

透明導電材料を用いた高電位静電気力顕微鏡用静電シールドの外乱電界抑制性能向上及び小型化

有泉 龍馬*, 齋藤 拓海**, 中川 活二**, 上原 利夫**, 岸本 幸樹***, 塩田 裕基***, 武藤 浩隆***, 芦澤 好人**.¹

(2026年1月16日受付; 2026年4月30日受理)

Enhanced Electrostatic Shielding and Miniaturized Shield Design for High Voltage Electrostatic Force Microscopy Using Transparent Conductive Materials

Ryuma ARIIZUMI*, Takumi SAITO**, Katsuji NAKAGAWA**, Toshio UEHARA**, Koki KISHIMOTO***, Hiroki SHIOTA***, Hirotaka MUTO*** and Yoshito ASHIZAWA**.¹

(Received January 16, 2026; Accepted April 30, 2026)

We investigated an electrostatic shielding approach to suppress cantilever interference caused by external electric fields, which can significantly compromise the accuracy of surface potential measurements in high voltage electrostatic force microscopy. A miniaturized electrostatic shield based on a transparent conductive material was developed to address this issue. Finite element analysis demonstrated that the proposed shield allows surface potential measurements over a wider area, even in the presence of relatively large surface structures. The measurable area was expanded to approximately 5 mm² compared with previously reported front-end electrostatic shields, while reducing the influence of unwanted external electric fields by approximately a factor of three. Experimental results further confirmed that the proposed shield achieves shielding performance comparable to conventional front-end electrostatic shields.

1. はじめに

近年, 電子写真の感光体, 振動発電に用いられるエレクトレット, 電気自動車などに用いられるパワー半導体チップ¹⁾など, 数百V以上の高表面電位をサブmmの空間分解能で計測する重要性が高まっている. 薄膜の微小領域における電位計測には, 走査プローブ顕微鏡の一つであるケルビンプローブフォース顕微鏡 (Kelvin Probe Force Microscopy: KPFM)²⁾が用いられているが, 通常 ± 10 V程度, 最高値でも100 V程度の計測しか報告されていない³⁾.

一方, 数kV程度を測定可能な一般的な高電圧用表面電位計では, mm台の空間分解能しかない. そこで, 我々は, 非接触で ± 2 kVまでの高表面電位を測定可能であり, 10 μ mの空間分解能を有する高電位静電気力顕微鏡 (High Voltage Electrostatic Force Microscopy: HV-EFM) の研究開発を独自に行ってきた^{1, 4-11)}.

HV-EFMでは, KPFMと同様に, カンチレバーとその自由端に設置された探針に直流電圧 V_{DC} 及び角周波数 ω の交流電圧 V_{AC} を印加し, 光てこ法により, 探針先端に働く静電気力によって共振したカンチレバーの ω 成分を V_ω として取得する. そして, V_ω が0となるような V_{DC} を求めるフィードバック制御を行うことにより試料の表面電位 V_s を計測している⁴⁾.

この際, 探針だけでなく, カンチレバーにも静電気力が働くことにより測定誤差が生じる. そのため, 下部シールドを設けることで, カンチレバー下面に影響する外乱電界を抑制している^{1, 4-6, 8-11)}. さらに, カンチレバー長手方向に静電シールド構造 (以後, 前方シールド) を有するホルダを設計することで, 試料の測定領域の表面電位と異なる表面電位が測定領域近傍に広く分布する場合に, 顕著に問題となるカンチレバー上面に影響する外乱電界を抑制している^{10, 11)}.

しかし, 前方シールドには図1のモデルに示す次の課題が残った. (1) 測定領域近傍の外乱電界がカンチレバー上

キーワード: 高電位静電気力顕微鏡, 表面電位計測, 静電シールド, 静電界解析, 透明導電材料

* 日本大学大学院理工学研究科

(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1, Narashinodai, Funabashi, Chiba 274-8501, Japan

** 日本大学理工学部

(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

College of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1, Narashinodai, Funabashi, Chiba 274-8501, Japan

*** 三菱電機株式会社

(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan

¹ ashizawa.yoshito@nihon-u.ac.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj.2026.50.4.138>

面に影響を及ぼすこと。これは、測定位置観察用に設けたカンチレバーと前方シールドとの 0.5 mm の間隙があることで生じる。そして、カンチレバー上面の電界の z 方向成分 E_z を評価した図 1 の結果で顕著に表れており、前方シールドを用いても、カンチレバー自由端で不要な E_z が 4 kV/m 程度残留している¹⁰⁾。(2)外乱電界が前方シールドの上方からカンチレバー上面に影響を及ぼすこと。これは、光てこ法のレーザー光路確保のために前方シールドの上方が開放した構造であるため、平坦でない測定試料や電圧印加用の導線などの高さのある構造物が近くにある場合に発生する。(3)高さのある構造物の周囲約 5 mm 以内の試料表面の測定ができないこと。これは、長手方向長さ 5 mm の前方シールドが高さのある構造物と接触するためである。

カンチレバー用の静電シールドには、(1)上方及び測定領域近傍からカンチレバー上面への外乱電界を抑制すること、(2)接触による測定の障害にならないことに加えて、(3)カンチレバー上面に照射する光てこ法のレーザーを遮蔽しないこと、(4)試料測定位置を観察可能であることなどが要求される。しかし、KPFM ではそもそも静電シールドを用いておらず、カンチレバー上下面に働く静電気力による誤差を含んだ計測になっているため、カンチレバー用静電シールドについての研究は十分でない。また、HV-EFM では、上述の下部シールド及び前方シールドを用いることにより高精度に表面電位を測定可能であるが、カンチレバー上面の電界の影響や、電界に対する最適なシールドの構造や配置が十分に明らかになっているとは言えない。

