

7月13日第3回高効率MEH研究会

目標：真空度と特性
の把握、パッケー
ジ素子の信頼性

実施計画：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

試験用素子の作製

A-1の課題と同時に試験
用デバイスを作製する。
作製難易度の低い10 μ W
級デバイスを用いる。

真空度と電気特性の把握

真空プローバーにて、
真空度と電気特性の関
係を把握する。

パッケージ評価

真空プローバーによる
データを基に、まずは
外注による真空パッ
ケージを予定。リーク
チェックと電気特性の
測定を時間をかけて実
施。

長期信頼性評価

高温加速試験による振
動発電素子の寿命試験
を実施する。アレニウ
スの原理を仮定し、室
温状態での寿命を推定
する。

7月末

8月末

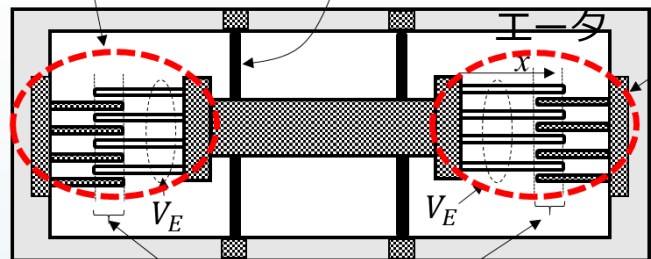
H28.1くらいより

特性がよくない場合、
再設計、再試作

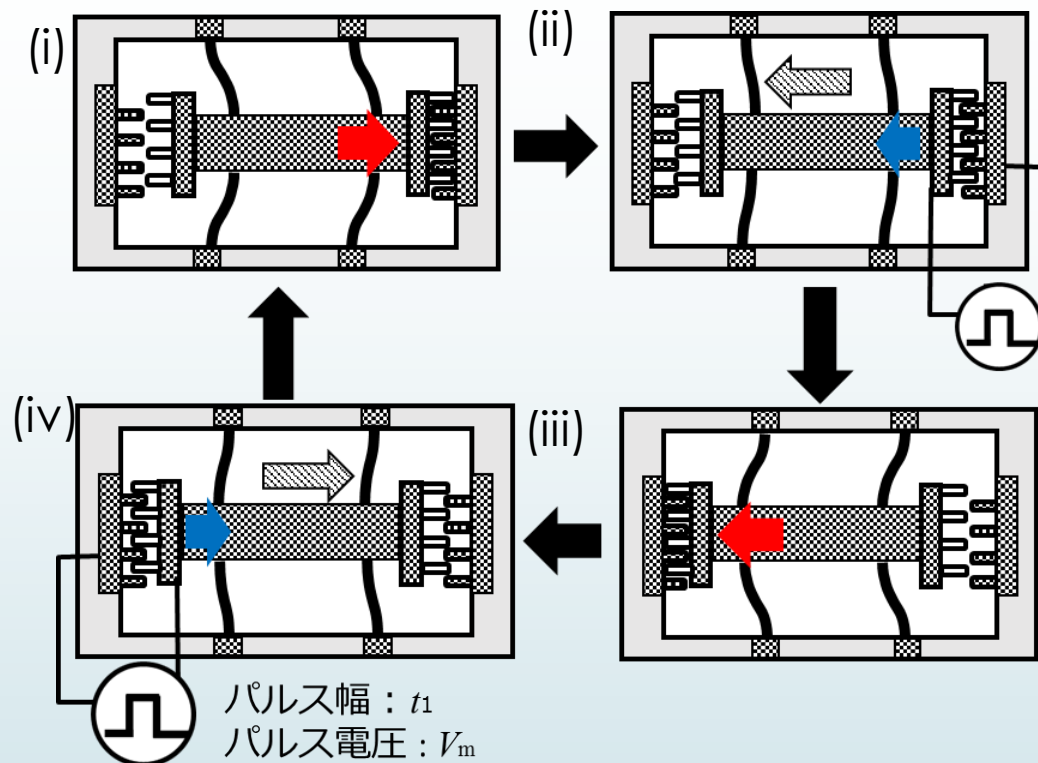
エレクトレット双安定櫛歯アクチュエータ発電デバイス

3

エレクトレット櫛歯
アクチュエータ 懸架バネ
(ばね定数: k) エレクトレット
櫛歯アクチュ



初期重なり: x_0
双安定櫛歯アクチュエータの構造



スイッチング原理

(i) 右側の櫛歯電極の変位により可動部を保持.

このとき、左側の櫛歯電極が噛み合わない様に設計. $\Rightarrow$ 左側櫛歯の静電引力が作用し

(ii) 右側の櫛歯電極にパルス電圧を印加することで左側の櫛歯電極へスイッチング

(iii) 左側の櫛歯電極の変位により可動部を保持.

このとき、右側の櫛歯電極がかみ合わない様に設計. $\Rightarrow$ 右側櫛歯の静電引力が作用しない

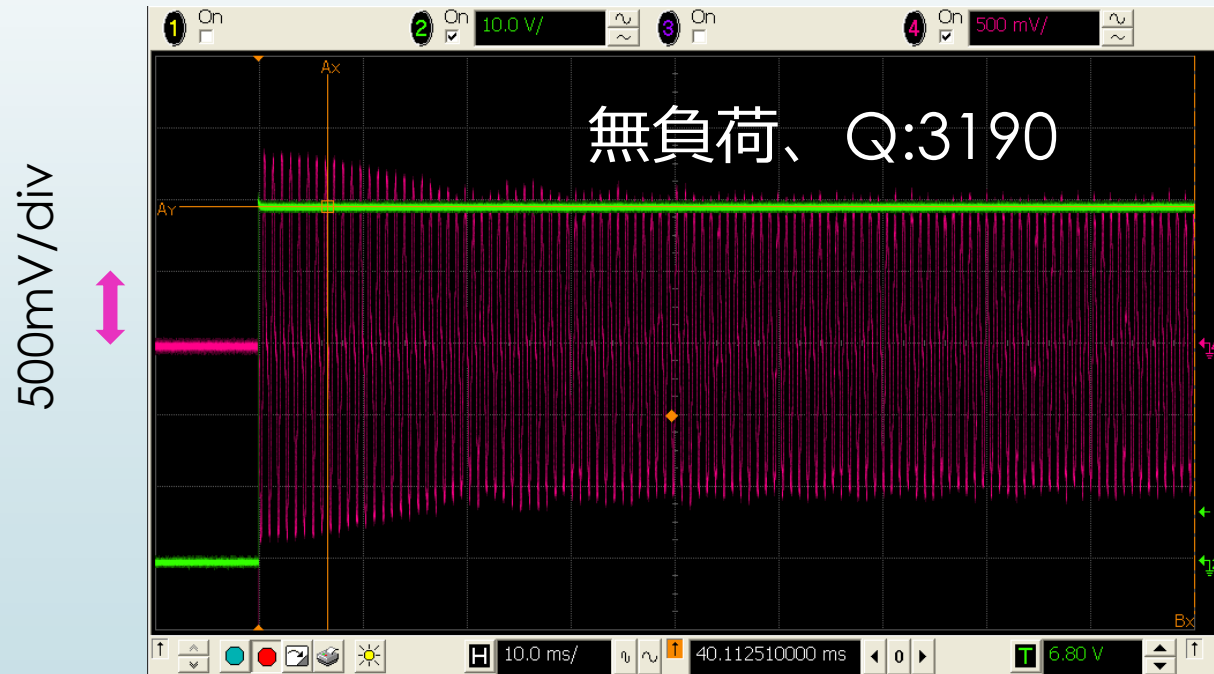
(iv) 左側の櫛歯電極にパルス電圧を印加することで右側の櫛歯電極へスイッチング

