

エネルギー・環境新技術先導プログラム／  
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3回高効率MEH推進委員会・  
第3回高効率MEH知的財産権分科会

平成27年10月5日(月)  
14:00 ~ 18:30

技術研究組合NMEMS技術研究機構(MEH)

## 静大テーマ設定の意義

振動発電素子は充電という容量性負荷の駆動のため、発電電力だけでなく、発生電流が重要な指針である。小さな力でも大きな電流を発生する構造が不可欠。

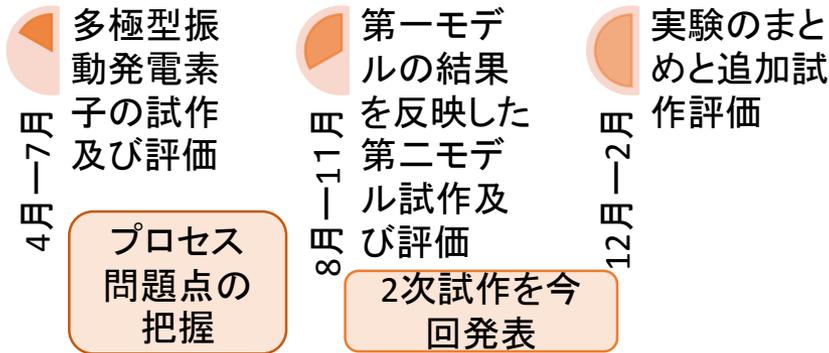
発生電流 = 力係数 × 振動速度

$$i = Av, v = f/r$$

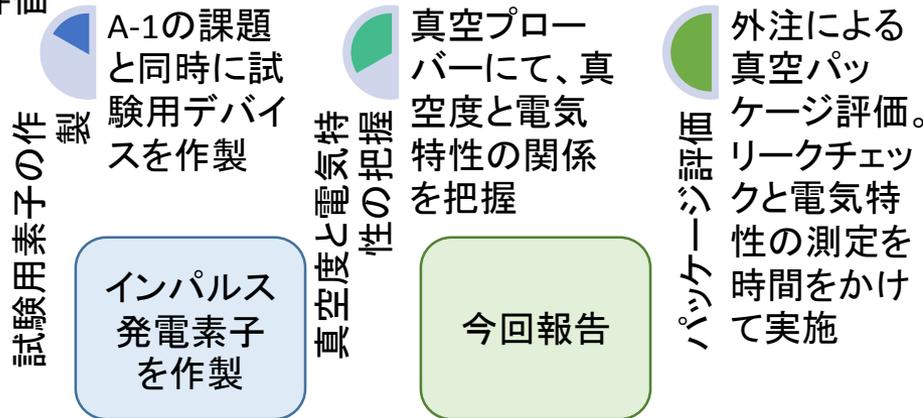
A-1: MEMSの振動速度はたかだか1m/sなので、力係数を大きくすることが必須。

A-2: 小さな力でも振動速度を大きくするためにダンピング抵抗を小さく。

### A-1. 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発

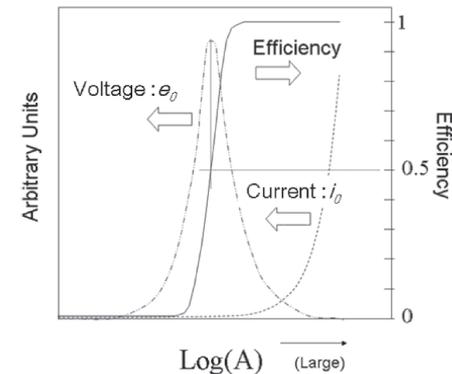


### A-2. エレクトレット振動発電素子のパッケージ技術と信頼性評価



## 年度末目標

大きな変位が可能で(電極間ギャップが支配)、かつ効率を100%にするために十分な大きさの力係数(帯電電圧が支配)を得ることのできる最適な構造を見出す。



真空度と電気特性の関係=ダンピングパラメータを実験的に求め、パッケージの真空度と電気特性の関係を理論、実験の両面で把握する。

## ①高密度固体イオンエレクトレットのエネルギーハーベスタ応用

	H27 4,5,6月	H27 7月	H27 8月	H27 9月	H27 10月	H27 11月	H27 12月	H28 1月	H28 2月
①-(1) 高電荷密度シリコンエ レクトレットの形成法の 開発	多極型振動発電素子の 試作及び評価	第一モデルの結果を反映した第二モデル試作及 び評価		実験のまとめと追加試作評価					
	1st試作による 問題点把握	2nd試作による評価							
①-(2) エレクトレット振動発電 素子のパッケージ技術 と信頼性評価	試験用デバイスを作 製	真空ブローバーにて、真空度と電気特性の関係を 把握、外注によるパッケージの評価		実験のまとめと追加試験・評価					
	双安定発電素 子を作製	真空度と電気特性の関係 を取得							

その他実施した内容:

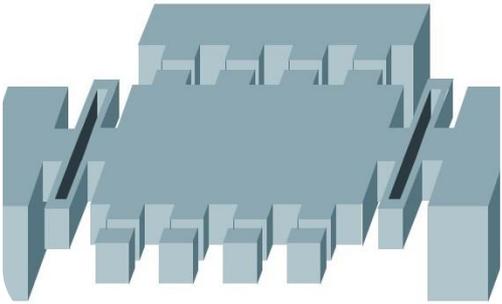
- ・帯電機構について→SIMSの結果から、カリウムイオンの移動によるガラス・シリコン界面における空間電荷層が、負電位のエレクトレット層を形成していることを確認。

