RFQ の高効率 VANE 形状

HIGH EFFICIENCY RFQ VANE SHAPE

岩下芳久、不破康裕
Y. Iwashita, Y. Fuwa
Kyoto University

Abstract

The vane shapes of RFQ have been designed based on a shape prescribed with so-called two-term potential and realized through simplifications by modifying cross-sections constant and/or approximations for smooth connection between the cells. Among the simplifications, simple trapezoidal modulations instead of elaborate wave modulations in the longitudinal direction has become reconsidered for its better acceleration efficiencies. However, the mixture of the higher order harmonics components to the electric field would increase nonlinearity on the beam optics. The less nonlinear vane shapes with higher acceleration efficiencies that include the trapezoidal shape can be generated by adding only the less nonlinear terms to the two-term potential.

1. はじめに

従来、RFQ の VANE 形状はいわゆる 2 項ポテンシャルで規定される形状をベースとしていて、一定断面形状による簡略化やセル間の接続を滑らかにするための近似を行って決定されてきている。形状の簡略化のために長手方向の変化を台形にする手法も古くからあるが、加速効率が大きいため最近見直されてきている。しかし、この形状では生成電場に多極成分の混入が大きくなり、ビーム光学的に非線形性が大きくなることが懸念される。また、一般に設計段階では、パラメタ数が少なく取り扱いが容易である 2 項ポテンシャルのみを用いてセルパラメタを決定しているため、設計段階から台形形状を組み込む事は難しい。

そこで、2 項ポテンシャルに非線形性の少ない項のみをいくつか加えて、台形形状に近い特性を持たせることを考える。この際に、高次項の係数に制限を設けて、2 項ポテンシャルと同様のパラメタ数でセルを特長づけることが出来れば従来の設計手法と大きく違わない方法で高効率 RFQ の設計が可能になるはずである。

2. 2 項ポテンシャル

2 項ポテンシャルは Figure 1 のような形状のもと、加速と、集束成分の最低次の項のみで記述される[1]。

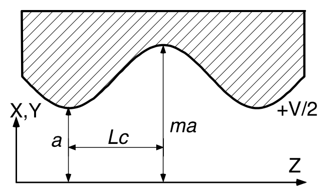

Figure 1: Definitions of vane parameter.

$$U_2(r,\psi,z)=\frac{V}{2}\{X\left(\frac{r}{a}\right)^2\cos 2\psi+AI_0(kr)\cos(kz)\},$$

where $A=\dfrac{m^2-1}{m^2I_0(ka)+I_0(mka)}, X=1-AI_0(ka), k=\pi/Lc$

ここで、a は最小となる z = 0 での半径である。ベーンの形状はポテンシャル U_2 の等電位面として定義できる。２項ポテンシャルよる典型的ベーン形状を Figure 2 に示す。これからわかるように、Lc/a が短い領域では m が大きくなるとベーン形状は簡単ではなくなる。また、ビーム軸から離れるにつれ隣のベーンとの距離が漸近的に近づき、また運転時に放電の懸念が生じる事もあり、実装時にはベーンの横方向の裾野は、途中で打ち切ってベーン間距離が不用意に近づかないようにする必要がある。なお、パラメタは各セル毎に定義されているが、それらは