真空度と発電電力の関係の把握(1)

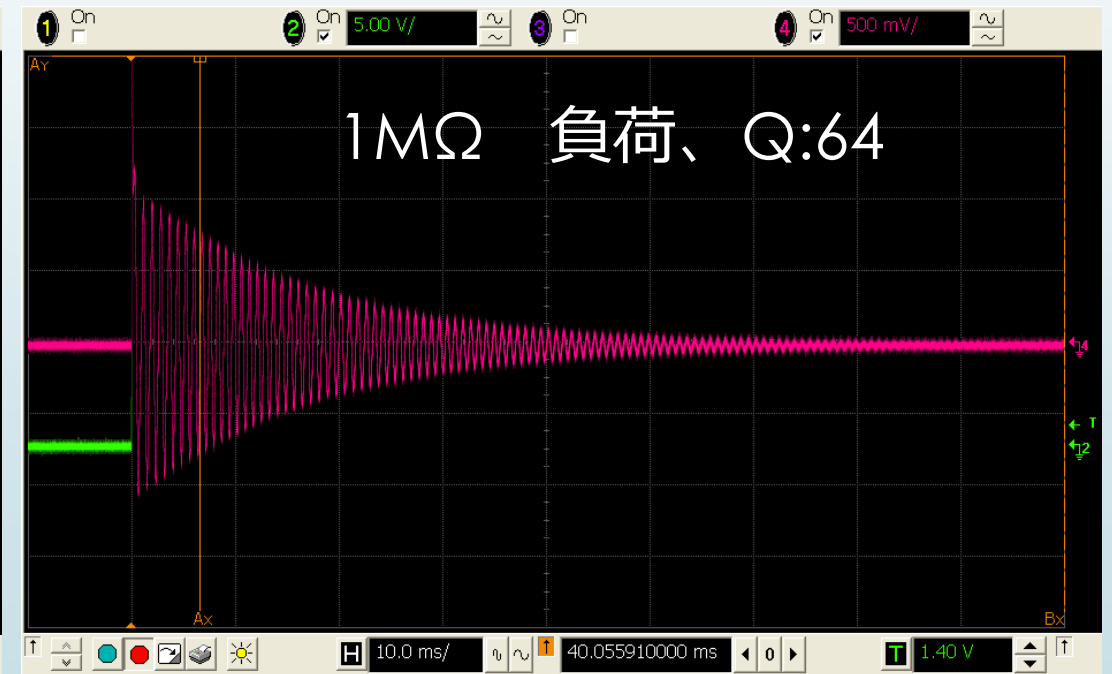
双安定エレクトレットアクチュエータによるインパルス発電実験
(真空計が故障のため、実際の真空度は不明)

ターボポンプ引き

I V変換の出力（短絡電流に相当） $1\mu\text{A}/1\text{V}$



$1\text{M}\Omega$ 負荷に発生する電圧を測定

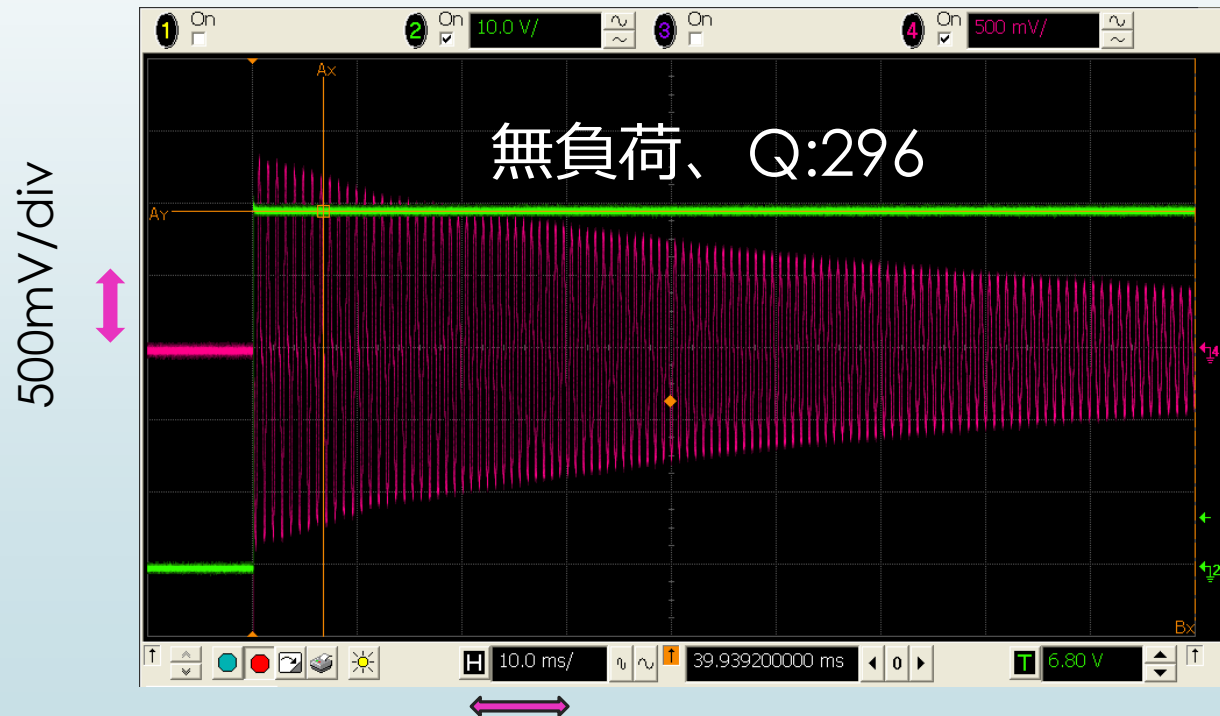


真空度と発電電力の関係の把握(2)

