

1 はじめに

今年のOHOセミナーは、「ビーム診断の基礎」をテーマとし、ビームモニタに関する講義が総勢13名の講師によって行われた。(過去形になっているのは、なぜか今年は例年と違い、テキスト原稿の締め切りがセミナーより遅く設定され、テキストを執筆している現在、既にセミナーは終了しているためである。)なかでも複数の講義で繰り返し登場したのは、電極型のビーム位置モニタ(BPM)であった。電子/陽子、線形加速器/リング、を問わず様々な加速器で用いられており、それぞれに専門家が居て独自の考察があるので繰り返し説明があったのであろう。(あるいは、たんに講師間の調整不足で内容が被っただけかもしれない。)本講義では、それらとは異なる種類のBPMである、空洞型ビーム位置モニタ(空洞BPM)を扱う。

筆者は空洞BPMについての講義を、OHO2006で既に一度行なった。その当時は、空洞BPMは極く一部の加速器でしか使われない特殊なモニタという位置付けであった。しかし現在は、X線自由電子レーザー(XFEL)施設が世界中で稼働するようになり、そこで要求される、 $1\mu\text{m}$ 以下の分解能でのビーム位置制御を実現するために、空洞BPMが広く用いられている。今やモニタの専門家でなくても、空洞BPMの構造や測定原理についてひととおり知っておいて損は無いと思われる。

本テキストでは、予備知識を前提とせずに、必要最小限の電磁気学の復習からはじめ、空洞BPMの原理、製作、信号検出、について解説する。基本的にこれだけの知識があれば、自ら空洞BPMを設計して使用することができるはずである。また、テキストの内容から分かるように、空洞BPMの周辺には、加速器技術の様々な分野との繋がりがあがる。たとえば、加速空洞と共通する空洞共振器、マイクロ波エレクトロニクス、ビームと構造体の相互作用、コヒーレント放射、などである。また、今回は扱わないが、BPMを

使って、ビーム軌道を調整したり、ビーム安定性を評価するなかで、ビーム光学や制御システム、さらには施設の環境安定性なども議論するようになる。広範な加速器科学を前にした若手研究者にとって、最適な入り口ではないだろうか。

XFELが世界中で稼働しているといっても、実際に空洞BPMの開発の経験を持つのは各施設に1人程度で、世界でも現役では10人程度ではないかと思われる。少し勉強するだけで直ぐに専門家になれる穴場のモニタである。KEK内でも他にちょうど良い人がおらず、ビームモニタの担当でも無い筆者が今回また講義をすることになった。(あるいは、たんに暇だと思われているだけかもしれない。)

2 導入

最初に、既に広く用いられてきた電極型BPMとは異なるBPMをなぜ考える必要があるか、簡単な導入をする。

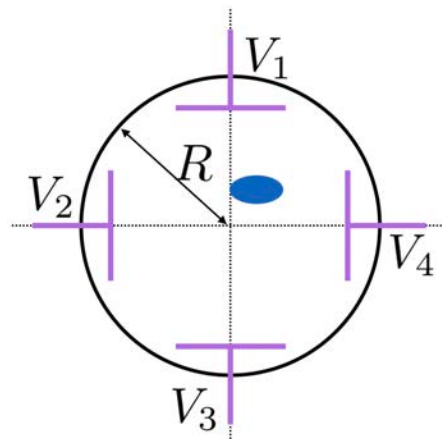


図1: 電極型BPMの概念図

電極型BPMの構造は、図1のようなものである。ビーム位置は、対向する電極の信号強度のバランスと、形状で決まる感度係数から、次のように計算される。

$$y = S \times \frac{V_1 - V_3}{V_1 + V_3} \quad (1)$$

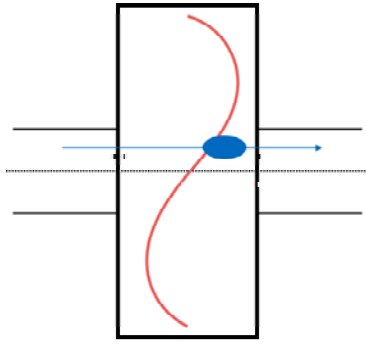


図 2: 空洞型 BPM の概念図

ここで、ダクト半径を R とすると、感度係数 S は、 $S \sim R/2$ である。例えば、半径 20 mm 程度のダクトを想定すると、2 つの大きな数値の $1/10000$ 程度の僅かな違いを読み取って、ようやく $1 \mu\text{m}$ の分解能が得られる。低ノイズで広いダイナミックレンジを確保した測定が必要であることが想像できるだろう。測定回路の線型性や安定性、4 つの回路の個体差も問題になる。また、電極を溶接して製作する製造工程が多く複雑で、製造誤差も大きい。製造コストも高い。これらのことから、電極型で、 $1 \mu\text{m}$ 以下の分解能を、しかも絶対的な中心位置の確度をもって、測定するのは困難である。

これから説明する空洞型 BPM の原理は、図 2 のようなものである。ビームによって空洞に励起されるダイポールモードを測定する。空洞中央をビームが通過したとき、ダイポールモードは励起されず、信号はゼロである。オフセットに比例して信号が発生する。中央にたいして位置が反転すると、信号の位相が反転する。通常は、中央にビームを調整したいので、信号をゼロにしようとする。このとき、ゼロからの僅かな違いを検出できるように測定回路のゲインを上げることで、高分解能の測定ができる。電極型と異なり、中央付近ではダイナミックレンジに制限されず分解能を上げられる。また、電気的な中心は、空洞の機械加工で決まり、信頼性が高い。構造が簡単で、製造コストも低い。ただ

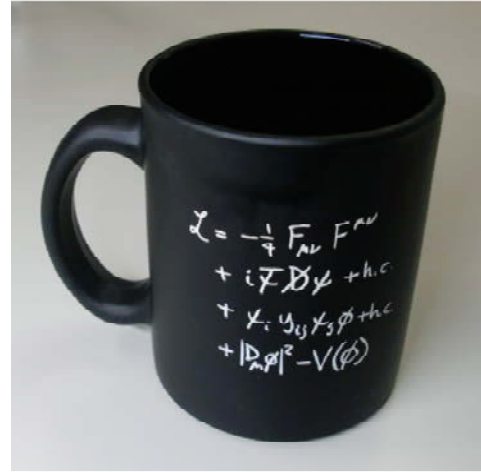


図 3: CERN のお土産のマグカップ。標準理論のラグランジアンがデザインされている。

し、空洞 BPM はビームとの相互作用 (インピーダンス) が大きく、ビームが高い繰り返しで通過するリングでは通常使えない。これらの特徴を踏まえると、細いダクトのシングルパスのレイアウトで、高分解能と絶対位置の確度を要求する XFEL には、最適の BPM である。

ここに説明した内容を表 1 にまとめた。

3 空洞共振器の基礎

3.1 電磁気の復習

最初に電磁気学の基本方程式を導いておく。必要な予備知識は、解析力学の最小作用の原理と、相対論の 4 元ベクトルの表記、だけである。CERN へ出張した際にお土産として購入した図 3 のマグカップが机の上にあったので、これを信じることにする¹。

標準理論のラグランジアンが記されており、その 1 行目が電磁気に相当する。

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \quad (2)$$

ここで、

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu = -F_{\nu\mu} \quad (3)$$

¹h.c. が多すぎると騒がれたが、1 つ目の h.c. は hot coffee と読めば良いとのことである [2] ちなみに、今販売中のもものでは 2 行目の h.c. が無くなっている。

表 1: 電極型 BPM と空洞型 BPM の比較

項目	電極型	空洞型
シングルショット分解能	せいぜい $1\mu\text{m}$	典型的に $0.3\mu\text{m}$
電気的中心の確度	数 $100\mu\text{m}$ (検出回路を含めるともっと悪い)	$10\mu\text{m}$ 機械加工で決まる。回路によらない。
ダイナミックレンジ	ダクトの半分くらい	ダクトいっぱい 分解能はやや悪くなる
サイズ (長手方向)	ボタン型は小さい (ストリップライン型が大きい)	大きい (ストリップライン型と同じくらい)
ビームダクト	形状やサイズは様々	大きいダクトには向かない (周波数が低く、サイズが大きくなる)
周波数	広帯域 (1 GHz 程度)	狭帯域 (S, C, X-band)
インピーダンス	ボタンだと小さい	大きい リングには向かない
製作	複雑、高価	簡単、安価 (周波数が低いと高価になる)
主な用途	リング、リニアック、輸送ライン	XFEL、輸送ライン、リニアック

である。

これを、オイラーラグランジュ方程式

$$\partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu A_\nu)} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\nu} = 0 \quad (4)$$

に代入する。左辺第 2 項は明らかにゼロである。
左辺第 1 項の ∂_μ の中身は、

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\alpha A_\beta)} = -\frac{1}{4} \frac{\partial F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}}{\partial (\partial_\alpha A_\beta)} \quad (5)$$

$$= -\frac{1}{2} F^{\mu\nu} \frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial (\partial_\alpha A_\beta)} \quad (6)$$

$$= -\frac{1}{2} F^{\mu\nu} (\delta_{\mu\alpha} \delta_{\nu\beta} - \delta_{\nu\alpha} \delta_{\mu\beta}) \quad (7)$$

$$= -\frac{1}{2} (F^{\alpha\beta} - F^{\beta\alpha}) \quad (8)$$

$$= -F^{\alpha\beta} \quad (9)$$

となるから、結局、式 4 は、

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = 0 \quad (10)$$

となる。また、テンソルの性質としてビアンキ恒等式

$$\partial^\lambda F^{\mu\nu} + \partial^\nu F^{\lambda\mu} + \partial^\mu F^{\nu\lambda} = 0 \quad (11)$$

が成り立つ。

式 10 は書き下すと、

$$\partial_\mu \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu (\partial_\mu A^\mu) = 0 \quad (12)$$

となる。ここで、

$$A^\mu = (\phi, \mathbf{A}) \quad , \quad A_\mu = (\phi, -\mathbf{A}) \quad (13)$$

と書き、

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (14)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (15)$$

としたものを、電場、磁場と呼ぶ。あらわに書くと、

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$F^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z \\ E_x & 0 & -B_z & B_y \\ E_y & B_z & 0 & -B_x \\ E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

となることが分かる。

ちなみに、任意の関数 χ を用いて

$$A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi \quad (18)$$

と変換しても、 \mathbf{E}, \mathbf{B} は変化しない。そこで、

$$\partial_\mu A^\mu = 0 \quad (19)$$

となるように変換する (ローレンツゲージ) と、式 12 は、

$$\square^2 A^\mu = 0 \quad (20)$$

と書ける。ここで、 $\square^2 = \partial_\mu \partial^\mu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2$ と書いた。²

式 10 の $\nu = 0$ の場合が、

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (21)$$

$\nu = 1, 2, 3$ の場合が、

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (22)$$

式 11 の $\nu = 0$ の場合が、

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (23)$$

$\nu = 1, 2, 3$ の場合が、

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (24)$$

である。式 21~24 の 4 つの方程式を、真空中のマクスウェル方程式という³。真空中というのは、電荷や電流が無い場合である。

電磁気学の問題は、与えられた境界条件のもとでマクスウェル方程式を満たす解を求める、という作業になる。ここで、完全導体の境界条件を、

$$\mathbf{E}_\parallel = 0 \quad (25)$$

$$\mathbf{B}_\perp = 0 \quad (26)$$

とする。それぞれ、導体境界において、電場は境界と平行な成分を持たない、磁場は境界と垂直な成分を持たない、ということである。

²単に記号の問題であるが、 \square と書く派と \square^2 と書く派があるようだ。ここでは、ファインマンの教科書 [3] の流儀に従った。

³4 つ書くよりは、式 20 の一行の方が簡単。いじわるな先生に、詰んでみる、と言われたときにも対応しやすい。

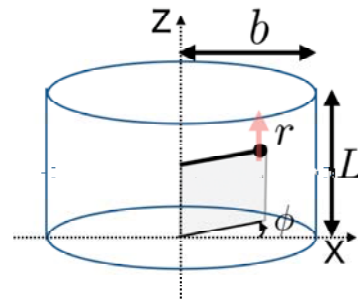


図 4: 円筒空洞とそのパラメータの定義

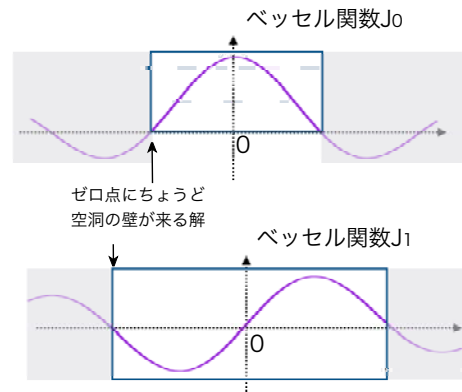


図 5: ベッセル関数と円筒空洞の境界条件

3.2 空洞共振器

ここでは、円筒空洞を考え、図 4 に示す座標系をとる。空洞の半径を b 、長さを L とする。円筒の軸方向を z 方向とする。

空洞が完全導体の境界条件を与えるとして、円筒空洞の固有モード、つまり境界条件を満たすマクスウェル方程式の解、が求まる。ここでは導出は行わず、結果だけ与える。円筒対称の問題ではたいていベッセル関数が登場する。ベッセル関数の J_0 は原点で極大の cos-like な関数である。ベッセル関数の J_1 は原点でゼロの sin-like な関数である。円筒の外壁において電場の z 成分がゼロである、という境界条件から、空洞外壁の位置に、丁度ノードが来るようなベッセル関数の形の解になることが想像できる (図 5)。あらわに書くと、最も単純な解は、図 6 のような形になる。端板間に電場が発生し、磁場がループ