- ・静電型発電素子は、高電圧、低電流であることから、低周波でも駆動可能なMEMSを用いた電流ブースト回路(昇流、降圧)を提案、実験的にその機能を確認。

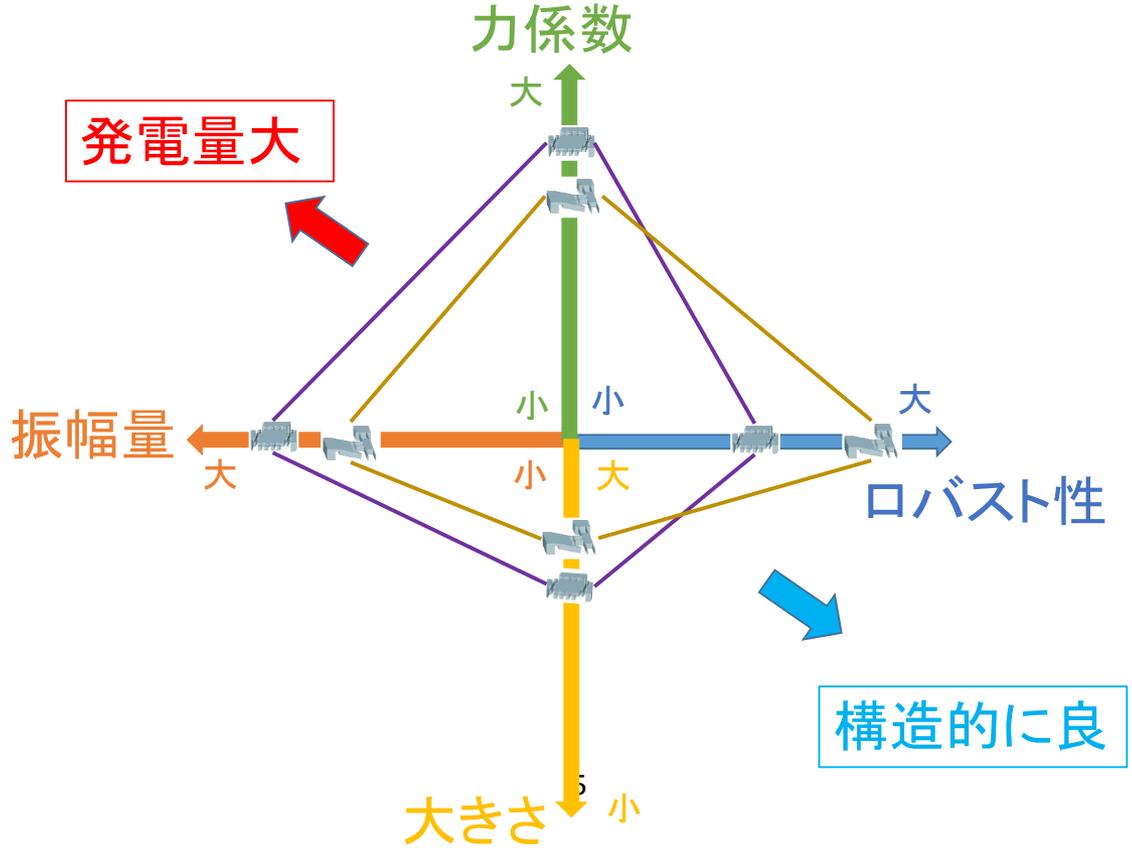
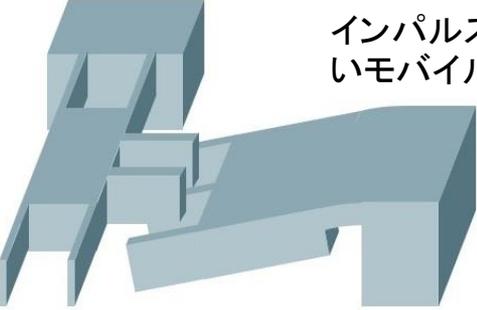
当初計画

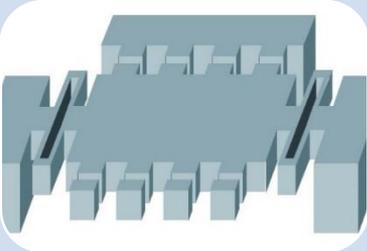
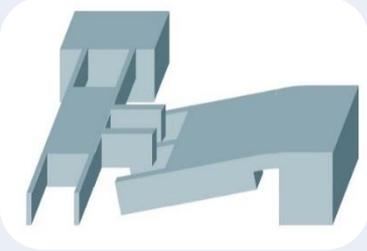
実施状況

