

ナノファイバーからなる静電誘導型振動センサの開発

大阪大学 野田祐樹*

土木 防災・減災・復興 振動センサ

研究の目的

本研究は高性能と低コストの二面性を兼ね備えた次世代型振動センサの開発を行なうことを目的とする。具体的には①有限要素法を用いた物理シミュレーションによる振動センサの設計、②電気紡糸技術（エレクトロスピンニング）を用いた印刷形成プロセスの確立と静電誘導の原理を利用した振動センサの作製、③0.1Hz～10kHzの5桁のダイナミックレンジをもつ振動特性の検証、の3段階からなる研究開発を行なう。

研究の内容

①有限要素法を用いた物理シミュレーションによる振動センサの設計

振動センサを作製する上で最も重要な課題の一つは共振現象である。即ち計測対象の振動帯域の中にセンサ自体に共振がある場合は、振動数とその強度を正確に計測することができない。特に本研究で採用する有機高分子からなる薄膜デバイスにおいてはそのヤング率、薄膜が変位する可動領域の大きさ、そして膜厚に応じて共振点が容易に変化することが予想される。そこで有限要素法を用いた物理シミュレーションを行なうことで、最適なセンサデザインのモデルを構築する必要がある。ここでは目標とする最大周波数10 kHz以下の周波数帯域で共振が発生しない構造を設計する。

センサ構造：開発する振動センサは既存のMEMS技術からなる静電容量型の振動センサに類似した構造をもつ。すなわち2つの固定電極間に可動部位として有機高分子からなる薄膜をサンドイッチした構造からなる。ここで有機高分子からなるシートは、黒色で示すバンクを介して固定電極間に浮く形で固定されている。予め分極した高分子シートを採用することで固定電極に電圧バイアスを印加する必要がない。バンクには任意の直径の穴を開ける。穴は面内方向からの振動を等方的に検知するよう真円形状を採用しており、振動検出軸は膜に対して面外方向の1軸とする。これにより3次元空間のあらゆる方向から伝搬する振動から1方向のみを検出する、高い異方性を実現できる。ここで有機高分子からなる薄膜は、商業的に入手しやすい連続膜から本研究にて開発する電気紡糸技術を用いたナノファイバーシートからなる膜を想定している。

共振周波数とヤング率・可動領域・膜厚の依存性：高分子シートとしてここでは化学的に安定で長期利用が可能なフッ素系樹脂 Poly Vinylidene DiFluoride（以下PVDF）を採用した。このPVDFからなるシートの共振周波数は目標とする最大周波数10 kHzより高い周波数でなければならない。ここではPVDFからなる高分子シートにおいて、ヤング率、直径、シート厚みの3パラメータに対する第一共振モードの共振周波数を検討した。計算は有限要素法を用い、シート側面の境界条件としてXYZ3方位と3軸に拘束をかけた。メッシュサイズは膜厚に対して1/5以下の精細度で分割して実施した。

（ヤング率）同一材料で連続膜とナノファイバーシートを同じ膜厚で作製した場合、ヤング率はナノファイバー膜の方が2桁低くなるのが先行研究で報告されている。例えばPVDFは連続膜で約3GPaであるため、ナノファイバー膜においては30 MPa前後であると推定される。そこでヤング率を3MPaから3GPaまで3桁のダイナミックレンジで変化させた。直径3 mm、厚み10 μmにおいてヤング率の依存性を検討したところ、そのヤング率を想定しても10 kHz以上に共振周波数有することが明らかとなった。すなわちPVDFが連続膜、ナノファイバー膜の形態に関わらず検出周波数より高い共振周波数を有することが明らかとなった。

（膜厚と直径）ヤング率と同様に膜厚と直径に対する共振周波数の影響を検討した。薄膜の可動領域として、ここではセンササイズを考慮し直径1 mmから10 mmまで変化させた。ヤング率の検討と同様、設定した検討範囲において共振周波数はいずれも10 kHzを超えることが明らかとなった。

以上の検討により、開発する振動センサは

- PVDFからなる高分子シートが連続膜、ナノファイバー膜の形態に依存しない
- 直径10mm以下
- 厚み0.1 μm以上

であれば10 kHzより高い共振周波数を有することが明らかとなった。

②電気紡糸技術（エレクトロスピンニング）を用いた印刷形成プロセスの確立

連続的な PVDF シートをナノファイバーに変えることでヤング率を 2 桁低減させることができる。これによりシートの柔軟性を向上させ、微小振動に対する高感度化が期待される。ここでは電気紡糸装置（以下エレクトロスピンニング）を用い、ファイバー径約 100 nm 前後の PVDF ナノファイバーシートを印刷形成する。シートは極性をもった誘電体からなり、これを可動部として 2 つの固定電極に近接させることで静電誘導により振動を電圧に変換させることができる。

