

トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究

第4回高効率MEH研究会 議事録

1. 日時：2015年8月18日（火）15:00～17:30
2. 場所：技術研究組合NMEMS技術研究機構 新テクノサロン A,B
東京都千代田区神田佐久間河岸67 MBR99ビル7階
3. 出席者(敬称略)：東京大学(藤田、年吉)、静岡大学(橋口、杉山)、京都大学(塩谷、張)、
鷺宮(石川、三屋、芦澤、石橋)、ダイキン(橋本、西野)、電力中央研究所(小野)、J R
東日本(福田) MMC(青柳、長谷川、鎌田、三原、阿出川、水津、出井、松本、小出(記))

4. 議事次第：

- (1) 挨拶 15:00-15:05
藤田先生
年吉先生
- (2) 前回議事録の確認 15:05-15:10
- (3) 研究発表
①【研究項目A】高密度固体イオンエレクトレットのエナジーハーベスタ応用
(静岡大学：橋口先生、杉山先生) 15:10-15:50
②【研究項目B】大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエナジーハーベスタ応用
(鷺宮製作所：三屋研究員) 15:50-16:10
③【研究項目C】高効率エナジーハーベスタの開発
(鷺宮製作所：芦澤研究員) 16:10-16:30
④【研究項目D、E】 16:30-17:00
 - ・全体計画の確認(マイクロマシンセンター：三原)
 - ・交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発(京都大学：張先生)
 - ・オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発(ダイキン：西野研究員)
- (4) 自由討論 17:00-17:10
- (5) 総評 17:10-17:20

5. 配布資料

- 【資料-1】 H27 年度第4回高効率MEH研究会出席者名簿
- 【資料-2】 H27 年度第3回高効率MEH研究会議事録
- 【資料-3】 H27 年度7月進捗報告
- 【資料-4】 今後のスケジュール
- 【資料-5】 予算執行状況

6. 結論：

自分たちのデバイスの特徴を生かした得意技で勝負する。今年中に150μWだして、プロジェクトが終わる頃には、我々の方式が一番良く使える条件を見出して、そこに特化したデバイスを作って、そこだけは誰にも負けないようにする。

各テーマの進捗は詳細内容に記すが、事務局としては、総括的には予定通りの進捗と判

断している。連絡事項は以下の通り（略）。

7. 詳細内容

挨拶

藤田先生：スタートダッシュで来たところで、少し夏の疲れがでるのではないかと心配しておりますが、今日も楽しい話を聞けるのを楽しみにしています。

年吉先生：私は学会でイスラエルに行っていましたが、なんとか無事に帰ってきました。後でお話もしたいと思いますが、今日もよろしくお願いいたします。

発表に関する Q&A

静岡大学：杉山先生関連

Q（年吉）：実測のページの容量は、1 本当たりの静電容量差？

A（杉山）：はい。

Q（年吉）：FEMのメッシュは、もう少し細かいほうが良いので、角の部分だけでも細かくしてやると良い。

Q（藤田）：この角の部分がポイントで、ここだけ細かくしている？

A（杉山）：いえ。これは均等です。細かくしてやってみます。

Q（藤田）：実測した値 5.81×10^{-15} は、絶対値をNの数で割った値？

A（杉山）：そうです。

Q（藤田）：浮遊容量の影響は、殆どないと考えて良いのか？

A（杉山）：はい。実際に測ったものと、その櫛歯を削り取ったものを測って、その差から計算している。

Q（年吉）：発電量は、静電容量にも比例するので、構造を厚く、単位面積当たりの櫛歯の数を多くして、隙間を狭くし、あとの工夫の為所は？プロセスで腕を上げる以外にエンジニアリング的な工夫の為所はないか？

このSEM写真は、RIEした後のエレクトレット熱酸化する前の状態で、これから膨らんで丸くなったりするのですね。今後のプロセスのやり方で、ここをこうしたらやれそうだとか工夫はないか。

A（杉山）：ギャップの $10 \mu\text{m}$ を狭めようと思っているが、この間のエッチングがアスペクト比に効いてきそう。ギャップを狭めると急激に容量差が増えるので、櫛歯の角をカットするとアスペクト比が稼げるので、ギャップを狭くして、角を丸めることで、容量差は増やすエッチングを考えている。

Q（年吉）：思考実験として、この櫛歯が、上の方のこれに倣う時のこの動きによる静電容量変化と、これを中に押し込んで、こういう動きの静電容量変化で、どちらが大きそうか？

A（杉山）：この方向の動きで $100 \mu\text{m}$ ですが、横方向の動きで $300 \mu\text{m}$ ぐらいを想定しているので、そちらで容量を稼ぐ。

