

アンテナ型 HOM カプラを有する 1.5GHz TM020 モード型高調波空洞の検討

DESIGN STUDY OF THE 1.5-GHZ TM020 HARMONIC CAVITY WITH ROD TYPE HOM COUPLES

高橋毅#, 坂中章悟, 山本尚人

Takeshi Takahashi #, Shogo Sakanaka, Naoto Yamamoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have investigated the design of a 1.5-GHz third-harmonic cavity which is used for lengthening the beam bunches in the proposed KEK Light Source. In this cavity, the TM020 mode is used for beam acceleration by referring to a pioneering work by Ego et al. [1,2]. We will use rod-type higher-order-mode (HOM) couplers to damp harmful parasitic modes. These HOM couplers are located where the electric fields of TM020 mode are nearly zero in order to decouple them to the TM020 mode. We investigated the parasitic mode damping of this cavity using computer simulations.

1. はじめに

KEK 放射光科学研究施設では、マルチバンドアクロマートラティス(multi-bend achromat lattice)に基づく極低エミッタンスの 3 GeV 蓄積リング型高輝度放射光源、KEK Light Source (KEK-LS) が検討されている[3,4]。KEK-LS においては、バンチ内散乱 (intrabeam scattering) によるエミッタンス増大が問題となるため、これを緩和する為に 3 次高調波空洞を用いてバンチを伸ばすことを検討している[5]。主加速周波数 500 MHz、3 次高調波周波数 1.5 GHz を用いる予定である。

Byrd らが報告しているように[6]、イオン捕獲を避ける等のためにバンチギャップを導入した場合には、過渡的ビーム負荷による高調波電圧の変動が発生し、バンチの伸長性能を落とす可能性がある。バンチギャップによって誘起される RF 電圧の変動を低減するには、3 次高調波空洞合計の R/Q が低いことが望ましい。このため高調波空洞としては、1 台当たりの R/Q が低く、Q 値が高いものが最適である。

最近恵郷氏により、TM020 モードを用いた高次モード (HOM) 減衰空洞が開発された[1,2]。この空洞では、ビームの加速に高次モードである TM020 モードを用いる。TM020 モードは径 (R) 方向のある場所で磁場がゼロになるため、空洞端板のその場所付近に高次モード引き出し用のスロットを設け、TM020 モード以外の寄生モードを引き出し、減衰させる設計である。この空洞は、R/Q が低く、無負荷 Q が高いという特性があるため、高調波空洞に適用した場合に非常に魅力的である。我々の行ったシミュレーションでは、1.5 GHz 高調波空洞として TM020 モード空洞を用いた場合、従来型の TM010 モード型空洞を用いた場合に比べて格段にバンチ伸長性能を改善できることがわかった[5]。

TM020 モード空洞の高次・低次モード (寄生モード) を減衰する方式としては、恵郷氏らによるスロットを用いる方式も可能であるが、我々は別の方式を検討中である。検討中の方式では、TM020 モードの電場がほぼゼロの場所にロッド型高次モード (HOM) カプラを取り付け、

TM020 モード以外の寄生モードを引き出す [7]。この方式では、HOM カプラに必要な口径が小さいため、空洞端板の機械的強度を保つのが容易である。また HOM カプラ自体は多数の使用実績があり[8,9]、信頼性がある。本稿では、この HOM カプラを用いた TM020 モード空洞における寄生モードの減衰等について計算機シミュレーションした結果を報告する。

2. 高調波空洞の基本設計

2.1 空洞の構造

シミュレーション計算に使用した TM020 モード高調波空洞の断面図を Figure 1 に示す。まず HOM カプラが無い状態で、TM020 モードの共振周波数が 1.5 GHz になるように、空洞の内径 (R_2) を仮に決めた。HOM カプラが無い場合の空洞の基本パラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of the TM020 Mode of the Cavity

Resonant frequency (f_{res})	1499.75 MHz
Unloaded Q (Q_0)	37,400 (34,400**)
R_{sh}/Q *	77.2 Ω
RF voltage/cavity (V_c)	156 kV
Dissipated power/cavity (P_c)	9.2 kW

* Defined by $R_{sh}=(V_c)^2/P_c$. ** With HOM couplers ($L_1=35$ mm).