タイプA: 多極型    小さな振動が定常的に続く場所向き

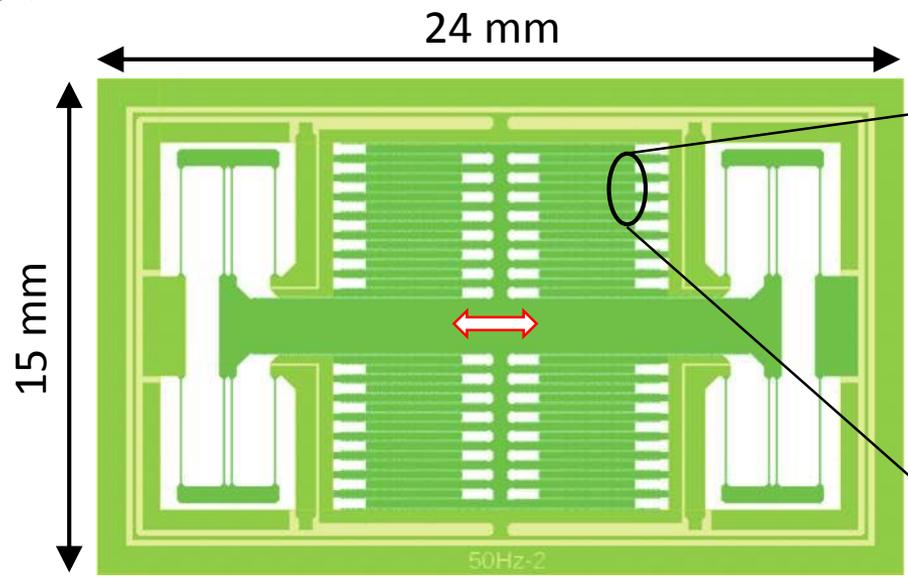


タイプB: カンチレバー型    インパルスが多いモバイル向き

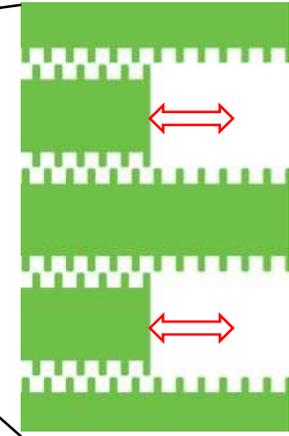


素子タイプ	現状	今年度末	先導研究終了時	性能改善のポイント
<p>A:多極型</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作製中</li> <li>・共振周波数: 100Hz</li> <li>・最適負荷時出力: 150<math>\mu</math>W(実効値)</li> <li>・力係数: <math>5 \times 10^{-5}</math></li> </ul>	<p>左記に同じ</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最大出力: 1mW</li> <li>・力係数: <math>1 \times 10^{-4}</math>以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電極間ギャップの縮小化</li> <li>・構造のアスペクト比の向上</li> <li>・振幅を制限するためのパッケージ</li> <li>・真空化</li> </ul>
<p>B:カンチレバー型</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接LED点灯</li> <li>・力係数: <math>2.5 \times 10^{-5}</math> (実測)</li> <li>・共振周波数: 1.1kHz(おもり無)</li> <li>・開放電圧: 10V以上 (実測)</li> <li>・短絡電流: 10<math>\mu</math>A以上 (実測)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・力係数: <math>1 \times 10^{-4}</math></li> <li>・共振周波数: 100Hz以下</li> <li>・最大出力: 100<math>\mu</math>W</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・共振周波数: 50Hz以下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造に対する電気機械エネルギー変換部の密度向上</li> </ul>