Q（年吉）：わかりました。この辺がサスペンションで、これが折曲がりサスペンション、周りがビーム、この方向にしか動かない、この方向に動いては困るのですね。これは抑制

できる構造になっていますか？

A（杉山）：なっていないが、シミュレーションでやったところ、2グラムの錘を載せて、1 Gの力が、この方向にかかった時の変位が $0.6\mu\text{m}$ くらいで安定性は良いが、デバイスとしてパッケージングした後に、錘の方でストッパを付けて、防ぐ方法を考えたい。

Q（年吉）：4分の1カットのウエハで、3個ぐらい？

A（杉山）：2つです。

Q（年吉）：この間の試作で割れたのは、基板研磨したから割れやすくなったのか？

A（杉山）：基板研磨の傷と、8インチのウエハにカプトンテープで固定したため、エッチングの時の応力で割れたと考えて、カプトンテープで固定せずにエッチングしたら割れずにできた。

Q（年吉）：10月には動いていると思うので、期待しています。

Q（藤田）：ここの幅を広くしているのは、どういう意図か？周波数を制御する意味で、あまり長くしない？変位を稼ぐなら長くした方が良いが、そんなに柔らかくしなくても大丈夫だということか？

A（杉山）：はい。

Q（年吉）：櫛歯の面積は全体の10分の1ぐらい。櫛歯の割合を増やすことは出来ないか？

A（杉山）：2グラムの錘として $6\text{mm}\phi$ のタングステンを想定しているので、錘を小さくできれば、櫛歯を増やせる。

Q（年吉）：錘を孔に埋め込むのではなく、このデットスペースを利用しては？

A（杉山）：錘の形状を整形して載せられれば、もう少し小さくできる。

Q（年吉）：この緑色に見えているところが、 $300\mu\text{m}$ 厚のシリコンの部分ですね。SOIの層の構成は？

A（杉山）：酸化膜が $2.5\mu\text{m}$ 厚、ハンドルが $500\mu\text{m}$ 厚。

Q（年吉）：絵に描かれていないが、この緑と同じようなパターンか？

A（杉山）：ハンドル層は、この周りの部分だけ。

C（年吉）：あとでマスクデータを見せてください。面積が有効活用できるかも知れない。

Q（青柳）：毎月定例会としてやっているが、今年度の全体の計画に対して、前回までは、ここまでやって、今回はここまでやった、今後の残りはこれだという、今の立ち位置が分かる進め方、どんな状況なのでしょう？

A（藤田）：次の橋口先生のガントチャートに入っている。

A（橋口）：杉山さんの立ち位置は、最終目標の 1mW の振動発電機に向けて、今年は最適構造の探索で、 $150\mu\text{W}$ を目標に試作しており、1回目の試作で不具合がでて、2回目の試作中。

静岡大学：橋口先生関連

Q（年吉）：周波数コンバータの使われ方としては、低い周波数に反応する発電機で発電した高い電圧で、別のMEMSのトランスを駆動して、周波数の高い電流成分を作れば、効率良く充電ができるということですね。

A（橋口）：電流は増やして、電圧は下げるという。

C (藤田) : 電子回路とマッチングが良い形に変換できる。

Q (年吉) : このトランスの部分は、周波数が高いから生で入ってくる個所で直に駆動するわけにいかないの、まずは、低い方の発電機で、一回電圧を作るということで良いですか。

A (橋口) : はい。

Q (年吉) : 機械要素がシリーズに入るほど効率は悪くなるが、2段階なら良いという判断か？

A (橋口) : そうです。

Q (年吉) : FTIRの二つの波形は、これは試料の反射率を見ている？この波形を見るとずれを補正して波形を合わせて比較し、波数が1100カイザーぐらいのところにピークがあるという認識をした方が良いのではないか。灰色がなだらかに下がったここに二つの波形の差があると解釈した方が良い。

C (藤田) : 吸収が大きくて反射してこないの、ここになかった吸収があるようになったというのが年吉先生のポイント。

C (年吉) : 基板の厚みが上下で異なっていたことで変わっているのであれば、厚み成分で補正をかけて表示すべき。データの処理方法を確認すること。生研4部の満田先生に話を聞くと良い。

Q (三原) : ダイキンのデータのシミュレーションで、Q値を一桁下げても殆ど影響しないのはなぜか？

A (橋口) : 負荷抵抗によるQは同じで、変動分は Q_i だけ。一桁下がったのは Q_i 。

Q (三原) : 周波数を半分にすると発電量が2倍になるのはなぜか？

A (橋口) : 周波数が低い方が、発電効率が良いため。

Q (三原) : 周波数をもっと低くすれば、もっと良くなるのか？

A (橋口) : そうかもしれない。

鷺宮の三屋さんと電中研の小野さん関連

Q (藤田) : ITOだと長くやると下がるが、この理屈で説明がつくのか？

A (小野) : ITOが下がっていたのは、抵抗の緩和の速度に依存していると考え。ITOでは、減衰するが、休ませると戻るの、なんらかの影響で緩和という現象がおきている。