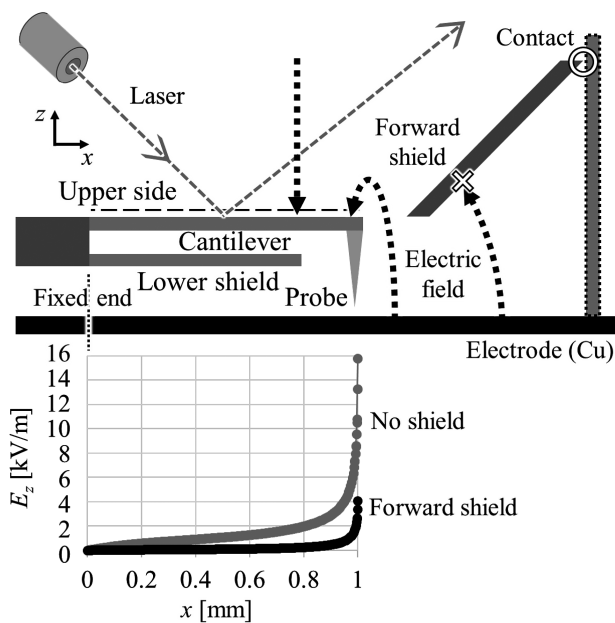


図 1 前方シールドの有無におけるカンチレバー上面の電界の z 方向成分の分布¹⁰⁾

Fig.1 Distribution of z -component of electric fields at the upper side of the cantilever with and without the forward shield.

そこで本研究では、レーザを遮蔽せず、試料位置を観察可能な状況において、上方及び測定領域近傍からの外乱電界を抑制する構造として、図 2 に示す透光性を有する導電材料でカンチレバー上面を直接被覆して静電シールドとする構造（以後、透明シールド）を提案する。透明シールドの設置位置及びカンチレバー端部からの突出長による外乱電界抑制性能を明らかにし、最適化することにより、透明シールドを用いた外乱電界抑制性能の向上及び測定可能領域拡大のためのシールドの小型化を目的とする。

2. 静電界解析による外乱電界抑制性能の解析

2.1 解析方法

2.1.1 解析指針

光てこ法を用いる HV-EFM におけるカンチレバー上面の外乱電界による測定値への影響は、静電気力により探針先端に働く信号源のトルクとカンチレバー上面全体に働き測定誤差の原因となるトルクとを比較することにより評価することが可能である¹¹⁾。

ここで、透明シールドのようにカンチレバー上面全体を完全に被覆するシールド構造では、カンチレバー上面の外乱電界の抑制性能は、カンチレバー端部からのシールドの突出長に依存し、カンチレバーの長手方向も幅方向も面内方向では同程度と考えられる。一方、カンチレバー上面に働くトルクは、電界の大きさが同じであっても長手方向と幅方向とは影響が異なる。そこで、まず 2 次元モデルを用いて、カンチレバー長手方向における一方向からの電界の影響を解析し、透明シールドの電界抑制性能を明らかにする。これは、カンチレバー幅方向からの電界の影響を無視する状況であり、幅方向に無限に長い透明シールドを想定したことに相当する。続いて、2 次元モデルにより得られた電界を用いて、カンチレバーの奥行き幅を考慮したカンチレバー上面全体に働くトルクの抑制性能を明らかにす

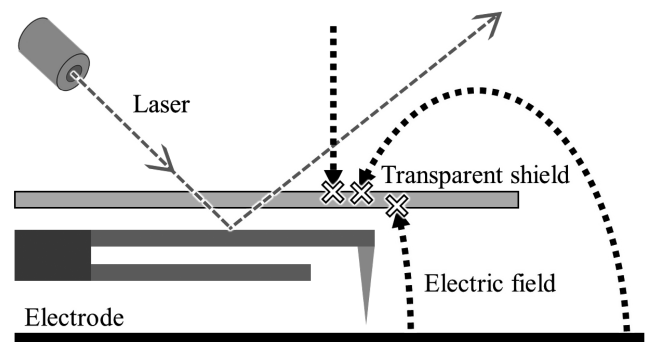


図 2 レーザ光透光性と静電遮蔽性を有する透明シールドホルダの構造

Fig.2 Structure of a transparent shield with laser light transmittance and electrostatic shielding properties.

る。そして、カンチレバー上面全体に働くトルクと探針先端に働くトルクを比較することにより、測定値への影響を評価する。

2.1.2 静電界解析

静電界は、シミュレーションソフト COMSOL[®]において、AC/DC モジュールを使用して有限要素法により解析した。電界は式(1)により算出し、基礎方程式として式(2)に示すポアソン方程式を使用した。

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

ここで、 $E[\text{V/m}]$ は電界強度、 $V[\text{V}]$ は電位、 $\rho[\text{C/m}^3]$ は体積電荷密度、 $\epsilon_0[\text{F/m}]$ は真空の誘電率である。図3に示す静電界解析に用いたメッシュ分割モデルのメッシュ条件は、自由三角形2次要素を用い、最小要素サイズは0.009 mm、最大要素サイズは2.01 mm、最大要素成長率は1.3、曲率因子は0.3、狭小領域解像度は1とした。

これらの条件に基づいて、透明シールドの設置位置及び寸法によるカンチレバー上面の電界の影響を解析した2次元モデルの概略図を図4(a)に示す。

実際の構造にあわせてホルダの先端部に1 mmのカンチレバー、カンチレバーの自由端に0.45 mmの探針、カンチレバーの下部0.1 mmの位置に0.8 mmの下部シールドを設置した。測定領域周辺から受ける電界の影響を解析するため、探針位置から長手(x 軸)方向への測定試料の長さを10 mmと設定した。探針-試料間距離は0.02 mmとした。カンチレバー、探針、下部シールドの厚さは0.005 mmとした。図4(b)に示す透明シールドの構造として、透明シールドの設置位置及び寸法による外乱電界抑制の効果を評価するために、透明シールドとカンチレバーとの距離 d を0.05~1 mm、カンチレバー自由端からカンチレバーの長手方向への透明シールドの突出長 L を0~5 mmとした。また、透明シールドの厚さは、実測時にたわむことによるカンチ

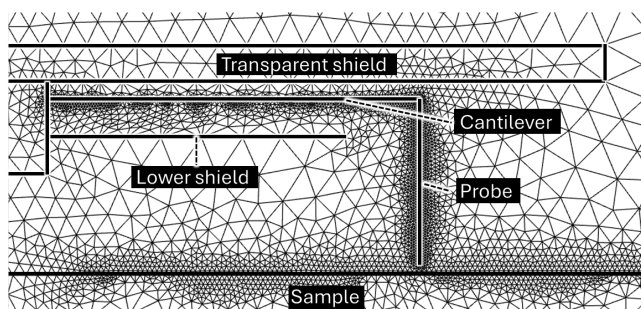


図3 静電界解析に用いたメッシュ分割モデルの拡大図
Fig.3 Enlargement of mesh division model used for electrostatic field analysis.

