

1 GeV リニアック検討資料

1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) RFQ用チューナ

著者(AUTHOR) 上野

概要(ABSTRACT)

RFQのチューナとして、現物合わせの削り込みで共振周波数を設計値に一致させ、電磁場分布を一様にする固定チューナを考えている。この固定チューナの共振周波数調整範囲の評価結果を述べる。

また、現在、固定チューナの変形を利用してパワー入力時の過渡状態に共振周波数を設計値に一致させるための新しい方式考えている。この方式の実現可能性探るための第一歩として、必要な変形量の評価も行なったので合わせて記す。

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

1. チューナによる共振周波数調整範囲の概算

JHP用RFQの実機では、直径5cmの固定式スタブ・チューナをビーム軸方向の等間隔の4箇所、各1/4空胴に1つずつ配置することを考えている。従って、チューナの総数は、 $4 \times 4 = 16$ 個である。これらのチューナの第一の目的はRFQの共振周波数を設計値(432MHz)に一致させることであり、第二の目的は工作誤差やヴェインにモジュレーションを施すことにより生ずる4つの1/4空胴間の共振周波数の違いやビーム軸方向での共振周波数の変化とそのため生ずる電磁場分布の非一様性を補正することにある。

ここでは、設置を考えているチューナで第一の目的を果たすことが可能かどうかを判断するために、共振周波数の調整範囲を概算してみることにする。

SuperFishを使って、図1-a,bに示す2つの形状の共振周波数の計算を行なった。図1-aは基準のRFQ(コールド・モデルの形状)であり、図1-bは基準のRFQの全長に渡って厚さ4.43113cm($4.43113^2 = \pi \cdot 2.5^2 = 19.63495$;直径5cmのスタブ・チューナを断面積が等しい1辺4.43113cmの四角柱のチューナで近似することを考えている)の板状のチューナを5mm程度挿入した場合の形状である。これら2つの形状の共振周波数の差からスタブ・チューナの効果概算する。先ず、SuperFishの計算結果を示しておく。

(1) 基準のRFQの計算結果

$$f_{\text{STD}} = 432.244 \text{ MHz}$$

(2) 板状チューナ付きRFQの計算結果

$$f_{\text{PTu}} = 454.574 \text{ MHz}$$

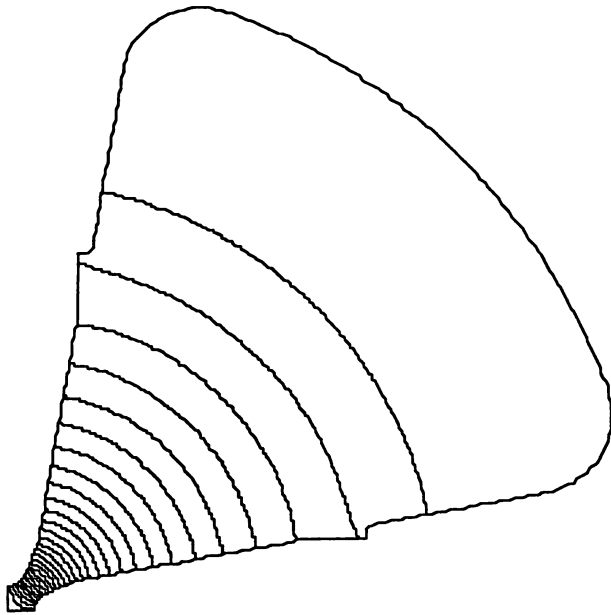
RFQの各1/4空胴には、4個のスタブ・チューナがあるので、それらを連続的に並べたときの長さは、 $4.43113 \times 4 = 17.72452$ cmである。従って、スタブ・チューナの板状チューナと同程度挿入したときの共振周波数の第0近似の値は次のようになる。

$$\begin{aligned} f_{\text{STu0}} &= 432.244 + (454.574 - 432.244) / 270 \cdot 17.72452 \\ &= 432.244 + 1.46588 \\ &= 433.710 \text{ MHz} \end{aligned}$$

この時の板状チューナのRFQ空胴断面内の面積、即ち、RFQの断面積の減少量は次の値である。

$$\begin{aligned} S_{\text{PTu}} &= [\sqrt{\{(7.12668 - 6.77313)^2 + (3.99340 - 3.63985)^2\}}] \\ &\quad \times [\sqrt{\{(6.77313 - 3.63985)^2 + (3.63985 - 6.77313)^2\}}] \\ &\quad + \pi \{ \sqrt{(7.12668^2 + 3.99340^2)} \}^2 \times \{ \pi / 2 - 2 \operatorname{atan}(3.99340 / 7.12668) \} / (2 \pi) \\ &\quad - [\sqrt{\{(6.77313 - 3.63985)^2 + (3.63985 - 6.77313)^2\}}] \\ &\quad \times [\sqrt{\{(6.77313^2 + 3.63985^2) + \{(6.77313 - 3.63985)^2 + (3.63985 - 6.77313)^2\} / 4\}}] / 2 \\ &= 0.50000 \times 4.43113 + \pi \cdot 8.16926^2 \times (\pi / 2 - 2 \times 0.51075) / (2 \pi) - 4.43113 \times 8.0020 / 2 \\ &= 2.21557 + 18.32914 - 17.72902 \\ &= 2.81569 \end{aligned}$$

