体のキャンセルコイルが検出センサ位置で作る磁界 (B_j^i : j 番のキャンセルコイルが i 番の検出センサ位置で作る磁界) の総和が磁気雑音の正負を反転させた量と等しくなる場合 ($B_i = -B_j^i$) に、磁気雑音をキャンセルすることが可能となる。両者を満足させる4元一次の連立方程式を立て、連立方程式の解からキャンセルコイルに流す電流を求める。

連立方程式は(2)式で表される。

$$\begin{aligned} B_1 &= A_{11}I_1 + A_{12}I_2 + A_{13}I_3 + A_{14}I_4 \\ B_2 &= A_{21}I_1 + A_{22}I_2 + A_{23}I_3 + A_{24}I_4 \\ B_3 &= A_{31}I_1 + A_{32}I_2 + A_{33}I_3 + A_{34}I_4 \\ B_4 &= A_{41}I_1 + A_{42}I_2 + A_{43}I_3 + A_{44}I_4 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 A_{ij} はキャンセルコイル j に単位電流を流した際に、検出センサ i にて生じる磁界強度である。 A_{ij} は両者の相対的な位置により一義的に決定される。

(2)式は(3)式の行列式となる。

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$|A| \neq 0$ ならば、逆行列 A^{-1} が存在し、(4)式で表される。

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} \triangle a_{11} & \triangle a_{12} & \triangle a_{13} & \triangle a_{14} \\ \triangle a_{21} & \triangle a_{22} & \triangle a_{23} & \triangle a_{24} \\ \triangle a_{31} & \triangle a_{32} & \triangle a_{33} & \triangle a_{34} \\ \triangle a_{41} & \triangle a_{42} & \triangle a_{43} & \triangle a_{44} \end{pmatrix} \quad (4)$$

(3)式の行列式より電流 I_j は(5)式で求められる。

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} \triangle a_{11} & \triangle a_{12} & \triangle a_{13} & \triangle a_{14} \\ \triangle a_{21} & \triangle a_{22} & \triangle a_{23} & \triangle a_{24} \\ \triangle a_{31} & \triangle a_{32} & \triangle a_{33} & \triangle a_{34} \\ \triangle a_{41} & \triangle a_{42} & \triangle a_{43} & \triangle a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

この $|A|$ ならびに $\triangle a_{ij}$ はキャンセルコイルと検出センサの配置により一義的に決定されるため、あらかじめ

計算可能な値である。そのため、演算は単純な加算処理のみとなり、応答性に優れたものとなる。

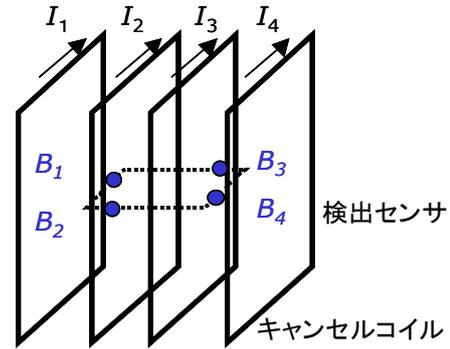


図-3 4段型キャンセルコイル構成図

3.2 解析モデル

4段型キャンセルコイルならびに検出センサ、磁気雑音発生源を図-4のように配置した。磁気雑音発生源からの磁界は距離の二乗に逆比例して減衰するものとした。磁気発生源の位置を X 軸方向に 200mm、2000mm、5000mm、10000mm に変化させ、シールド評価エリア内の磁気雑音の減衰率を求めた。シールド評価エリアは、100mm × 100mm、200mm × 200mm、400mm × 400mm、600mm × 600mm で検討した。

