

IDENTIFICATION OF WALL CURRENT MONITOR WITH CURRENT TRANSFORMER

Kenichi YANAGIDA, Hiroshi YOSHIKAWA, Shinsuke SUZUKI, Akihiko MIZUNO,
 Hironao SAKAKI, Toshihiko HORI, Yuichi ITOH, Masahiko KODERA,
 Atsushi KUBA, Hideyuki KOTAKI and Hideaki YOKOMIZO
 JASRI-JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team
 SPring-8, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, 678-12, JAPAN

ABSTRACT

A wall current monitor is a kind of current transformer. Therefore a behavior of its output follows the theory of transformer. A wall current monitor consists of a single-turn primary loop on which a beam current flows, a single-turn secondary loop on which the wall current flows and a load impedance (resistance). When a secondary current flows on the load impedance the voltage emerges which we observe. This voltage corresponds the induction voltage of transformer. A wall current monitor is often covered by a current return path which consists a part of secondary loop. This type is regarded as a TM_{010} mode resonant cavity with magnetic pick up.

壁電流モニタと電流トランスの同一性

1.はじめに

加速器、特に線型加速器に於いて壁電流モニタ（以下WCMと記す）や電流トランス（以下CTと記す）は非破壊型の電流モニタとして使用される。CT出力は多くの教科書等[1][2]でラプラス変換を用いて説明される。それらの記述中で、インダクタンスは実定数として扱われる。そのため、ラプラス逆変換の結果は2次側の起磁力（2次電流 I_s と2次巻き数 N の積）は1次側の起磁力に等しくなることを示す。

他方、WCM出力の説明ではビーム電流のイメージ電流として、反対方向に、同じ大きさの壁電流 I_w が無条件に流れるとする。そして、電流が負荷抵抗 R （若しくは負荷インピーダンス Z ）上を流れるとき、電圧 $I_w R$ （ $I_w Z$ ）が発生し、これがオシロスコープ等で観測される。壁電流を2次電流と置き換えると、仮想のインダクタンス中の1次起磁力と2次起磁力が等しくなると言う点でCTと同じである。

本研究会ではこのようなCTとWCMの起磁力の類似性から、CT及びWCMが同一であるという理論を展開する。

2.CTの等価回路

図1にCTの等価回路を示す。CTの等価回路は、ビーム電流 I_b をシングルターンの1次電流とし、

コアに巻かれた N ターンのコイル上を2次電流が流れる。2次電流の流れる正の向きは、コアの内側でビーム電流と同じ向きとする。2次電流の負荷インピーダンス Z は負荷抵抗 R 及び浮遊容量 C の並列接続である。負荷抵抗は実装抵抗と信号検出用50 Ω ケーブルとの合成抵抗である。例えば、実装抵抗が10 Ω の場合、負荷抵抗は8.33 Ω になる。負荷インピーダンスは周波数に依存する複素インピーダンスとなる。

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega CR} \quad (1)$$

(1)式に於いて浮遊容量 C はCT出力の立上り時間に関係する。浮遊容量が十分小さく（ $C \rightarrow 0$ ）、ビーム電流の立上り時間が大きい場合には；

$$Z = R$$

としても差し支えない。

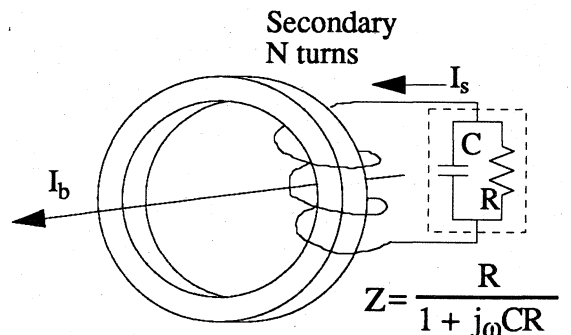


図1 電流トランスの等価回路。

トランスの理論を用いると、誘導起電力Vは；

$$V = -j\omega(L_m I_b + L_s I_s) \quad (2)$$

と表される。ここで、 L_m は相互インダクタンス、 L_s は2次ループの自己インダクタンスである。1次ループの巻き数を N_p 、2次ループの巻き数を N とすると、 L_m 及び L_s は以下のように表される。

$$L_m = \frac{N_p N \mu_r \mu_0 S}{l} \quad (3)$$

$$L_s = \frac{N^2 \mu_r \mu_0 S}{l} \quad (4)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_r は比透磁率、 S は磁性体の断面積、 l は磁気回路の長さである。CTが磁性体のトロイドを含む場合、比透磁率は複素数であり、周波数に依存し変化するが、それは別の機会に述べるとして、ここでは比透磁率を実定数とする。加速器用CTの場合1次ループはビーム電流のシングルパスであり、 $N_p=1$ である。そこで(2)式は次のようになる。