*基準のRFQの形状とSuperFishの計算結果



```

1SF RFQ FOR JHP COLD MODEL
$reg nreg=1,dx=0.0190,xmax=10.00,npoint=20,
ymax=10.00,xmin=0.0,ymin=0.0,xreg1=0.9000,
yreg1=0.9000,xreg2=1.50,yreg2=1.50$
SPO X=0.00, Y=0.00 $
SPO X=0.34, Y=0.00 $
SPO NT=2, X0=0.59500, Y0=0.00000, R=0.25500, THETA=112.21400 $
SPO X=0.90, Y=0.40 $
SPO X=3.75, Y=0.90 $
SPO X=4.60, Y=0.90 $
SPO X=4.60, Y=1.05 $
SPO X=4.65, Y=1.10 $
SPO X=6.90, Y=1.50 $
SPO NT=2, X0=6.72497, Y0=2.48456, R=1.00000, THETA=20.27693 $
SPO X=1.10, Y=4.65 $
SPO X=1.05, Y=4.60 $
SPO X=0.90, Y=4.60 $
SPO X=0.90, Y=3.75 $
SPO X=0.40, Y=0.90 $
SPO X=0.23607, Y=0.49859 $
SPO NT=2, X0=0.00000, Y0=0.59500, R=0.25500, THETA=270.0000 $
SPO X=0.0, Y=0.0 $
    
```

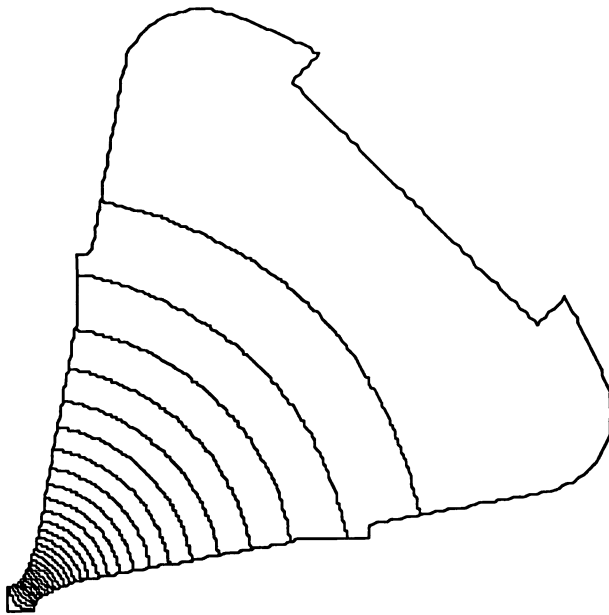
*THETA=159.72307は、169.7の間違いだった。
チューナの効果をみる場合には問題ない。

```

SUPERFISH DTL OUTPUT SUMMARY 13:29:53 18-DEC-9
PROBLEM NAME =SF RFQ FOR JHP COLD MODEL
FREQUENCY (STARTING VALUE = 432.000) = 432.244 MHZ
NORMALIZATION FACTOR (E0=1 MV/M) ASCALE = 2181.2
STORED ENERGY (MESH PROBLEM ONLY) = 6.8096338E-06 JOULES/CM
POWER DISSIPATION (MESH PROBLEM ONLY) = 1.8466649E+00 WATTS/CM
T,TP,TPP,S,SP,SPP = 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q = 10014 SHUNT IMPEDANCE = 1.8411570E+03 MOHM/M
MAGNETIC FIELD ON OUTER WALL = 578 AMP/M
MAXIMUM ELECTRIC FIELD ON BOUNDARY = 2.4616709E+00 MV/M
    
```

ISEG	XBEG (CM)	YBEG (CM)	XEND (CM)	YEND (MV)	EMAX (W/CM)	POWER (DELX)	D-FREQ (DELY)	D-FREQ	D-FREQ
2	3.4000E-01	0.0000E+00	4.9860E-01	2.3610E-01	2.4617E+00	7.4052E-04	WALL	1.7310E+01	1.1952E+01
3	4.9860E-01	2.3610E-01	9.0000E-01	4.0000E-01	1.8957E+00	6.9300E-03	WALL	4.0224E+00	9.8515E+00
4	9.0000E-01	4.0000E-01	1.5000E+00	5.0530E-01	1.0190E+00	2.0732E-02	WALL	6.1117E-01	3.4836E+00
5	1.5000E+00	5.0530E-01	3.7500E+00	9.0000E-01	4.2599E-01	1.3869E-01	WALL	1.7426E-01	9.9715E-01
6	3.7500E+00	9.0000E-01	4.6000E+00	9.0000E-01	1.3232E-01	6.5851E-02	WALL	0.0000E+00	-3.8973E-01
7	4.6000E+00	9.0000E-01	4.6000E+00	1.0500E+00	7.9569E-02	1.1930E-02	WALL	-8.3613E-02	0.0000E+00
8	4.6000E+00	1.0500E+00	4.6500E+00	1.1000E+00	1.3084E-01	5.6651E-03	WALL	-1.9028E-02	-1.9028E-02
9	4.6500E+00	1.1000E+00	6.9000E+00	1.5000E+00	1.2262E-01	1.9673E-01	WALL	-2.3515E-01	-1.3229E+00
10	6.9000E+00	1.5000E+00	7.6630E+00	2.8311E+00	1.5689E-02	1.5729E-01	WALL	-8.8672E-01	-5.8858E-01
11	7.6630E+00	2.8311E+00	2.8311E+00	7.6630E+00	1.9674E-03	6.3729E-01	WALL	-3.2343E+00	-3.2342E+00
12	2.8311E+00	7.6630E+00	1.5465E+00	7.0715E+00	1.1863E-02	1.4137E-01	WALL	-4.7542E-01	-8.5606E-01
13	1.5465E+00	7.0715E+00	1.5000E+00	6.8192E+00	1.9527E-02	2.2938E-02	WALL	-1.6603E-01	-3.0601E-02
14	1.5000E+00	6.8192E+00	1.1000E+00	4.6500E+00	1.2063E-01	1.9009E-01	WALL	-1.2697E+00	-2.5032E-01
15	1.1000E+00	4.6500E+00	1.0500E+00	4.6000E+00	1.2593E-01	5.6638E-03	WALL	-1.8682E-02	-1.8682E-02
16	1.0500E+00	4.6000E+00	9.0000E-01	4.6000E+00	7.4759E-02	1.1927E-02	WALL	0.0000E+00	-8.3943E-02
17	9.0000E-01	4.6000E+00	9.0000E-01	3.7500E+00	1.3310E-01	6.5837E-02	WALL	-3.8973E-01	0.0000E+00
18	9.0000E-01	3.7500E+00	5.0530E-01	1.5000E+00	4.3144E-01	1.3859E-01	WALL	9.9725E-01	1.7465E-01
19	5.0530E-01	1.5000E+00	4.0000E-01	9.0000E-01	1.0101E+00	2.0732E-02	WALL	3.4747E+00	6.0960E-01
20	4.0000E-01	9.0000E-01	2.3610E-01	4.9860E-01	1.8969E+00	6.9303E-03	WALL	9.8612E+00	4.0267E+00
21	2.3610E-01	4.9860E-01	0.0000E+00	3.4000E-01	2.4500E+00	7.4051E-04	WALL	1.1951E+01	1.7311E+01