レバーとの接触を防ぐため、十分な支持基板の厚みを考慮して0.1 mmとした。

また、試料(Cu)の電位は $V_s = 100 \text{ V}$ とし、カンチレバーホルダ、カンチレバー、探針、下部シールド、透明シールドには $V_{\text{bc}} = 103 \text{ V}$ の電圧を印加し、電位差を3 Vとした。この電位差は、HV-EFMの計測において、 V_s が0となるような V_{bc} を求めるフィードバック制御時に、 $V_{\text{bc}} = V_s' \pm 3 \text{ V}$ の電圧を印加することで V_s を計測していることに対応している。ここで、 V_s' は V_s の推定値であり、測定開始時には任意で予測値を設定し、測定時には1つ前の表面電位測定値が設定される。

2.1.3 トルク解析

有限要素法による静電界解析により取得したカンチレバー上面の E_z とその位置の x 座標を用いて、カンチレバーの奥行幅 w を考慮したカンチレバー上面全体に働くトルク T を式(3)~(5)により算出した^{10,11)}。

$$T = \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n (r_i \times F_i) [\text{Nm}] \quad (3)$$

$$r_i = \left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2} - x_0 \right) [\text{m}] \quad (4)$$

$$F_i = f_i (x_i + x_{i-1}) w \\ = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{E_{i-1} + E_i}{2} \right)^2 (x_i + x_{i-1}) w [\text{N}] \quad (5)$$

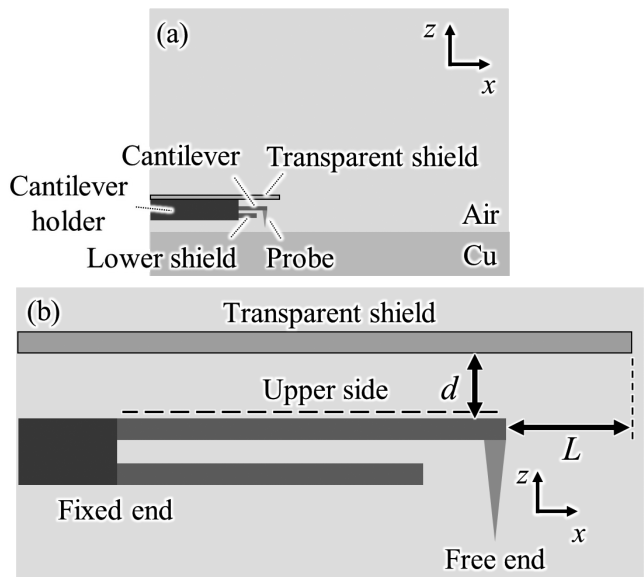


図4 有限要素法に用いた解析モデル(a)解析モデル全体、(b)透明シールド-カンチレバー間距離 d 及び透明シールド突出長 L の定義

Fig.4 Schematic diagram of a simulation model using finite element method; (a) an entire simulation model and (b) definitions of a distance between the transparent shield and the cantilever d and a protruding length of the transparent shield from the free end of the cantilever of the transparent shield L .

ここで、 t_i は i 番目のセルに働くトルク、 r_i は支点から作用点に向かうベクトル、 F_i は i 番目のセルに働く静電気力の z 方向ベクトル、 f_i は i 番目のセルの x 方向の単位長さあたりに働く力の大きさ、 E_i は i 番目のセルの E_z である。また、カンチレバーの奥行幅 w を実際の寸法に合わせて 0.35 mm とした。

2.2 透明シールドとカンチレバーとの距離に対する透明シールドの電界及びトルク抑制性能評価

透明シールドの外乱電界抑制性能の評価にあたり、透明シールドを配備したカンチレバー及び探針近傍における電位分布及び電界分布を図5に示す。ここで、 L は前方シールドの長手方向長さと同じ $5 \text{ mm}^{10, 11)}$ 、 d はカンチレバーと下部シールドとの距離と同じ $0.1 \text{ mm}^{1, 4-6, 8-11)}$ とした。図5(a)に示す電位分布では、カンチレバー上面と透明シールドの間の電位はほぼ一定となっており、カンチレバー上面の電界が弱いことを示唆している。図5(b)に示す電界分布では、透明シールド上方の電界をすべて遮蔽しており、カンチレバー上面では、概ね探針先端と比較し3~5桁ほど小さくなっている。

定量的な解析として、まず透明シールドの設置位置に対する外乱電界抑制性能を調査した。カンチレバー上面の電界を評価するために、種々の d におけるカンチレバー固定端からの距離 x に対するカンチレバー上面の E_z を図6に示す。 E_z はいずれも固定端側ではほぼ0であり、自由端側で増加している。これは、透明シールド上方からの電界を遮蔽しても、測定領域近傍からの電界が透明シールド下面側からカンチレバー上面に影響を及ぼすためだと考えられる。この自由端の E_z を d に対して図7に示す。比較のため、

シールドなし及び前方シールドの場合の自由端の $E_z^{10)}$ も示す。 $d = 1 \text{ mm}$ においてもシールド効果は観測され、 d が小さくなると E_z は単調に小さくなり、 $d \leq 0.2 \text{ mm}$ では、図1で示した前方シールドの E_z よりも小さくなることが明らかになった。これは、 d を小さくすることにより測定領域近傍からの外乱電界を遮蔽する性能が向上していることを示しており、 $d \leq 0.2 \text{ mm}$ では、前方シールドでは抑制できない外乱電界を遮蔽していることが明らかになった。