設計デバイス

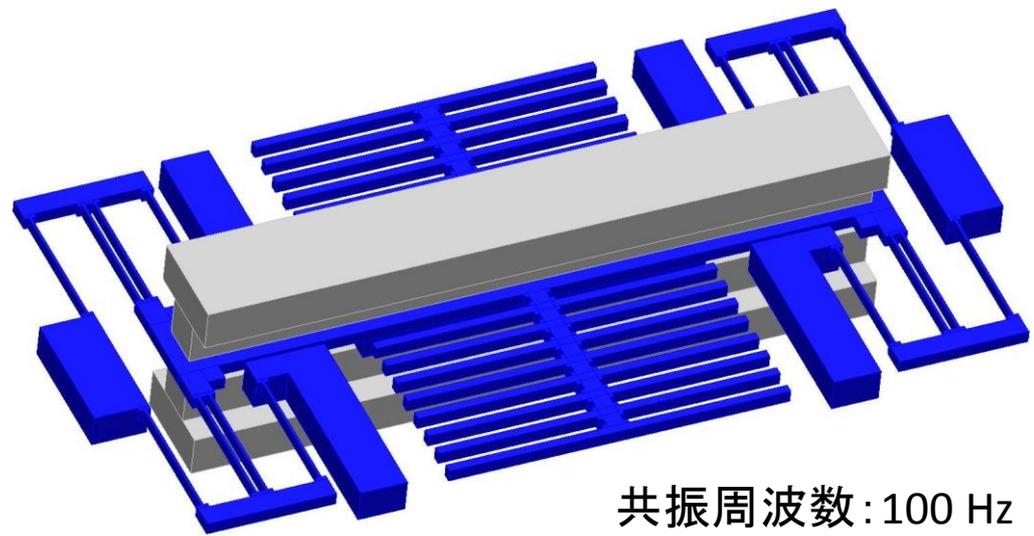


多極櫛歯電極部



発電理論式

$$P_{max} = \frac{mavQ}{4}$$

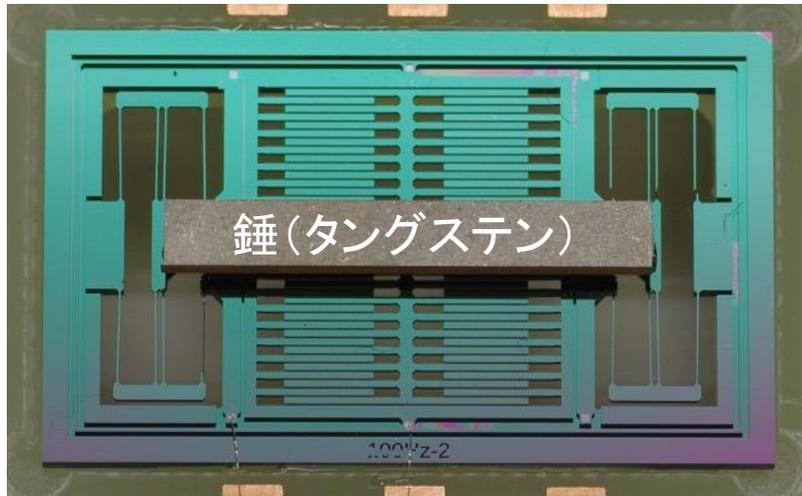


共振周波数: 100 Hz

〈作製デバイス〉

24 mm

15 mm

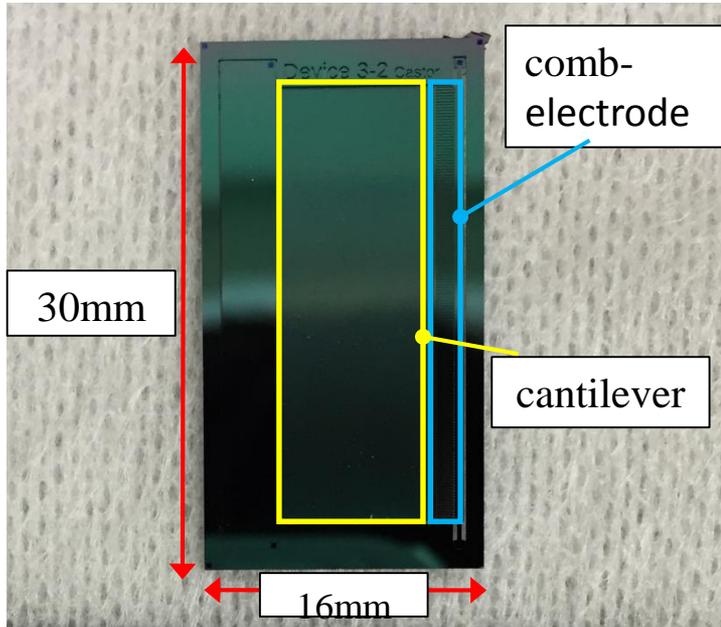


〈解放電圧測定〉

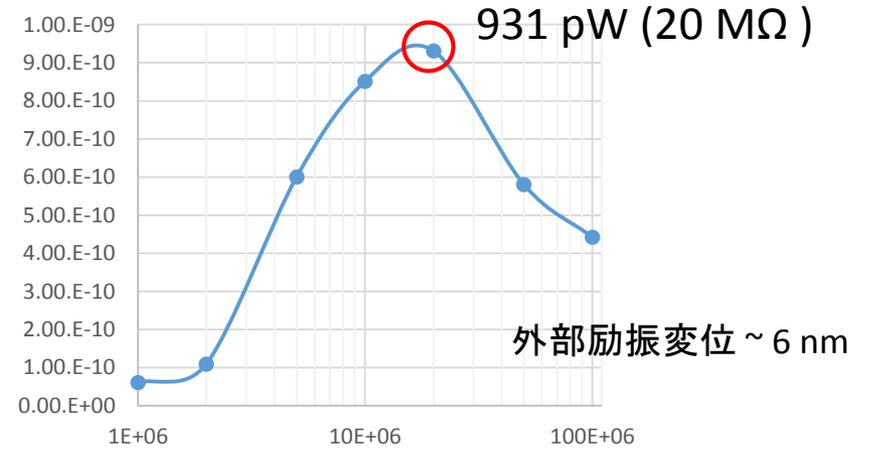


今後、加振器により詳細を測定

## <作製デバイス>



## 負荷抵抗と出力電力



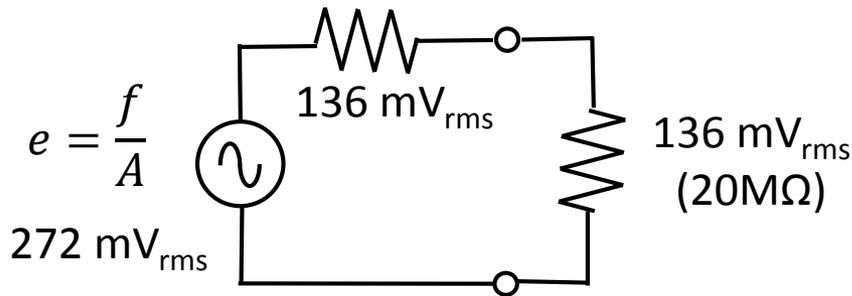
力係数  $A = 2.5 \times 10^{-5}$

$$f = Ae = 6.8 \times 10^{-5} \text{ [N] (rms)} \quad a = \frac{f}{m} = 2.27 \times 10^{-3} \text{ [m/s}^2\text{] (rms)}$$

$$v = \frac{a}{\omega} = 3.53 \times 10^{-6} \text{ [m/s] (rms)}$$

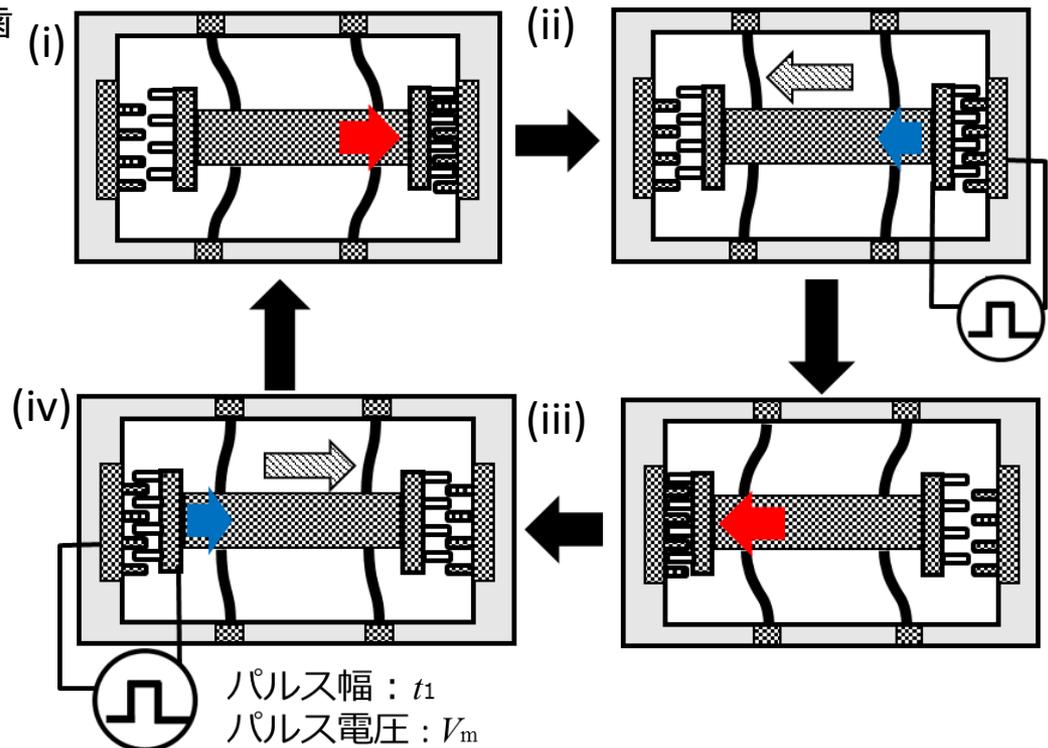
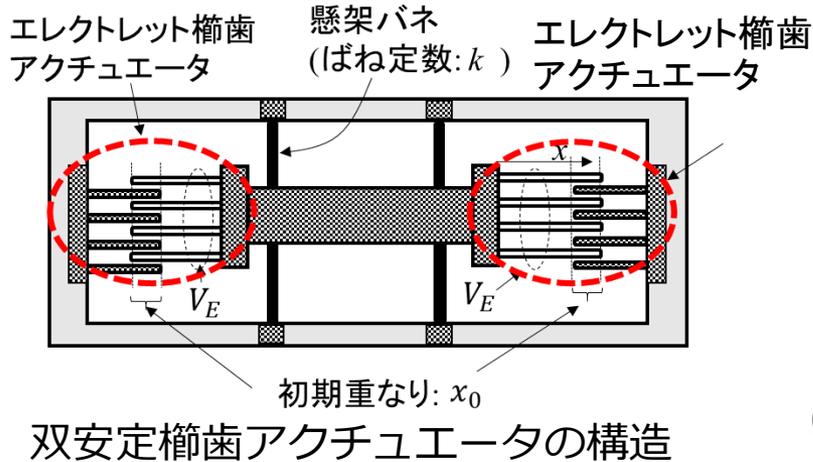
$$P_{max} = \frac{mavQ}{4} = 9.26 \times 10^{-10} \text{ [W]} \quad \text{実測値と一致}$$