*板状チューナを挿入したRFQの形状とSuperFishの計算結果



```

1SF RFQ FOR JHP COLD MODEL
$reg nreg=1,dx=0.0190,xmax=10.00,npoint=24,
ymax=10.00,xmin=0.0,ymin=0.0,xreg1=0.9000,
yreg1=0.9000,xreg2=1.50,yreg2=1.50$
$PO X=0.00, Y=0.00 $
$PO X=0.34, Y=0.00 $
$PO NT=2, X0=0.59500, Y0=0.00000, R=0.25500, THETA=112.21400 $
$PO X=0.90, Y=0.40 $
$PO X=3.75, Y=0.90 $
$PO X=4.60, Y=0.90 $
$PO X=4.60, Y=1.05 $
$PO X=4.65, Y=1.10 $
$PO X=6.90, Y=1.50 $
$PO NT=2, X0=6.72497, Y0=2.48456, R=1.00000, THETA=20.27693 $
$po nt=2, x0=0.00000, y0=0.00000, x=7.12668, y=3.99340 $
$PO X=6.77313, Y=3.63985 $
$PO X=3.63985, Y=6.77313 $
$PO X=3.99340, Y=7.12668 $
$po nt=2, x0=0.00000, y0=0.00000, x=2.83112, y=7.66300 $
$PO NT=2, X0=2.48456, Y0=6.72497, R=1.00000, THETA=159.72307 $
$PO X=1.10, Y=4.65 $
$PO X=1.05, Y=4.60 $
$PO X=0.90, Y=4.60 $
$PO X=0.90, Y=3.75 $
$PO X=0.40, Y=0.90 $
$PO X=0.23607, Y=0.49859 $
$PO NT=2, X0=0.00000, Y0=0.59500, R=0.25500, THETA=270.0000 $
$PO X=0.0, Y=0.0 $
    
```

*THETA=159.72307は、169.7の間違いだった。

```

SUPERFISH DTL OUTPUT SUMMARY    13:08:01 18-DEC-9
PROBLEM NAME =SF RFQ FOR JHP COLD MODEL
FREQUENCY (STARTING VALUE = 432.000)    = 454.574 MHZ
NORMALIZATION FACTOR (E0=1 MV/M)    ASCALE = 2280.4
STORED ENERGY (MESH PROBLEM ONLY)    = 6.7382139E-06 JOULES/CM
POWER DISSIPATION (MESH PROBLEM ONLY)  = 2.1652884E+00 WATTS/CM
T,TP,TPP,S,SP,SPP = 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q = 8888    SHUNT IMPEDANCE = 1.5702296E+03 MOHM/M
MAGNETIC FIELD ON OUTER WALL    = 605 AMP/M
MAXIMUM ELECTRIC FIELD ON BOUNDARY    = 2.4616182E+00 MV/M
    
```