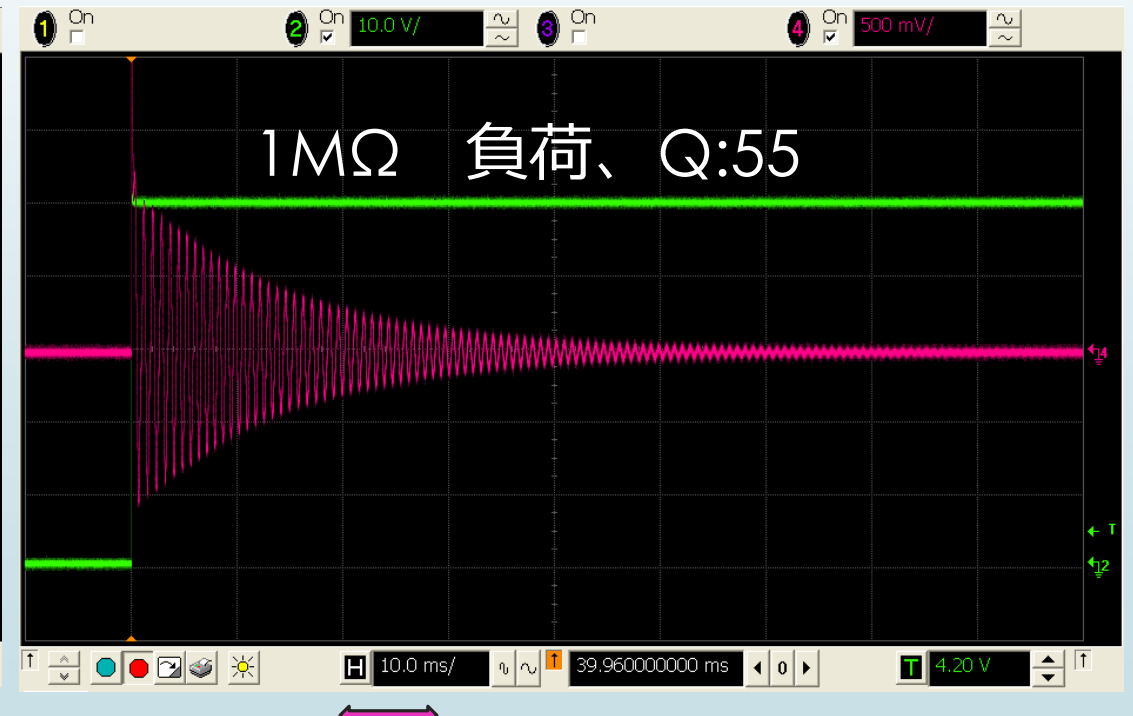
双安定エレクトレットアクチュエータによるインパルス発電実験
(真空計が故障のため、実際の真空度は不明)

ロータリーポンプ引き

I-V変換の出力（短絡電流に相当） $1\mu\text{A}/1\text{V}$



$1\text{M}\Omega$ 負荷に発生する電圧を測定

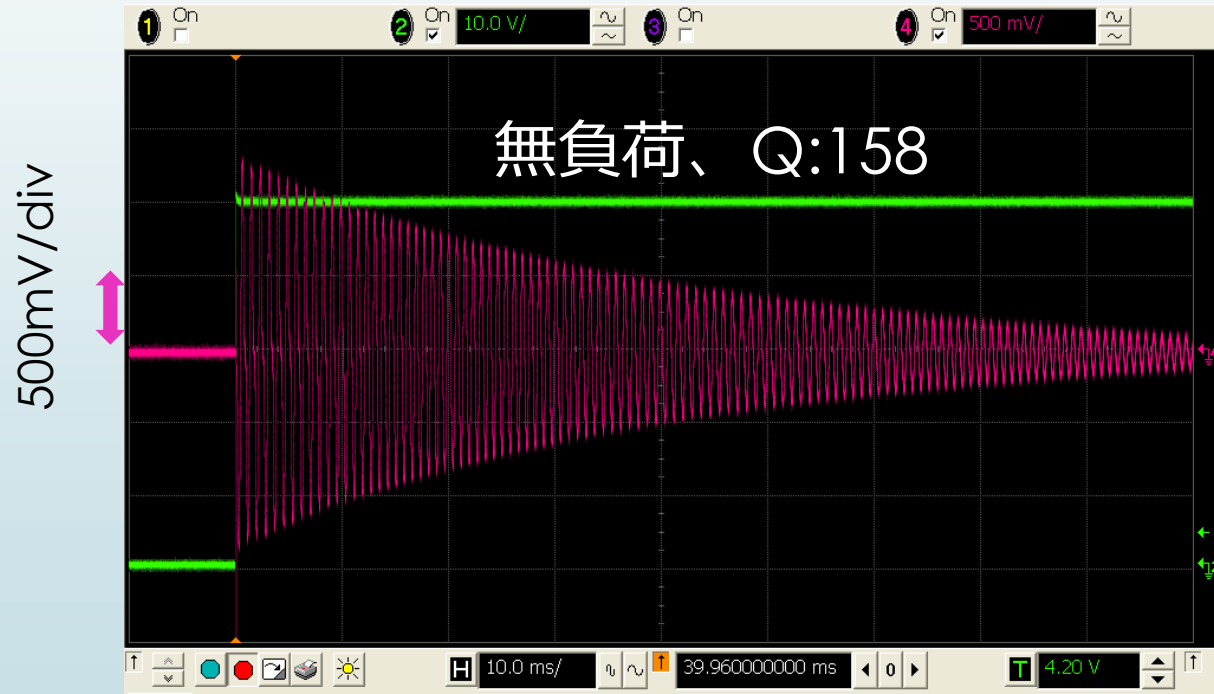


真空度と発電電力の関係の把握(3)