$$P = \frac{mavQ}{4} \frac{1}{1 + \left(\frac{m\omega_0^2 C_0}{QA^2}\right)^2} \quad \text{効率100\%}$$



# インパルス発電素子

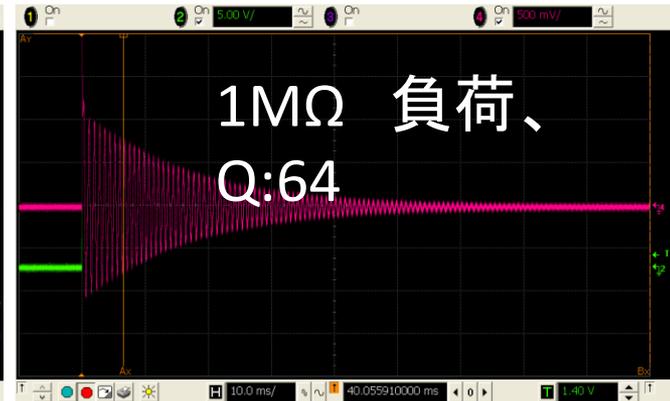
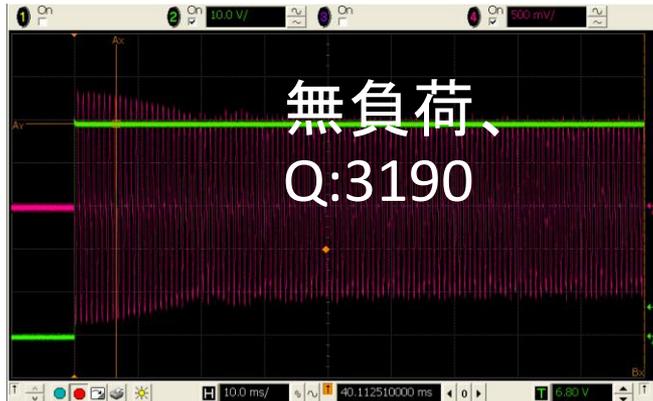
線形システムの伝達関数はインパルス応答関数と等価であるので、振動発電素子の等価回路との関係を把握するため、インパルス発電素子を作製し、真空度とQ値の関係を調査した。



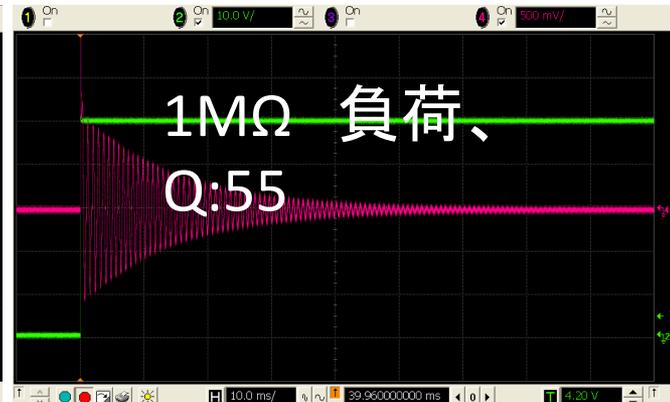
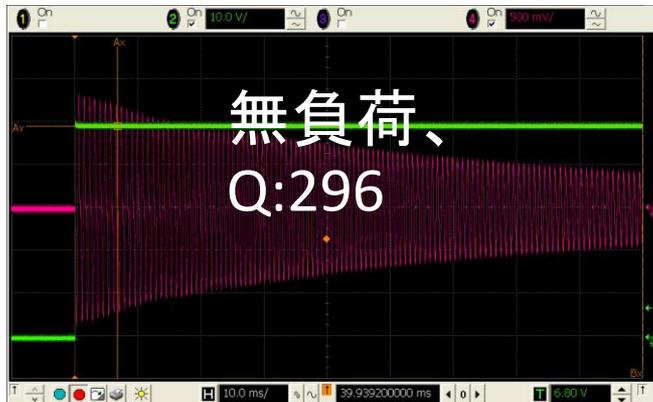
スイッチング原理