ISEG	XBEG (CM)	YBEG (CM)	XEND (CM)	YEND (CM)	EMAX (MV)	POWER (W/CM)	D-FREQ (DELX)	D-FREQ (DELY)	D-FREQ	D-FREQ
2	3.4000E-01	0.0000E+00	4.9860E-01	2.3610E-01	2.4616E+00	8.3988E-04	WALL	1.8397E+01	1.2701E+01	
3	4.9860E-01	2.3610E-01	9.0000E-01	4.0000E-01	1.8956E+00	7.8591E-03	WALL	4.2715E+00	1.0462E+01	
4	9.0000E-01	4.0000E-01	1.5000E+00	5.0530E-01	1.0186E+00	2.3506E-02	WALL	6.4550E-01	3.6793E+00	
5	1.5000E+00	5.0530E-01	3.7500E+00	9.0000E-01	4.2518E-01	1.5697E-01	WALL	1.6153E-01	9.2461E-01	
6	3.7500E+00	9.0000E-01	4.6000E+00	9.0000E-01	1.2982E-01	7.4339E-02	WALL	0.0000E+00	-4.7087E-01	
7	4.6000E+00	9.0000E-01	4.6000E+00	1.0500E+00	7.6949E-02	1.3460E-02	WALL	-9.8599E-02	0.0000E+00	
8	4.6000E+00	1.0500E+00	4.6500E+00	1.1000E+00	1.2658E-01	6.3903E-03	WALL	-2.4098E-02	-2.4098E-02	
9	4.6500E+00	1.1000E+00	6.9000E+00	1.5000E+00	1.1863E-01	2.2139E-01	WALL	-2.7778E-01	-1.5627E+00	
10	6.9000E+00	1.5000E+00	7.6630E+00	2.8311E+00	1.4899E-02	1.7663E-01	WALL	-1.0322E+00	-6.8550E-01	
11	7.6630E+00	2.8311E+00	7.1267E+00	3.9934E+00	1.6718E-03	1.2972E-01	WALL	-9.0296E-01	-4.1662E-01	
12	7.1267E+00	3.9934E+00	6.7731E+00	3.6398E+00	2.5551E-02	5.0551E-02	WALL	-2.7355E-01	-2.7355E-01	
13	6.7731E+00	3.6398E+00	3.6398E+00	6.7731E+00	2.8725E-02	4.4175E-01	WALL	-2.3919E+00	-2.3919E+00	
14	3.6398E+00	6.7731E+00	3.9934E+00	7.1267E+00	2.5054E-02	5.0545E-02	WALL	-2.7353E-01	-2.7353E-01	
15	3.9934E+00	7.1267E+00	2.8311E+00	7.6630E+00	1.7777E-03	1.2970E-01	WALL	-4.1657E-01	-9.0286E-01	
16	2.8311E+00	7.6630E+00	1.5465E+00	7.0715E+00	1.1179E-02	1.5874E-01	WALL	-5.5357E-01	-9.9636E-01	
17	1.5465E+00	7.0715E+00	1.5000E+00	6.8192E+00	1.8612E-02	2.5773E-02	WALL	-1.9354E-01	-3.5671E-02	
18	1.5000E+00	6.8192E+00	1.1000E+00	4.6500E+00	1.1669E-01	2.1391E-01	WALL	-1.5006E+00	-2.9562E-01	
19	1.1000E+00	4.6500E+00	1.0500E+00	4.6000E+00	1.2182E-01	6.3886E-03	WALL	-2.3757E-02	-2.3757E-02	
20	1.0500E+00	4.6000E+00	9.0000E-01	4.6000E+00	7.2270E-02	1.3456E-02	WALL	0.0000E+00	-9.8922E-02	
21	9.0000E-01	4.6000E+00	9.0000E-01	3.7500E+00	1.3058E-01	7.4322E-02	WALL	-4.7086E-01	0.0000E+00	
22	9.0000E-01	3.7500E+00	5.0530E-01	1.5000E+00	4.3065E-01	1.5685E-01	WALL	9.2467E-01	1.6192E-01	
23	5.0530E-01	1.5000E+00	4.0000E-01	9.0000E-01	1.0096E+00	2.3506E-02	WALL	3.6698E+00	6.4383E-01	
24	4.0000E-01	9.0000E-01	2.3610E-01	4.9860E-01	1.8967E+00	7.8594E-03	WALL	1.0472E+01	4.2760E+00	
25	2.3610E-01	4.9860E-01	0.0000E+00	3.4000E-01	2.4500E+00	8.3986E-04	WALL	1.2701E+01	1.8397E+01	

$$=0.63543 \times 4.43113$$

従って、チューナが6.35mm挿入された状態と考えることができる。上述したように、この時の共振周波数の変化は1.47MHzであったので、チューナが1mm移動したときの共振周波数の変化は次式で与えられる。

$$(df/dl)_{STu0} = 1.47/6.35 \text{ MHz/mm} = 230.7 \text{ kHz/mm}$$

この数値は、同程度の共振周波数の一般的な空洞のチューナ(TRISTANのAPSでは直径7cmのスタブ・チューナで1MHz/5cm=20kHz/mm)と比較するとかなり大きな値になっている。もちろん、チューナの数(16個)が多いことが1つの原因ではあるが、もう1点空洞の容積が小さいことに起因していることにも注意しておく必要がある(キャパシタンスが非常に大きな空洞である)。

以上の計算は、RFQ空洞の容積の変化と共振周波数の変化の関係を示したものである(共振周波数の変化値の第0近似)。しかし、実際には、チューナは連続的ではなく離散的に分布(この場合、直径5cmのスタブ・チューナが270/4=67.5cmおきに分布)しているので、共振周波数の変化は空洞の容積の変化より大きくなる。このことは、次のように理解される。チューナは、その付近の磁場の流れを妨げる(または、引き込む)ことにより共振周波数を変化させるのであるが、磁場の流れはチューナ付近で急激に変化するのではなく、チューナから離れたところから滑らかに変化することになる。従って、チューナが離散的に分布している場合、チューナの実効的な容積は大きくなることになる。山崎氏の話によるとTRISTANのAPS空洞の経験では、チューナの効果は空洞の容積の変化量の1.8程度であったとのことである。この関係をそのまま適用すると、チューナが1mm移動したときの共振周波数の変化は次式のようになる。

$$(df/dl)_{STu} = 1.47/6.35 \times 1.8 \text{ MHz/mm} = 416.7 \text{ kHz/mm} (?)$$

しかし、この1.8という係数はチューナの離散の程度等に依存しているので、チューナの効果の正確な値はコールド・モデルの測定結果を待たなければならない。但し、230.7kHz/mm以上であることは確かであろう。従って、チューナの移動範囲を±5mmとすると、調整可能な共振周波数の範囲はほぼ次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta f_{STu} &= \pm(230.7 \times 5 \text{ kHz以上} 416.7 \times 5 \text{ kHz程度}) \\ &= \pm(1.15 \text{ MHz以上} 2.08 \text{ MHz程度}) \end{aligned}$$