$$V = -j\omega \frac{N \mu_r \mu_0 S}{l} (I_b + N I_s) \quad (5)$$

(5)式で I_b は1次側及び $N I_s$ は2次側の起磁力(単位は[A・T])を表す。一般的なトランスの説明として、1次側に電流が流れた場合、その電流による磁束を打ち消すように2次電流が流れる。理想的なトランス(透磁率が十分大きい)場合、(5)式括弧内は十分小さくなる、即ち $N I_s = -I_b$ となる。実際には、透磁率は無限に大きくないので、 $|N I_s| < |I_b|$ が常に成り立つ。

ところで、2次ループで発生した電圧は全て負荷インピーダンスの両端に印加され；

$$V = Z I_s = \frac{R I_s}{1 + j\omega C R} \quad (6)$$

となる。そこで(5)及び(6)式から I_s を消去するとVは；

$$V = -\frac{R I_b}{N} F \quad (7)$$

$$F = \frac{1}{1 + \frac{R}{j\omega N^2 \mu_r L} + j\omega C R} \quad (8)$$

$$L = \frac{\mu_0 S}{l} \quad (9)$$

と表される。ここでFは周波数領域に於ける結合係数(無次元)である。絶対値の最大値は1である。結合係数が1に近いほど結合度が大きく、理想変圧器に近い。Lは磁性体が無い場合の、即ち中空トロイドのインダクタンスである。(8)式中の $j\omega C R$ は立上りに寄与する項である。浮遊容量が十分小さいと、高い周波数領域まで結合係数は大きくなる。

立上りの時定数は $-C R$ である。同様に $\frac{R}{j\omega N^2 \mu_r L}$ はドループに寄与する項である。ドループ時間(時

定数)は $\frac{N^2 \mu_r L}{R}$ である。 $\frac{R}{j\omega N^2 \mu_r L}$ が小さい周波数領域では結合係数は1(実数)に近くなる。

3.WCMの等価回路

図2にWCMの等価回路を示す。以下にWCMの一般的な説明を記す。ビーム電流 I_b は1次電流として、真空チェンバの中心を流れる。壁電流 I_w はビーム電流のイメージ電流である。即ち、ビーム電流が流れると、それに付随して壁電流は同方向に流れるが、電荷が逆であるため、逆電流が流れる。真空チェンバは通常抵抗値は0であるため、電圧は発生しない。そこで、真空チェンバの途中に負荷抵抗 R を挟み込む(実際は浮遊容量との並列結合で負荷インピーダンス Z)。壁電流が負荷抵抗を流れる時に電圧が発生し、出力となる。真空チェンバの外側に磁性体のトロイドを置く場合もある。

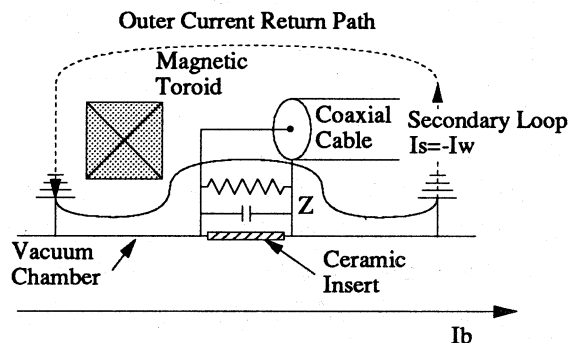


図2 壁電流モニタの等価回路。

実際問題として、イメージ電流は流れているのか?。DCビームではDCのイメージ電流が流れているのか?。実際には、壁電流モニタの出力にバンド幅が存在しており、DCのビーム電流では出力しない。また長い矩形パルスのビーム電流では、立上りと立下りの微分波形出力のみで、フラットな部分の出力は無い。このような考察から、イメージ電流は実際には流れていないと思われる。

そこで壁電流モニタ両端の真空チェンバは何らかの方法で接地されているものとする(接地されていなくても良いのであるが)、図2のように外側に電流リターンパスが出来、閉ループが出来。これはCTの2次ループに相当し、2次巻き数は1である。ループの途中に負荷インピーダンス Z が挟まっている。負荷インピーダンスは負荷抵抗 R と浮遊容量 C との並列結合で(1)式ようになる。浮遊容量が生じるのは、セラミックインサートの部分がコンデンサとして働くためである。浮遊容