# 真空度とQ値の実測例

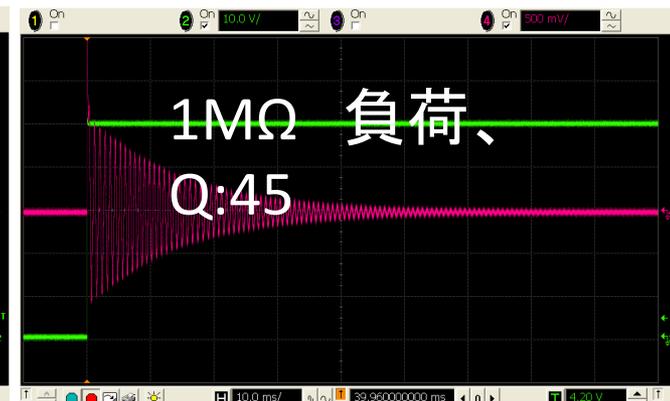
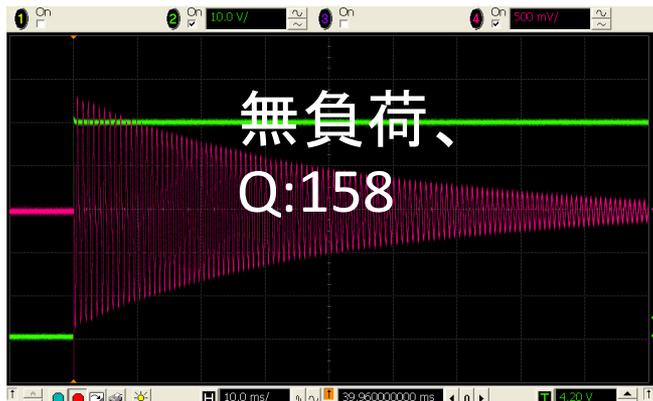
高真空：  
ターボ引き



低真空：  
ロータリー引き



大気中



$$\frac{1}{Q_T} = \frac{r_f + RA^2}{\omega_0 m} = \frac{r_f}{\omega_0 m} + \frac{RA^2}{\omega_0 m} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_L}$$

$Q_i$ : ダンピング抵抗によるQ

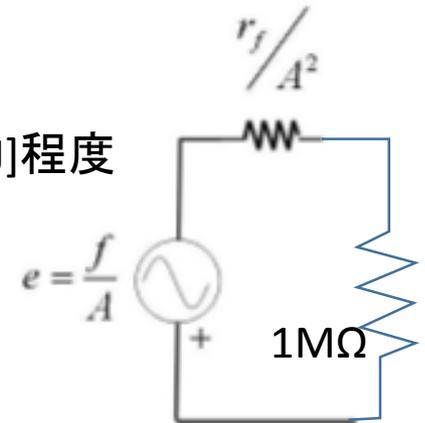
$Q_L$ : 負荷抵抗によるQ

Q値まとめ	無負荷 $Q_i$	1M $\Omega$ 負荷 $Q_T$ (実測)	$Q_i$ と $Q_L$ による $Q_T$ (計算)
大気	158	45	45.5
ロータリー	296	55	52.5
ターボ	3190	64 $\doteq$ $Q_L$	

ほぼ一致

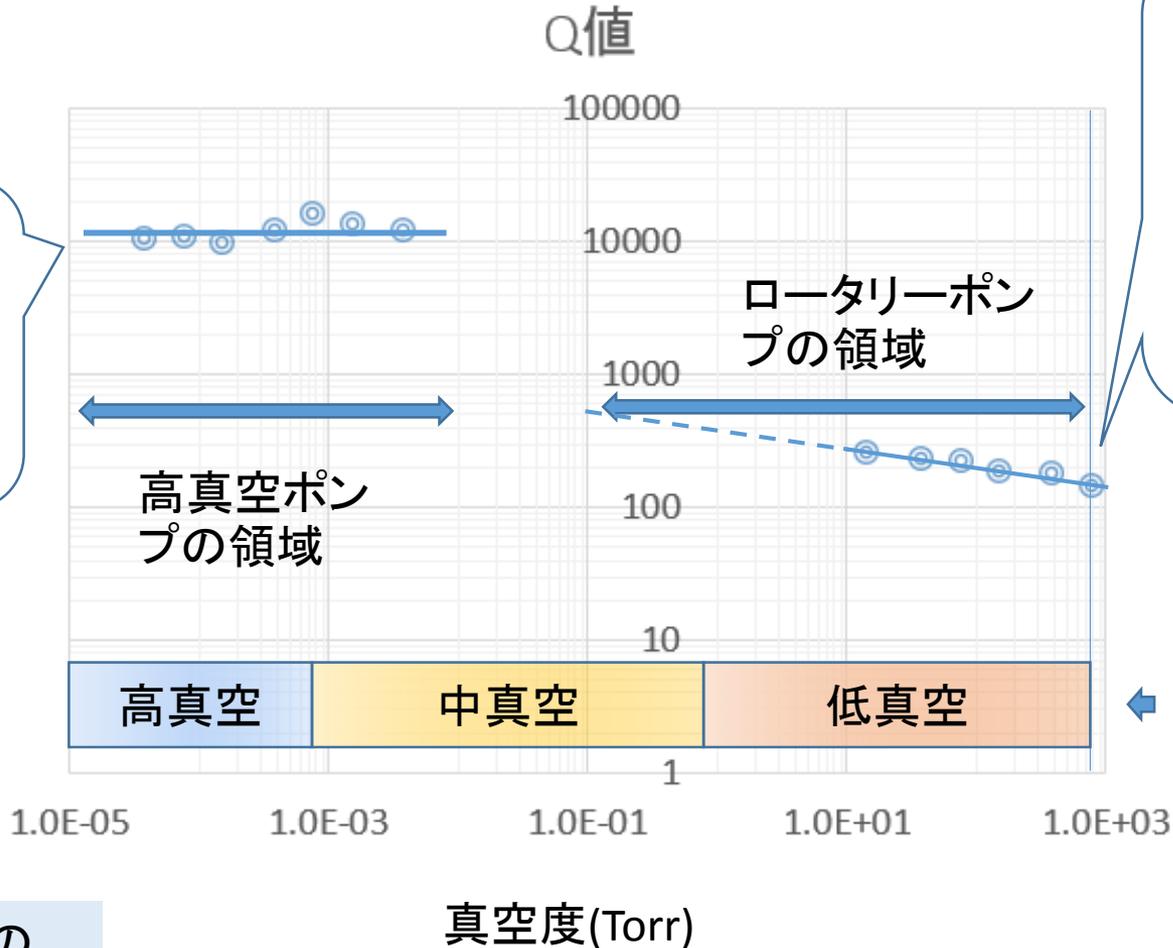
バネの初期変位とバネ定数から、バネの有するエネルギーは、5.67[nJ]程度

	$Q_T$	発生エネルギー(nJ)	Qによる最適負荷	効率(バネのエネルギーに対する)
大気	45(0.70)	4.03	404k $\Omega$	71%
ロータリー	55(0.86)	4.91	216k $\Omega$	87%
ターボ	64(1)	5.66	20k $\Omega$	$\doteq$ 100%