RFQの実機として共振周波数 $432 \pm \Delta f_{STu}$ のものが作れば、パワーを入れない状態では、チューナを使って共振周波数が合わせられることになる。RFQの共振周波数の誤差やチューナの調整範囲 Δf_{STu} が実際にどの程度になるのかは、コールド・モデルの測定でかなり良い精度で定量的に評価される予定である。

2. 熱変形による共振周波数の変化

パワーを入力した場合の熱変形は、吉野氏に計算してもらっている。ここでは、空胴の温度が変化した場合の共振周波数の変化を概算してみる。

まず、次の5通りの形状の共振周波数をSuperFishで計算した(R、x、yについては図を参照)。

- (1) STD: (R, x=y)=(7.94173, 0.34)
*PISLによる共振周波数の変化($\Delta f_{\text{PISL}} = -16.712\text{MHz}$: by MAFIA)を補正する形状
f = 448.903MHz (=432+16.903MHz) (Q=9952)
- (2) R-: (R, x=y)=(7.77776, 0.34)
f = 461.956MHz (Q=9845)
- (3) R+: (R, x=y)=(8.16396, 0.34)
f = 432.643MHz (Q=10102)
- (4) x(y)-: (R, x=y)=(7.94173, 0.33)
f = 443.849MHz (Q=9884)
- (5) x(y)+: (R, x=y)=(7.94173, 0.35)
f = 453.488MHz (Q=10011)

これらの計算結果から、Rの変化に対する共振周波数の変化量df/dRとxの変化に対する共振周波数の変化量df/dx(y)が次のように計算された。

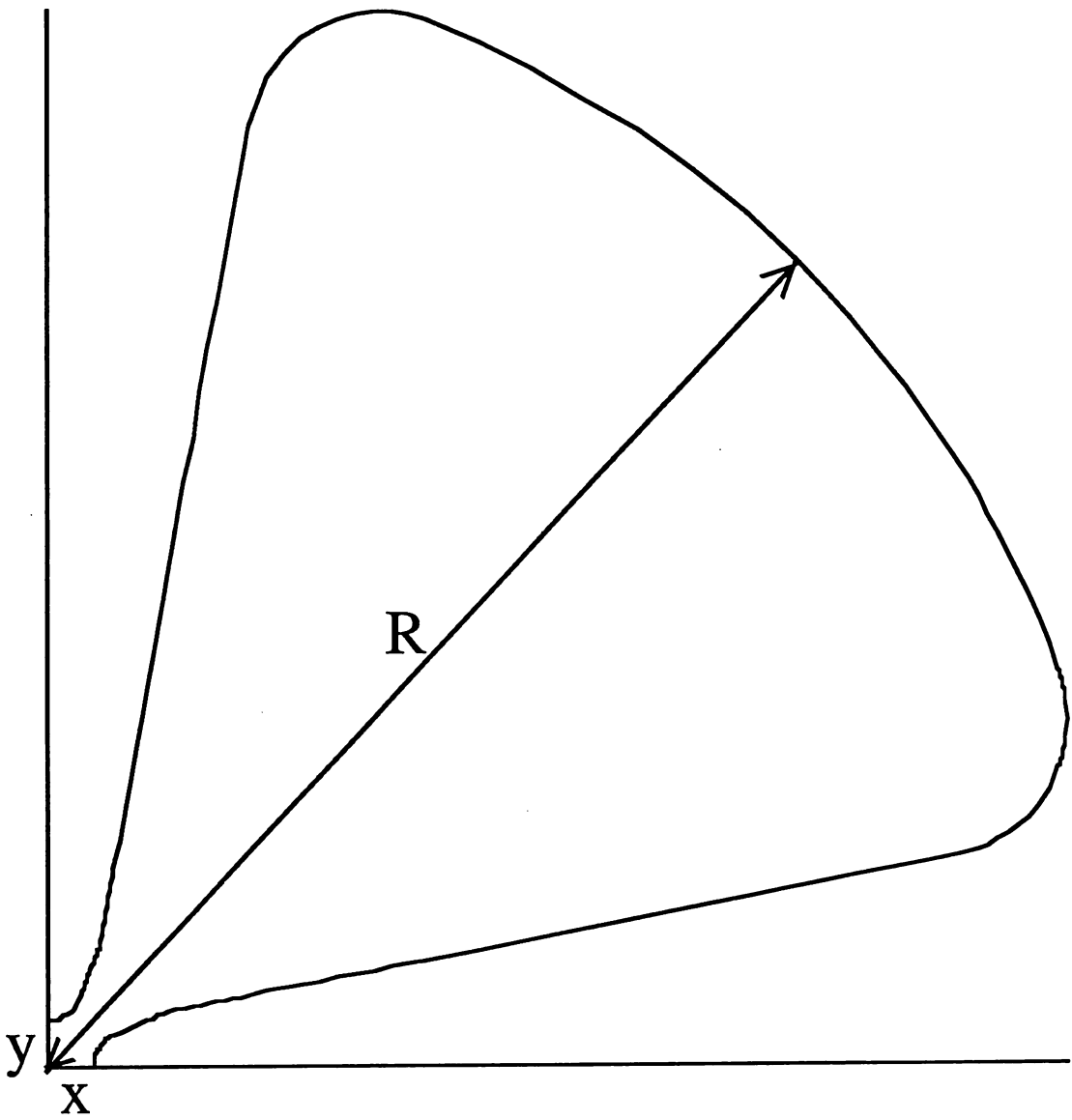
$$\begin{aligned} df/dR &= -75.745\text{MHz/cm} &= -7.5745\text{kHz}/\mu\text{m} \\ df/dx(y) &= +481.95\text{MHz/cm} &= +48.195\text{kHz}/\mu\text{m} \end{aligned}$$