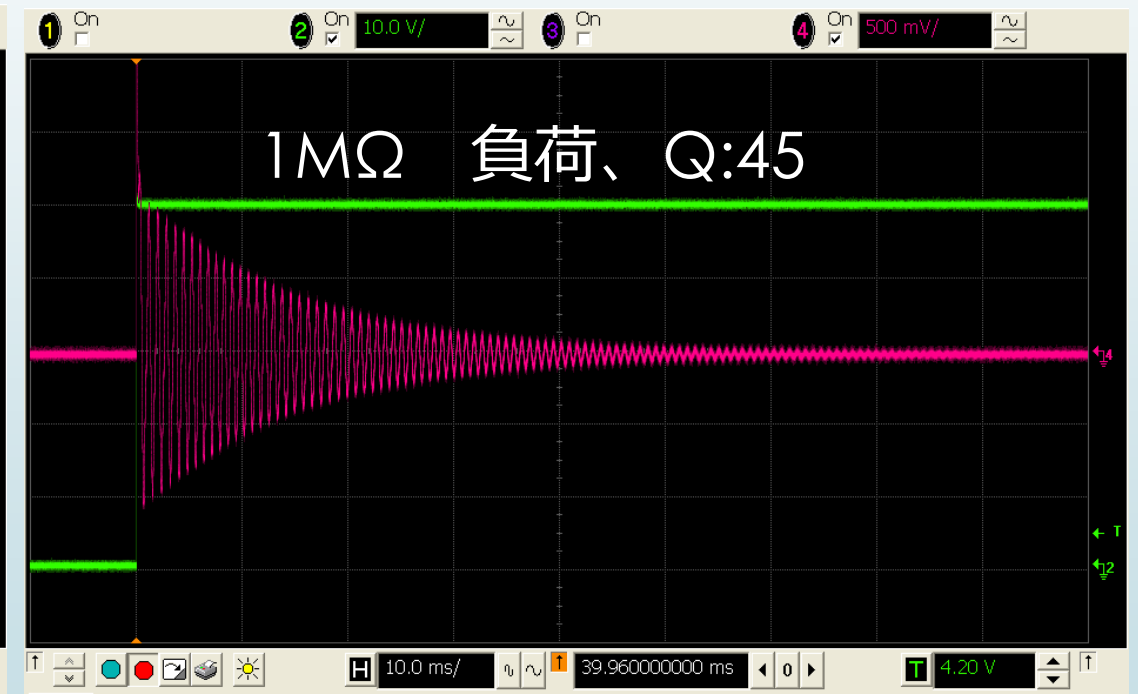
双安定エレクトレットアクチュエータによるインパルス発電実験
(真空計が故障のため、実際の真空度は不明)

大気中

I V変換の出力（短絡電流に相当） $1\mu\text{A}/1\text{V}$



$1\text{M}\Omega$ 負荷に発生する電圧を測定



Q値のまとめと考察

r_f : ダンピング
 m : 質量
 k : バネ定数

A : 力係数
 R : 負荷抵抗
 C : 容量 (浮遊含む)

負荷接続時の機械系からみた櫛歯
 アクチュエータのインピダンス

$$z'_m = \frac{f}{v} = r_f + j\omega m + \frac{k}{j\omega} + \frac{A^2 R(1 - j\omega CR)}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

通常 $1 \gg \omega^2 C^2 R^2$ かつ $m \gg CA^2 R^2$

$$\therefore z'_m = r_f + RA^2 + j\omega m + \frac{k}{j\omega}$$

負荷接続時に観測されるQ値

$$Q_T = \frac{\omega_0 m}{r_f + RA^2} \quad \text{あるいは}$$

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

Q値まとめ	無負荷 Q_i	1M Ω 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 $\div$ Q_L	

ほぼ一致

左に示す理論通りになっている。

力係数の推定

$$Q_L = \frac{\omega_0 m}{RA^2} \quad \text{より力係数} A \text{を算出}$$

$$A = 8.03 \times 10^{-6} \quad \text{設計値は } A = 8.61 \times 10^{-6}$$

発生エネルギーとQ値

負荷時の波形の2乗を積分して発生エネルギーを計算

	QT	発生エネルギー(nJ)	Qによる最適負荷	
大気	45(0.70)	4.03(0.71)	404kΩ	
ロータリー	55(0.86)	4.91(0.87)	216kΩ	
ターボ	64(1)	5.66(1)	20kΩ	

※ () はターボのデータを1とした場合の割合

最適負荷値は振動発電機の内部抵抗でもあるので、内部抵抗によるエネルギー消費を抵抗比から見積もる。

大気 : $x: 4.03 = 404: 1000$ $x = 1.63[\text{nJ}]$

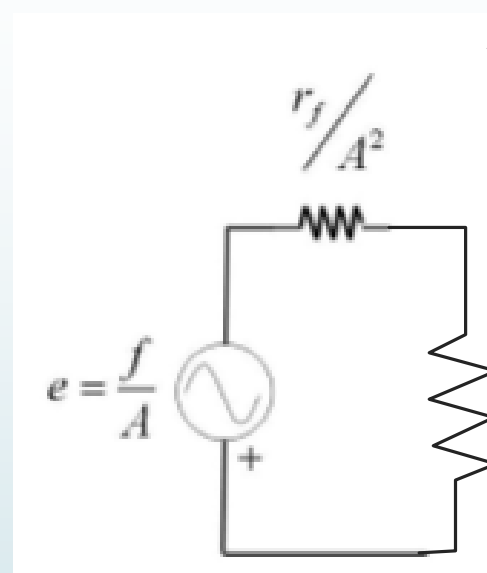
ロータリー : $x: 4.91 = 216: 1000$ $x = 1.06[\text{nJ}]$

全消費
エネルギーは

$1.63 + 4.03 = 5.66[\text{nJ}]$

$1.06 + 4.91 = 5.97[\text{nJ}]$

ターボでの消費
電力にほぼ一致



実際バネの初期変位は
≒17.5μm、
バネ定数は設計値で40[N/m]、
共振周波数が設計値より少し
小さいので、バネ定数が
37[N/m]としたら、

$$E_k = \frac{1}{2} k x^2 = 5.67[\text{nJ}]$$

バネの有するエネルギーが約5.66[nJ]であつたと推測される

インパルス応答の電力とQ値

今回の素子では、初期エネルギーが決まっていて、電力はそのエネルギーを何秒で放出できるかで決まる。インパルス応答の振幅の減衰は、

$e^{-(\omega_0/2Q)t}$ で表されるが、最適負荷を接続した場合、Q値はこの半分になるので、

$e^{-(\omega_0/Q_T)t}$ に従って減衰する。一方電力は振幅の2乗なので、 $e^{-(2\omega_0/Q_T)t}$

時定数に相当する時間で、初期エネルギーがほとんど消費されるとすれば、半分が負荷で消費されるので、その電力は

$$\tau = \frac{Q_T}{2\omega_0} \quad \therefore P = \frac{E_k/2}{\tau} = \frac{\omega_0 E_k}{Q_T}$$