容量によるインピーダンスは50M $\Omega$ 程度なので、ほぼ順抵抗と近似できる。

インパルスによる発電では、最適負荷という指標ではなく、内部抵抗が小さいことが重要？



広い範囲でQ値はほぼ一定。等価回路から、出カインピーダンスが小さくなる効果は大きいと考えられる。

低真空の領域では、わずかにQ値が増加する。しかし真空度が2桁よくなっても、Q値の変化は小さい。パッケージのコストと性能向上の関係からこの領域でのパッケージは効果が十分あるとはいいがたい。

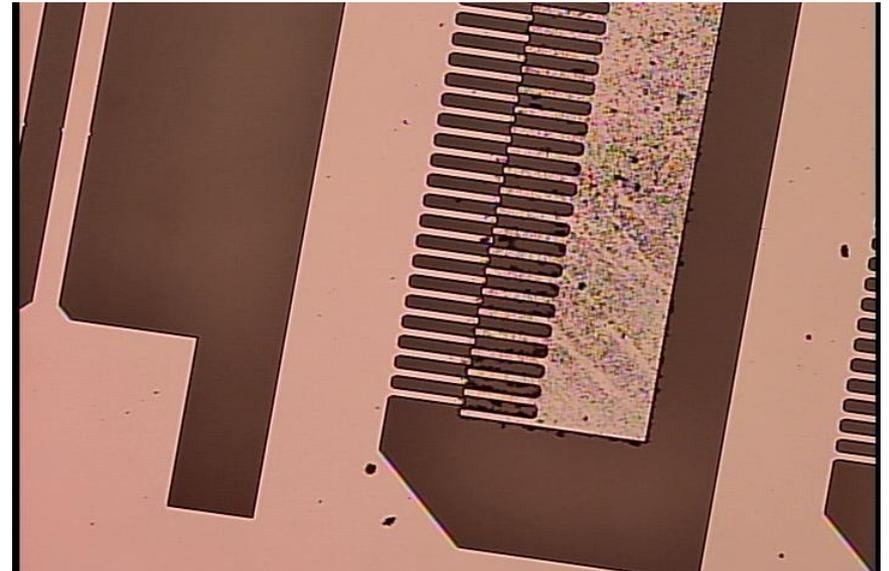
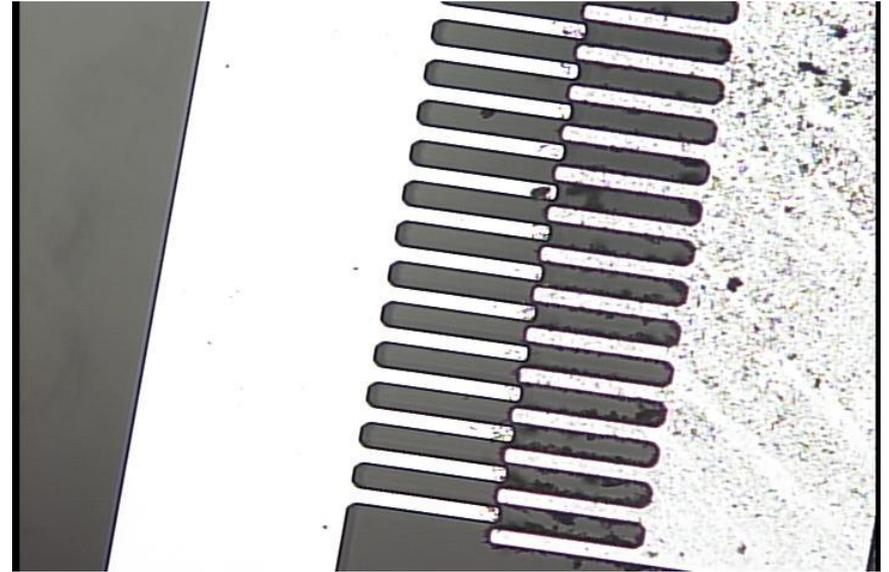
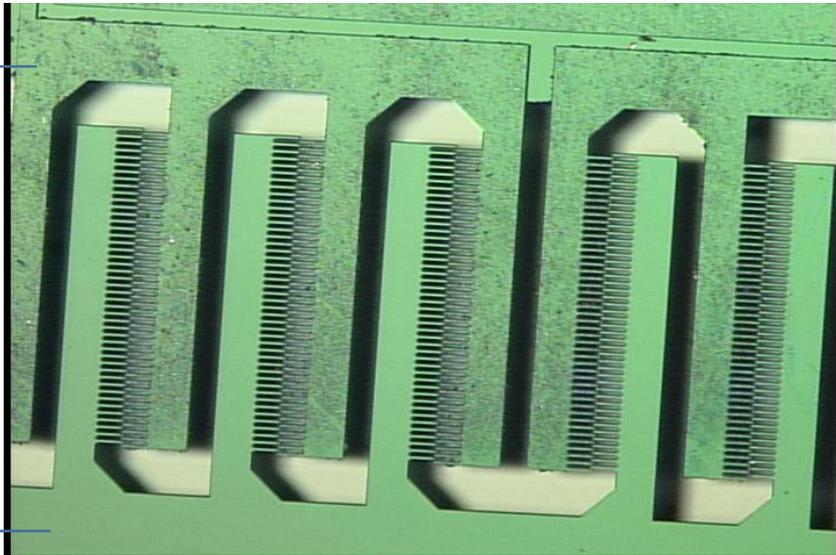
JIS Z 8126による真空区分