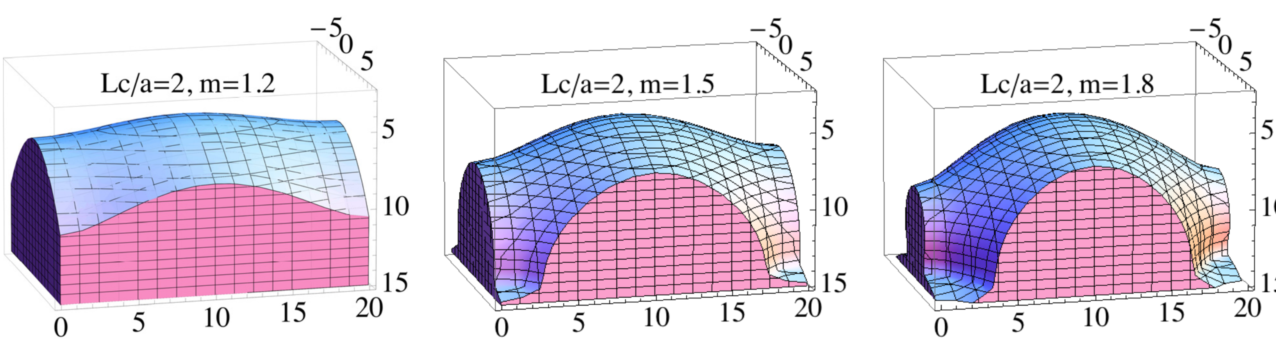

Figure 2: Typical vane profiles based on the two term potentials.

各セルで変化するため、ベーンの接続部では連続には繋がらない。
2 項ポテンシャル U_2 の表式から判るように、加速係数 A と集束係数 X は、m と Lc/a のみの関数となる。これらの等高線図を Figure 3 に示す。これらはセル長が短い領域では m に関して単調な変化をしない。このため、m は通常 2 ないし、3 程度までに制限しているケースが多い。。

2. 6 項ポテンシャル

前述の 2 項ポテンシャルに次式のように、新たに四つの項を付け加えてみる。

$$U_6(r,\psi,z) =$$
$$\frac{V}{2}\left\{\cos 2\psi\left(X_0\left(\frac{r}{a}\right)^2 + X_1 I_2(kr)\cos(kz) + X_2 I_2(2kr)\cos(2kz)\right)\right.$$
$$\left.+A\left(\alpha_1 I_0(kr)\cos(kz)+\alpha_2 I_0(3kr)\cos(3kz)+\alpha_3 I_0(5kr)\cos(5kz)\right)\right\}$$

where

X_0: Constant Q term for conventional RFQ A01,
X_1: Inter Cell Continuity (new),
X_2: IH DTL type Q (finger) & Trapezoidal Shape A21,
$A\alpha_1$: Original Accelerating Term A10,
$A\alpha_2$: Trapezoidal Shape A30,
$A\alpha_3$: Trapezoidal Shape A50 (new) and $\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3=1$.

いわゆる 8 項ポテンシャルから明示的な高次多極成分を省き、新たに A50、及び A22 に相当する項を付け加えたものになっている[2]。A30、A50 が台形形状の加速に関する部分をよく反映する項で、A22 は隣のセルとの連続性を回復させる働きがある。これらは、Bessel 関数由来の多極成分以外には、明示的な多極成分を含まない。
X_n 及び α_n を以下のように決めてやることにより 6 項ポテンシャル U_6 は 2 項ポテンシャル U_2 と同様、m, Lc/a と座標のみの関数になる。ベーン曲面は 6 項ポテンシャル U_6 の等ポテンシャル面で表現されるが、これには 6 つの係数を決めてやる必要がある。まず値としては両端でのベーン曲面の稜線の半径座標を指定することにより 2 つ条件を決めることが出来、また、中央付近の座標を決めることによりもう一つ条件を決めることが出来る（Figure 4 参照）。さらに、台形形状を模擬するために、ベーン曲面の稜線のセル両端での z 方向の曲率（2 次微分係数）をゼロにするように X_n 及び α_n を設定することが出来る。これで 5 つの条件が決まる。さらに高次の項を入れる事も出来、その際にはさらに高次の微係数をゼロにするようにして係数を求めることが出来る。m がセルの前後で異なる場合、セル間にベーン曲面の不連続性が生じるが、残り 1 つのパラメタはこの不連続性を解消するために用いることが出来る。このようにして設定した加速係数 A と集束係数 X は、2 項ポテンシャルと同様、m と Lc/a のみの関数