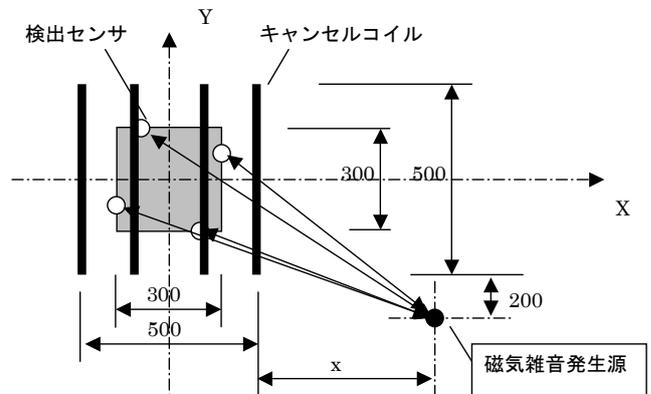


図-4 解析モデル

3.3 解析方法

シールド性能の解析は、まず、キャンセルコイルに単位電流を流した時に検出センサで観測される磁界強度 A_{ij} を算出し、 $[A_{ij}]$ の逆行列を求めた。次に磁気雑音発生源から検出センサまでの距離を考慮して、検出センサ箇所の磁気雑音の磁界強度 $B_1 \sim B_4$ を算出し、逆行列からキャンセルコイルに流す電流 $I_1 \sim I_4$ を求めた。磁気雑音発生源がシールド評価エリアに作る磁界強度 B と、キャンセルコイルに電流 $I_1 \sim I_4$ を流した時に、シールド評価エリアで得られる磁界強度 B' を求め、シールド評価エリアにおけるキャンセルコイルを動作後の磁界強度 $\angle B =$

$B-B'$ および、磁気雑音の減衰比 $\Delta B/B$ を算出した。

3.4 解析結果

3.4.1 磁気雑音からの距離特性

磁気雑音発生源の距離を変化させた場合の、シールド評価エリア内の減衰比の平均値を図-5に示す。磁気雑音発生源が離れるにつれて減衰比は低下する。シールド評価エリアの大きさにかかわらず、ほぼ同程度の減衰比である。磁気雑音発生源が、近距離の場合は1/10程度の減衰比であるが、2000mm離れた所で約3/100に、5000mm以上離れると約1/100に減衰することが確認された。

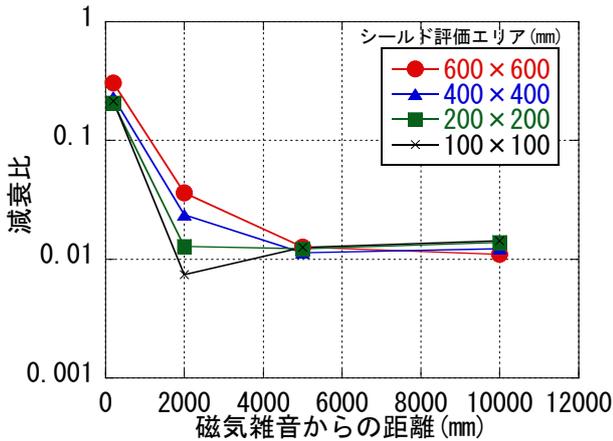


図-5 磁気雑音からの距離特性

3.4.2 シールド評価エリア内の性能分布

磁気雑音の発生源を $x=2000\text{mm}$ 、シールド評価エリアを $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ならびに $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ とした場合の、磁気雑音の減衰比分布を図-6、7に示す。

減衰比分布は、シールド評価エリアが $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ では周辺部で部分的に高くなるが、 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ならびに $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ ともエリア内でなだらかな変化を示す。勾配磁気雑音に対して、4 段型キャンセルコイル方式は減衰比ならびにシールド面積で、優れたシールド性能が確認できた。