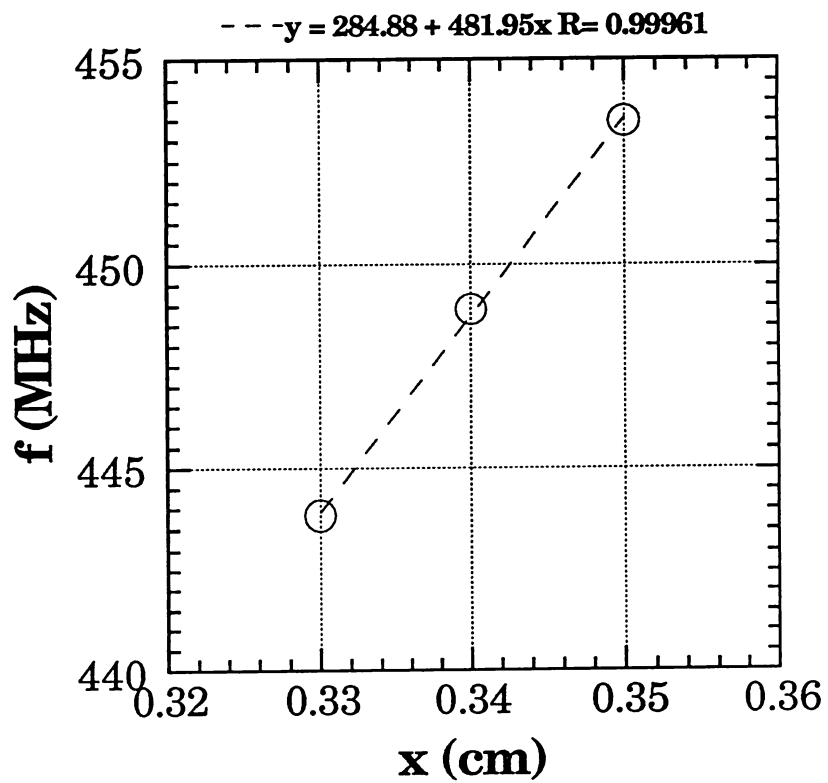
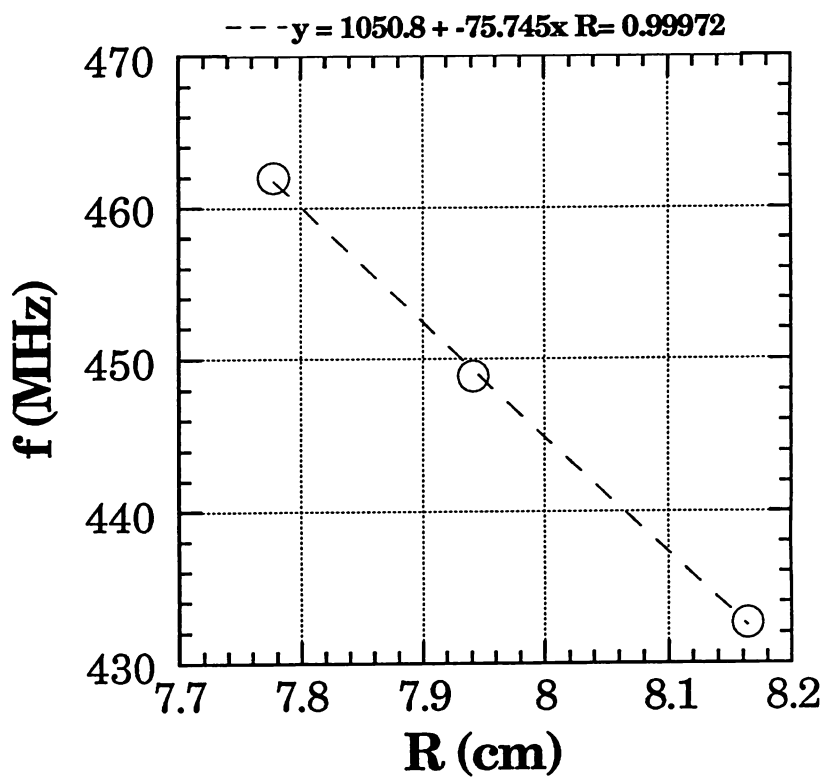
これら2つの値を使って、空胴の温度が変化したときの共振周波数の変化を概算してみる。銀入り無酸素銅(20Ag-OFC、Ag:0.2%)の線膨張係数は、 $1.7 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (20~100°C)であるので、温度の変化に対するR、x(y)の変化量dR/dT、dx(y)/dTは、各々、次の値である。

$$\begin{aligned} dR/dT &= 7.94173 \times 1.7 \times 10^{-5} \text{ cm/}^\circ\text{C} = 1.35 \mu\text{m/}^\circ\text{C} \\ dx(y)/dT &= 0.34 \times 1.7 \times 10^{-5} \text{ cm/}^\circ\text{C} = 5.78 \times 10^{-2} \mu\text{m/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