この2次元モデルにより解析したカンチレバー上面の E_z が測定値に及ぼす影響を考えるために、2次元モデルの奥行方向に相当するカンチレバーの幅方向を加味して、 E_z によりカンチレバー上面全体に働き、カンチレバーの固定端を支点とするトルクの大きさ T_0 を算出した。 d に対する T_0 を図8に示す。 T_0 は d が小さくなると、指数関数的に減少

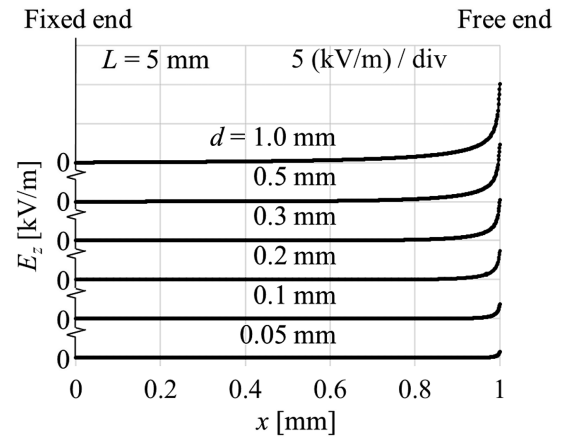


図6 カンチレバー固定端からの距離 x に対する電界の z 方向成分 E_z

Fig.6 The z -component of electric field E_z as a function of the distance x from the fixed end of the cantilever.

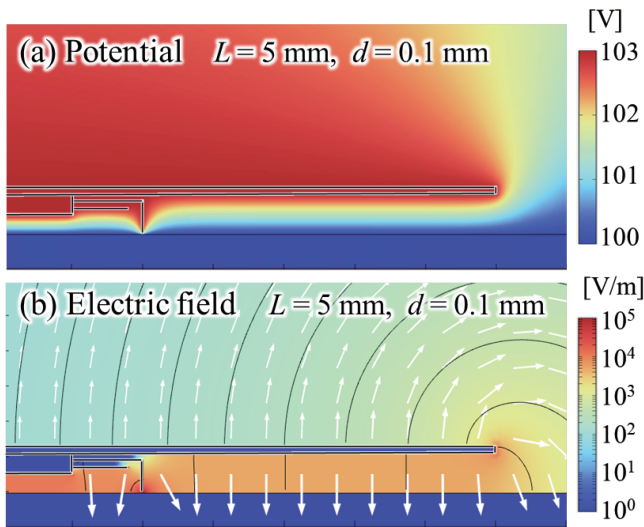


図5 透明シールド ($L = 5 \text{ mm}$, $d = 0.1 \text{ mm}$) の解析結果；(a) 電位分布，(b) 電界分布

Fig.5 Transparent shield ($L = 5 \text{ mm}$, $d = 0.1 \text{ mm}$) analysis results; (a) potential distribution, (b) electric field distribution.

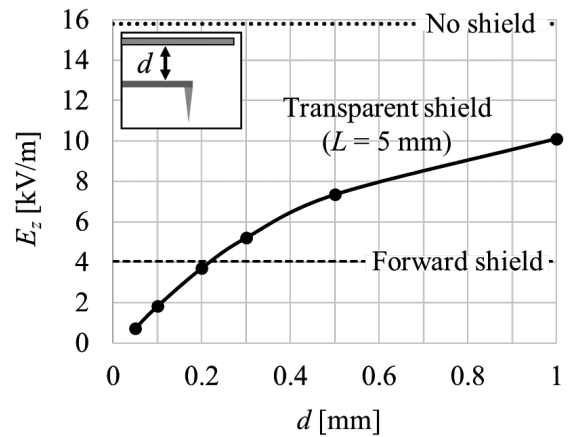


図7 $L = 5 \text{ mm}$ の透明シールドにおける透明シールドーカンチレバー間距離 d に対するカンチレバー自由端の E_z

Fig.7 The z -component of electric field E_z at the free end of the cantilever as a function of a distance between the transparent shield and the cantilever d in a transparent shield with $L = 5 \text{ mm}$.

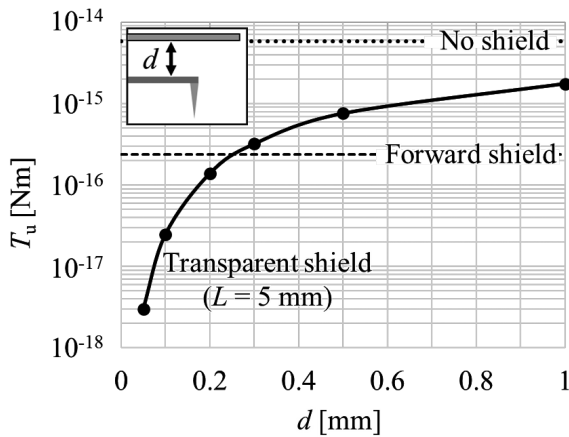


図8 $L = 5 \text{ mm}$ の透明シールドにおける透明シールドーカンチレバー間距離 d に対するカンチレバー上面全体に働くトルク T_u

Fig.8 Torque T_u acting on the entire upper side of the cantilever as a function of a distance between the transparent shield and the cantilever d in the transparent shield with $L = 5 \text{ mm}$.