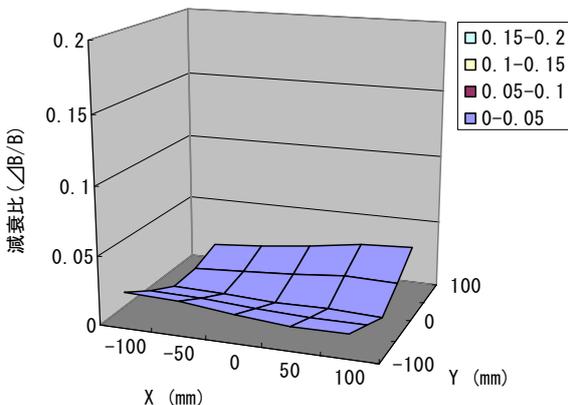


図-6 減衰比分布(評価エリア $200\text{mm} \times 200\text{mm}$)

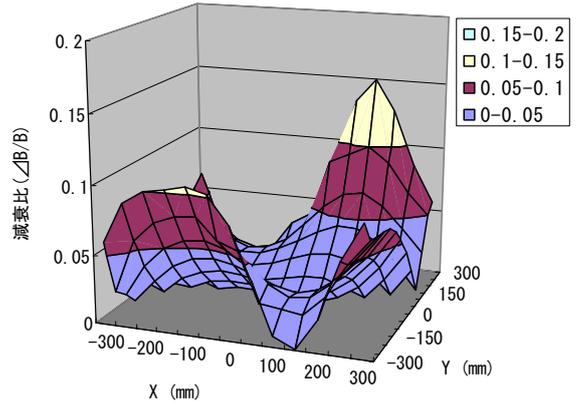


図-7 減衰比分布(評価エリア $600\text{mm} \times 600\text{mm}$)

§ 4. シールド効果実験

4.1 実験装置

4 段型キャンセルコイルならびに磁気雑音発生用コイルの寸法を図-8に示す。キャンセルコイルの駆動には図-9に示す構成の帰還回路を製作した。時間応答性向上のため、検出センサの計測値をマイクロチップに搭載した A/D 変換器で同時処理するとともに、演算処理をマイクロコントローラで処理し、駆動用アンプにキャンセルコイルに流す電流信号を直接送信する方式を採用した。使用した機器の仕様を表-2に示す。