Q (橋口) : 短絡電流を測っている？

A (三屋) : オシロやデジタルマルチメータで直接測っている。

Q (三原) : ITOは半導体的な要素があるので、空乏層の膜厚が増えて、抵抗が増加していると考えてはいけないのか。

A (小野) : そう考えて問題ないです。ITOは半導体だが、バンドギャップが小さく室温の熱程度で励起できてしまう。電子密度は小さいが、移動度が大きいので、メタリックな振る舞いをする。

Q (三原) : セラミックスの場合は、空乏層の中にチャージをトラップしやすく時定数も高いと言われているが。

A (小野) : カチオンを貼り付けた時は、空乏層というよりも電子を積極的に入れている。アニオンを貼り付けた時は、電子を抜いているので空乏層ができています。

Q (三原) : 電流が同じ方向なのは変ではないか？

A (小野) : まさに界面の電子を抜いたり、入れたりしている。ITOは、電子を入れても抜いても抵抗が上がる配合になっているので、いずれでも抵抗が上がる。

Q (三原) : 抵抗は説明できるが、電流は説明できていない。

A (小野) : 界面の抵抗が変わるので、貼っているものを剥がした時に、ここにいた電子が、その抵抗によって食われていると考えている。

Q (年吉) : カチオンやアニオンが入っていないゲルも是非お願いします。温度が変わっているだけかもしれない。

A (小野) : やります。特にイオン液体を固定していないフィルムでやるのが良いと考える。

Q (橋口) : I-V が、太陽電池の特性と似ているので思ったが、この特性がボンと下がった時に、ゼロ電流の時の開放電圧は、2.5Vぐらいにならないか。

A (小野) : I がゼロの時は、電気化学反応が起きていない。電流が増える時は、なんらかの電気化学反応が起きているので、現象としては少し違うと考えている。

Q (藤田) : プラスのイオンが固定されていて、電子が入った時に電流が流れて、離れた時に戻るはずが、電流が流れないということですか。

A (三屋) : はい。

Q (藤田) : そちらの今のアイデアは、入る時はバルクの抵抗が小さいので入れるが、出る時は、ここに高抵抗の層ができていますので、時間がかかるというモデルですね。モデルを描いて、電荷の動きと、どこに抵抗層ができるとか説明してください。

Q (年吉) : ドライブしているモーターの変位も分かれば記載。

鷺宮の芦澤さん

Q (藤田) : 段付 $5\mu\text{m}$ 帯電 100V のデバイスの動作をシミュレーションしてパワーに変換したモデルは、どんなモデルか？

A (芦澤) : 段付というのは、稼働側の櫛歯が固定側より細くしてあり、動きやすくすることで外からの振動を拾いやすくしている。

Q (藤田) : 変位と力のグラフから加わった力に対する振動を計算して、変位から電流に変換したとうことですね。

A (芦澤) : そうです。

C (年吉) : ウエハのオリフラを回転するとヤング率が変わるので、加味してみてください。

Q (年吉) : このモデルでは、櫛歯電極間の静電引力も計算されていて、復元力のばねと釣り合う運動方程式を解いている。SOI の厚みが $20\mu\text{m}$ に対して、 $5\mu\text{m}$ 段差が付いていれば、加速の速度を得られるという考え？

A (芦澤) : そうです。

Q (年吉) : 前よりは、多少小さくなっている？

A (芦澤) : チップサイズは、大きくなっている。ウエハに収まる極力大きなものを作った。

Q (年吉) : サスペンションは、上下方向には柔らかくて、左右方向には硬い？

A（芦澤）：そうです。

Q（年吉）：サスペンションの硬さは、櫛歯間にかかる上下方向の静電引力も加味して計算している？

A（芦澤）：ある電圧より高い電圧で帯電するとプルインしてしまうが、200Vまでならできそう。

Q（年吉）：それは水平方向の話で、上下方向は？帯電電圧が高すぎると、ちょっとずれた時の復元力が極端に大きくなって、直ぐに引き戻される。共振周波数が高めにずれていくのか？それを加味して、共振設計しているか？

A（芦澤）：共振は、今回の櫛歯だと、振幅が小さくなるにつれて周波数上がる非線形振動しますので、ある周波数に共振周波数を合わせ込むことは考えていない。インパルス上に加速度が加わった時に、どれだけずれるかが静電力の強さと関係しており、弱い帯電の方が、より大きく振動できて、結果的には運動エネルギーを全部出せる。