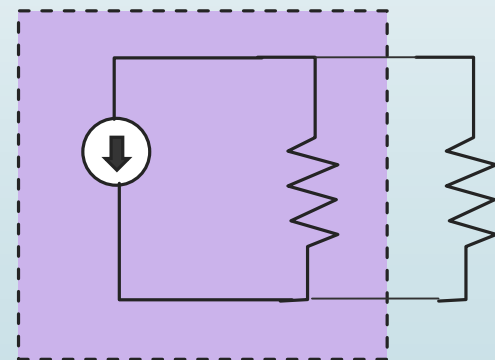
Q_T が小さい方が大きな電力

一方、この電力を消費するために、無負荷時のMEMSが発生する電流の半分が負荷抵抗に流れると考えられるので、

$$P = R \left(\frac{i}{2} \right)^2 = R \left(\frac{Av}{2} \right)^2 = \frac{RA^2\omega_0^2 x^2}{4} \quad \therefore R = \frac{4E_k}{Q_T A^2 \omega_0 x^2}$$

今回は

$$2.2[\text{M}\Omega] @ Q_T = 50$$



発生電圧とQ値との関係

通常は印加された力がQ倍される。

→今回は力が決まっている。

→等価回路における発生電圧（開放電圧）に関する力は、バネの持っている力のQ分の1と考えることができる。

$$e = \frac{f}{A} = \frac{kx/Q_T}{A} \quad \text{ターボの場合：} e \approx 25[\text{mV}]$$

最適負荷と短絡電流から計算される電圧の振幅： $e = 1.5[\mu\text{A}] \times 20[\text{k}\Omega] = 30[\text{mV}]$ 程度

	上記理論値[V]	短絡電流×最適負荷[V]	測定Q値による電圧[V]
大気	0.510	0.606	1.80
ロータリー	0.273	0.324	1.47
ターボ	0.025	0.03	1.26

振動速度と振幅

無負荷時の発生電流と力係数より初期の速度を算出

$$i = Av \quad v = \frac{i}{A} = \frac{3 \times 10^{-6}}{8.03 \times 10^{-6}} = 0.374 \text{ [m/s]}$$

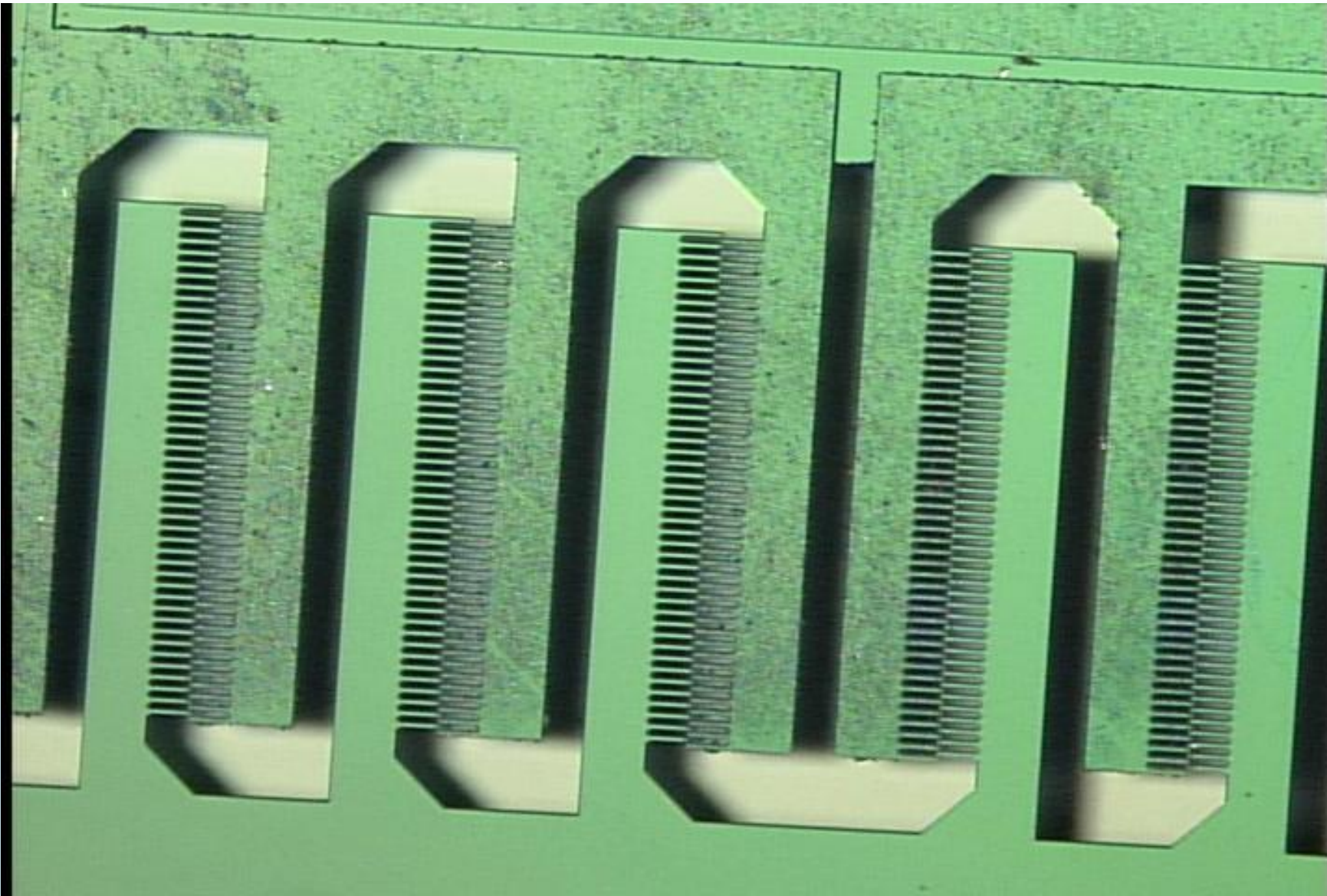
次に速度と共振周波数より振幅(peak-to-peak)を算出

$$v = \omega_0 x \quad x = \frac{v}{\omega_0} = \frac{0.374}{2\pi \times 1.64 \times 10^{-3}} = 36.2 \times 10^{-6}$$