TM020 モード以外の寄生モードを減衰させるために、4 つの HOM カプラを空洞の側壁に対称に取り付けた。HOM カプラは、ロッドアンテナと同軸伝送線路から成る。これらの HOM カプラを TM020 モードの電場がほぼゼロの場所に設置し、TM020 モードとは結合させずに、それ以外の寄生モードだけを引き出す設計である。HOM カプラの寸法は、Figure 1 に示すように仮に決めたが、HOM 減衰性能などの評価結果を見て、さらに最適化を行う予定である。これらの HOM カプラはできるだけコンパクトに設計し、直線部で高調波空洞が占める長さを短くすることを目指す。

takeshi.takahashi@kek.jp

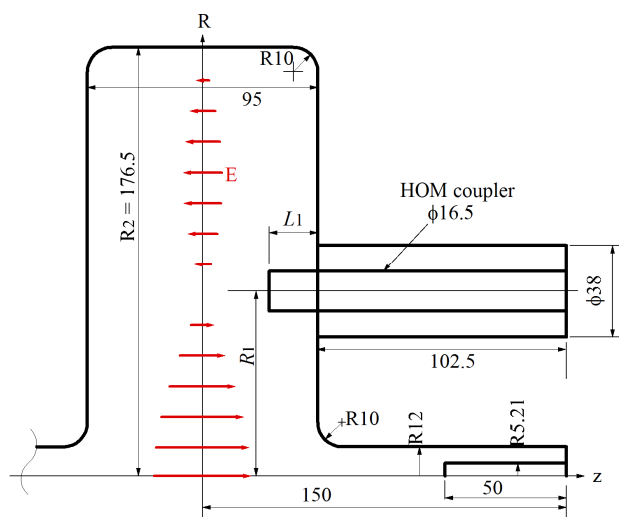


Figure 1: Cross section of the harmonic cavity. Electric fields of TM020 mode are schematically shown by red arrows. Unit: mm.

2.2 寄生モード減衰の目標値

Figure 1 で HOM カプラの無い軸対称空洞について、主要な寄生モード (TM020 モード以外の低次および高次モード) の共振周波数、縦方向の R_{sh}/Q 、および横方向の R_t/Q を計算した結果を Table 2 に示す。結合バンチ不安定性 (coupled-bunch instability; CBI) を避けるためには、これらの各寄生モードの負荷 Q_L は、Table 2 の第 5 列目に示す Q_L の目標値まで十分に減衰される必要がある。なお、Table 2 に示す Q_L の目標値は、単純な点バンチモデルに基づいて CBI の成長率を計算し、これが放射減衰率より小さくなる条件から求めた。高調波空洞がある場合には、それによる Landau damping 等が影響するため、さらに精度の高い再評価が将来必要である。計算に際しては、KEK-LS のリング内に 5 台の高調波空洞を設置することを仮定した。

2.3 シミュレーションによる電磁場解析

電磁場シミュレーションコード ANSYS HFSS を使用して高調波空洞形状および HOM カプラの位置と形状とを最適化中である。HFSS に入力した空洞形状モデルを Figure 2 に示す。この図で、Port 3~6 は HOM カプラを示し、HFSS でポートとして割り当てた。各ポートの終端は無反射状態を仮定してシミュレーション計算を行った。HOM カプラの同軸部の内導体および外導体の直径は Figure 1 に示す通りで、特性インピーダンスが 50Ω となるように寸法を選んだ。

またシミュレーションによる評価に用いるため、空洞モデルのビームポートには、仮に同軸型プローブを設置し、その終端にポート 1 (Port 1) と 2 (Port 2) を割り当てた。これらのプローブの外部 Q 値 (Q_{ex}) は、TM020 モードの場合で約 1.4×10^9 であり、十分大きいので寄生モード等の Q 値の評価に影響しない。

Table 2: Properties of the Principal Parasitic Modes

Mode	f (GHz)	R_{sh}/Q (Ω)	R_t/Q (Ω/m)	Q_L^*	Q_{ex}^{**}
TM010	0.6524	168.1	-	45	32
TM110	1.0370	-	1026.4	32	15
TE111	1.6543	-	9.2	3500	4414
TM011	1.7149	6.2	-	460	< 55
TM111	1.8913	-	148.3	220	< 20
TM120	1.8969	-	554.2	59	380
TE121	2.1327	-	10.8	3000	n.a.
TM021	2.1865	34.6	-	65	33100
TM030	2.3517	12.8	-	160	< 57
TM121	2.4675	-	632.0	52	< 53
TM130	2.7479	-	20.3	1600	< 128
TE131	2.7903	-	4.0	8100	n.a.
TM031	2.8464	39.3	-	44	< 39

* Target value. ** Estimated. n.a.: not estimated yet.