し、 $d \leq 0.2 \text{ mm}$ では、前方シールドよりも小さな値を示した。 $d = 0.05 \text{ mm}$ の場合、 T_u はシールドなしと比較し3桁低減、前方シールドと比較しても2桁低減した。この大幅な低減は、 T_u への影響が大きいカンチレバー自由端近傍における E_z を、透明シールドにより遮蔽したためだと考えられる。以上より、透明シールドをカンチレバーに近接するほど、測定領域近傍からの E_z による T_u を大幅に低減する効果が得られることが明らかになった。

2.3 カンチレバー自由端からの透明シールドの突出長に対する透明シールドのトルク抑制性能

透明シールドとカンチレバーとの距離 d のシールド効果への影響の解析により、レーザを遮蔽せず、測定位置を観察することが可能な透明シールドによって、カンチレバー上面の E_z 及び T_u を大幅に低減可能であることが示された。

そこで次に、構造物周囲の測定可能領域の拡大のために、小型化可能な寸法を調査した。前節と同様に2次元モデルにより解析した E_z を用いて、異なる L における T_u を算出した。最も特性の優れた $d = 0.05 \text{ mm}$ の場合における T_u を L に対して図9に示す。 T_u は L を 5 mm から 0.5 mm まで短くしてもほぼ一定値を示した。 $L = 0.5 \text{ mm}$ 以下では急激な増加を示したが、 0.1 mm においても、前方シールドの場合と比べて十分小さい値を示している。これは、透明シールド下面側からカンチレバー上面に影響を及ぼす測定領域近傍の外乱電界が、カンチレバー自由端の極近傍 0.5 mm 程度の領域であることを示し、 0.5 mm よりも遠方の領域の外乱電界による透明シールド下面側からカンチレバー上面に及ぼす影響は限定的であることを示している。そのため、この結果より、透明シールドの L を 0.5 mm にすることで、前方シールドの場合の 5.5 mm (長手方向長さ 5 mm 、間隙

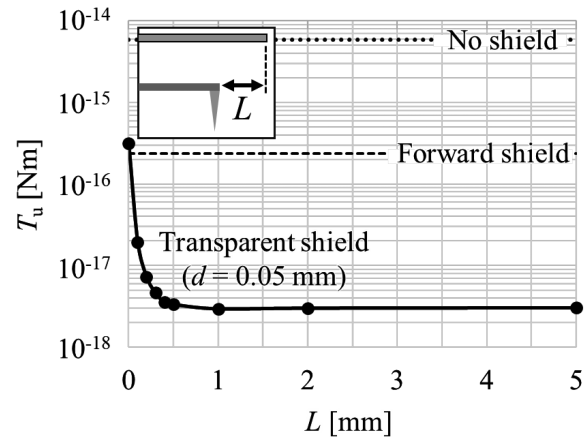


図9 $d = 0.05 \text{ mm}$ の透明シールドにおけるカンチレバー自由端からの透明シールドの突出長 L に対するカンチレバー上面全体に働くトルク T_u

Fig.9 Torque T_u acting on the entire upper side of the cantilever as a function of protrusion length from the free end of the cantilever L in the transparent shield with $d = 0.05 \text{ mm}$.

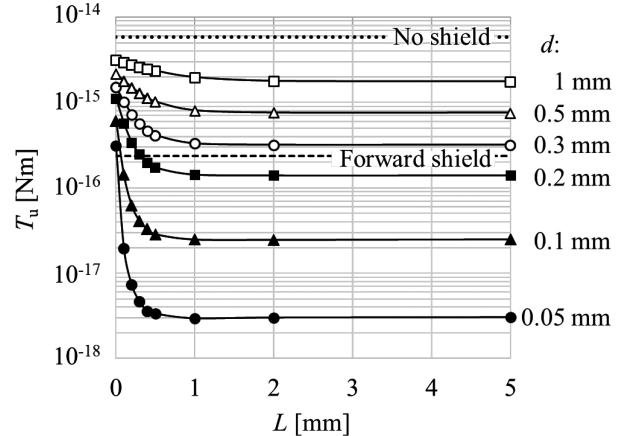


図10 L 及び d に対するカンチレバー上面全体に働くトルク T_u
Fig.10 Each torque T_u acting on the entire upper side of the cantilever as a function of L and d .

0.5 mm) と比べて、高さのある構造物近傍の測定可能領域を 5 mm 拡大できることが明らかになった。

透明シールドを作製するうえでは、加工性や歩留まりの観点から、解析によって最適化された設置位置及び寸法で実際に作製できるとは限らない。そのため、各 d における L の T_u への影響を調査した。結果を図10に示す。 $d \leq 0.2 \text{ mm}$ 、 $L \geq 0.5 \text{ mm}$ の透明シールドを用いることで、前方シールドと同程度以上に T_u を抑制するシールド性能を実現可能であることが明らかになった。

2.4 透明シールドの電界抑制性能が及ぼすトルクの測定値への影響

ここまで、表面電位が一般的な導体板を用いて、透明シールドの設置位置及び寸法による E_z 及び T_u の抑制性能を評価した。ここで、HV-EFMにおける表面電位計測では、探針やカンチレバー等に $V_{bc} = V_t \pm 3 \text{ V}$ 印加時のそれぞれ

の V_0 を計測して表面電位 V_s を求めている原理上、仮に T_0 が存在しても、 $V_{DC} = V_s \pm 3 \text{ V}$ を印加した場合の T_0 が等しい場合には、 T_0 の影響が相殺されることで測定誤差は発生しない。しかし、先行研究において、試料の測定領域の表面電位と異なる表面電位が測定領域近傍に広く分布する場合など、 T_0 が相殺されずに測定値に影響することが報告されている¹¹⁾。

そこで、先行研究¹¹⁾と同様に、 T_0 が測定値に及ぼす影響を解析した。解析モデルを図 11 に示す。GND ステージに置いたガラス基板上に、測定電極（電極 1）と外因電極（電極 2）を同一面内に設置した。ここで、電極間の距離は前方シールドの評価と比較するために、前方シールドの長手方向長さと同じ 5 mm とした。間隔をあけて電極 1 上に右端から $-x$ 方向に 1 mm の位置に探針が来るようにカンチレバー等を設定した。カンチレバー、探針、下部シールド、カンチレバーホルダの寸法は図 4(a) の解析モデルと同様である。透明シールドは $L = 0.5 \text{ mm}$ 、 $d = 0.05 \text{ mm}$ とした。