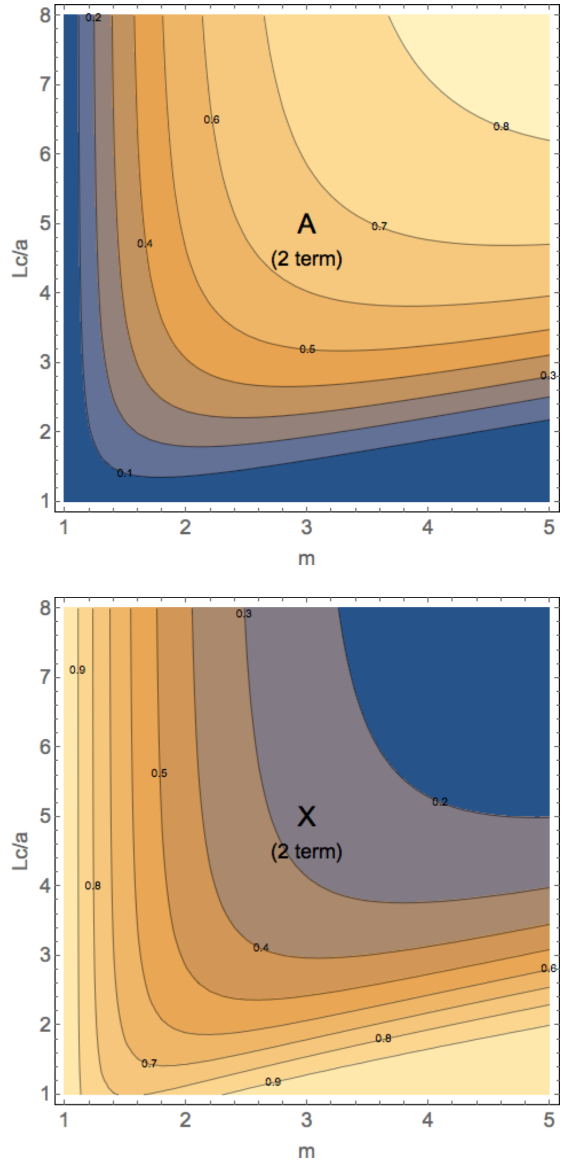

Figure 3: Acceleration term A and focusing term X.

$$y(0) = y(0.6Lc) = y(Lc) = V/2, \quad y''(0) = 0, \quad y''(Lc) = 0$$

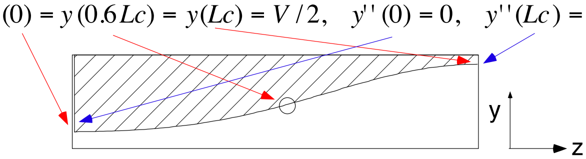

Figure 4: Conditions for vane parameters.

となる。セル半ばの拘束点の座標を 0.6Lc とした場合の等高線図を Figure 5 に示す。セル長の短い領域で大きな m の値を指定することは、2 項ポテンシャルに於いても有効ではなかったが、6 項ポテンシャルでは高次の成分により、等ポテンシャル面が外縁部では大きく暴れるため、このような領域は避ける必要がある。使用可能な有効領域はおよそ $m < 0.65Lc/a + 0.5$ 程度であろう。この領域内では加速係数 A 及び集束系数 X は m に関して単調に変化

する。Transit time factor を考慮に入れた実効加速係数 AT に換算して、2 項ポテンシャルと 6 項ポテンシャルの比を較べると、おおよそ 2～3 割大きな値を持つことが判る（Figure 6 参照）。

6 項ポテンシャルの表現する具体的なベーン形状の例を Figure 7 に示す。高次成分を含むため、外縁部でビーム軸から離れるに従って、大きなうねりを持つようになる。ここでは A50 の影響で谷が五つ出来ている。また、大きな m では稜線が切れることがある。稜線が切れる部分は軸からの距離が離れているため、充分離れたところで滑らかに繋げばあまり大きな影響が無いように出来よう。