従って、温度の変化に対する共振周波数の変化量df/dTは、次のように概算される。

$$\begin{aligned} df/dT &= (df/dR)(dR/dT) + (df/dx(y))(dx(y)/dT) \\ &= -7.5745 \times 1.35 + 48.195 \times 5.78 \times 10^{-2} \\ &= -10.2 + 2.79 \\ &= -7.4\text{kHz/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$





この値とパワー・ソースのバンド幅から空洞の温度、即ち、冷却水の温度の調整精度が決定される。また、パワーを入力した場合の共振周波数の変化を50kHz程度と考えると、それを補正するための水温調整範囲は約7℃ということになる。尚、パワーを入力した場合の熱変形 ΔR_H 、 $\Delta x(y)_H(\mu m)$ に対する共振周波数の変化 $\Delta f_H(kHz)$ についても同様に次の計算式で概算できる。

$$\begin{aligned}\Delta f_H &= (df/dR) \Delta R_H + (df/dx(y)) \Delta x(y)_H \\ &= -7.5745 \Delta R_H + 48.195 \Delta x(y)_H\end{aligned}$$

3. 固定式チューナの新しい微調整方式

前節で述べた様に、熱変形による共振周波数の変化が50kHz程度で、水温の調整範囲が10℃以下ならば冷却水の温度による共振周波数の調整も可能であると考えられる。しかし、水温の調整精度を高めようとすればするほど、水温を変化させるときの時定数を長くせざるおえない。これは、RFQにパワーを入力していくときに長い時間を要することを意味する。また、RFQの入力パワーに連動させて高精度に冷却水の温度を変化させるシステムは高価なものになる。しかし、JHPのRFQの様にチューナの数が多き場合には、チューナを可動式にすると高価になり、しかも信頼性が低下すると考えられる。

そこで、共振周波数を微調整する方法として図の様に、固定式チューナの圧力やピエゾ素子等による変形で行なう方式を考えてみた。この方法では、RFコンタクタ部が固定されるので可動式チューナよりずっと信頼性が高いと期待されるが、共振周波数の調整範囲も少なくなる。この周波数調整範囲が熱変形による共振周波数の変化を補正できるかどうか、この方式が実現可能かどうかを決定することになる。

ここでは、50kHz共振周波数を変化させる時に必要な変形計算してみる。この変形が弾性変形内で可能かどうか、また、その変形が滑らかに起こせるかどうか等は、今後研究しなければならない。

拡大図の様に、先端がh mm出っ張ったとする。この時のRFQ空洞の容積の変化(減少)は、球面の極率をR mmとして、次の様に計算される。

$$R^2 = (R-h)^2 + 25^2 \text{ (チューナの半径の二乗)}$$

$$R = (h^2 + 25^2) / (2h)$$

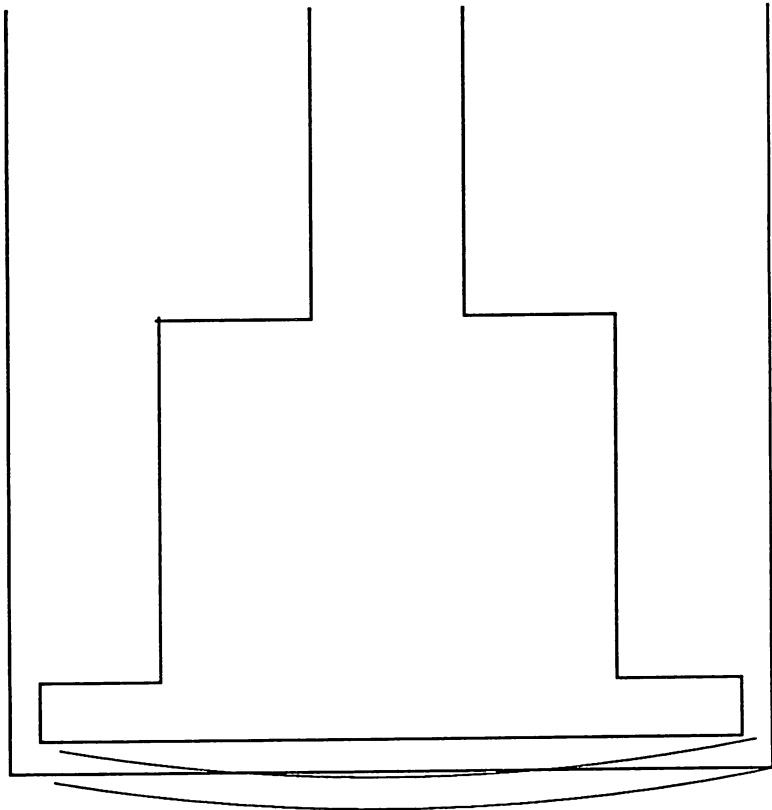
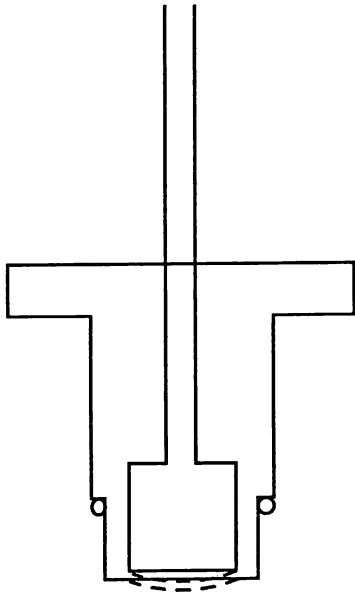
$$\Delta V = (2/3) \pi R^2 h - (1/3) \pi (R^2 - (R-h)^2)(R-h)$$

従って、h=0.5、1、2 mmの各場合の具体的な値は、次のようになる。

$$\Delta V(h=0.5) = 0.491 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V(h=1.0) = 0.982 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V(h=2.0) = 1.968 \text{ cm}^3$$