電極 1 には $V_1 = 0 \text{ V}$ 、電極 2 には $V_2 = -100 \sim 100 \text{ V}$ の電圧を印加した。カンチレバー等には $V_{DC} = \pm 3 \text{ V}$ を印加した。この印加電圧は、測定時に $V_{DC} = V_s \pm 3 \text{ V}$ の電圧を印加することに対応している。

静電界解析により得られた電界を用いて、 V_2 に対する T_0 及び探針先端のトルク T_p を算出し、測定誤差の原因となる T_0 を信号源となる T_p で無次元化した T_0/T_p を算出した。そして、 $V_{DC} = \pm 3 \text{ V}$ のそれぞれでの T_0/T_p の差 $\Delta(T_0/T_p) = (T_0/T_p)^{+3V} - (T_0/T_p)^{-3V}$ を測定誤差の定量的な評価の指標として用いた¹¹⁾。ここで、 $\Delta(T_0/T_p)$ が正負に値を持つことは、測定誤差が正負に発生することを意味している。

V_2 に対する $\Delta(T_0/T_p)$ の解析結果を図 12 に示す。比較のため、シールドなし及び前方シールドの場合の $\Delta(T_0/T_p)$ ¹¹⁾ も示す。 $\Delta(T_0/T_p)$ はいずれも負の線形的な変化を示した。シールドなし及び前方シールドの場合の $\Delta(T_0/T_p)$ の変化率はそれぞれ $-7.54 \times 10^{-2} \text{ V}^{-1}$ 及び $-1.36 \times 10^{-3} \text{ V}^{-1}$ であった¹¹⁾。一方、透明シールドの場合の $\Delta(T_0/T_p)$ の変化率は $-9.58 \times$

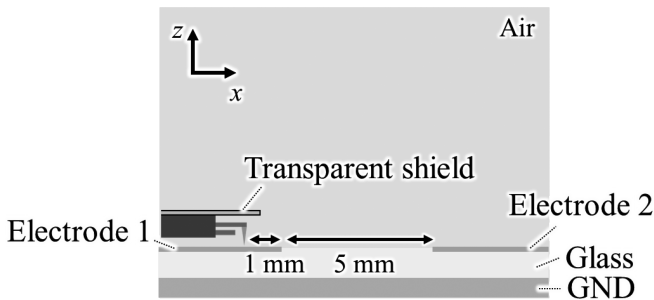


図 11 トルクの測定値への影響を評価する解析モデル
Fig.11 Simulation model for evaluating the influence of torque on measurement values.

10^{-7} V^{-1} を示し、シールドなし及び前方シールドの場合と比較しそれぞれ約 5 桁及び 3 桁低減した。以上の結果より、前方シールドと比較して 5 mm 小型化した透明シールドを用いて、測定誤差を大幅に低減可能であることが示された。

2.5 小型透明シールドの幅設計

ここまでの解析では、2次元モデルにより透明シールドの長手方向（ x 軸方向）の L を指標として小型化可能な寸法を評価した。ここでは実測に向け、同様に奥行幅方向（ y 軸方向）の小型化可能な寸法を評価する。

y 軸方向の電位分布が x 軸方向と同様な場合、カンチレバー側面端部に働く E_z は、カンチレバー自由端に働く E_z と同様と考えられる。そこで、側面端部及び自由端に働く E_z により生じるトルクの比較を行い、透明シールドの y 軸方向への突出長 L_y を決定する。

固定端からの x 方向の長さが $L[\text{m}]$ 、 y 方向の奥行幅が $w[\text{m}]$ のカンチレバーにおいて、同一の E_z により自由端及び側面端部の微小幅 δ にそれぞれ働くトルク T_1 及び T_2 は、以下に示す式(6)及び(7)でそれぞれ表される。

$$T_1 = \int_{y=0}^w (L e_x \times \frac{1}{2} \epsilon_0 E_z^2 e_z) \delta dy = (\frac{1}{2} \epsilon_0 E_z^2 \delta) L w (-e_y) \quad (6)$$

$$T_2 = \int_{x=0}^L (x e_x \times \frac{1}{2} \epsilon_0 E_z^2 e_z) \delta dx = (\frac{1}{2} \epsilon_0 E_z^2 \delta) (\frac{1}{2} L^2) (-e_y) \quad (7)$$

ここで、 e_x 、 e_y 、 e_z はそれぞれ x 、 y 、 z 軸方向の単位ベクトルを表す。式(6)、(7)より、実際の寸法となる $L = 1 \text{ mm}$ 及び $w = 0.35 \text{ mm}$ の場合に T_1 と T_2 の比は

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{L}{2w} = \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 350 \times 10^{-6}} \approx 1.4 \quad (8)$$

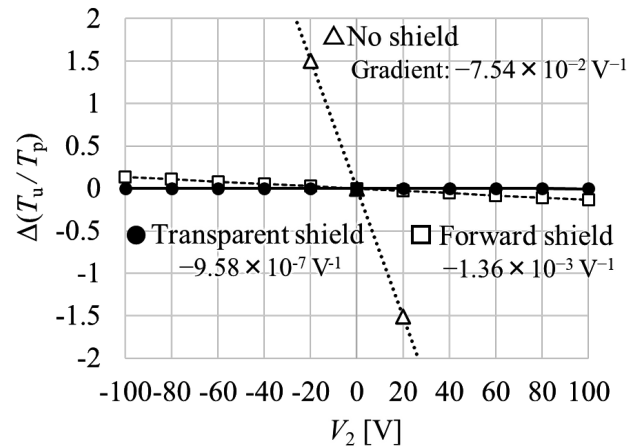


図 12 外因電極電圧 V_2 に対する測定誤差の指標 $\Delta(T_0/T_p)$ ¹¹⁾
Fig.12 Figure of merit of measurement error $\Delta(T_0/T_p)$ as a function of applied voltage to external electrode V_2 .