2 項ポテンシャルの場合でも、実際にはベーン形状は外縁部では打ち切りが必要であるので、適当な所で打ち切ることにより、複雑な工作を回避できるはずである。

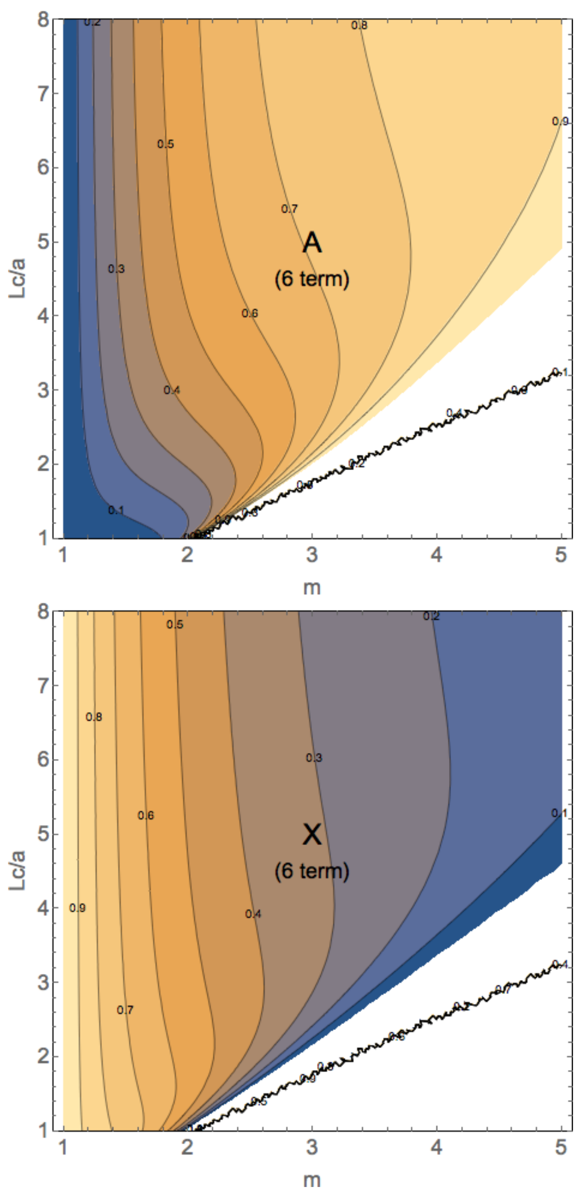

Figure 5: Acceleration term A and focusing term X.

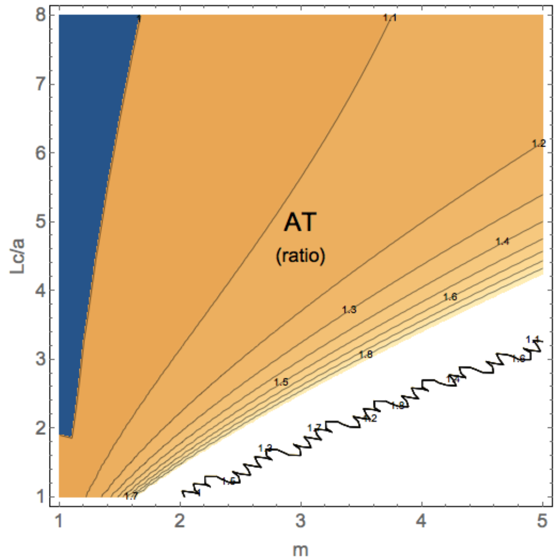

Figure 6: The ratio of the effective acceleration term AT.