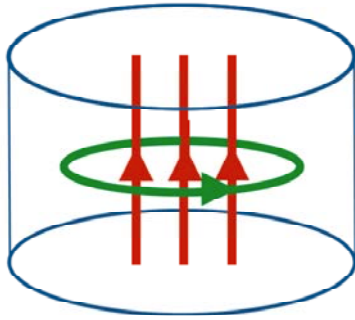


図 6: TM010(モノポール)モードの電磁場

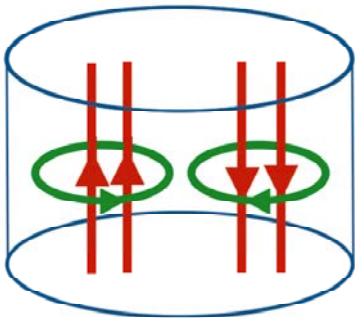


図 7: TM110(ダイポール)モードの電磁場

を描く。電場は z 成分だけで、

$$E_z = E_0 J_0(rk) e^{i\omega t} \quad (27)$$

と表される。一般には TM010 モードと呼ばれる。これをここではモノポールモードと呼ぶ。

次の解は、図7のような形である。やはり端板間に電場が発生し、磁場がループを描くが、方向が反転した2つの部分に分かれている。電場は z 成分だけで、

$$E_z = E_0 \cos \phi J_1(rk) e^{i\omega t} \quad (28)$$

と表される。一般には TM110 モードと呼ばれる。これをここではダイポールモードと呼ぶ。

空洞に電磁場のモードが存在することが分かったが、集中定数の回路との対応を見てみよう。図8左上に、コイルとキャパシタで構成された共振回路を描いた。この LC 回路の共振周波数は、

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (29)$$

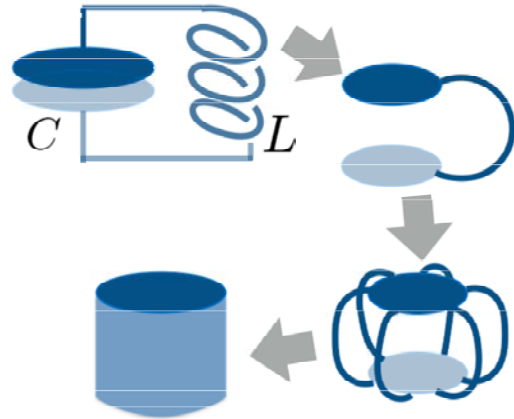


図 8: LC 共振器から空洞共振器へ

である。普通、MHz 帯域程度までは集中定数で理解できるが、周波数が上がり GHz 帯域に入ると分布定数の世界になる。ここで、共振周波数を上げるには、 L と C を小さくすれば良い。 C を小さくするには、キャパシタの極板を遠ざければ良い。 L を小さくするには、コイルの巻数を減らし、1本の線にしてしまう。さらに L を小さくするには、線を並列にしていく。並列の数を増やしていくと、最終的には外壁の板になる。こうして、図8左下の円筒空洞の形になる。つまり、円筒空洞の端板はキャパシタの名残、外壁はコイルの名残、であると理解できる。

LC 回路との対応から想像できるように、空洞に蓄積された電磁場エネルギーは、角振動数 ω で電場と磁場でエネルギーをやり取りしながら時間発展する(図9)。電磁場のエネルギーは、代表して電場で計算すると、

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int |E_z|^2 dV \quad (30)$$

と表される。(ここでは電場に z 成分しかないモードを想定して、 E_z と書いている。)

エネルギー損失があることを想定し、図9は減衰振動のイメージで描いている。空洞の電磁気エネルギーの損失の指標として、次の Q 値が用いられる(全体の負荷 Q 値という意味で Q_L と書く)。

$$Q_L = \frac{\omega U}{P} \quad (31)$$

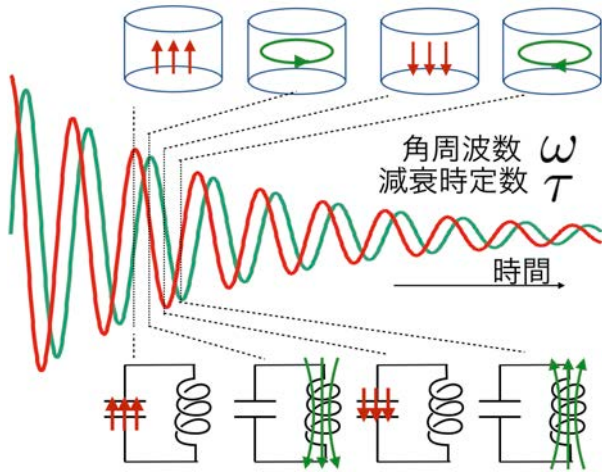


図 9: 空洞の電場と磁場の時間発展

つまり、1 サイクルあたりに失うエネルギーの全エネルギーにたいする割合 (の逆数) である。

ここで、損失を、空洞の内壁で熱損失となる部分 P_{wall} と、信号として取り出される部分 P_{out} に分けて考える。 $P = P_{wall} + P_{out}$ である。そうして、 Q 値のうちでそれぞれの寄与を Q_0 および Q_{ext} と呼ぶ。取り出しポートが複数ある場合は、それぞれのポートの Q_{ext} で議論することが多い。

$$Q_0 = \frac{\omega U}{P_{wall}} \quad (32)$$

$$Q_{ext} = \frac{\omega U}{P_{out}} \quad (33)$$

空洞内部の電磁気エネルギーは、指数関数的に減衰する。エネルギーが $1/e$ になる時定数 τ は、

$$\tau = \frac{Q_L}{\omega} \quad (34)$$

となる。なお、振幅が $1/e$ になる時定数は 2τ である。

4 空洞 BPM の原理

4.1 ビームと空洞の相互作用

図 10 のように、加速器のビームダクトに空洞を取り付けた状態を考える。

ビームの通過によって、空洞が励起 (内部に電磁波が発生) する仕組みを、図 11 に示す。ビーム

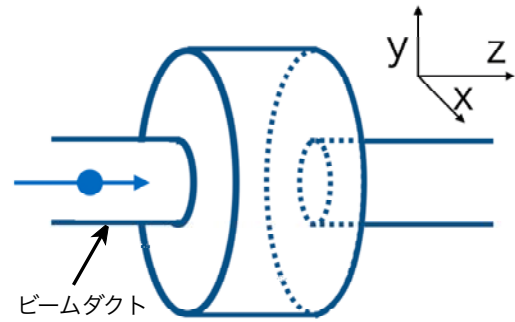


図 10: 加速器ビームダクトに設置される空洞の概念図

と並走する壁電流が空洞の側壁を流れるが、図 8 で説明したように、空洞の側壁はコイルに相当する。つまり、LC 回路でコイルに電流が流れることに対応する。このとき電磁誘導の起電力、

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (35)$$

が発生することから、空洞に電磁波エネルギーが励起されることがイメージできる。

このような、ビームと空洞との相互作用は、 R/Q と呼ばれる量で議論される。シャントインピーダンス R は、

$$R = \frac{|\int \mathbf{E} ds|^2}{P} \quad (36)$$

定義される量で、ビーム軸上の電場 (の 2 乗) と空洞の損失パワーとの比である。加速空洞の場合は、一定の投入 RF パワーでどれだけビームを加速できるかを示す、加速の効率の指標となる量である。これを Q 値で割って、損失 P の寄与が相殺した、 R/Q という量を定義する。

$$R/Q = \frac{|\int \mathbf{E} ds|^2}{\omega U} \quad (37)$$

R/Q は損失や材料に依存しない、空洞の電磁波の形状を反映した量である。

ビーム軸で積分すると書いたが、これはダクトの中央ではなく、文字通り今考えるビームの軌道の意味である。ここでは、ビームが x 軸方向に x だけオフセットして通過する場合を、 $R/Q(x)$ と書くことにし、ビーム位置に依存した応答を考える。

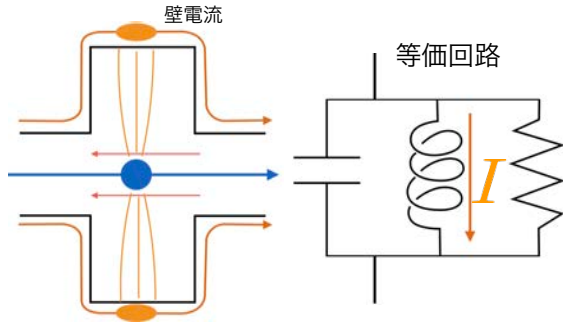


図 11: ビームによって空洞が励起される仕組み

例えば、図 4 の円筒空洞の TM₀₁₀(モノポール) の場合、式 27 の E_z を用いて、定義に従って計算すると、

$$R/Q(x) = \frac{2J_0^2(xk)LT^2}{\omega\epsilon_0\pi b^2 J_1^2(bk)} \sim \text{const.} \quad (38)$$

となる。原点付近で $J_0 \sim 1$ であることから、モノポールモードの R/Q はビーム位置 x に依存しないことが分かる。

一方、TM₁₁₀(ダイポール) の場合は、式 28 の E_z を用いて計算すると、

$$R/Q(x) = \frac{2J_1^2(xk)LT^2}{\omega\epsilon_0\pi(b^2/2)J_0^2(bk)} \propto x^2 \quad (39)$$

となる。ダイポールモードの R/Q は原点でゼロ、ビーム位置の 2 乗に比例することが分かる。

初期状態で励起されていない空洞に電荷 q が通過する状況を考える。このとき、空洞に励起される電圧は、

$$V_{exc} = \frac{\omega}{2}(R/Q)q \quad (40)$$

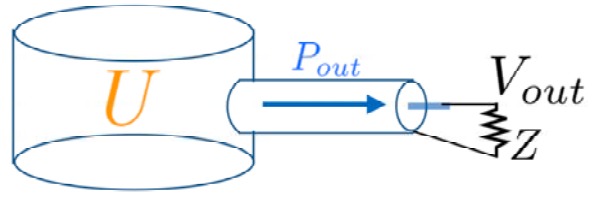


図 12: 信号を取り出して検出

また、空洞に励起されるエネルギーは、

$$U_{exc} = \frac{\omega}{4}(R/Q)q^2 = \frac{1}{2}qV_{exc} \quad (41)$$

となる。エネルギー保存則を考えると、空洞に電磁場エネルギーが発生したのに相当し、ビームはエネルギーを失うことが分かる。これは、ビームローディングの基本定理、と呼ばれるものである(多くの教科書(例えば[4])に説明が載っている)のでここでは導出は省略する)。

4.2 空洞 BPM の信号

ビームによって空洞に励起された電磁波は図 12 のようにカプラーで取り出し検出器の抵抗に導かれる。検出される電圧は、オームの法則から

$$V_{out} = \sqrt{ZP_{out}} = \frac{\omega q}{2} \sqrt{\frac{Z}{Q_{ext}}(R/Q)} \quad (42)$$

となる。式 39 を思い出すと、ダイポールモードを検出した信号電圧は、原点でゼロ、原点からの距離 x に比例、電荷 q に比例、となることが分かる。

ビーム位置モニタとしては、軌道角度によらず位置の信号だけを測定したい。しかし、ビームが空洞中心を通過しても、軌道角度に由来する信号が発生する。これは、以下のように考えれば理解できる。