画像から読み取れる振幅のほぼ2倍でつじつまが合っている。

帯電領域の確認

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



SOI

Si_sub

BOX :
2μm

SOI

Si_sub

c.f.BOX
: 1μm

SOI

Si_sub

帯電時の陽極側のみの付着。

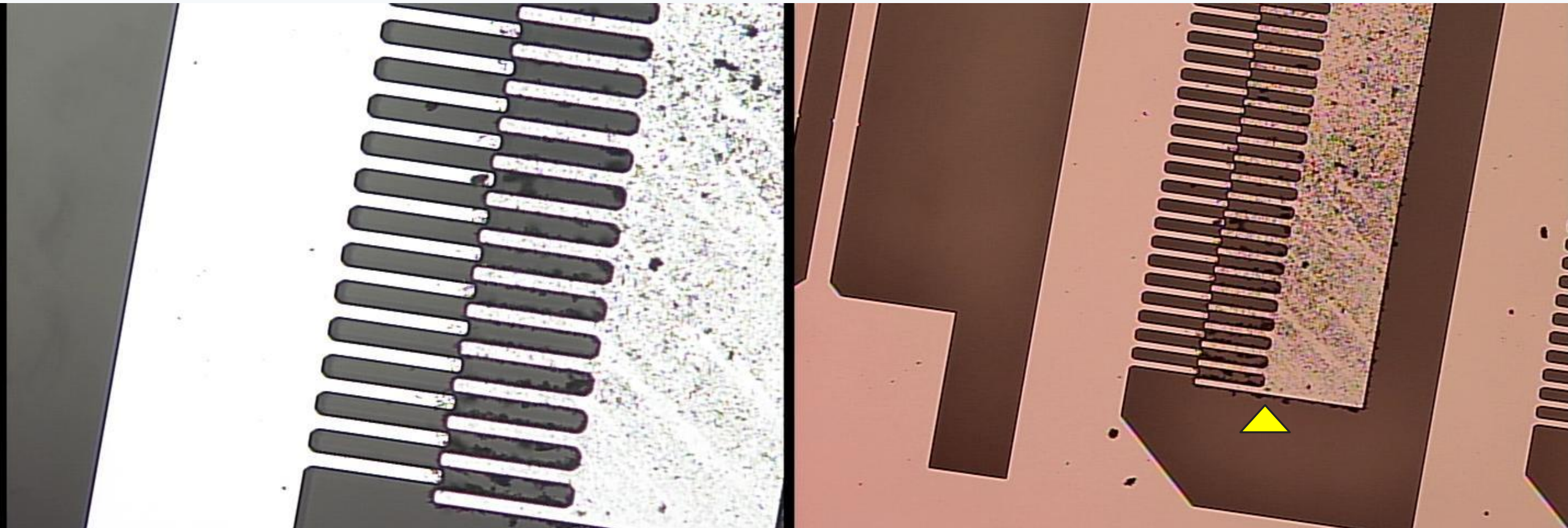