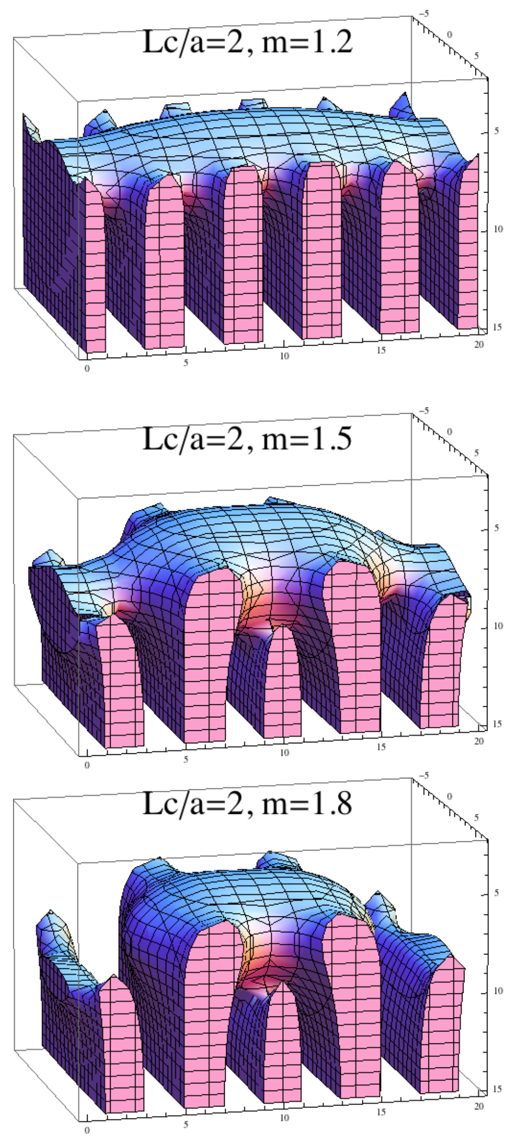

Figure 7: Typical vane profiles based on the six term potentials.