ビーム位置の信号を

$$V(x) = Ax\sqrt{L}\sin(\omega t) \quad (43)$$

と書くとする(\sqrt{L} に比例することは式 39 から分かる)。角度信号は、図 13 のように空洞を分割

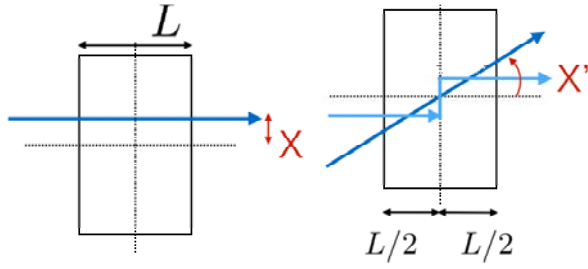


図 13: ビーム角度信号の発生原理

して考えれば理解できる。仮想的に空洞を前半で発生した信号と後半で発生した信号を発生時間差を考慮して足し合わせて考えると、

$$\begin{aligned}
 V(x') &= A \frac{x'L}{4} \sqrt{\frac{L}{2}} \sin\left(\omega\left(t + \frac{L}{4c}\right)\right) \\
 &\quad - A \frac{x'L}{4} \sqrt{\frac{L}{2}} \sin\left(\omega\left(t - \frac{L}{4c}\right)\right) \\
 &= A \frac{x'L}{2} \sqrt{\frac{L}{2}} \cos(\omega t) \quad (44)
 \end{aligned}$$

となる。たしかに、ビームが空洞中心を通過しても信号が発生するという結果である。ただし、位置信号が \sin であるのにたいして、角度信号は \cos になっていることから分かるように、位相が 90 度異なる。これを利用して、角度信号を分離して検出することが可能である。また、角度と位置の感度比は L^2 に比例する。薄い空洞にすると相対的な角度信号の影響が抑えられる。

ここまでは、ビームは点電荷として扱ってきた。大きさのあるバンチの場合は、バンチに含まれる個々の点電荷の信号のコヒーレントな足し合わせだと考えれば良い。バンチ長 σ_z が電磁波モードの波長と比べて無視出来ない場合、位相のばらつきの効果で、実効的な信号が減る。いわゆるフォームファクタと呼ばれる次の因子がかかると考えれば良い。

$$\exp\left(-\frac{\omega^2 \sigma_z^2}{2c^2}\right) \quad (45)$$

一般には、空洞の共振周波数が高いほうが位置感度が高いが、このバンチ長の効果を合わせて考えると、かえって信号が小さくなる場合もあ

る。XFEL の場合は、バンチ長が短いので通常この効果は小さい。

原点からの僅かな位置変化で発生する微弱なダイポールモードを検出したい場合、それ以外の信号は邪魔である。とくにモノポールモードは、ビームで強く励起されるため、強烈なバックグラウンドである。モノポールモードはダイポールモードと周波数が異なる。しかし、一般に共鳴ピークは周波数軸で見るとローレンツ型の強度分布

$$\frac{f_0/(2QL)}{\sqrt{(f_0/(2QL))^2 + (f - f_0)^2}} \quad (46)$$

をし、Q 値は有限なので、その裾野はずっと広く、ダイポールモードの周波数帯まで続いている。このため、バンドパスフィルタをつかった周波数選別だけでは取り除くことができない。ただし、共鳴のオフピークでは位相が 90 度ずれるので、原理的には位相検出でダイポールモードと分離することは可能である。

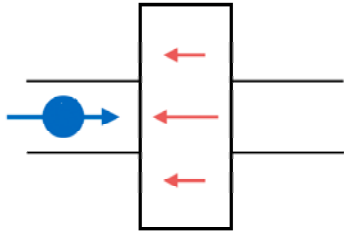
以上をまとめると、空洞からの信号は、次のように表記することができる。

$$V = V_{position} + iV_{angle} + iV_{tail} + V_{noise} \quad (47)$$

$V_{position}$ が測定したいビーム位置信号、 V_{angle} はビーム角度信号、 V_{tail} は異なる周波数の信号の裾野、 V_{noise} は検出回路の熱ノイズ(後述)、である。i が付いているのは、位相が 90 度異なるという意味である。ダイポールモードの周波数を、狭帯域で位相を分離して検出すれば、ビーム位置信号 $V_{position}$ の情報を取り出すことができる。

閑話休題

ビームローディングの計算では、始状態では空洞に電場が無いにもかかわらず、あたかも図のように空洞に減速電場が立っているような状況を一旦想像し、この電場をビーム軌道に沿って積分して R/Q を計算し、ビームが通過する際に受ける減速、と同時にエネルギー保存の原理から空洞には電磁場の励起、という結果を得る。



素朴な、ビームが真空中に電磁場(光)を出す、という描像とは逆で、ビームが通過する前から光の素のようなものがあって(始状態は光が無いのに!)、それがビームによって増幅する、という描像になる。不思議だな、と思うのは筆者だけだろうか。

4.3 ビームに与える影響

ビームモニタは、ビームに影響を与えることなく(非破壊で)、測定することが理想である。空洞BPMはビームとの相互作用が大きく、位置感度が高いわけであるが、ビームに影響は無いのだろうか。

ビームをキックする効果は、Panofsky-Wenzelの関係式

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{F}_{\perp} = \nabla_{\perp} \mathbf{F}_{\parallel} \quad (48)$$

で説明される。 \mathbf{F} は電磁場がビームに与える力である。この式の教えるところは、ビームに前後方向にかかる力が横方向に変化するとき(右辺)、ビームに横方向の力が発生する(左辺)、ということである。ビームが空洞BPMをオフセンターで通過し、ダイポールモードを励起する状況は、まさにこれに対応し、バンチ後半部が横に蹴られ

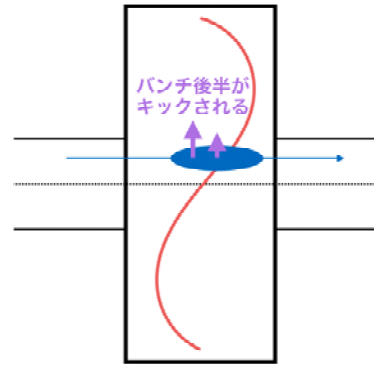


図 14: ウェイクフィールドによるビームのキック

る効果が発生する(図14)。ただし、通常はBPMは設計軌道に精密に設置し、BPMの中心を通すようにビーム調整をすることから、結果的にはこのキックの効果は受けないはずである。

5 空洞BPMの製作

ここでは、筆者がATFの空洞BPMを製作した経験を踏まえて、その設計思想と構造について解説する。

5.1 パラメータの決定

空洞BPMを設計するにあたって、まず検討するのは周波数である。普通はビームダクト直径が先に与えられ、周波数を検討するうえでの制限になる。ダクト直径が大きくなると周波数の高いモードが固有モードにならないので、必然的に低い周波数を選択せざるを得ない。また、周波数が低すぎると空洞サイズが大きくなり、高分解能で製作しやすいというメリットがなくなってくる。典型的には、直径20mm程度のビームダクトで4~6 GHz (C-band)を選択することが多い。

時定数については、長くするか、短くするか、設計にあたって2つの考え方がある。一つ目は、銅を材料にして、高Q値(数1000)で長い時定数(数100 ns)とする設計である。減衰するまでに信号波形を多くサンプリングでき、デジタル

波形処理で複雑な操作をすることが可能になる。また、信号ピークが飽和した場合でもテイル部から情報がとれるので、測定レンジが大きくとれる。二つ目は、ステンレスを材料にして、低Q値(数100)で短い時定数(数10 ns)とする設計である。高バンチ繰り返しの場合に信号の重なりを回避したい場合には適している。この場合、ある程度アナログで処理する検出回路になる。

空洞にRF信号を入出力する場合、同軸アンテナやループアンテナの構造が使われることが多い。しかし、今の場合は、微弱なダイポール信号を、強烈なモノポールモードやその他モードのなかで検出しなければならない。そこで、図15の選択的カプラを利用する[5]。これは、導波管の端部に、スロットと呼ぶ細長い穴を開けたものである。スロットを介して磁場で結合する。磁場がスロット長辺と平行なモードのみが導波管側に取り出され、伝搬する。図16のように、空洞端板に動径方向にスロットを配置すると、特定の方向のダイポールモードに結合し、モノポールモードには結合しない。また、導波管のカットオフ周波数をモノポールモードより高く設計することで、モノポールモードをさらに抑制することができる。

円筒空洞にダイポールモード選択的カプラを4つ付けたBPM空洞の構造を図17に示す。読み出しは、最小限ではX,Y方向のダイポールモードにそれぞれ1つで良いが、対称性と、予備としても使えることも考慮して、4つの読み出しポートを付けた。導波管の反対側は、導波管から同軸に変換し、同軸ケーブルで信号を伝送できるようにしている。

5.2 構造と製作および調整

空洞は複雑な構造をしているように思えるが、実際は部品点数は少ない。主には、図18に示す4部品、即ち、空洞部と導波管部そして両側の蓋である。図19に、ネジ留め試作モデルの空洞部と導波管部の写真を示す。

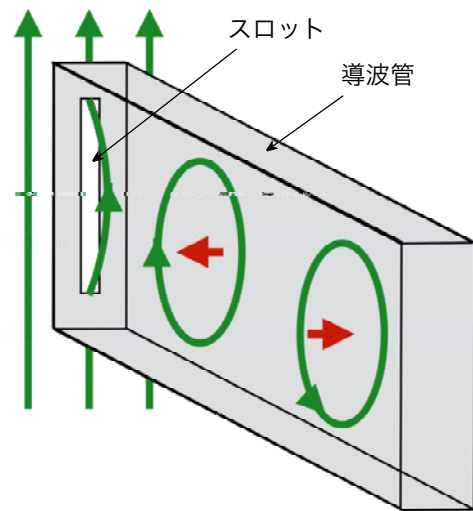


図15: 選択的カプラ。端部のスロット構造を介して磁場で結合する。特定の方向に磁場をもつモードのみを読み出すことができる。

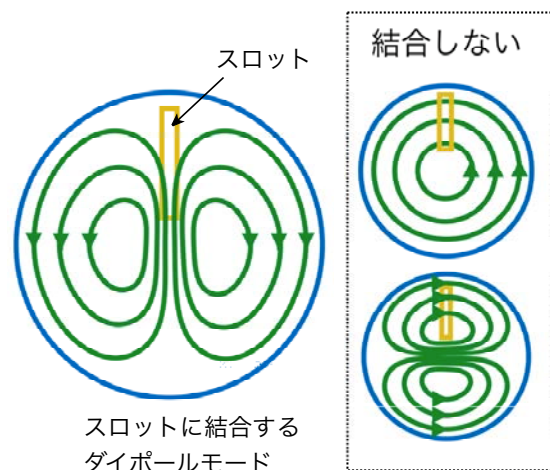


図16: モード選択性。円筒空洞の端板に動径方向のスロットで読み出すと、特定の向きのダイポールモードのみを読み出すことができる。

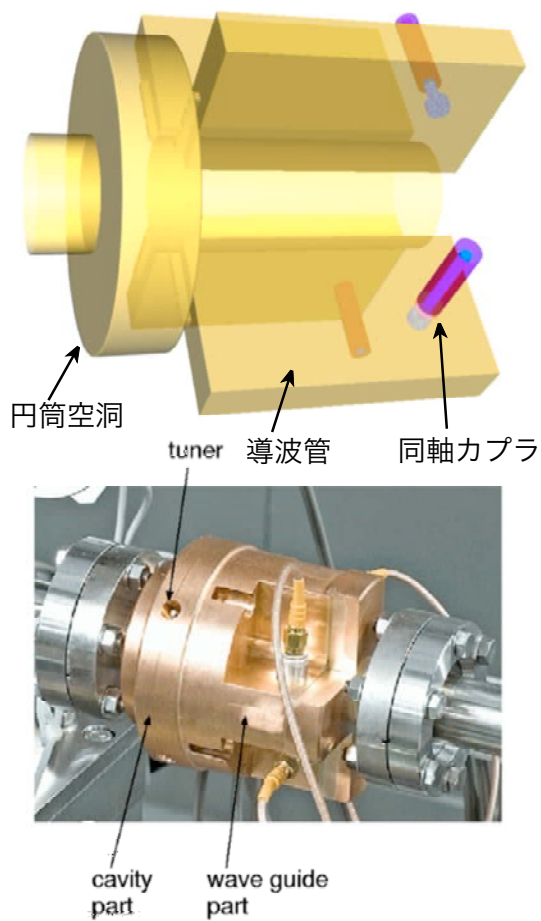


図 17: 空洞 BPM の構造。(上) 空洞としての構造。
(下) 試作 BPM をビームラインに設置した写真。

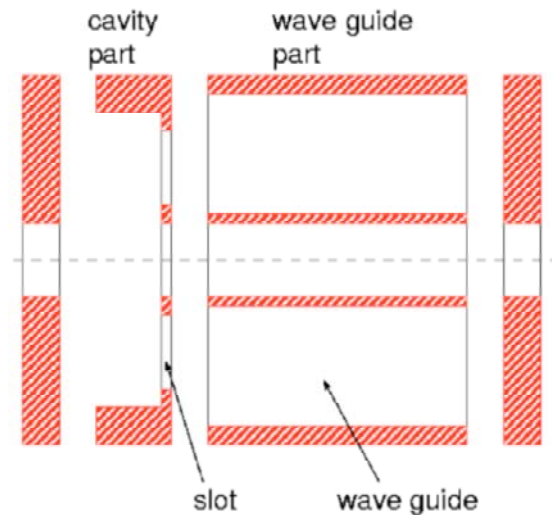


図 18: 空洞を構成する部品。主な部品は 4 つ。

空洞部は、損失を小さくして高い Q 値を実現するために鏡面加工する。また、目標の周波数に精度良く合わせる必要があるため ((後述) 多数の空洞を同じ基準信号で検波したいため、周波数を合わせておきたい。)、試作を踏まえてロウ付け後の周波数変化も考慮して内径を調整する。円筒空洞部を旋盤で一度の工程で加工することで、空洞の外形と内形の関係性は保証される。電磁場のモードとしての中央は内形で決まるのにたいし、設置時には外形を基準にするので、外形中心と内形中心が精度良く一致していることは、絶対的な位置を保証するうえで重要である。機械加工の精度より、電気的中心が $10\mu\text{m}$ 以下の確度で決まる。