陽極側では、どの部分も一様に帯電している。

パーティクルの付着により櫛歯間の静電引力は消滅。

ブローで除去を試みたが取れなかった。
→酸化膜内のエレクトレットは存在。

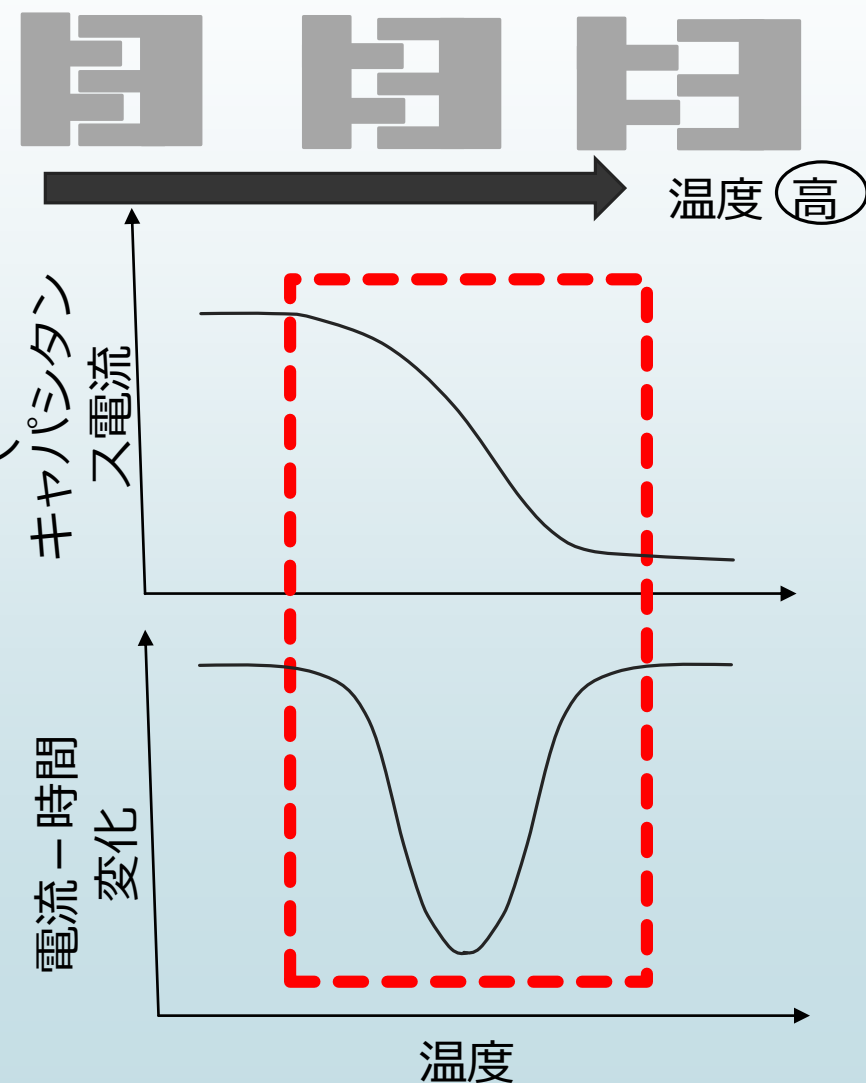
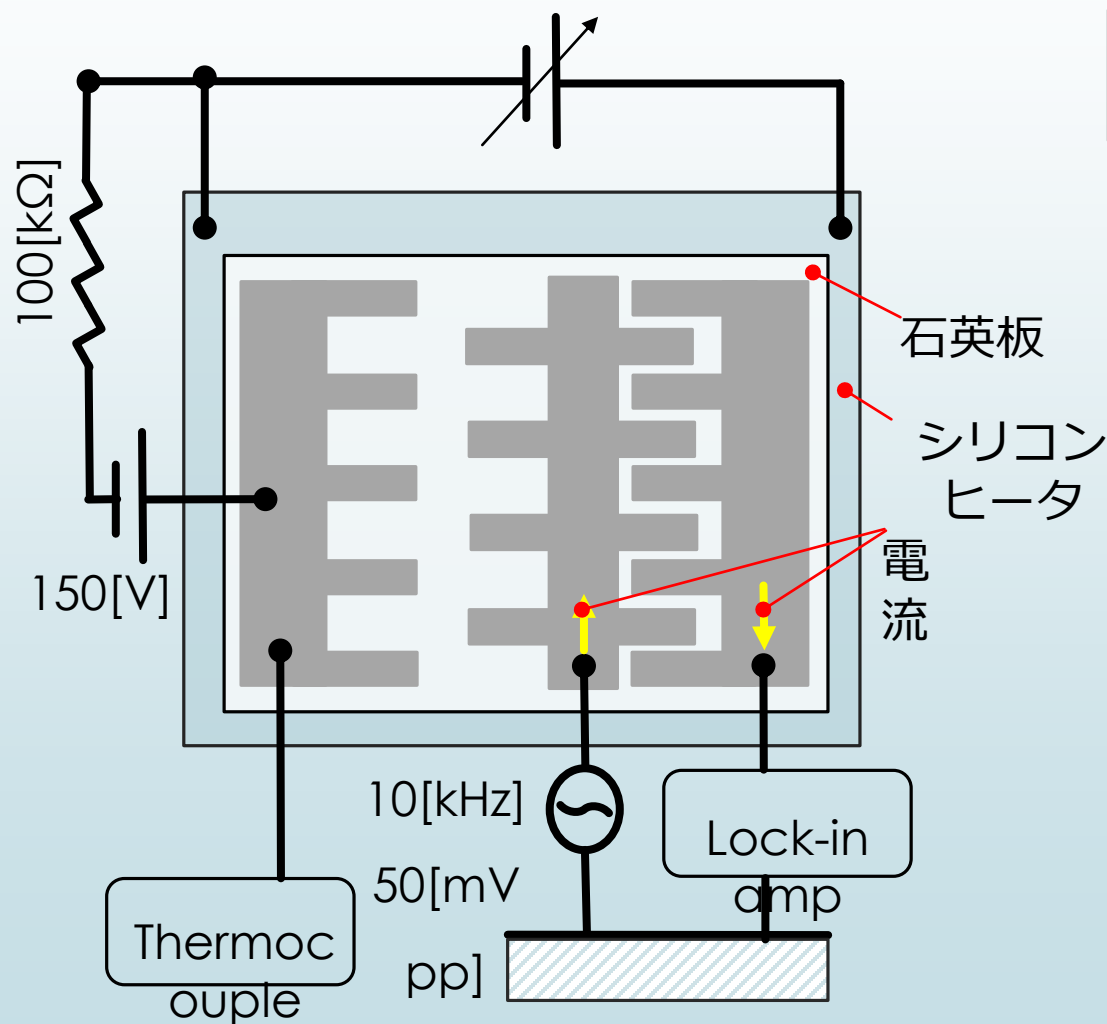
パーティクル付着状態の詳細