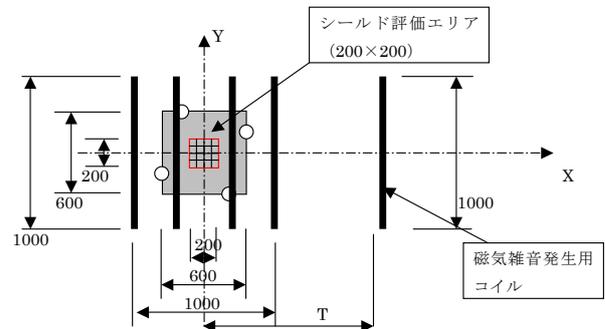


図-8 実験装置寸法図

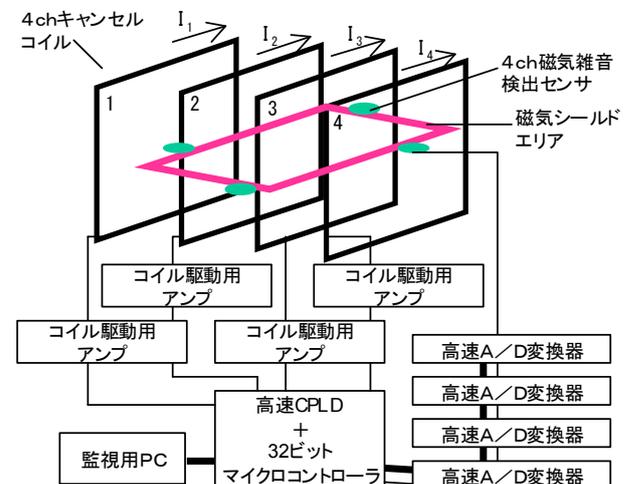


図-9 実験装置構成図

表-2 実験装置仕様

機器	仕様
検出センサ	Honeywell HMC1021+増幅回路
コントロールボード	<ul style="list-style-type: none"> ・高速CPLD: アルテラ社MAXII (EPM570) ・マイクロコントローラ: ST マイクロ社 STM32F103 (72MHz, ROM128kbyte, RAM20kbyte) ・Ethernet コントローラ: マイクロチップ社 ENC28J60
A/D 変換器	<ul style="list-style-type: none"> ・AD コンバータ: アナログデバイセズ社 AD7663 (16 ビット 250ksps)
制御ソフト	<ul style="list-style-type: none"> ・コントロールボード: 専用C言語+プログラマブルロジック ・パソコン用表示ソフト: マイクロソフト社 VisualC#
制御用コイル	<ul style="list-style-type: none"> ・コイル外形 1000×1000mm ・銅線φ1.2mm×12 ターン×1段
磁気雑音発生用コイル	<ul style="list-style-type: none"> ・コイル外形 1000×1000mm ・銅線φ1.2mm×33 ターン

4.2 実験方法

キャンセルコイル 1~4 にそれぞれ単位電流を流し、その時の磁気雑音検出センサ値 $[A_{ij}]$ を記録し、マイクロコントローラで係数 $[A_{ij}]^{-1}$ をあらかじめ求めておく。この係数はキャンセルコイルと検出センサの配置により一義的に決定されるため、磁気雑音検出センサ値の加算処理のみでコイル電流を求められ応答性に優れたものとなる。

シールド性能の評価点を図-10に示す。シールド空間の平面上にシールド性能の測定評価点を25点(5×5)設け、磁界センサを配置した。センサには表-3に示す、高感度でオフセット動作が可能な Applied Physics 社製フラックスゲート型磁束計(APS520A)を使用した。

シールド空間の中心から距離 T (mm) 離れた場所に磁気雑音発生用コイルを配置し、キャンセルコイル作動の有無での磁気雑音を計測した。両者の比からシールド性能を求めた。磁気雑音の周波数は、0.08Hz、0.2Hz、0.5Hz、1.1Hz、2Hz、5Hz、10Hz の7種類である。

4.3 実験結果

4.3.1 周波数特性

実験により得られた本装置の周波数特性を図-11に示す。磁気雑音発生用コイルは $T=1000$ (mm) に設置し、計測はシールドエリアの中心評価点(13)で実施した。周波数 1.0Hz 以下では磁気雑音を 1/100 程度まで、10.0Hz では 5/100 程度まで低減可能である。

表-3 Applied Physics 社製 APS520A 仕様

項目	仕様
Noise level	3×10^{-7} Oe rms/Hz ^{1/2} @5Hz
Frequency response	flat from dc to 250 Hz
Linearity over ± 1 Oe	<0.1%
Drift in zero with temperature	< 10^{-5} Oe/ $^{\circ}$ C
Drift in full scale output with temperature	<0.01%/ $^{\circ}$ C
Sensibility Full scale range	Sensitivity at output BNCs
1000 mOe	10 V/Oe
100mOe	100 V/Oe
10 mOe	1 V/mOe
1 mOe	10 V/mOe
orthogonality between axes	$\pm 0.2^{\circ}$
orthogonality between axes and reference surface (probe housing)	$\pm 0.2^{\circ}$

1mOe=0.1 μ T (大気中)