導波管部は、電磁波はシングルパスであるから、損失の要求は緩く鏡面で無くて良い。ワイヤ放電加工で直方体にくり抜いて製作する。導波管の反対側の端近くにアンテナを突き出す構造で、同軸に変換する。正しくマッチングするように、アンテナ形状と位置は設計されている。

円筒空洞では、X 方向と Y 方向のダイポールモードは縮退している。完全に縮退していれば問題無いのだが、製作の僅かな誤差により縮退が解け、一般には X, Y 方向に一致しない向きに

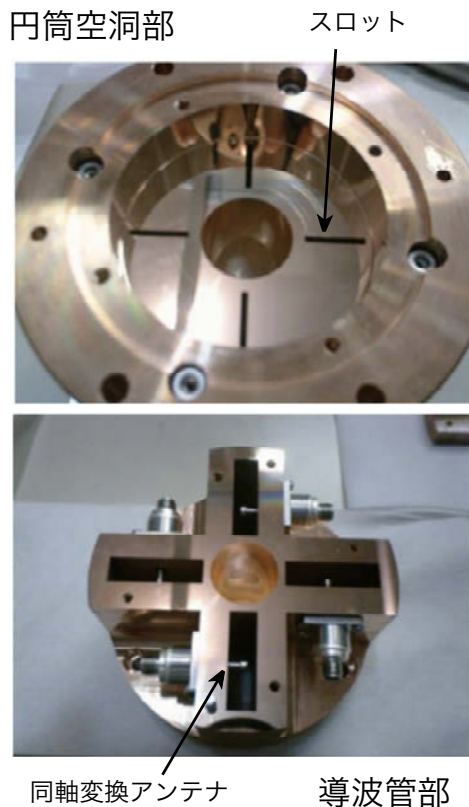


図 19: 空洞を構成する部品の写真。主な部品である、円筒空洞部 (上) と、導波管部 (下)。このほかに、これらに蓋をする両端のパーツがある。

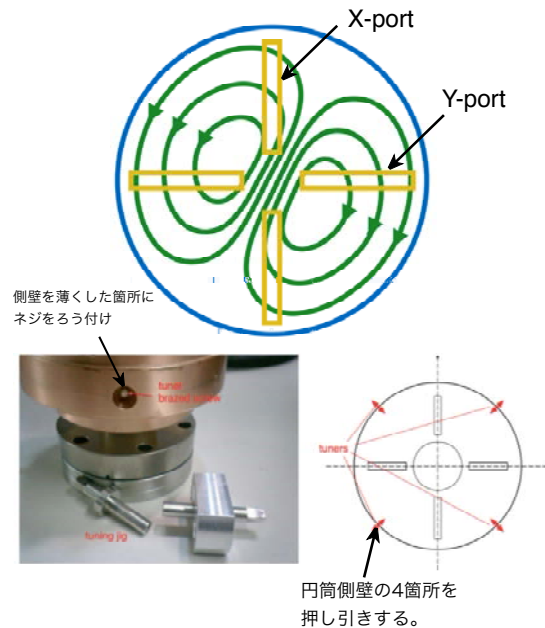


図 20: XY 混合とその調整。空洞の固有軸が傾くと、X と Y の信号が混合する。製作時の誤差で生じた固有軸を調整できるように、空洞側壁の 4 箇所にチューナーを用意している。

固有軸が生じる。このとき、X 方向と Y 方向の信号に混合が生じてしまう。固有軸を調整する機構が必要である。図 20 に示すように、空洞側面の 4 箇所に、側壁を薄くして押し引きで塑性変形させられる部分 (チューナー) を設けておき、空洞の周波数と同時に XY 混合を調整することができる。空洞がろう付けまで完成した後、ネットワークアナライザを用いて、X ポートから Y ポートへの透過を測定しながら、チューナーを調整し、透過率を最小化する。

図 21 は、XY 混合がある時に観測されるビーム信号を模式的に示したものである。X 方向にのみビームオフセットがある場合、X-port に信号が発生するのは普通であるが、時間が経過するに従って Y-port にも信号が流れ込んでくる。これは、図 22 の連成振り子の実験と同じようなものと理解できる。連成振り子は、僅かに結合した 2 つの同じ周期の振り子の系で、一方だけを振動させると、時間の経過とともにもう一方が振動し始める。

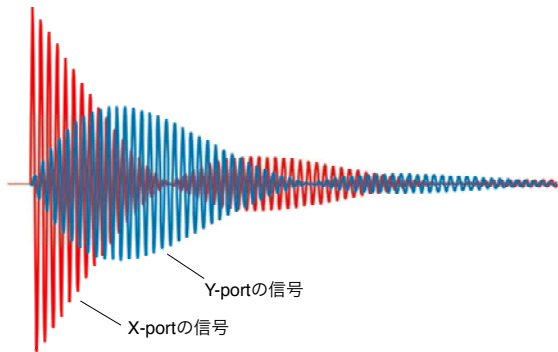


図 21: 検出されるビーム信号への XY 混合の影響。X にオフセットを持ったビームによる信号を模式的に描いた。始めは X-port にだけ信号が出るが、時間が経過すると、Y-port にも信号が混ざりこんでくる。

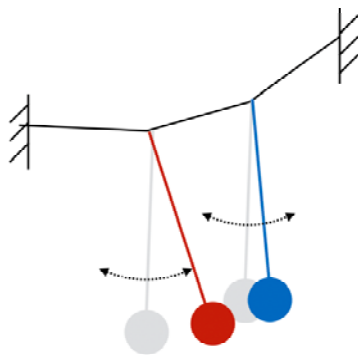


図 22: 連成振り子のアナロジー。2つの周期がほぼ等しい振り子が、僅かに結合した系。片方だけを揺らすと、そのうちもう片方が揺れ始めると同時に最初に揺らした方の揺れは止まる。以降これを繰り返し、互いにエネルギーをやり取りする。

位置検出用の空洞(ダイポール空洞)では、ビーム電荷と位置の両方に比例した信号が得られる。ビーム電荷が変化しても、位置の情報だけを取り出すには、ビーム電荷による規格化が必要である。ビーム位置に依存せずにビーム電荷に比例した信号を得るため、別途、レファレンス空洞と呼ばれる空洞を設置する。これは、TM010モードの空洞である。ダイポール空洞のTM110モードの周波数とレファレンス空洞のTM010モードの周波数を同じになるように設計する。図 23 は、レファレンス空洞の構造を示す。ここでは、空洞端板に設けた穴から同軸に結合する構造としているが、TM010モードは他のモードと比べて非常に強く励起されるし、ビーム位置にも依存しないので、ある意味どのような設計でも構わない。

6 空洞 BPM の信号検出

ここでは、検出回路と信号解析について解説する。

6.1 高感度の RF 信号検出回路

温度があれば、原理的に電子の動きによるランダムなノイズがある。熱雑音のパワー [W] は、

$$p_{TN} = k_B T f_{BW} \quad (49)$$

と表される。 k_B はボルツマン定数、 T は温度である。 f_{BW} は測定の帯域幅である。抵抗 Z で検出する際の電圧 [V] は、

$$V_{TN} = \sqrt{4k_B T Z f_{BW}} \quad (50)$$

となる。

図 24 に示すように、空洞の信号は狭帯域であるのにたいし、熱雑音は周波数領域で一様であるから、小さな信号をノイズに埋もれずに検出するには、測定帯域を狭めることが有効である。

検出回路では、信号をアンプで増幅するが、その際、信号雑音比 SNR は悪化する。SNR が悪

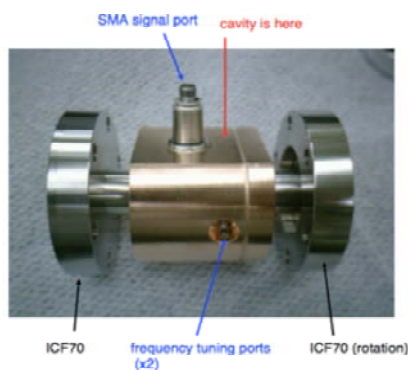
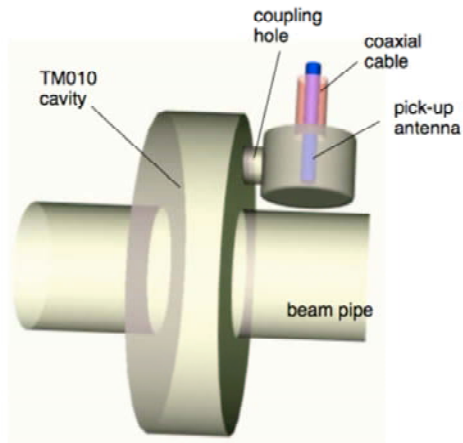


図 23: レファレンス空洞。同時に用いられるダイポール空洞のダイポールモードと、このレファレンス空洞のモノポールモードが同じ周波数となるように設計し、レファレンス空洞ではモノポールモードを検出する。

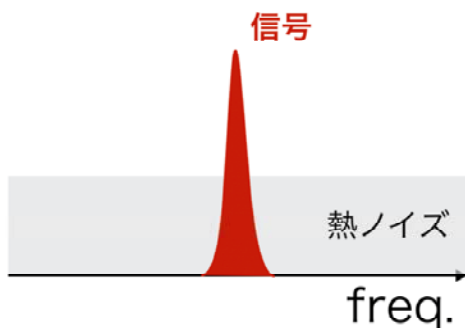


図 24: 周波数領域での信号と熱雑音。広いスペクトルの熱雑音にたいし、空洞の信号は狭い。

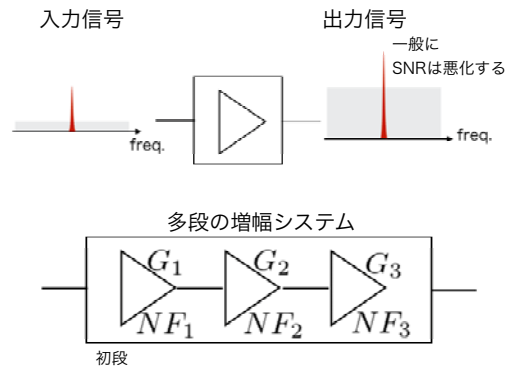


図 25: 雑音指数とその伝搬

いと、いくら信号を大きくしても感度は上がらない。SNR の悪化を抑える回路設計が必要である。SNR の悪化は雑音指数 (NF: Noise Figure)、入口と出口での SNR の比、

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (51)$$

で表される。理想的な場合は、 $NF = 1$ (0 dB) ということである。

通常、アンプを多段に用いるが、各段のゲインを G_i 、雑音指数を NF_i をすると、全体の雑音指数は、フリスの式

$$NF_{total} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} \dots \quad (52)$$

で与えられる。つまり、初段の NF_1 が支配的である。初段のアンプはできるだけ NF が良くゲインが大きいものにするのが良い。また、初段のアンプまでは、損失が小さく短いケーブルで接続するのが良い。

RF の波形を直接に記録するのは困難であるから、常套手段として周波数変換の手法を用いる。周波数変換の原理は簡単である。2つのサイン波

$$a(t) = A \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (53)$$

$$b(t) = B \sin(\omega_2 t + \phi_2) \quad (54)$$

を掛け算すると、

$$a \times b = \frac{AB}{2} [\cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2))] \quad (55)$$

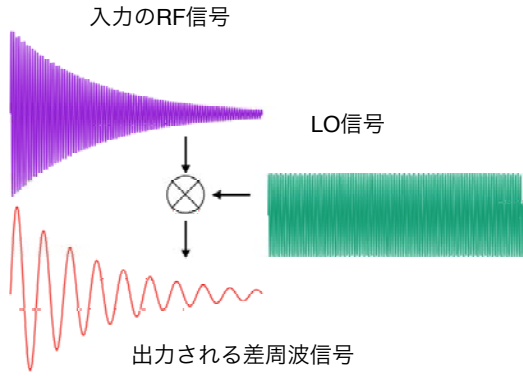


図 26: 周波数変換。ミキサと呼ばれる掛け算器で、RF 信号と L.O. 信号から差周波数信号に変換する。

となり、差周波数成分と和周波数成分が生じる。バンドパスフィルタ (あるいはローパスフィルタ) で差周波数成分だけを取り出すことができる。これを応用して、図 26 に模式的に示すように、空洞の信号と近い周波数の基準 RF 信号 (L.O. と呼ばれる) を導入し、差周波数成分だけを取り出すと、元の RF 信号を扱いやすい周波数に変換された (ダウンコンバート) 信号が得られる。