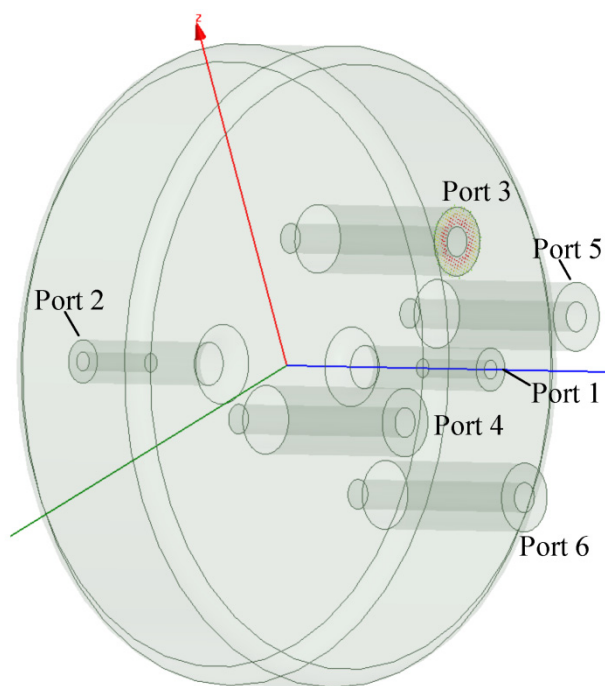


Figure 2: Schematic view of the harmonic cavity.

はじめに HOM カプラが TM020 モードと結合し難い位置を計算で求めた。HOM カプラのロッドアンテナの長さ (Figure 1 の L_1) は仮に 20 mm とした。Figure 3 は、HOM カプラの位置 (R_1) に対し、TM020 モードの外部 Q 値 (Q_{ex}) の計算結果を示す。外部 Q 値は、HOM カプラ 4 本合計の外部 Q 値である。Figure 3 より、 $R_1=76.1$ mm の時に HOM カプラの外部 Q 値が最も大きくなる、即ち HOM カプラと TM020 モードの結合が最も小さくなる、事がわかる。HOM カプラ位置 R_1 は、暫定的にこの 76.1 mm に決めた。ただし、後でロッドアンテナの長さ (L_1) を最適化した後、この位置を再度微調整する必要がある。なお Figure 3 によれば、TM020 モードの外部 Q 値を例えば 10^6 以上にするためには、 R_1

の位置を ± 0.2 mm 以内で決めなくてはならない事になる。
この設置精度については、今後注意が必要である。

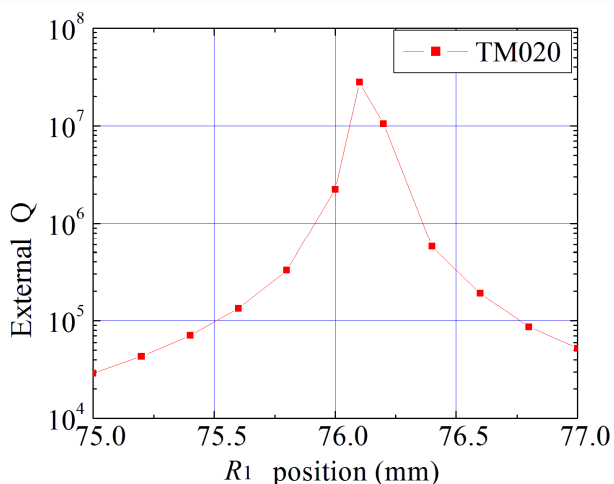


Figure 3: External Q of the TM020 mode vs. position (R_1) of the HOM coupler. Rod length: $L_1= 20$ mm.