量はCTの場合と比べて小さく、出力の立上り時間が小さくなる。

4. 空胴共振器モニタの等価回路

壁電流モニタによっては図3のように、外側に導電性の電流リターンパスを持つことがある。

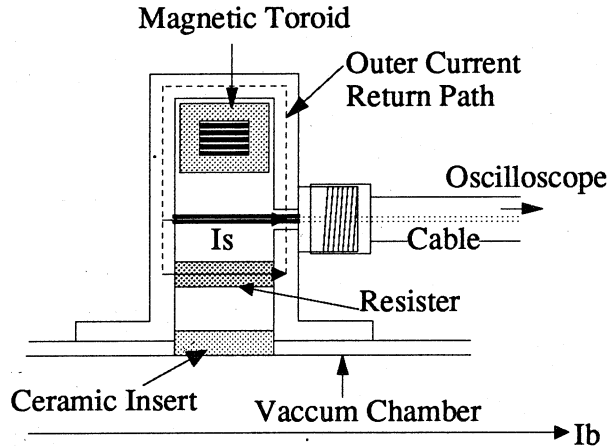


図3 外側電流リターンパス付きの壁電流モニタ。

この場合、空胴共振器(TM₀₁₀)の磁界結合型モニタの性格が強くなる。図3に於いて、磁性体のトロイド、実装抵抗及びセラミックインサート取り除き、ループを小さくすると、ピックアップ付きの空胴共振器となる(図4)。

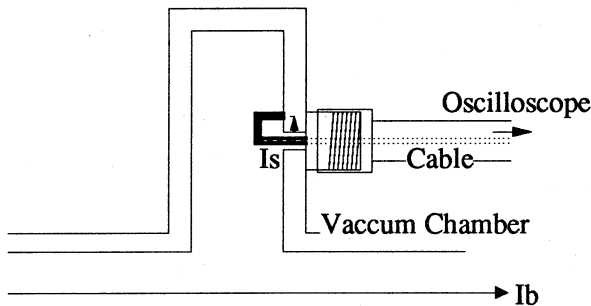


図4 空胴共振器モニタ。

空胴共振器のピックアップ(2次ループ)に於いても、トランスの理論により出力は(7)式のようなになる。但し、ビーム電流が真空チェンバの中心を流している場合のみ有効であり、中心から少しずれるとTM₁₁₀モードの様な高次モードが発生し、出力が若干増加(減少)する。この原理を利用したものが、空胴共振器位置モニタである。勿論高次モードが発生しない(高次モードインピーダンスが0である)場合や、2次ループ中に磁性体のトロイドを配置し、TM₀₁₀モードによる磁束を相対的に大きくしてやると、位置による出力の変化は無

くなる。

逆に図5のようにTM₁₁₀モードに沿うように磁性体を配置すると、TM₀₁₀モードの磁束が相対的に小さくなり、位置による出力のみが得られると思われる。今後、TM₁₁₀モードの周波数応答性や、出力の大きさ等を定式化し、非破壊型の位置モニタを製作する予定である。

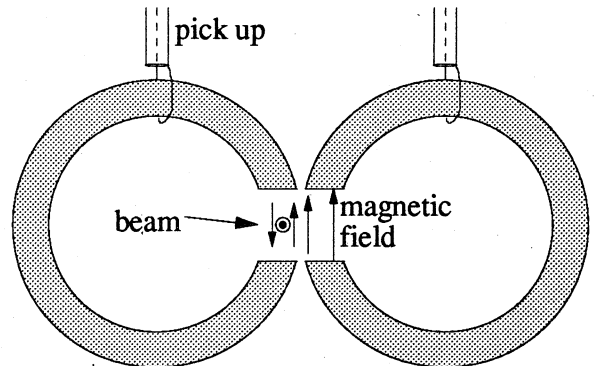


図5 TM₁₁₀モードを用いた非破壊型位置モニタの例

5. まとめ

電流トランス、壁電流モニタ及びTM₀₁₀モード空胴共振器モニタの出力メカニズムは全く同等であり、トランスの理論からその周波数領域の出力関数が得られる。

時間領域での出力の振舞は別の機会に述べる。時間領域への変換はフーリエ逆変換を行えば良い。フーリエ逆変換を行うためには、ビーム電流を仮定する必要がある。試行関数としてヘビサイドのステップ関数が最適である。その理由は、任意のビーム波形はステップ関数の線形近似で表すことが可能だからである。

参考文献

- [1] H. Koziol, CERN 89-05 (1989) 63
- [2] R. Littauer, Physics of High Energy Particle Accelerators (American Institute of Physics, 1983) 869