複数の RF 信号を共通の L.O. を用いてダウンコンバートすると、周波数変換前の相対的な位相関係が、変換後も保たれる。つまり、変換後の扱いやすい周波数で相対的な位相を測定すれば、元の RF で相対位相を測定したのと同値である。図 27 のように、ダイポール空洞とレファレンス空洞を、共通の L.O. でダウンコンバートすることで、信号の位相を検出できる。今の場合、ビーム位置の正負、あるいは 90 度ずれたモードの除去、ができるということである。

検出の感度を上げるには、狭帯域化することが重要であるが、単純なバンドパスフィルタで狭帯域化するのは困難である。そこで、周波数変換と組み合わせて、図 28 に示すヘテロダイン検出のスキームが用いられる。これは、バンドパスフィルタとダウンコンバートを交互に行うことで、最終的に信号周波数の近傍のごく狭い帯域だけを取り出す手法である。数 GHz の RF 信号を数 MHz の帯域幅で検出することができる。

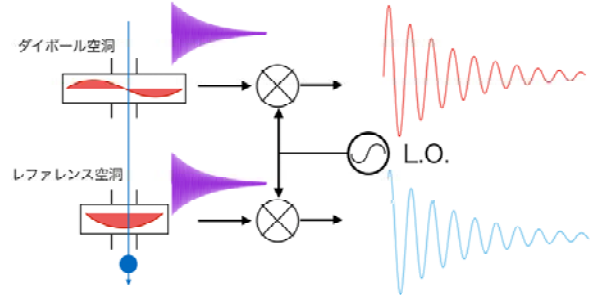


図 27: 位相検出の原理。共通の L.O. でダウンコンバートすることで、ダイポール空洞とレファレンス空洞の信号の位相関係が保たれる。

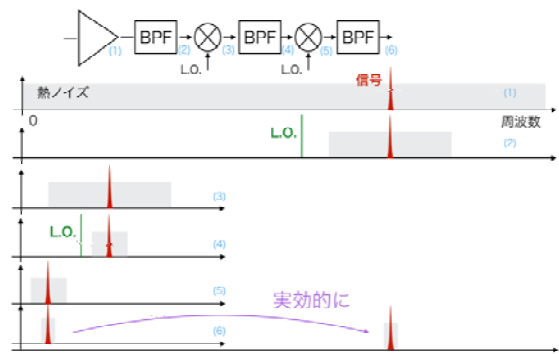


図 28: ヘテロダイン検出のスキーム。2 段階のダウンコンバートの例。単純にバンドパスフィルタで帯域を制限するスキームではできないような、非常に狭い帯域を取り出すことができる。

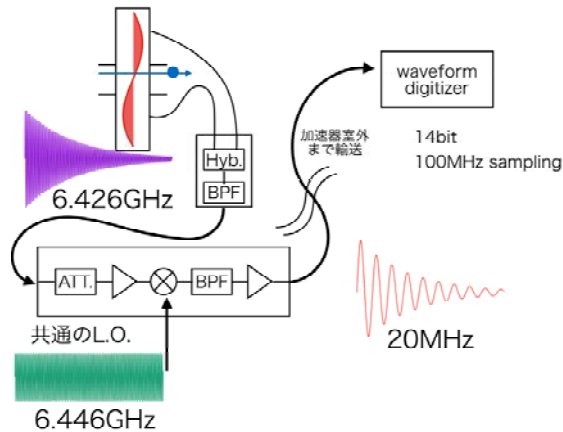


図 29: 検出回路全体の信号の接続。ハイブリッドコンバイナ (Hyb.) で2つのポートの信号を合成してから、ダウンコンバータに入力される。ここまでが、加速器室内の BPM のすぐ近くに置かれる。そのあと、加速器室外まで信号を輸送し、波形記録される。

検出回路の構成の全体は、図 29 のようになる。信号の減衰を避け感度良く検出するため、各 BPM の架台の近くに処理回路が設置される。BPM 空洞は、X 方向と Y 方向のポートがそれぞれ2つあり、位相が反転した信号が出力される。2つのうち片方を使用し、もう片方は終端しておいても良いが、ここでは、信号を増やす為に合成して用いる。位相反転の2つのポートをまず180度ハイブリッドで合成し、バンドパスフィルタで様々な高次モードのノイズを取り除く、受動回路ユニットを経由したうえで、周波数変換を行う。減衰の少ない 20 MHz の信号に変換されたあと、加速器遮蔽の外まで信号を輸送する。減衰サインカーブの信号は、波形レコーダで記録される。14 bit で 100 MHz サンプルの ADC を用いている。

6.2 信号の解析

波形を取り込んだ後の処理はソフトウェアで行う。DDC(デジタルダウンコンバージョン)と呼ぶ手法を用いる。フィッティングなど他の手法もあるが、処理が単純で高速なのが、DDC の利点である。20 MHz の信号を 100 MHz でサンプル

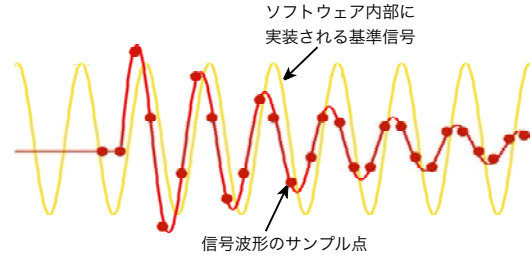


図 30: DDC の処理のイメージ。内部にソフトウェアで実装した基準信号でダウンコンバートする。

すると、図 30 に示すような離散的なサンプル点になる。DDC は、ソフトウェア内部に基準信号 (L.O.) のサイン波 (角周波数 ω_{DDC}) を想定し、ソフトウェアでダウンコンバートの処理を行うものである。

各サンプル点 i に対して、複素振幅

$$y_{DDC}(t_i) = \sum_i g(t_j - t_i) e^{i\omega_{DDC} t_j} y(t_j) \quad (56)$$

が得られる。ここで、 g はガウシアンフィルタで、

$$g(t_i) = \sqrt{2\pi}\sigma \exp\left[-\frac{t_i^2(2\pi\sigma)^2}{2}\right] \quad (57)$$

である。 σ がフィルタの帯域幅を意味する。

これを振幅と位相に変換すると、

$$A(t_i) = \sqrt{y_{DDC}(t_i) \cdot y_{DDC}^*(t_i)} \quad (58)$$

$$\phi(t_i) = \arctan\left[\frac{\text{Im}(y_{DDC}(t_i))}{\text{Re}(y_{DDC}(t_i))}\right] \quad (59)$$

が得られる。中心周波数 ω_{DDC} は、信号パルス内で一定の位相が得られるように調整を行う。ここで、パルス内で振幅と位相の代表値とするサンプル点 i を決め、以降の処理に用いる A, ϕ とする。

ダイポール空洞について A_d および ϕ_d 、レファレンス空洞について A_r および ϕ_r 、が得られたとき、レファレンス空洞を用いて次のように電荷について規格化とともに位相の原点の取り直しを行い、

$$I = \frac{A_d}{A_r} \cos[\phi_d - \phi_r] \quad (60)$$

$$Q = \frac{A_d}{A_r} \sin[\phi_d - \phi_r] \quad (61)$$

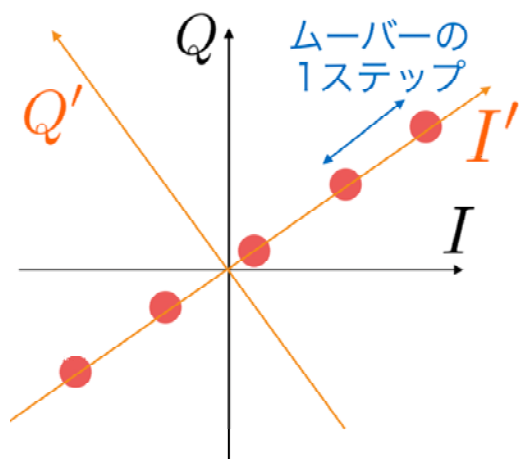


図 31: IQ 平面でのキャリブレーション。ビームまたは BPM を動かした時に動く方向が、ビーム位置の軸である。

とした、 I, Q が、ビームの位置および角度の情報を持つ出力となる。

ビーム信号は IQ 平面上の一点に対応するわけであるが、位置信号と角度信号の分離と、距離のスケールを付ける必要がある。ビームを分かった量だけ動かすか、BPM を分かった量だけ動かすと、図 31 のように IQ 平面上で信号が動く。動く方向が位置に対応する軸 (I') で、それと直交する方向が角度に対応する軸 (Q') である。また、その 1 ステップがビームあるいは BPM を動かした距離に対応する。(I, Q) 表記から (I', Q') 表記へは、回転行列で変換することができる。

7 空洞 BPM の例

ここでは、実際に加速器でどのように空洞 BPM が用いられているか例をあげて紹介する。最初に、筆者が開発に携わった ATF の空洞 BPM の例を示す。現在では、特に XFEL の施設で空洞 BPM が標準的なモニタとして利用されている。各施設でどのような設計がなされているか比較するのも興味深い。文献を紹介しておくので詳細はそれらを参考にしていきたい。

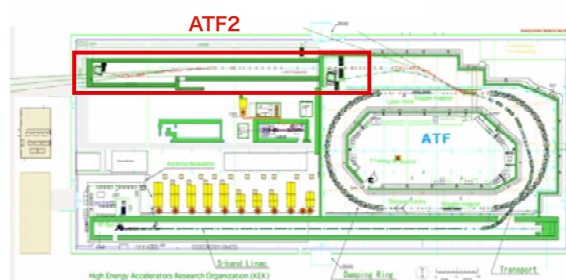


図 32: ATF2 の概要



図 33: ATF2 ビームラインの写真

7.1 ATF2 の例

ATF では、ダンピングリングからの取り出しビームラインの拡張である、ATF2 の建設を 2008 年頃に行った (図 32)。これは、低エミッタンスの電子ビームをリニアコライダの最終収束部を模擬したビーム光学系で収束する技術開発を行う試験ビームラインである。最終収束システムでは、ビームを各 Q マグネットの中心に数 μm の精度で調整する必要がある。そのため、全ての Q マグネットにはその磁極に位置調整された空洞 BPM を設置した。空洞 BPM を主なビーム位置モニタとして採用した世界で初めての例である。図 33 にビームラインの写真を示す。

ATF2 の BPM システムの建設は国際協力で行われ、空洞の設計は BINP (露) から導入したものをベースに、KEK でパラメータを決定した。検

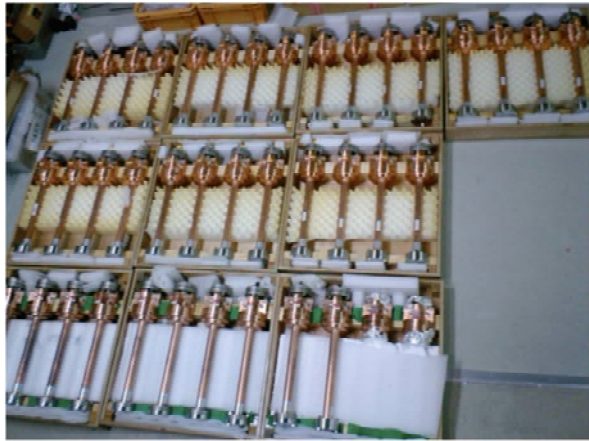


図 34: ATF2 建設時に量産した空洞 BPM

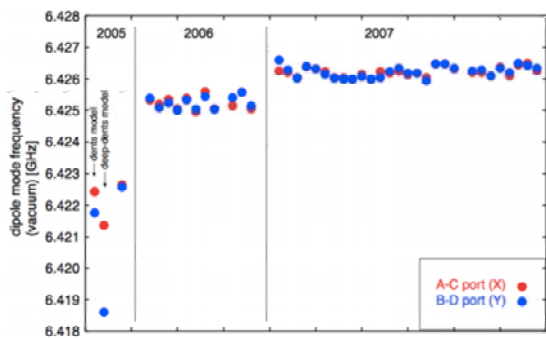


図 35: ATF2 の空洞 BPM の周波数

出回路は SLAC(米) で開発し製作した。空洞の製作は PAL(韓) で行った。デジタル波形処理のソフトウェアは UCL(英) で開発した。

量産は PAL の研究所内にある真空炉でロウ付けをし、周波数と XY 混合の調整を行った。図 34 に示すように、43 個の空洞 BPM が製作された。Q マグネットに貫通する形で取り付けるため、Q マグネットの長さのビームダクトが付いている。また、KEK にて 4 個のレファレンス空洞を製作した。