次に、主な寄生モードの外部 Q 値を求めた。各寄生モードの共振周波数の周辺で励振周波数をスキャンして、S パラメータを計算した。各モードのうち、モノポールモードについては S_{21} を、ダイポールモードについては S_{36} を計算し、各 S_{21} および S_{36} の絶対値 ($|S_{21}|$ および $|S_{36}|$) の 3dB 帯域幅から外部 Q 値を求めた。なお、空洞の壁は完全導体と仮定しているの、シミュレーション計算では外部 Q 値は負荷 Q 値と同じである。

これらのシミュレーション計算によって求めた外部 Q 値 (4 本の HOM カプラを含む) を、ロッドアンテナの長さ (L_1) の関数として示したのが Figure 4 である。TM111 モードと TM120 モードの共鳴は、周波数が近いために重複しているの、それぞれの $|S_{36}|$ の曲線が合成されたとしてフィッティングすることによって、それぞれの外部 Q 値を分離導出した。HOM カプラが取り付けられた場合、TM111 モードと TM120 モードの混合が起きているらしい事が解った。また、TE121 モードは TE411 モードに共振周波数が近く、モードの判別が出来なかった。HOM カプラが取り付けられた場合、HOM カプラの影響でモードの混合が起きる事があり、このような場合の R_1/Q などの特性は別途調べる必要がある。

Figure 4 に示すように、HOM カプラのロッドを長くすると、ほとんどの寄生モードの外部 Q 値を十分小さくできる。Table 2 の第 6 列目は、ロッド長 35mm に対して、計算された外部 Q 値を示している。TM120 モードと TM021 モード以外のほとんどの寄生モードが Q_L の目標値よりも低く減衰できることがわかった。一方、TM120 モードと TM021 モードは今回の HOM カプラの位置では電場が弱く、HOM カプラにうまく結合しないことがわかった。今後、これらのモード (TM120, TM021) をうまく減衰させる工夫が必要である。現時点では、空洞形状を工夫してこれらのモードの電磁場分布変えて HOM カプラと結合し易くする、または HOM カプラの形状を改良すること、等を検討している。

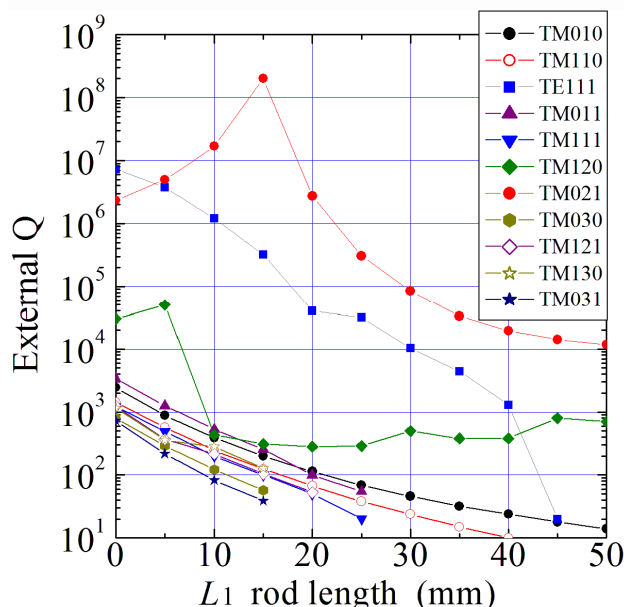


Figure 4: Calculated external Q (with four HOM couplers) of the principal parasitic modes vs. the rod length of the HOM couplers.

加速モードである TM020 モードの共振周波数は、ロッドアンテナの長さが増加するにつれて摂動によって上昇する。HOM カプラのロッドアンテナの長さ (Figure 1 の L_1) を 0mm ~ 50mm まで変化させた場合の TM020 モードの共振周波数の変化を Figure 5 に示す。HOM の減衰に適している 35mm のロッド長では、共振周波数は約 7.8 MHz 上昇する。このため、この周波数シフトを補償するために空洞の内径 (R_2) を調整する必要がある。この内径 (R_2) を調整した後、HOM カプラの取り付け位置 (R_1) を最適化する必要がある。このように、HOM カプラの長さに対して、空洞内径と HOM カプラ取り付け位置を反復調整する必要がある。