となる。よって、側面端部の T_2 は自由端の T_1 よりも、1.4 倍大きい。これはカンチレバーの長手方向長さ L が、奥行幅 w に比べて3倍程度長いことが要因である。

ここで、図10に示す長手方向への突出長 L に対する T_0 を1.4倍することで、幅方向への突出長 L_y に対する T_0 として適用すると、 $d = 0.2 \text{ mm}$ において長手方向への突出長 L を 0.5 mm とした場合の T_0 の抑制性能と同等以上の T_0 の抑制性能を幅方向に持たせるためには、 $L_y \geq 1 \text{ mm}$ が必要となると考えられる。したがって、透明シールドの奥行幅は、カンチレバーの幅 $w = 0.35 \text{ mm}$ に y 軸方向両側にそれぞれ $L_y = 1 \text{ mm}$ 突出した 2.35 mm 程度まで低減することが可能であると推察される。この場合、前方シールドの奥行幅 10 mm に対して 76.5% 低減される。なお、 d を 0.2 mm より小さくすることにより、 T_0 を大幅に低減可能であるため、 L 及び L_y を低減することで、さらにシールドを小型化することが可能である。

3. 透明シールドを用いた実測における表面電位計測の誤差低減の検証

3.1 実験方法

静電界解析によって、カンチレバー上面を覆っても、レーザを遮蔽せず、測定位置の観察が可能な透明シールドの優位性が示された。そこで次に、実際に用いるうえで、HV-EFMによる表面電位測定の実証のために、実測により、先行研究¹¹⁾と同様に解析と対応する状況で透明シールドによる測定誤差の低減を評価した。

測定試料は、図13に示す 30 mm 角のガラス基板上に厚さ 300 nm の2つの銅電極を 5 mm の距離で成膜して用いた¹¹⁾。測定用電極（電極1）は $V_1 = 0 \text{ V}$ に固定し、外因用電極（電極2）に $V_2 = -100 \sim 100 \text{ V}$ まで 20 V ずつ変化して電圧を印加した。

計測位置は、電極1の右端から $-x$ 方向へ 1 mm 、下端から y 方向へ 15 mm の位置とし、探針 - 試料間の距離は 0.02 mm とした。そして、疑似的に2次元モデルとするために、図13に示すように長手方向が電極2を向くように配置した。

また、探針に共振周波数 $f = 2,730 \text{ Hz}$ 、 $V_{AC} = 12 \text{ V}_{pp}$ の交流電圧を印加し、測定した100回の平均値を測定電位 V_s とした。ここで、 $V_1 = 0 \text{ V}$ に固定しているため、測定された V_s は測定誤差を意味している。

透明シールドには、両面導電コートされた厚さ 0.1 mm のPETフィルム（長岡産業(株)、スタクリア® NAS）を用いた。奥行幅 3 mm の透明シールド用カンチレバーホルダを製作し、ホルダ先端の両面にそれぞれカンチレバーと透明シールドを導電性ペーストを用いて $d \approx 0.2 \text{ mm}$ で取り付

けた。透明シールドの寸法は、 $L \approx 2 \text{ mm}$ 、 $L_y \approx 1.3 \text{ mm}$ であり、前方シールドに対して、面内方向の面積比で $1/7$ 程度に小型化している。図10よりこの設置位置及び寸法の透明シールドの T_0 が前方シールドの T_0 と同程度であることから、実測に用いる透明シールドの性能は、前方シールドと同程度であると見積もられる。なお、透明シールドの透過率は 90% 以上であり、本研究における測定結果への影響は無視できる程度である。

3.2 透明シールドの測定誤差低減性能の評価

上記透明シールドを用いた探針で測定した V_s を、電極2に印加した電圧 V_2 に対して図14に示す。図中には100回測定の標準偏差をエラーバーで示している。比較のため、シールドなし及び前方シールドの場合の測定値 $V_s^{(11)}$ も示す。透明シールドの V_s は、印加した V_2 によらず標準偏差 0.02 V 程度の精度で $V_s \approx 0 \text{ V}$ を示し、前方シールドの $V_s^{(11)}$ と同

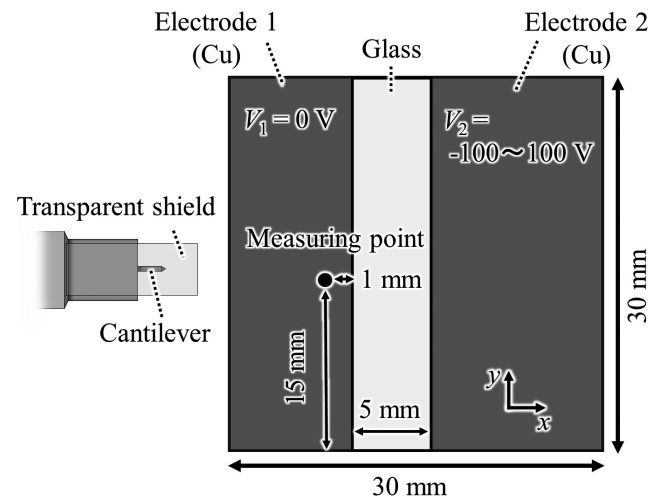


図13 測定方向と測定試料
Fig.13 Measurement direction and measurement sample.

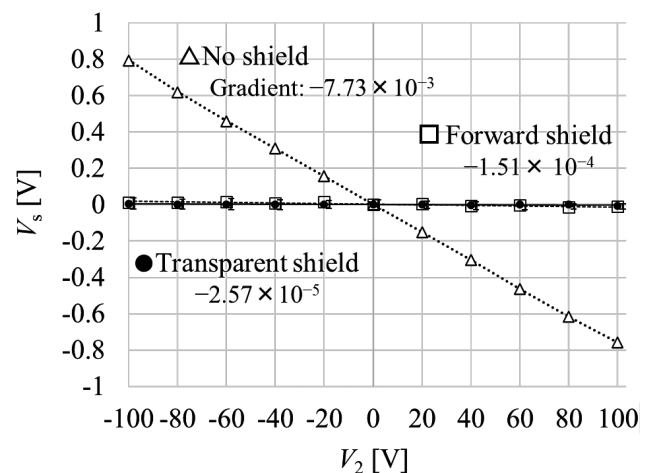


図14 外因電極電圧 V_2 に対する測定電位 $V_s^{(11)}$
Fig.14 Measured surface potential V_s as a function of applied voltage to external electrode V_2 .