チューナの移動1mm当たりのRFQ空胴の容積の変化は、 $\pi 2.5^2 \times 0.1 = 1.963 \text{ cm}^3$ に対応し、この時の周波数変化が230.7kHz(以上)と予想されるので、それぞれの場合の共振周波数の変化は次のようになる。

$$\Delta f(h=0.5) = 0.491 / 1.963 \times 230.7 = 57.7 \text{ kHz}$$

$$\Delta f(h=1.0) = 0.982 / 1.963 \times 230.7 = 115.4 \text{ kHz}$$

$$\Delta f(h=2.0) = 1.968 / 1.963 \times 230.7 = 231.3 \text{ kHz}$$

熱計算の結果にもよるが、チューナの先端を0.5mm程度変形させることができれば、熱変形を補正できる可能性が高い。安全を見て、最大1mm変形させるめどがつけば、実機にも採用できると考えられる。

4. まとめ

今後のコールド・モデルの測定や熱計算の結果にもよるが、現時点では、チューナの数や周波数調整範囲も適当である様に思われる。固定式チューナの変形で、共振周波数を微調整する方式も有望そうである。RFQの特徴(空胴の容積が小さい)を利用するユニークな方法なので実現させてみたい。

V: 真空ポット

$Z=16$
V

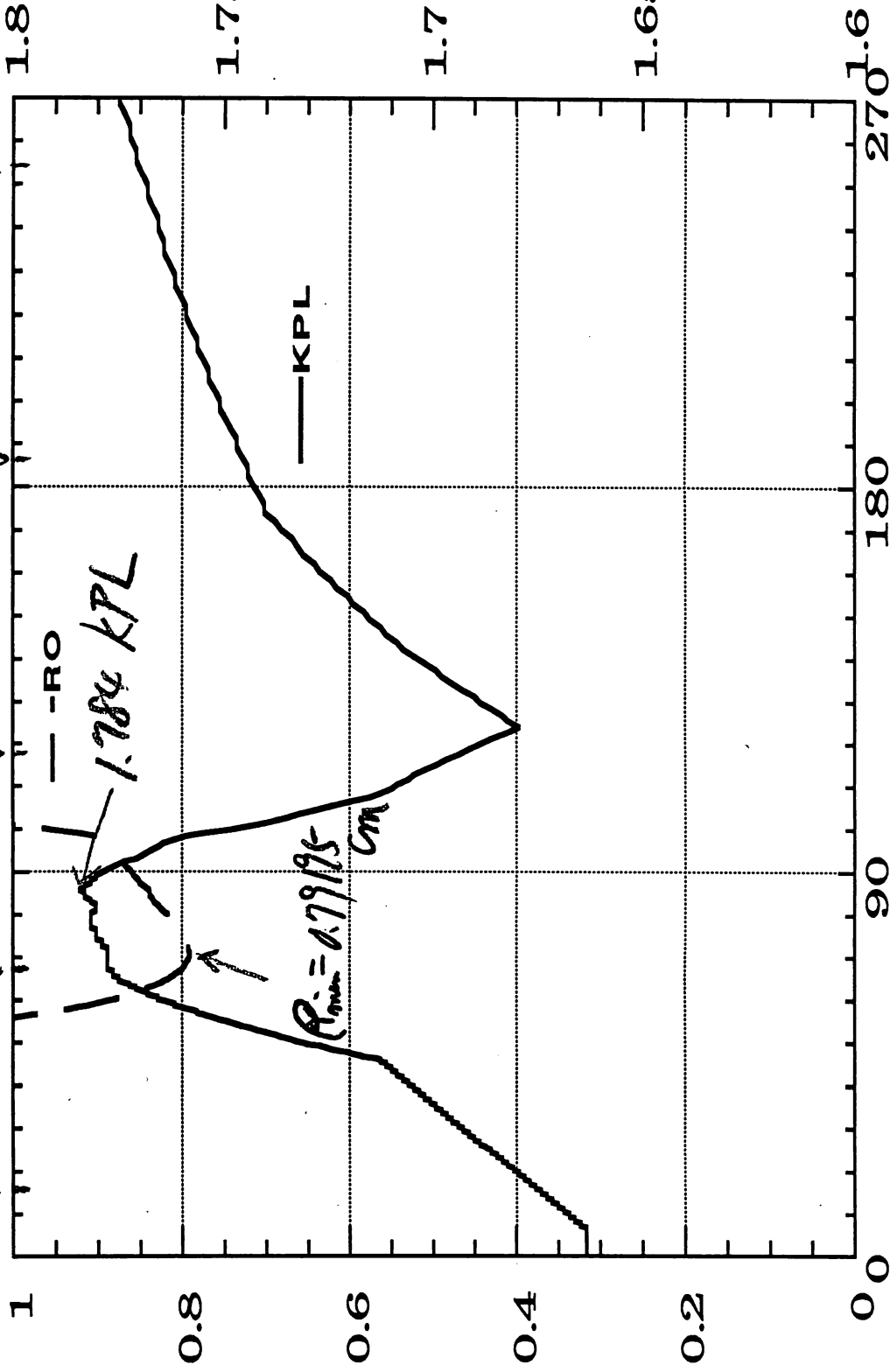
$Z=67$
V

$Z=118$
V

$Z=186$
V

$Z=214$
V

Minimum Curvature of Longitudinal Curve (cm)



Maximum Surface Field (Kilpatrick)

1.75

1.7

1.65

270

Longitudinal Position (cm)