エレクトロスピンニングは絶縁性高分子溶液をシリンジ等のノズルに重点し、金属表面を GND としてノズルに kV 以上の高電圧を印加することでポリマー溶液を射出する技術である。このとき電圧がしきい値を超えると、電荷の反発力がポリマー液滴の表面張力に打ち勝って、電荷を帯びた噴流が発生する。この噴流を集積することで極細ポリマー繊維が形成されるメカニズムである。ここでは PVDF の高分子溶液を重点し射出することで PVDF ナノファイバーシートの作製を行った。具体的にはガラス表面に金もしくはアルミを蒸着したサンプルを基板としこれを GND とする一方で、ノズルに数 kV から数十 kV の高電圧を印加して高分子溶液の射出を行った。その際、基板側を走査することで基板面全体に均一なナノファイバーを形成した。その後溶媒を乾燥させることで白色のシート状印刷物を確認することができた。ナノファイバーの形成を確認するため、走査型電子顕微鏡でその表面を観察したところ、1次元のワイヤ構造物が網目状に重なり合っている様子が観測された。このときファイバーに塊（バルジ）が形成されておらず、拡大するとその直径が約 100 nm であることが明らかとなった。これによりエレクトロスピンニング装置で高品質な PVDF からなる高分子ナノファイバーシートが印刷形成することに成功した。

③振動センサの作製と評価

①と②で得られた知見を元に振動センサの作製と評価を行った。具体的には構造由来の構造を避ける為に直径 3mm の穴を開けた厚み 100 μm のバンク構造に PVDF ナノファイバーを連続塗布することで厚み約 1 μm のシート構造を印刷形成した。このとき使用した高分子溶液の体積は 100 μL 以下であった。

開発した振動センサの特性評価を行った。計測は大学研究室にて実施した。ここでは IMV 製加振器を用いた計測環境にて 5 Hz から 8010 Hz までの周波数領域において評価を行った。各周波数に対応する正弦波を 1–10 m/s^2 の加速度で振動センサを加振した。信号はチャージアンプを介して電圧変換と増幅を行い、市販のオ

シロスコープにてサンプリング周波数 20 kHz、15–16 bit の電圧解像度で計測した。

どの周波数においても加振周波数に対応する周期で振動するサイン波を観測することができた。10 Hz においては波形の山が一部潰れているような挙動が観測された。これはナノファイバーシートが 2 つの固定電極に接近した際に電極表面に接触していることを示唆している。10 Hz のような低周波加振では同じ加速度でも変位量は大きくなる傾向にあるため、10 Hz でのみ波形の頭打ちが観測されたことはバンク厚みの最適化が必要であることを示している。

全ての加振周波数において信号を観測することに成功したものの、高周波になるに従い信号強度が弱くなる傾向が観測された。これは一定加速度においては高周波振動ほどファイバー膜の変位が小さくなることに由来し、静電容量の変化が相対的に小さくなったことが原因であると考えられる。一方で一定周波数において加振力を変化させた場合は、それぞれの周波数で信号強度が加振力に対して線形に増加する傾向を観測することができたことから、観測した信号が確かに加振振動に由来するものと証明された。しかしながら 10 Hz においては加振力に対する出力の増加率が 110 Hz および 8010 Hz より低い。サイン波波形の頭打ちの傾向からも示唆されたように、低周波においては変位量がバンク厚みを上回っていることが予想される。このため低周波では大きな加振力を印加しても出力信号に反映されていないと考えられ、バンクの厚みの最適化について課題が残ることが明らかとなった。

以上をまとめると、振動試験の結果、PVDF ナノアファイバーからなる静電容量型振動センサが 5 Hz から 8010 Hz までの周波数領域において加振振動に由来する振動を検知に成功した。一方で 10 Hz 近傍の低周波においては信号波形の頭打ちの傾向が、8010 Hz 近傍の高周波においては膜変位量の減少に伴う信号強度の低下する傾向がある。これらを解決するためには振動で変位した膜と固定電極間の距離を考慮する必要があり、これを解決するためにバンクの厚みについて最適化を行なう必要があることが明らかとなった。

今後の予定

研究目的である 0.1 Hz ~ 10 kHz の 5 桁のダイナミックレンジをもつ振動特性の検証において、特に 5 Hz 以下の極低周波領域については実験スケジュールの問題で実現しなかったものの、2023 年以降、共同研究パートナーの産業技術総合研究所と共に引き続き検証を続ける予定である。本研究結果から、検出信号は高周波数から低周波数になるにつれ信号強度が増加することが明らかであるため、5 Hz 以下の極低周波領域でも振動を検知できることが期待される。