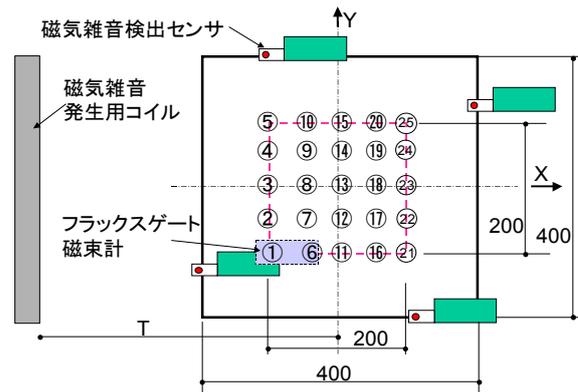


図-10 シールド性能評価点

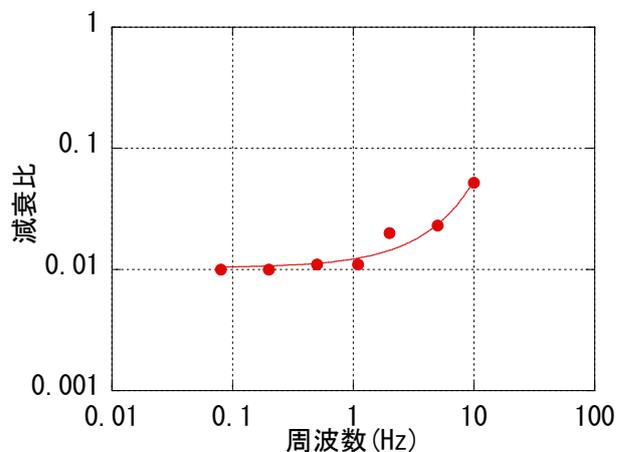


図-11 周波数特性

4.3.2 距離特性

磁気雑音発生用コイルの設置位置を 1000mm から 1900mm に変化させた際の、距離特性を図-12に示す。磁気雑音の周波数 0.08Hz および 1.1Hz においては、減衰比はいずれの場合においても 1/100 以下であった。

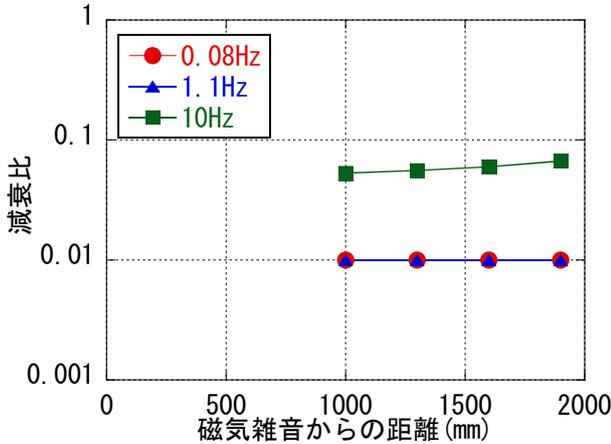


図-12 距離特性

4.3.3 シールド性能分布

0.08Hz における磁気シールドエリア内のシールド効果分布特性を図-13~15に示す。磁気雑音発生用コイルは T=1050 (mm) に設置し、評価点 (1)~(25) で計測を行った。図-13は磁気雑音の磁界分布、図-14はキャンセルコイルを作動させた場合の減衰比分布、図-15はヘルムホルツコイルを用いてシールドエリアの中心評価点 (13) の磁気雑音をキャンセルさせた場合の減衰比分布のシミュレーション結果を示す。キャンセルコイル作動時は磁気雑音を全てのシールドエリア内で 1/100 程度に減衰させることが可能である。しかし、シミュレーションではあるが、ヘルムホルツコイルを用いた場合は、勾配磁界を発生させることができないため、磁気雑音の X 軸方向距離減衰をキャンセルできず、最大 20/100 程度の減衰比となった。

§ 5. まとめ

4 段型キャンセルコイルを用いたアクティブ磁気シールド方式は、勾配磁気雑音の消去に有効であることを解析および実験により確認した。

磁気雑音発生源までの距離特性は、解析では発生源に近いほどシールド効果が低い傾向だったが、実験では、シールド効果に差は見られなかった。

本方式は各キャンセルコイルに流す電流を独立して制御するため、各磁気雑音検出センサ値の演算処理が必要であるが、本実験装置では、演算処理をマイクロプロセッサで並列処理することにより、時間応答性を向上させた。その結果、10Hz 以下の周波数を有する磁気雑音に