櫛歯のすきまの様子。側壁にも付着しているようである。



固体イオンエレクトレット膜の温度安定性

TSD (Thermally Stimulated Discharge)法による熱的安定性評価を静電アクチュエータの変位によって計測した。



TSD実験の結果

$$i \propto x \propto E^2 \quad (E: \text{エレクトレット電位})$$

MEMSの容量変化の生データ



325°C付近にピークがある。しかしこれは昇温速度に依存していることが判明。(昇温は実験者が手動で電源のパワーを調整した)

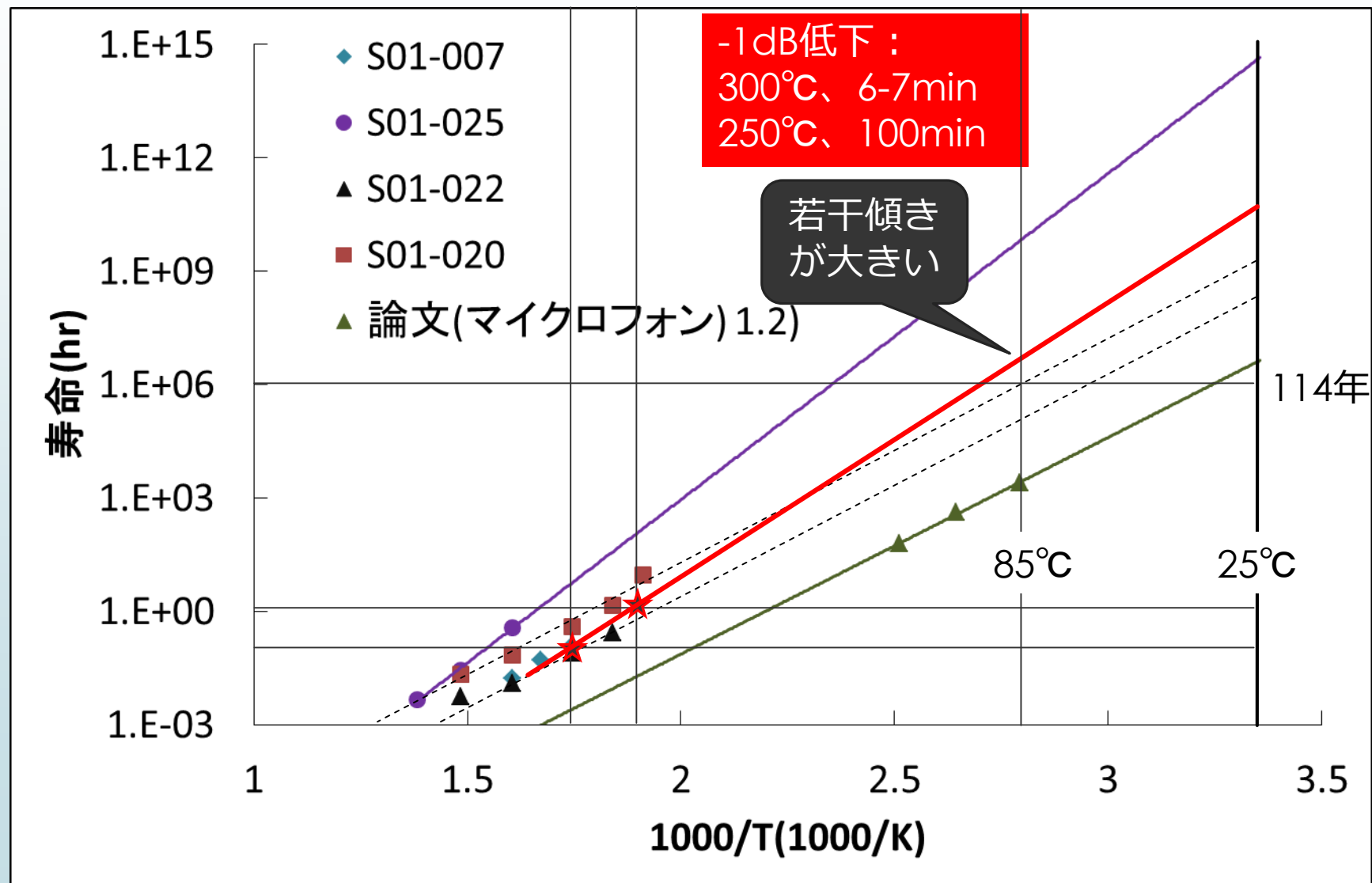
そこで5秒毎の電流の変化を温度の関数としてプロット



$$\frac{\Delta i}{\Delta t} \propto \frac{\Delta x}{\Delta t} \propto 2E \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

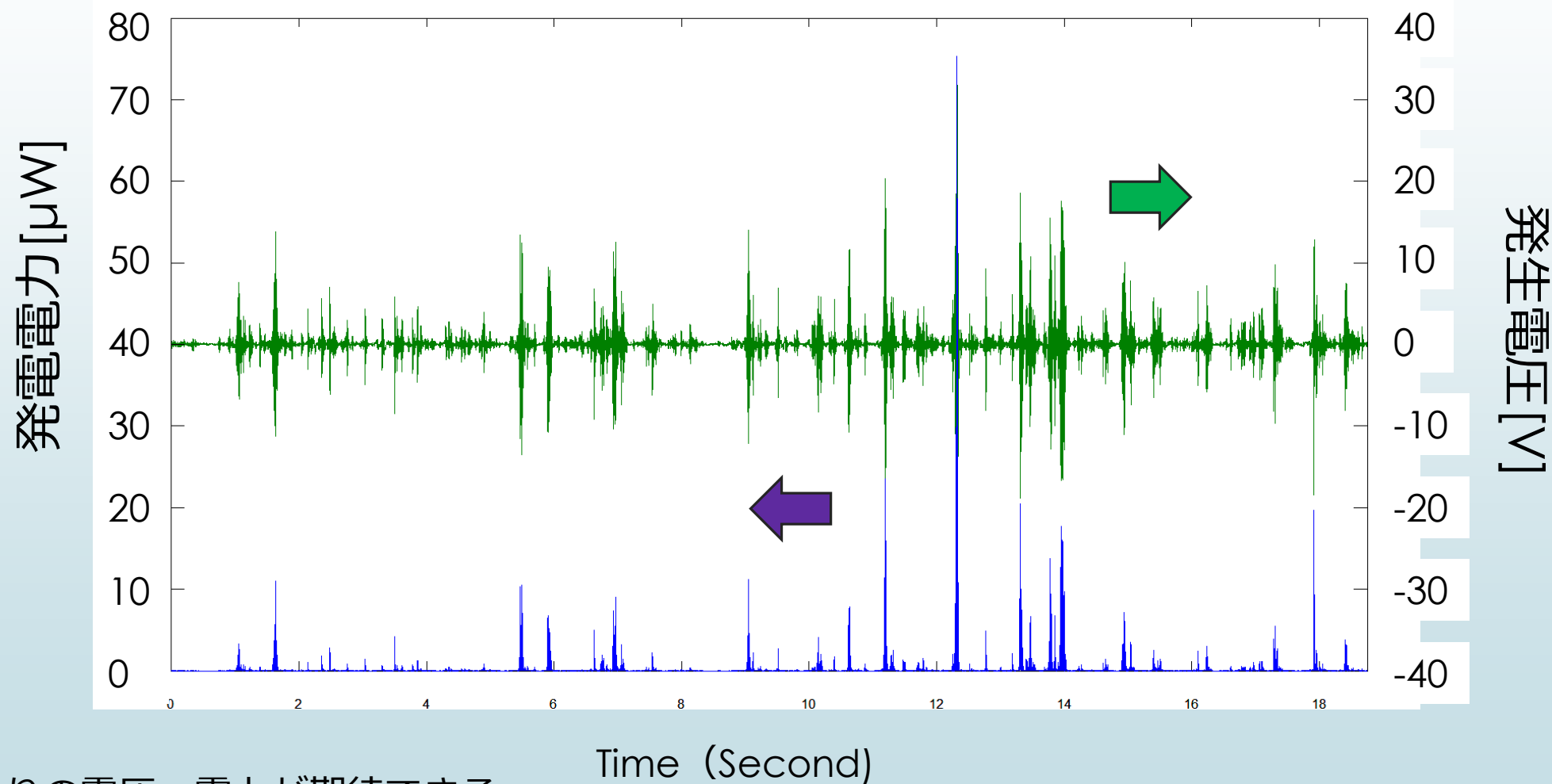
このグラフは当該温度におけるエレクトレット電圧の低下速度を反映している。

今回サンプルの加速試験結果



ダイキンさん実測データによる発電量予測

胸ポケット、x方向：発電機モデルは、現在静大で作成中の150Hz共振モデル。



それなりの電圧、電力が期待できる。

自己回帰シミュレーションによる。

目標：真空度と特性
の把握、パッケージ
素子の信頼性

今後の予定

試験用素子の作製

A-1の課題と同時に試験
用デバイスを作製する。
作製難易度の低い10 μ W
級デバイスを用いる。

真空度と電気特性の把握

真空プローバーにて、
真空度と電気特性の関
係を把握する。

今の素子で真
空度とQ値の
関係を把握し、
次へ進む。

7月末

パッケージ評価

真空プローバーによる
データを基に、まずは
外注による真空パッ
ケージを予定。リーク
チェックと電気特性の
測定を時間をかけて実
施。

8月末

長期信頼性評価

高温加速試験による振
動発電素子の寿命試験
を実施する。アレニウ
スの原理を仮定し、室
温状態での寿命を推定
する。

H28.1くらいより

特性がよくない場合、
再設計、再試作