試作を 2005 年度に、2006 年度と 2007 年度に量産を行った。KEK で受け入れ時に全数測定した、空洞の周波数、 Q_L 値、 Q_{ext} 値、XY 混合を、図 35~38 に示す。安定した性能のものが製作できていることが分かる。

各 Q マグネットは、図 39 に示すユニットになっ

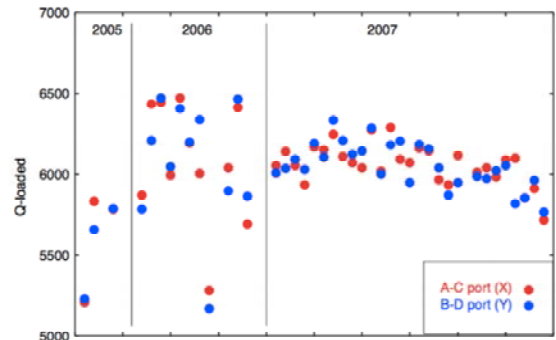


図 36: ATF2 の空洞 BPM の Q_L 値

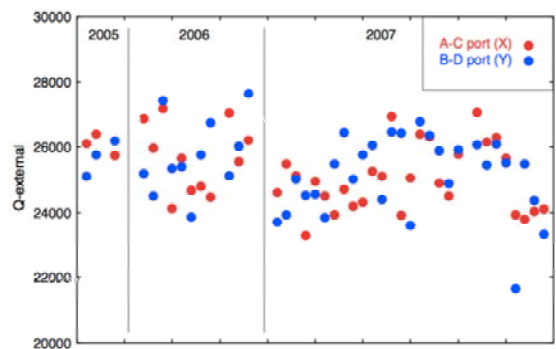


図 37: ATF2 の空洞 BPM の Q_{ext} 値

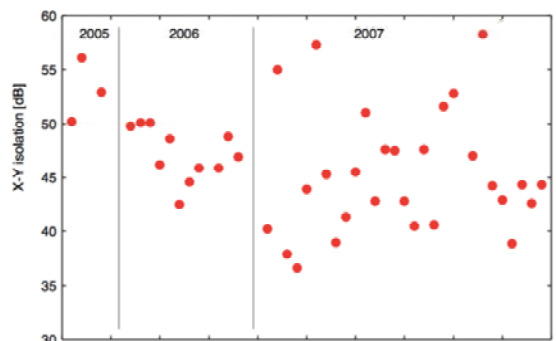


図 38: ATF2 の空洞 BPM の XY 混合

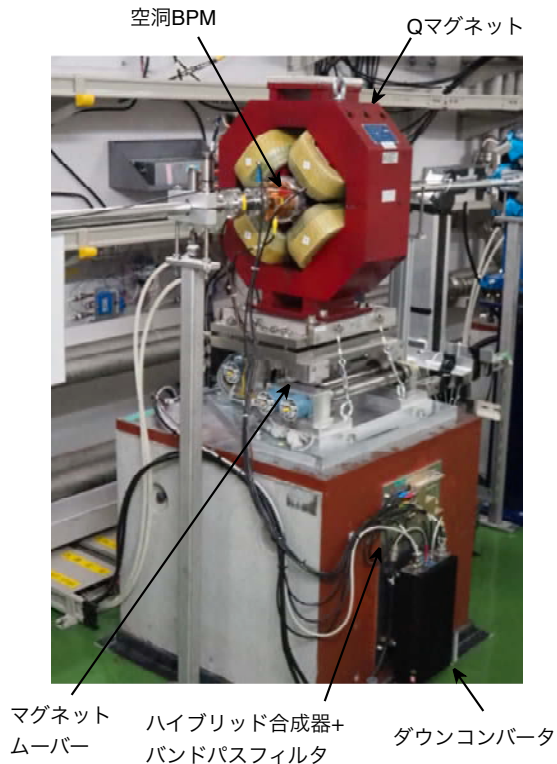


図 39: ATF2 の Q マグネットのユニット

ている。コンクリートピラーの架台に、水平垂直に遠隔で動かせる精密ムーバーが設置され、その上に Q マグネットが乗っている。BPM は Q マグネットのコアに固定されている。ATF では、ビームにたいして Q マグネットを動かしてビーム調整を行う。また、BPM のキャリブレーションは、Q マグネットごとにこのムーバーを動かして行う。ピラーの側面には検出回路系が設置されている。図 40 に回路系の詳細を示す。BPM の 4 つの出力ポートは、1.5 m の同軸ケーブルで、まずハイブリッド合成器とバンドパスフィルタによる受動的なユニットに接続される (上部の小さな箱)。X,Y の 2 系統になった RF 信号は、続いてダウンコンバータで 20 MHz の信号に変換される。これを加速器遮蔽の外まで輸送し、VME のデジタル波形レコーダで記録される。

ATF は試験加速器ということもあり、環境の安定性は良いとは言えないが、毎週 1 度の BPM キャリブレーションを行なって運用している。(必

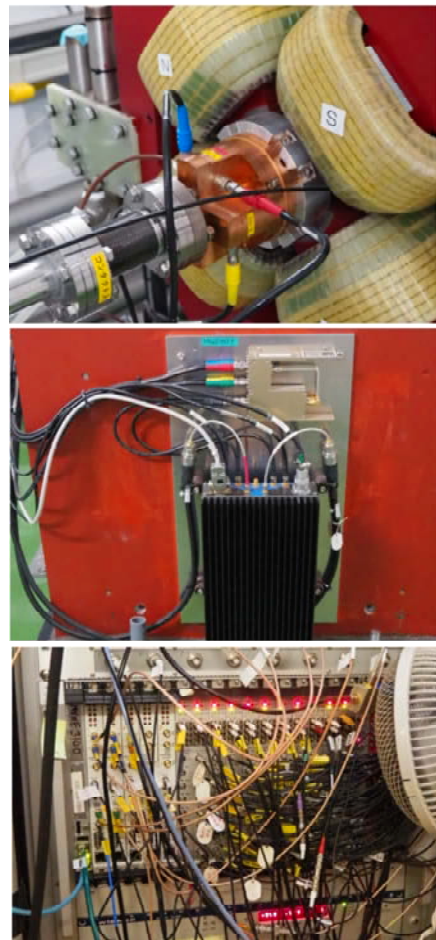


図 40: ATF2 の空洞 BPM と検出回路。(上) マグネットに取り付けられた空洞 BPM、(中) 架台に取り付けられた検出回路系、(下) 加速器室の外に置かれた波形レコーダ。

ずしも必要無いようであるが、今ではルーティンとなっているようだ。) 通常はダウンコンバータの入力部に 20 dB アッテネータを挿入した状態で運転し、分解能 250 nm を確認している。なお、アッテネータを外した場合、分解能 30 nm が得られている [6]。

7.2 XFEL の例

SLAC の LCLS では、アンジュレータの架台に合計 34 台の空洞 BPM が設置されている [7][8]。11.384 GHz の X-band の周波数で、Q 値は 3500 である。ダイポールモード選択的カプラの設計はこのグループから提案されていた [5]。X-band 信号のケーブルでの損失や安定性を気にしたのか、空洞からダウンコンバータまで導波管で接続しているのが特徴的である。

韓国 PAL の XFEL では、LCLS から多くの技術を導入しているが、空洞 BPM も LCLS と近い X-band の 11.424 GHz で Q 値 3500 のものを使用している。ただし、導波管を設計変更し、同軸変換してケーブルで信号を接続するものになっている [9]。また、ATF で行なった空洞 BPM の製作の経験も生かされているようである。

イタリアのシード型 FEL 施設、FERMI では、アンジュレータ部に 10 台の空洞 BPM が用いられている。周波数 6.50 GHz で Q 値が 7500 程度で、構造は ATF の設計に近い。ダイポール空洞とレファレンス空洞とが一体となった銅のパーツで製作されている。その製造工程が独特である [10]。まず、導波管部をワイヤー放電加工で貫通させ、そのとき空洞部も一緒にくり抜いてしまい、そのあとで空洞部を埋めて完成させる。

SACLA では、アンジュレータ部に 4760 MHz の空洞 BPM が用いられている [11][12]。ステンレス製で Q 値が 500 程度と低く設計されている。Q 値を低くすることで、周波数調整が必要無い、また、時定数が短く調整無しでも XY 混合の影響が小さい、という考えである。導波管部がビームダクトに切り込んでいる設計が特徴的である

が、これも製作を簡単にする工夫である。時定数が短い為、アナログ IQ 検波で信号検出を行う。アンジュレータ部の BPM は専用の XY ムーバーに設置されており、空洞中心をビームが通過するように調整できる。アンジュレータ部の 20 台の BPM で分解能 0.6 μm 以下を達成している。SACLA については OHO2013 のテーマで取り上げられており、前坂氏によるビーム診断の講義の中で空洞 BPM について解説されている [13]。

SwissFEL は、C-band の技術を採用しており、SACLA から多く導入しているが、空洞 BPM も SACLA の設計を採用している [14]。また、EuroXFEL も同じグループが担当しており [15]、SACLA の設計を 3.3 GHz にスケールした設計となっている。特に、高繰り返しビームでもバンチ間の信号が重ならないことと、チューナーを必要とせず量産向きであるという点が目的に叶っている。

7.3 その他の例

ユーザー施設の加速器で普通に使われるようになったのは最近になってからであるが、空洞 BPM は実は古くからある技術である、SLAC では 2-mile accelerator の建設当初から使われていた [16]。2856MHz のダイポール矩形空洞が 2 つとレファレンス空洞が一体化されたものが、スイッチヤードに設置されていた。

SLAC では、1990 年代にリニアコライダの最終収束部の開発を行った FFTB の実験で、ナノメートルのビーム位置制御に必要な高分解能の空洞 BPM の開発が行われた [17]。アルミ製のブロックでネジ留めで 3 つの空洞を構成し、それらを真空チェンバに入れたセットアップで分解能評価試験を行い、25 nm の位置分解能を実証した [18]。

同時期に、やはりリニアコライダの開発を目的として、BINP のグループが 13.5 GHz の空洞 BPM を開発し、BNL において実験を行い、100 nm 以下の位置分解能を実証している [19]。

KEKのATFでは、ダンピングリング下流の取り出しラインのビーム性能が確立してきた2005年頃、BINPで開発したC-band空洞BPMを3台用いて、これらを高剛性多軸ムーバーに設置し、デジタル波形処理の技術を駆使して、分解能試験を行った。16.9 nmの位置分解能を実証した[20][21]。さらにそれに引き続き、専用の薄型矩形空洞を開発し、最終収束部の大きな角度発散を想定した高分解能空洞BPMの試験を行った。分解能8.7 nmを実証した[22]。このタイプのBPMは現在のATF2の最終収束部でも使用されている。

8 まとめ

空洞型ビーム位置モニタは、シングルパスで高分解能が得られ、中心の信頼性も高い。現在では、XFELで標準的に用いられているモニターである。

XFELのビームモニタ担当、の人以外では空洞BPMを扱う機会が少ないかもしれないが、原理はわりと簡単で、この1時間程度の講義で分かったつもりになってもらえたと思う。

ナノメートルオーダーの高分解能でビーム位置を測定したい、あるいは、微弱電荷を高感度で測定したい、などの特殊な要求があったとき、空洞BPMという選択肢も検討してみたら良いかもしれない。

9 おわりに

本テキストに含めたかったが、あえて全体の見通しを良くするために割愛した(実は時間が足りなかった)内容がいくつかある。一つ目は、RFシミュレーションによる空洞の設計についてである。スロットの位置や大きさの最適化、製作誤差の交差、導波管から同軸への変換部の設計、などは計算機シミュレーションで行う。実はこれは筆者が設計を行った当時とソフトウェアツールも変わってきている。二つ目は、空洞の基本

特性試験についてである。ネットワークアナライザを用いたポート間の測定から Q_L や Q_{ext} を計算する手順、アンテナを動かして空洞の電气的中心を確認する試験、ビーズを入れて空洞の電場形状を測定する手順、などは、RF測定の良い入門である。三つ目は、空洞をビーム試験した結果や豊富な信号波形の例である。ビーム角度信号がどのくらい発生するか、ノイズとなる信号はどのくらい混入するか、計算通りの感度が出ているのか、ATF2で実際に運用したシステムの安定性なども紹介したかった。四つ目は、BPMの位置分解能評価法についてである。いわゆる3-BPM法によって、ビームジッタよりも小さなnmオーダーの位置分解能が評価できる。あるいはSVDの手法で多数のBPMの相関から、各BPMの位置分解能を導出することができる。上記の内容の、RF設計や測定の一般的な手法であったり、ビーム位置モニタの性能評価の一般的な手法であったりするところは、他で学ぶこともできるであろう。OHO2006のテキスト[1]では、これらについてもいくらかは述べている。