程度以上の確度を示した。一方、シールドなしの V_s は、解析における図 12 の $\Delta(T_0/T_p)$ を反映し、負の線形的な変化を示した¹¹⁾。また、 $V_2 = 100$ V の場合、透明シールドでは $V_s = -0.01$ V 程度であり、シールドなしの場合の $V_s = -0.77$ V と比べて測定誤差が 98.7% 低減した。これは、 $L \approx 2$ mm, $L_y \approx 1.3$ mm の透明シールドを $d \approx 0.2$ mm に設置して用いたことにより、 T_0 の主要因である透明シールド上方からの E_z に加え、透明シールドとカンチレバーとの間の E_z も前方シールドと同程度に抑制できたことによると考えられる。このことより、2次元モデルにより長手方向で解析した電界を用いて、幅方向を含むカンチレバー上面全体のトルクを解析することで、設計するシールドの測定誤差低減性能を評価できることが示された。

以上の結果より、前方シールドと比べて長手方向 5 mm, 幅方向計 7 mm の小型化を実現して測定可能領域を拡大した透明シールドにおいて、前方シールドと同様に測定誤差を大幅に低減可能であることが実証された。

結論

透明シールドを用いた外乱電界抑制性能の向上及び測定可能領域拡大のためのシールドの小型化を目的に、透明シールドの設置位置及び寸法による測定誤差低減の評価を有限要素法及び実測により行った。

その結果、静電界解析により、カンチレバーの長手方向端部からの突出長 $L = 0.5$ mm 以上、幅方向端部からの突出長 $L_y = 1$ mm 以上となる奥行幅 2.35 mm 以上の透明シールドをカンチレバーとの距離 0.2 mm 以下で設置することにより、前方シールド以上に電界及びトルクを抑制可能であることが推察された。そして、透明シールドの設置位置と寸法の最適化によって、高さのある構造物近傍の測定可能領域を 5 mm 拡大したうえで、カンチレバー上面全体のトルクの測定値への影響をシールドなしと比べて 5 桁、前方シールドと比べて 3 桁低減可能であることを示した。また、前方シールドに対して、面内方向の面積比で 1/7 程度に小型化した透明シールドを用いた実測によって、シールドなしと比べて測定誤差が 98.7% 低減することを示し、前方シールドと同等程度以上のシールド性能を有する小型シールドを実現した。

参考文献

- 岸本幸樹, 塩田裕基, 武藤浩隆, 有泉龍馬, 中川活二, 上原利夫, 芦澤好人: 静電気力顕微鏡を用いたパワー半導体チップ終端部の表面電位計測. 第 56 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム論文集, p.120, 電気学会 (2025)
- M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle and H. K. Wickramasinghe: Kelvin probe force microscopy. Appl. Phys. Lett., **58** (1991) 2921
- C. J. McCluskey, N. Sharma, J. R. Maguire, S. Pauly, A. Rogers, T. Lindsay, K. M. Holsgrove, B. J. Rodriguez, N. Soin, J. M. Gregg, R. G. P. McQuaid and A. Kumar: Spatially Resolved High Voltage Kelvin Probe Force Microscopy: A Novel Avenue for Examining Electrical Phenomena at Nanoscale. Adv. Physics Res., **3** (2024) 2400011
- F. Inoue, A. Itoh and T. Uehara: A Study to Visualize Charge Distribution with Electrostatic Force. Proc. IS&T Int'l Cong. on Adv. in Non-Impact Printing Technologies (NIP10), p. 291, Soc. for Imaging Sci. and Tech., New Orleans (1994)
- M. Tani, T. Uehara, K. Nakagawa and A. Itoh: An Analysis of Electrostatic Force and Designing/Manufacturing of a Detector with Cantilever for Electrostatic Force Microscope. Proc. IS&T Int'l Conf. on Digital Printing Technologies (NIP13), p. 284, Soc. for Imaging Sci. and Tech., Seattle (1997)
- T. Uehara, Y. Kogiso, J. Higashio, Y. Ashizawa, K. Aizawa, K. Nakagawa and A. Itoh: Real Time Observation of Surface Potential Distribution with an on CTL. Proc. IS&T Int'l Conf. on Digital Printing Technologies and Digital Fabrication (NIP25), p. 212, Soc. for Imaging Sci. and Tech., Louisville (2009)
- T. Uehara, T. Saito, J. Higashio, Y. Ashizawa, K. Nakagawa and A. Itoh: A New Sensor Adjacent Methodology for High Spatial Resolution and High Voltage Measurement. Proc. IS&T Int'l Conf. on Digital Printing Technologies and Digital Fabrication (NIP27), p. 564, Soc. for Imaging Sci. and Tech., Minneapolis (2011)
- T. Uehara, H. Takatsu, T. Suzuki, J. Higashio, Y. Ashizawa and K. Nakagawa: Sensor Structure Improvements of Electrostatic Force Microscopy for Accurate Voltage Measurement on Photosensitive Materials. 静電気学会講演論文集 '16, p.30, A-11, 静電気学会 (2016)
- 中川活二, 上原利夫: 表面電位画像化による半導体不純物分布評価および高空間分解能化. 日本画像学会誌, **56** (2017) 92
- 有泉龍馬, 中川活二, 上原利夫, 岸本幸樹, 塩田裕基, 武藤浩隆, 芦澤好人: 静電気力顕微鏡用カンチレバーホルダにおけるシールド機能の検討. 静電気学会春期講演会論文集, p.9, 静電気学会 (2025)
- 有泉龍馬, 中川活二, 上原利夫, 岸本幸樹, 塩田裕基, 武藤浩隆, 芦澤好人: 高電位静電気力顕微鏡を用いた表面電位計測における静電シールドの外乱電界抑制効果. 静電気学会誌, **50** [1] (2026) 8