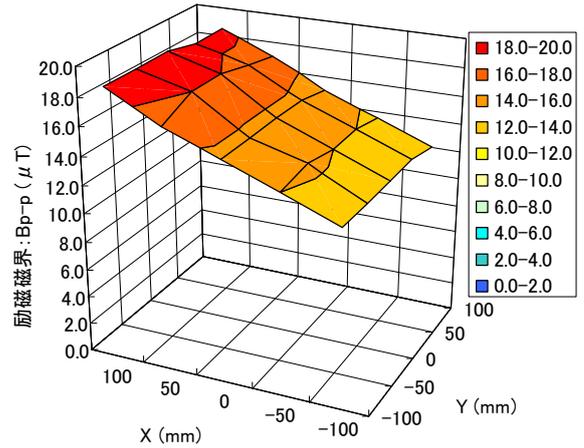


図-13 磁気雑音の磁界分布

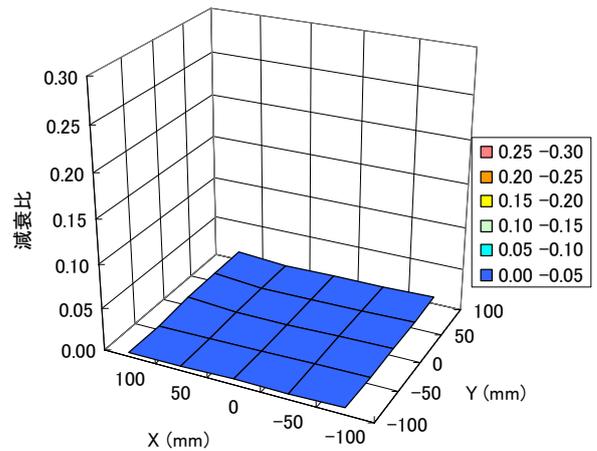


図-14 アクティブ磁気シールド作動時減衰比分布

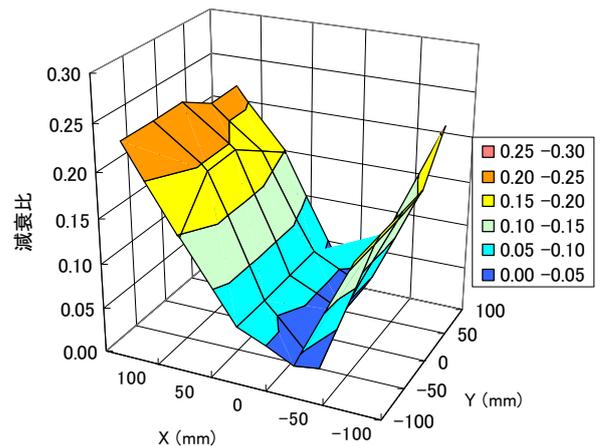


図-15 ヘルムホルツコイル使用時の減衰比分布

対して、5/100 の減衰性能を確保することが出来た。

シールドエリアの中央に対象とする機器を設置し、磁気雑音検出センサをその周囲に配置することで、設置エリアの磁気雑音を 5/100 程度に減衰させることが可能である。また、ヘルムホルツ型キャンセルコイルを用いた

従来のアクティブシールド方式に比べて、広いエリアの磁気雑音を消去できることを確認した。

本システムは次世代半導体の回路パターン製造に利用される電子線リソグラフィ(露光)装置に対し、製造施設内で発生する周波数 10Hz 以下の不確定な勾配磁気雑音を減衰することが可能である。例えば、エレベータから

20m 程離して装置を設置した場合、環境磁気雑音は 0.1 μT 程度であり、最小設計寸法 0.01 μm の許容磁界変動 0.015 μT を十分満たすことが可能である。

今後は、さらなる高周波数の磁気雑音に対する対応、3次元磁気雑音への対応などの改良が考えられる。

<参考文献>

- 1) “ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)2009Edition” page12 Lithography
- 2) 日本建築学会編：“電磁環境と建築設計”，丸善，2000
- 3) 日本建築学会編：“建築におけるシールド材料・施工 磁気シールド”，ミマツコーポレーション，2003