今年のOHOセミナーは、コロナ禍の影響でZOOMによるリモート開催となった。例年ならば、施設見学で空洞BPMの実物が加速器に設置されている様子を直接見てもらえるところだったが、リモートではその体感が得られないのが残念である。そこで、実物に代わるものとして、ATF2空洞BPMのほぼ実物大ペーパークラフトを、本テキストの特別付録として掲載することにした。自分の手で組み立てながら、空洞BPMの内部構造を学ぶことができる。

OHOセミナーは、今年で36周年を迎え、これまで多くの講師がテキストを執筆されてきた。近年は、その解析が進むとともに、ページ数偏重主義の傾向も感じられる。100ページを超えるとマイスターとして顕彰されるようにすらなった。昨年度は、総ページ数も1講師あたりの最大ページ数もが過去最大を記録した。昨年までの統計で、1講師あたりの平均ページ数は29.9ページだそうである[23]。ただし、ページ数の突出した

一部のテキストが平均値を引き上げており、ピークは21ページである。(本テキストは、ここまでに一応ピーク値を超えており、特別付録まで含めると平均値を超えていることになる。)本テキストでは、ページ数は無駄に増やさず、ビームモニタの専門家でもなくとも読み通して流れをつかみやすいものにするのを心がけた。積分総ページ数が10000ページを超えたOHOテキストであるが、近年の傾向として、背表紙の色が毎年変わるという予想もしなかった現象が発生している。これは加速器科学の多様性を象徴したものなのか、あるいは研究分野の不安定性を示唆するものだろうか。それとも単に、解析班と事務局の小競り合いの結果なのか。本テキストが配布された際に、まず背表紙の色に注目するとともに、加速器分野の一研究者として、今後の傾向を見守りたい。

謝辞

毎年のOHOセミナーに関するとりまとめに尽力していただいている、応用超伝導加速器センター山本康史氏に、この場を借りて感謝します。

OHOテキストのページ数をめぐる問いのきっかけを生み出し、研究分野の創成に貢献した許斐太郎氏に、感謝します。

日々の雑務に追われてOHOセミナーのスライド準備がなかなか進まなかった筆者を激励してくださった清水洋孝氏に感謝します。

参考文献

- [1] 本田洋介, OHO セミナー 2006, ”ナノビーム診断”
- [2] J.Woithe *et al.*, “Let’s have a coffee with the Standard Model of particle physics! ”, Phys. Educ. 52 (2017) 034001
- [3] Feynman, Leighton, Sands, ”Lectures on Physics”, オンライン英語版は、CalTech のサイトから無料で読める <https://www.feynmanlectures.caltech.edu>
- [4] H.Wiedemann, ”Particle Accelerator Physics (4th edition)”, Springer
- [5] Z.Li *et al.*, ”Cavity BPM with Dipole-mode-selective coupler”, Proceedings of PAC03 (2003)
- [6] Y.I.Kim *et al.*, ”Cavity beam position monitor system for the Accelerator Test Facility 2”, Phys. Rev. ST-AB, 15, 042801 (2012)
- [7] R.Lill *et al.*, ”Linac Coherent Light Source Undulator RF BPM System”, SLAC-PUB-12452, Proceedings of FEL2006 (2006)
- [8] R.Lill *et al.*, ”Design and Performance of the LCLS Cavity BPM System”, SLAC-PUB-13067, Proceedings of PAC07 (2007)
- [9] S.Lee *et al.*, ”PAL-XFEL cavity beam position monitor pick-up design and beam test”, Nucl. Instrum. Meth. A 827 (2016) 107-117
- [10] M.Forno *et al.*, ”A novel electromagnetic design and a new manufacturing process for the cavity BPM (Beam Position Monitor)” Nucl. Instrum. Meth. A 662 (2012) 1-11
- [11] H.Maesaka *et al.*, ”Sub-micron resolution rf cavity beam position monitor system at the SACLA XFEL facility”, Nucl. Instrum. Meth. A 696 (2012) 66-74
- [12] Y.Otake, H.Maesaka *et al.* ”Beam monitor system for an x-ray free electron laser and compact laser” Phys. Rev. ST-AB, 16, 042802 (2013)
- [13] 前坂比呂和, OHO セミナー 2013, ”高精度ビーム診断”
- [14] B.Keil *et al.*, ”Status of the SwissFEL BPM System”, Proceedings of IBIC2015 (2015)

- [15] B.Keil *et al.*, "The European XFEL Beam Position Monitor System", Proceedings of IPAC10 (2010)
- [16] E.V.Farinholt *et al.*, "Microwave Beam Position Monitors at SLAC", IEEE Trans. Nut. Sci. NS-14 1127 (1967)
- [17] S.C.Hartman, T.Shintake *et al.*, "Nanometer resolution BPM using Damped Slot Resonator", SLAC-PUB-95-6908 (1995)
- [18] T. Slaton, G.Mazaheri and T.Shintake, "Development of Nanometer Resolution C-band Radio Frequency Beam Position Monitors in the Final Focus Test Beam", Proceedings of LINAC1998 (1998) p911
- [19] V.Balakin *et al.*, "Experimental Results From a Microwave Cavity Beam Position Monitor", Proceedings of PAC1999 (1999) p461
- [20] S.Walston *et al.*, "Performance of a Nanometer Resolution BPM System", Proceedings of EPAC2006 (2006) p1256
- [21] S.Walston *et al.*, "Performance of a high resolution beam position monitor system", Nucl. Instrum. Meth. A, 578, 1-22 (2007)
- [22] Y.Inoue, Y.Honda *et al.*, "Development of a high-resolution cavity-beam position monitor", Phys. Rev. ST-AB, 11, 062801 (2008)
- [23] 山本康史, private communication.

A 特別付録

本文中に解説した ATF2 の空洞 BPM の、だいたい実物大のペーパークラフトを掲載する。完成すると図 41 のようになる。実際に手にとって空洞 BPM の構造を学ぶことができる。作り方を図 42 に示す。この OHO テキストを切り取って作っても良い。しかしそれでは 1 台きりしか作れないので、厚手の紙に印刷して使うと良いだろう。アルミホイルで作ると本当に RF 空洞になるかもしれない。