C（年吉）：上下方向に様に振動する場合ですね。中心軸をあえて重心からずらすと意外と簡単に低い周波数帯に設計ができるかもしれない。試してみてください。

Q（松本）：高密度エレクトレット化することで10倍とかになると思ったが、高密度化は単にチャージ密度を上げて発電量が上がると思っていた。微小振動の場合は、電荷が少ないほうが良いということに対するコメントをください。

A（芦澤）：今回のデバイスによる都合で、例えば、錘を載せていれば、外からのエネルギーをキャッチするという部分は、そこでできるので、そういう条件では、ギャップが小さいほど、チャージが大きいほど、出力は大きい。

C（年吉）：電荷を与え過ぎると、電荷そのものがガチガチのばねになってしまうので、外から揺らしての動かなくなる。

C（藤田）：前回から問題になっていると思うが、機械的なエネルギーを電気に変換するデバイスをやっているの、電気的には電荷密度を上げるほど良くなるはずだが、外からのエネルギーを中に取り込む機械的な部分の設計をきちんとしないと意味がない。我々のコンピテンスはここにあるが、そちらで負けるとトータルで勝てなくなるので、良く考える必要がある。

MMCの三原さん、京都大学の張さん、ダイキンの西野さん関連

Q（年吉）：ATRの中身は、インベンセンスの加速度センサで、データはメモリーに保管し、USBで、有線に取り出せる？

A（西野）：無線でもパソコンに繋げながら取れるし、本体にメモリーに蓄積することもできる。

Q（年吉）：我々の発電機を加速度センサと置き換えたらそのまま計測器に使えないかと考えていたが、ATRの価格は？

A（西野）：3軸で7万円です。

Q（三原）：消費電力は？

A（西野）：USBで充電して、半日ぐらいはもつと思ったが、正確には確認が必要。

Q（橋口）：Q値を下げてブロードにした方が、多く拾えるというイメージだが、発電機的

には、内部抵抗が上がってしまう問題がある。Qとしては、現状の50、60ぐらいが良いと考えている。

C（三原）：人体の方は、インパルスで良いが、インフラ系は、定常状態とトラックが通った時のインパルスが出る場合で、定常状態では周波数を揃えないと効率的な発電ができない。周波数を合わせることはできるのですか？

C（橋口）：今は勝手に周波数を決めているが、どこを拾っていくのかを決めてしまわないと双方に困る。

Q（塩谷）：そういう意味では、橋の定常状態ではなく、インパルスに絞った方が良いということか？どちらの方が、エネルギー的には発電できるのか？

A（橋口）：継続時間による。

Q（塩谷）：そういう意味では、両方ともしっかりデータを取って計算していただいて、検討する必要があるのが今の段階？

C（年吉）プロジェクトリーダーとしては、自分たちのデータが良く見える土俵でやる。今年中に150 μ Wだして、プロジェクトが終わるころ頃には、我々の方式が一番良く使える条件を見出して、そこに特化したデバイスを作って、ここだけなら誰にも負けないとしないといけない。どこが一番使えるかは、研究会の中で見つけていく。学術的には、ちゃんと抑えてあるので、いかようにも対応できますよとなっていると良い。

C（塩谷）：道路インフラで劣化を対象とした時に、疲労と瞬間的なダメージがあり、後者に絞れば、インパルスが入ってくるので、ストーリー的にはうまく流れている。なんらかのアブノーマルな状態になった時に、振動が大きくなったり、インパルスを与えたりしますので、あの辺りを積極的に取って、センサに渡すというストーリーを立てれば良い。

Q（年吉）：イベントドリブン型のスイッチ兼電源という考え方？

A（塩谷）：そうですね。

C（福田）：アプリケーション的な見方をしていたが、10年ほど前に鉄道の振動データを取っていたが、だいたい40 Hz以下で、インフラ系の振動を狙うならその辺が良いかなと。Qの大小が、どう関わってくるか良く言えないので、インフラ系の振動は、常に同じように出るわけではないので、そこら辺をどう拾うかが課題。鉄道総研で、振動を利用する記事があったので、今年中に150 μ W発電するような用途はないかといった話には、ご協力できていると思っている。

総評

藤田先生：自分のデバイスの長所を生かした狙いを一つ二つ考えて、ステージゲートの時は、その場でLEDが光りましたといったことを見せて行きたい。

年吉先生：付け足すことはないのですが、真剣勝負は、得意技一つ持っていれば、必ず勝つとの信念で。来年のMEMSで、是非、発表を。

以上