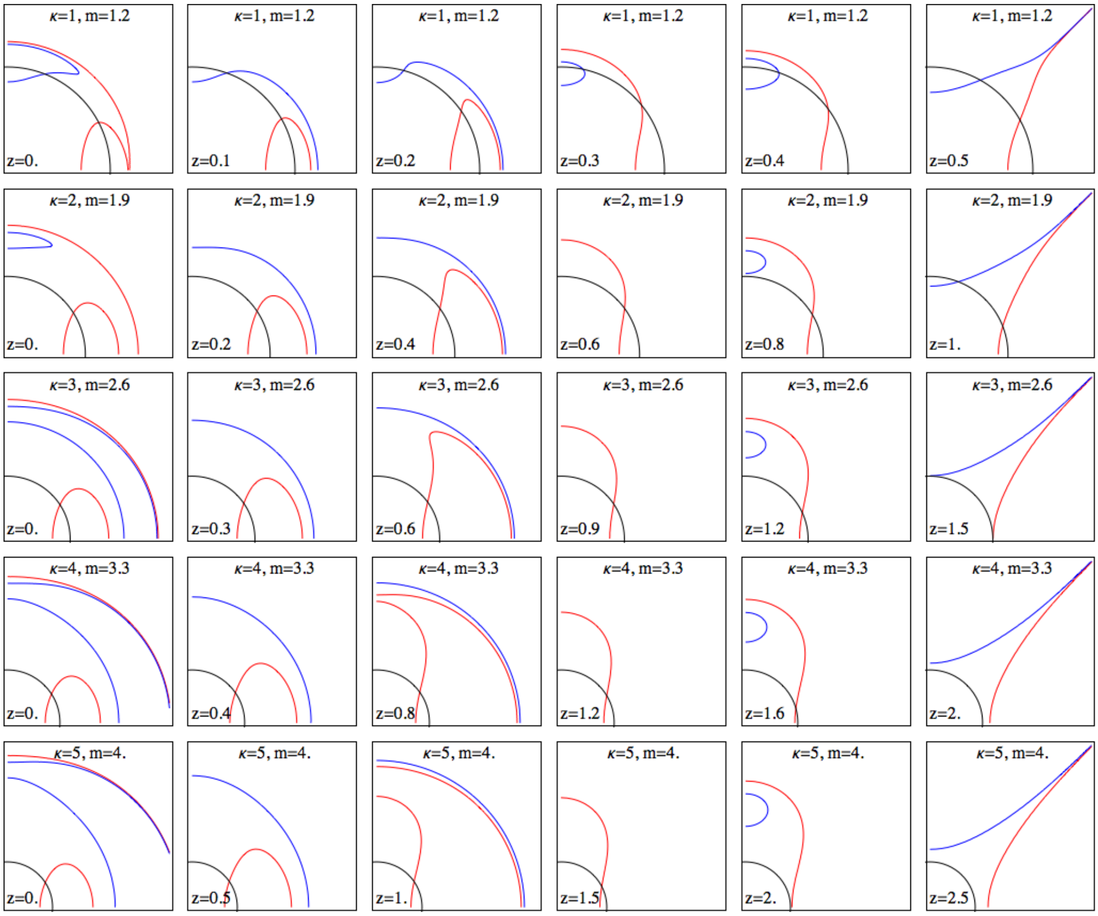

Figure 8: Vane cross sections along z axis for typical parameters $Lc/a(=\kappa)$ and m.

そこで、いくつかの $Lc/a(=\kappa)$と m に於いてビーム軸方向に垂直な面内でのベーンの断面形状を調べてみる（Figure 8 参照）。ここで、赤線は水平に位置するベーンに対応する 6 項ポテンシャルの等高線であり、青線は垂直方向に位置するベーンに対応するそれである。黒線は最小半径 a の√２倍の四半円である。およそこの半径でベーンを打ち切れば無駄に振動する領域を除外できる。一方、ベーンの稜線での曲率は大きな z 座標依存性はなく、ほぼ一定に見えることから、機械加工上コストの安い concave cutter を使った一定断面形状を用いるのが合理的であろう。このようにして構成したベーン形状の例を Figure 9 に示す。ここでは、κ=2 で m=1.2 と 1.5 の時の例を示してある。

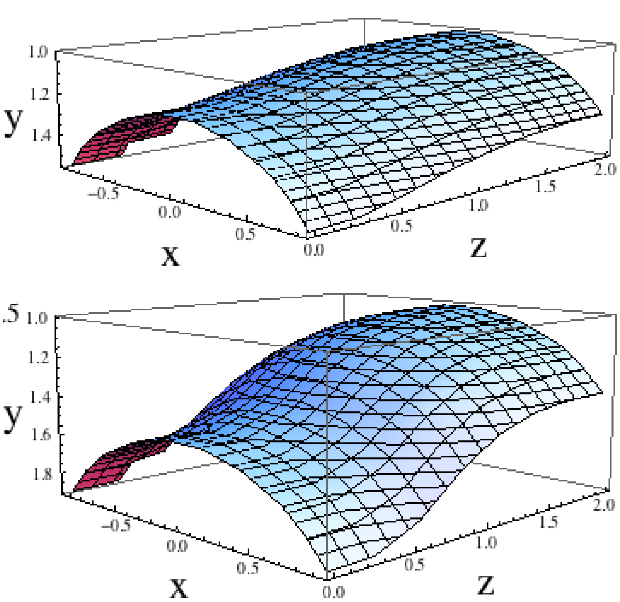

Figure 9: Constant cross sectional vanes with κ=2, m=1.2 and 1.5.

この打ち切り操作や一定断面形状の使用により多極成分の混入が有るはずであるが、これは現在調査中である。

参考文献

[1] R. H. Stokes, K. R. Crandall, J. E. Stovall and D. A. Swenson, RF QUADRUPOLE BEAM DYNAMICS, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, 3, 1979, pp.3469-3471.

[2] K. R. Crandall, "Effects of Vane-Tip Geometry on the Electric Fields on Radio-Frequency Quadrupole Linacs", Los Alamos National Laboratory Technical Note, LA-9695-MS, 1983.