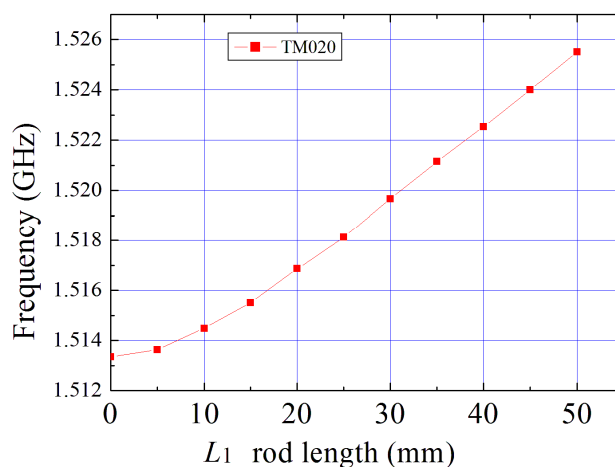


Figure 5: Calculated resonant frequency of TM020 mode vs. the rod length of the HOM couplers.

ロッド長さ 35 mm では、TM020 モードの無負荷 Q の計算値は 34,400 である。これは HOM カプラがない場合

の約92%の値である。必要とされる高調波空洞1台当たりのRF電圧は1台あたり156kVであり、このときの空洞1台あたりの壁消費電力は9.2kWである。この約9%の約820Wが、4本のHOMカブラのロッドの表面で消費される。従って1本のHOMカブラのロッドで約205Wの発熱があるが、これはロッドの水冷で対応可能である。

3. 結論

我々は、KEK-LSでバンチ伸長を行うための1.5GHz高調波空洞を検討中である。バンチギャップによる加速電圧の過渡的変動を低減するために、恵郷氏らにより最初に提案されたTM020モードを使用する空洞を検討中である。R/Qが低くQ値が高いTM020モードを使用する事で、バンチギャップにより誘起される過渡的電圧変動による悪影響を抑える事ができる。

寄生モードを減衰する方式として、恵郷氏らのTM020モード加速空洞とは異なり、ロッド型HOMカブラを用いる方式を検討中である。この方式では、TM020モードの電場が弱い場所にロッド型HOMカブラを取り付け、TM020モードとの結合を避けつつ、それ以外の寄生モードを減衰する。電磁場シミュレーションにより寄生モード減衰を評価したところ、殆どの寄生モードはこの方式で減衰できる事がわかった。ただし今のところ、TM120モードとTM021モードが、また十分に減衰できていない。これらのモードは、TM020モードと類似の電磁場分布を持ち、HOMカブラの位置で電場が弱いために結合が不十分である、と考えられる。今後、何らかの改善を施して、これらのモードも含めて寄生モードを十分減衰できるようにしたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP17K05131の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Ego, J. Watanabe, S. Kimura, and K. Sato, "Design of a HOM-damped rf cavity for the SPring-8-II storage ring", in *Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014)*, Aomori, Japan, August 2014, paper MOOL14, pp. 237-241 [in Japanese]; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOL/MOOL14.pdf
- [2] "SPring-8-II Conceptual Design Report", pp. 56-57, RIKENSPring-8 Center, Nov. 2014; <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [3] K. Harada *et al.*, "The HMBA lattice optimization for the new 3 GeV light source", in *Proc. 7th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16)*, Busan, Korea, May 2016, paper THPMB012, pp. 3251-3253.
- [4] T. Honda, "Concept of a new generation synchrotron radiation facility KEK light source", in *Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17)*, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper WEPAB047, pp. 2687-2690.
- [5] N. Yamamoto, S. Sakanaka, and T. Takahashi, "Simulation study of normal-conducting double rf system for the 3-GeV KEK light source project", in *Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17)*, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper THPIK037, pp. 4176-4179.

- [6] J.M. Byrd, S. De Santis, M. Georgsson, G. Stover, J.D. Fox, D. Teytelman, *Nucl. Instr. and Meth. A* 445 (2000) 271.
- [7] T. Takahashi, S. Sakanaka, and N. Yamamoto "Design Study of Damped Accelerating Cavity based on the TM020-mode and HOM Couplers for the KEK Light Source Project", presented at the 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), Copenhagen, Denmark, May 2017, paper THPIK036, pp. 4172-4175.
- [8] M. Izawa, H. Kobayakawa, S. Sakanaka, and S. Tokumoto, "Higher-order-mode damping coupler for beam instability suppression", *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 26, pp. 1733-1739, 1987.
- [9] Y. Morozumi, T. Higo, and Y. Yamazaki, "Higher order mode damper with self-cooled coupler", *Part. Accel.* vol. 29, pp. 85-90, 1990.