この領域でのパッケージを今後実施する。

# 帯電領域の確認

帯電時の電  
圧の向き

帯電している部分だけパー  
ティクルが付着している様子

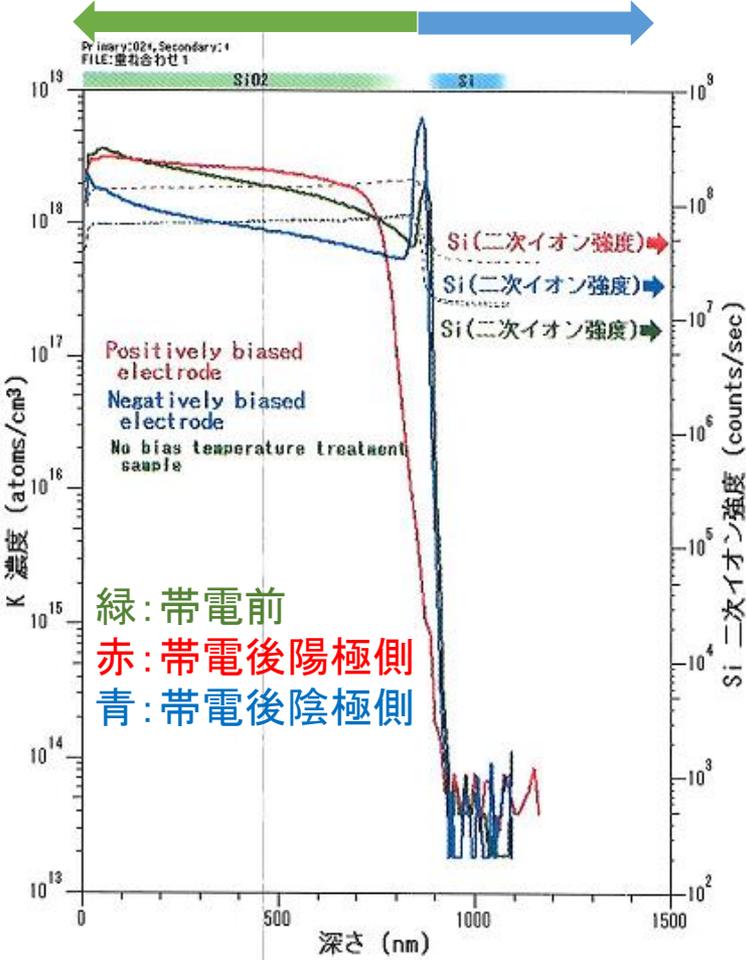


# 帯電機構に関して

SIMSによるカリウム濃度  
分布測定結果

SiO<sub>2</sub>

Si基板

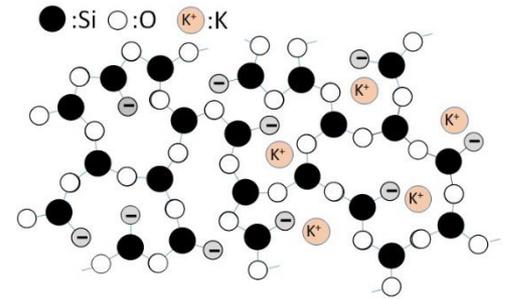


緑: 帯電前  
赤: 帯電後陽極側  
青: 帯電後陰極側

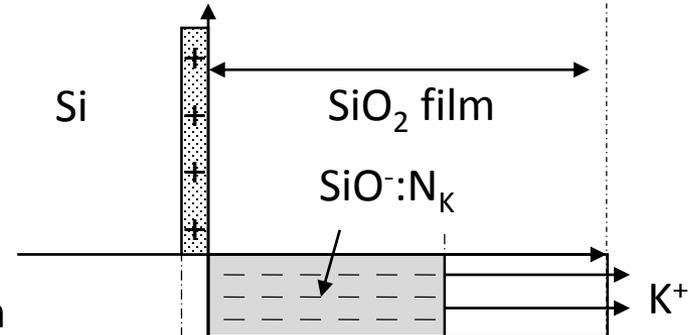
右のモデルと帯電  
電圧がほぼ一致

## 帯電モデル

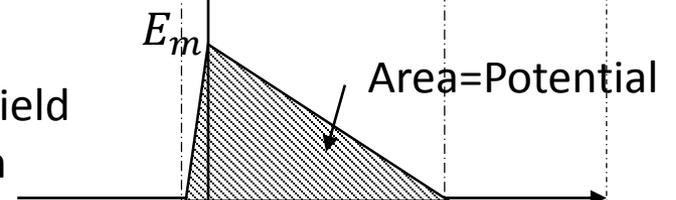
(a) Structure of SiO<sub>2</sub> film



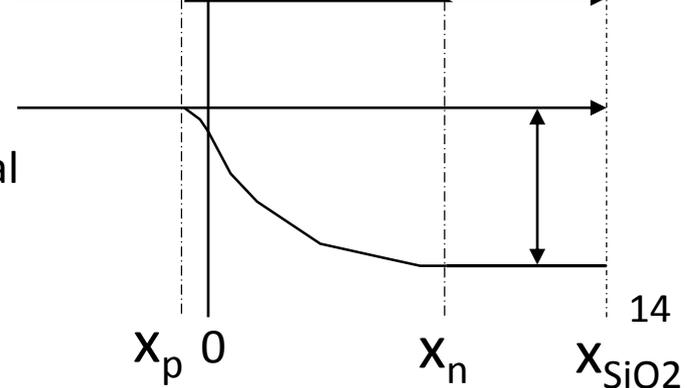
(b) Space-charge distribution



(c) Electric field distribution



(d) Potential variation



## A-1. 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発

- ✓ 作製したデバイスの詳細な特性評価  
加振器による発電電力と様々なパラメータとの関係を求め、等価回路モデルと比較。
- ✓ 1mW級の振動発電素子実現に向けた設計

## A-2. 真空パッケージの実施と特性評価

- ✓ 外注による真空パッケージを実施。真空度の推移や加振機による特性を評価する。