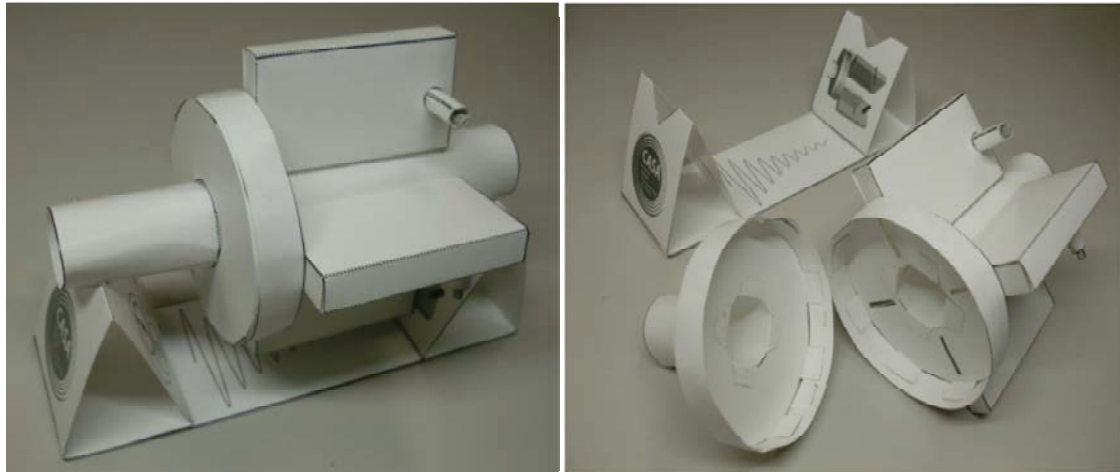


図 41: 空洞 BPM ペーパークラフト完成図

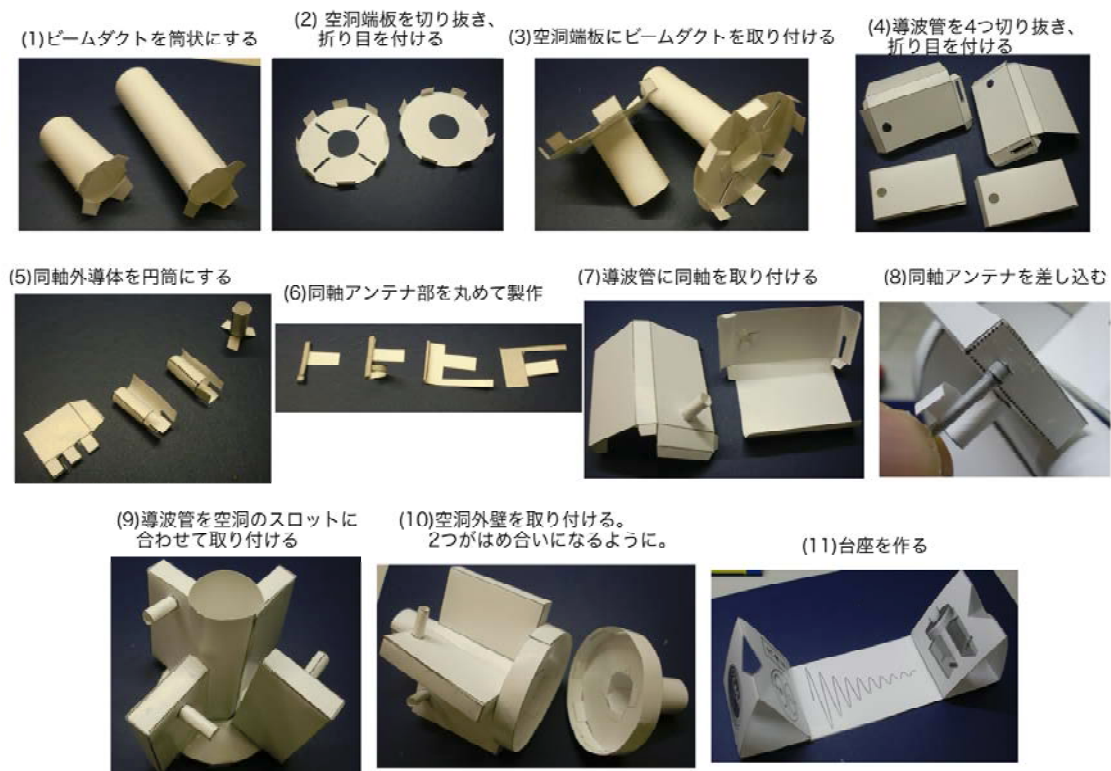


図 42: 空洞 BPM ペーパークラフトの作り方

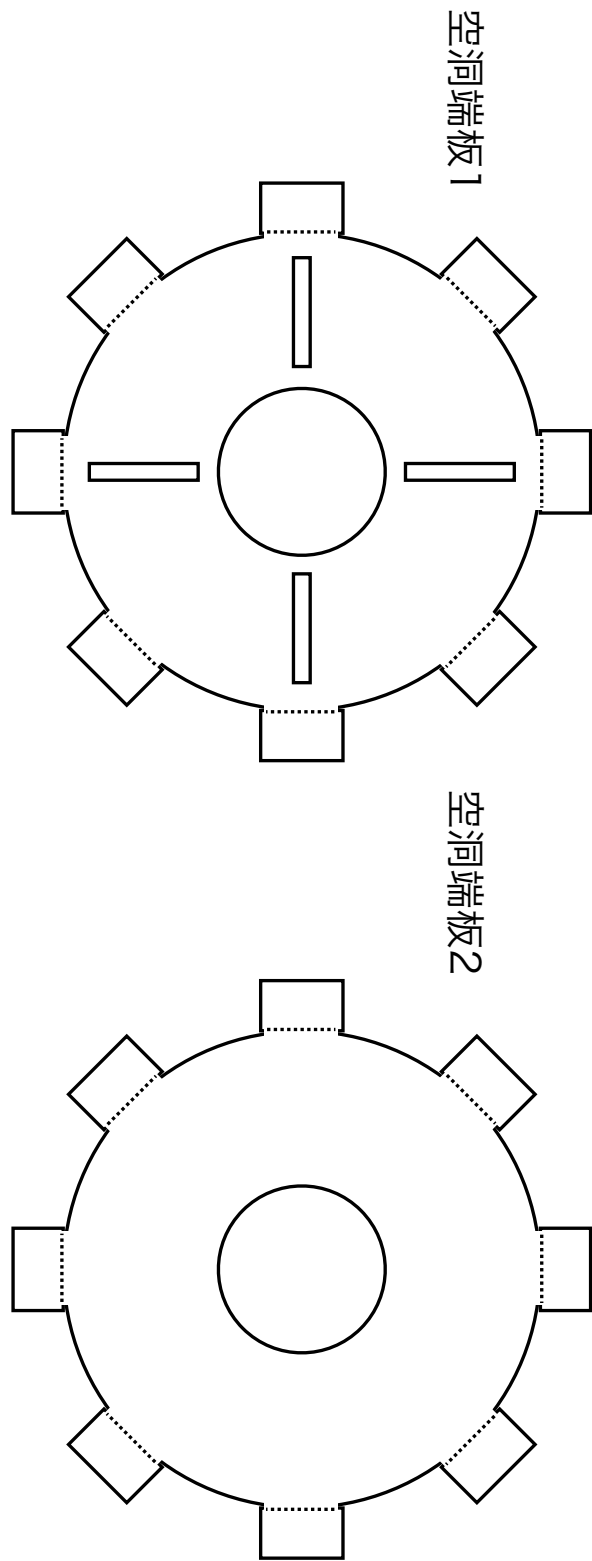
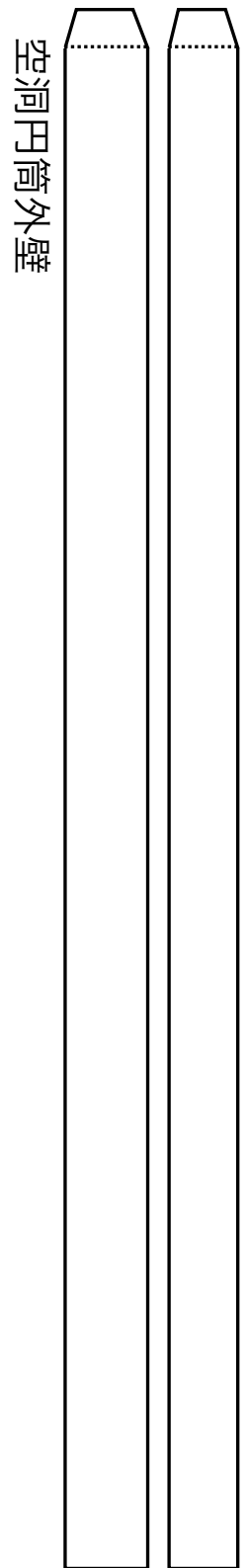


図 43: 空洞 BPM ペーパークラフト 1

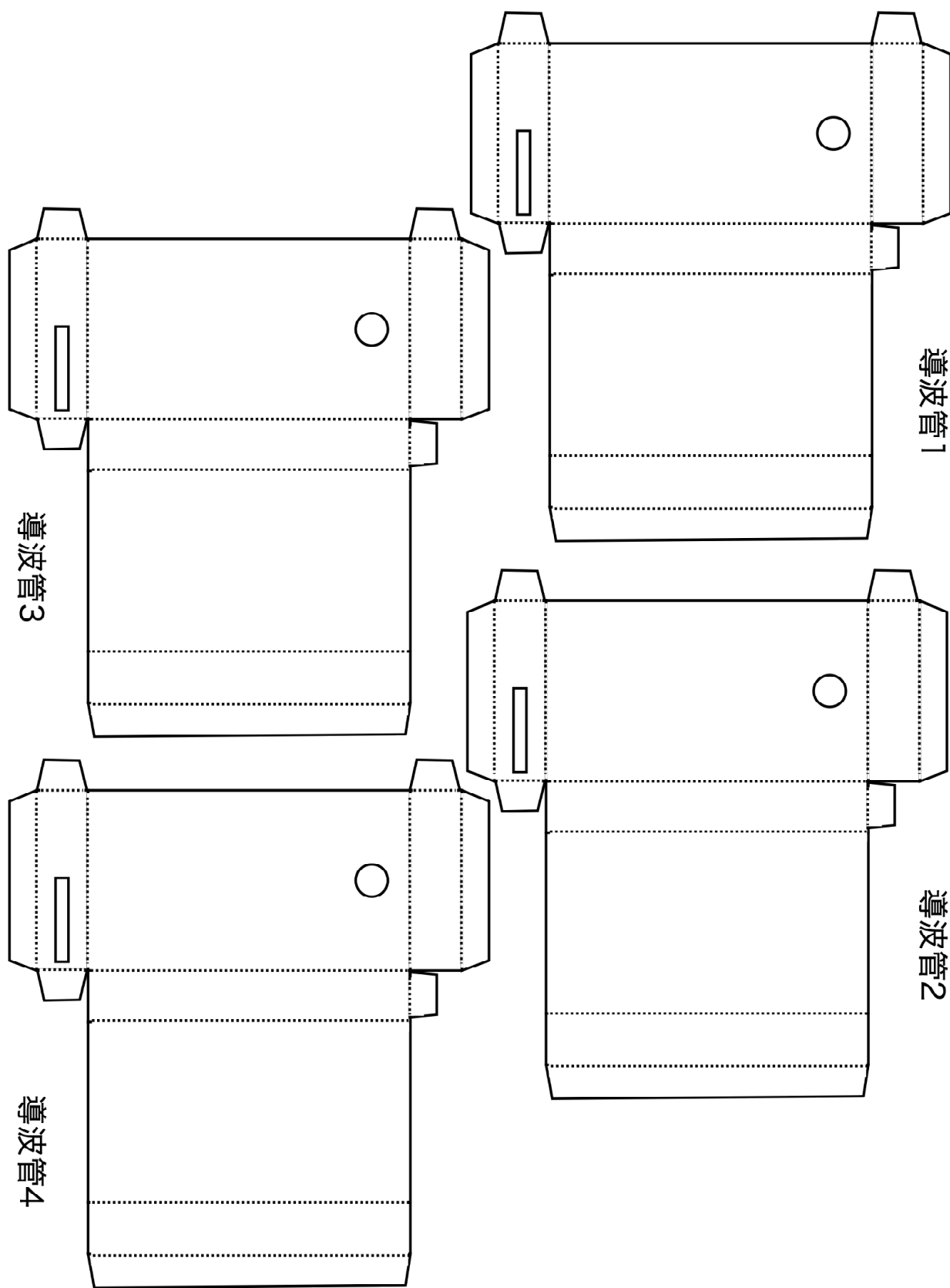


図 44: 空洞 BPM ペーパークラフト 2

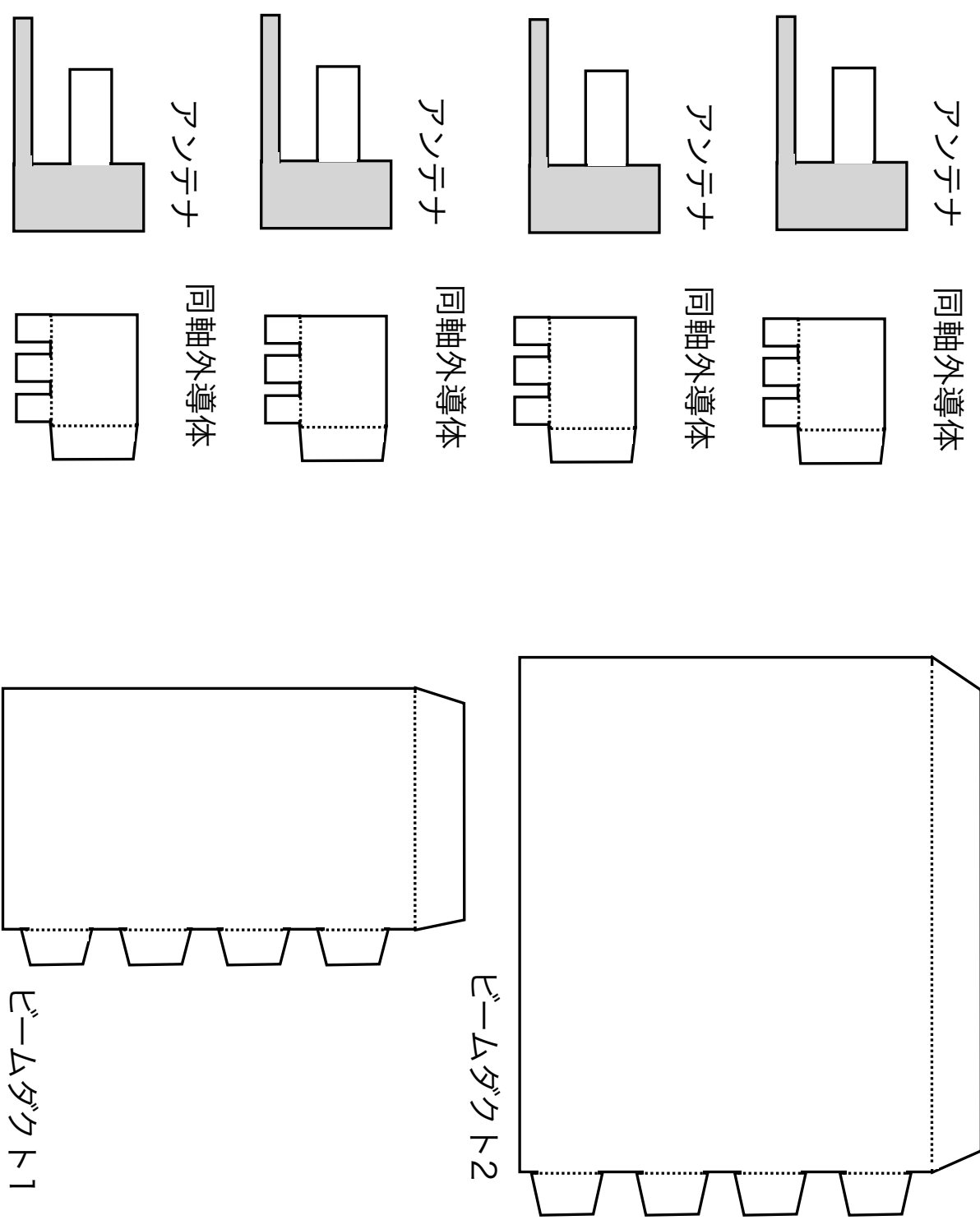
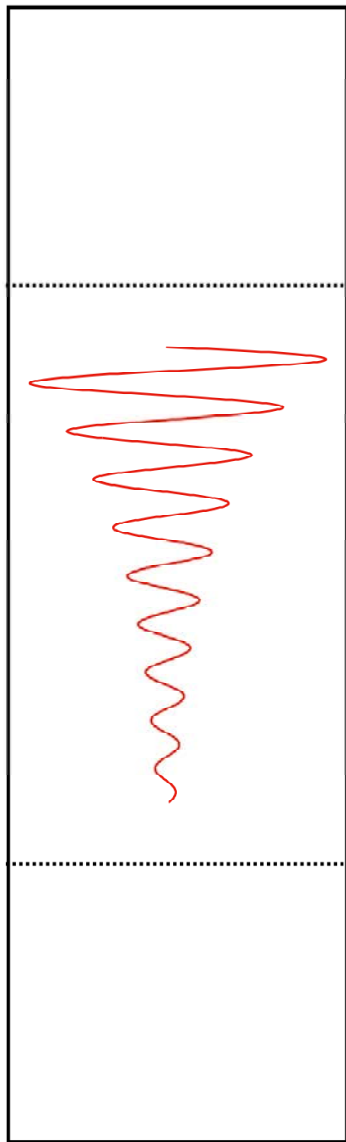
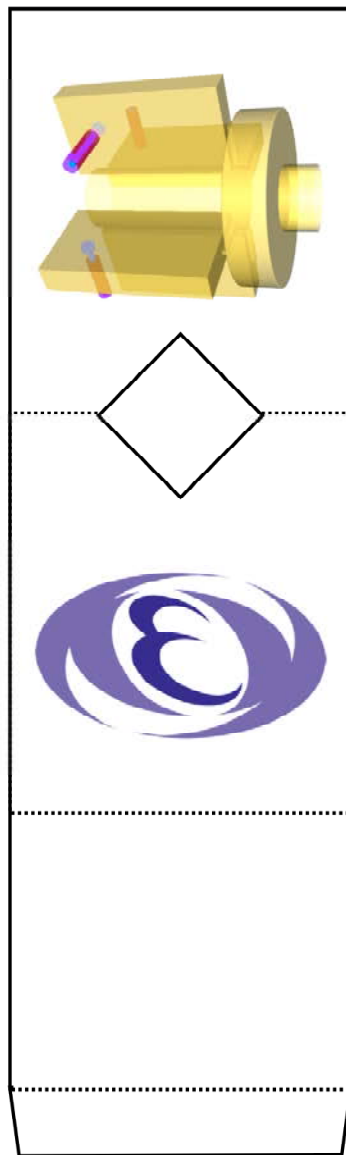


図 45: 空洞 BPM ペーパークラフト 3



ベース



台座2



台座1

図 46: 空洞 BPM ペーパークラフト 4

