

ここで、実験データを十字点で示し、計算値を実線(又は点線)で示す。電極#2-#3間の結合も同様な傾向を示し電極構造は設計通りに仕上がっていることを確認した。

測定結果(図5(a))によるとストリップライン伝送路特有の定在波による共振構造が見える。中央部のディップ周波数は $f=538.2\text{MHz}$ 、第1ローブの最大感度周波数と S_{21} はそれぞれ $f=315.8\text{MHz}$ 、 $S_{21}=-39.704\text{dB}$ である。第2ローブのそれは $f=837.05\text{MHz}$ 、 $S_{21}=-36.365\text{dB}$ である。校正信号の周波数は、読出回路の検波周波数と同一とし $f=300\text{MHz}$ である。この周波数での結合度はほぼ最大である。しかし、結合度の大きさは1%程度で従来型BPMに比べ約1/10であることがわかった。これは、大口径化により電極間距離が大きくなったこと、さらに電極開口角が小さくなったことで電極間の電磁結合が弱められたことに起因する。また、パイプ内径に対する電極の張出しが無くなったことで、磁界結合度(k_L)が電界結合度(k_C)に比べ弱められたこと、また、第1ローブと第2ローブに非対称性が生じ、 $f=300\text{MHz}$ における結合度がさらに低減したと考えられる。このことは、校正信号源の出力を従来型BPMに対し10倍大きくする必要があることを意味する。パルス動作で励振させることを考えると読出回路にとってはノイズ源にもなり望ましいことではない。このノイズの影響が問題ないレベルまで抑制可能かどうかも課題となる。

5.2 電極間結合の解析

前節の解析解(11)を用いて電極間結合度の評価を最小二乗法により行ったところ、結合度に対し、 $k_L=0.011$ 、 $k_C=0.013$ 、特性インピーダンスに対し、 $Z_C=42.5\Omega$ 、伝送路電気長に対し $l=128.1\text{mm}$ を得た。図5(a)、(b)に示した計算結果は、これらのパラメータを(11)に代入して得られたものである。こうして得られた解析結果は、測定データと良く一致する。

タイムドメインリフレクトメータ(TDR)による測定から $Z_C=41\pm 1\Omega$ が得られ測定誤差の範囲内で一致した。ただし、TDRの測定では結合のある伝送路の特性インピーダンスが得られるので、厳密には解析解で定義したものと異なることに注意すべきである。しかし、~1%の結合度から解析解と測定で得られる特性インピーダンスの差が測定誤差に比べ充分小さいので、本解析手法の正しさを示している。また、解析された伝送路電気長 l は機械長($l=132.5\text{mm}$)に比べ若干短くなっている。これは、電極端部の効果に起因し3次元的に見ると準TEM波の電磁界が端部で歪められた結果であると考えられる。電極間の相互静電容量と相互誘導係数で表された結合度は、それぞれ1.3%、1.1%となり電界結合が磁界結合に比べ~15%程大きいことが明らかになった。これは、BPM電極のパイプ内径に対する張出しが無くなり電極間を周回する磁界成分が弱められたことに起因する。

図5(a)に示す測定データをよく見ると、中央の

ディップ周波数を中心とする2つのローブが非対称であること、さらに第1ローブと第2ローブの最大感度周波数がディップ周波数に向かって引き寄せられていることがわかる。これは、従来型BPMには見られなかった振舞である。本解析によると大口径BPMの結合度 k_L と k_C の不均衡によりこのような非対称性が生じること、さらにディップ周波数もずれることが明らかになった。結合度 k_L を変化させた場合の計算結果(図5(a))が示すように不均衡が大きいほどローブの非対称性が大きくなり、従来型BPMのように $k_L\approx k_C$ の場合にのみ対称性が回復することがわかった。

図4(b)に S_{21} 位相の測定データと計算結果を示した。計算結果は測定データと概ねよく一致しているが、周波数が $f<200\text{MHz}$ の領域で両者の差が大きくなっている。特定の周波数領域での不一致は、従来型BPMでは見られなく、大口径BPM特有のものと考えられる。大口径BPMでは、軸方向と方位角方向の電極-パイプ間のギャップ長を微妙に調整しており、電極端部での準TEM波の電磁界の歪みが影響すると考えている。今回の解析では、残念ながら電極端部の効果を3次元的に取扱うことはできない。しかしながら、 $f<200\text{MHz}$ を省いた周波数領域での曲線的な位相変化をよく再現する。このことは、本解析手法がストリップライン型BPMの動作原理を充分説明する手法の一つであることを示している。

6. まとめ

新陽電子ラインに適応した大口径ストリップライン型BPMの開発が進行中である。筆者等は、電極間の結合を電磁結合のあるストリップライン伝送路として扱えば、物理的な見通しがよくなり定量的な解析が可能になることを明らかにした。さらに、本解析により電極伝送路の周波数特性がよく再現されることを明らかにした。今回の成果は、電磁結合を利用する高精度なBPMのゲイン校正に応用される。

参考文献

- [1] M. Masuzawa, in Proceedings of the First International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, 2010, pp. 4764-4768.
- [2] K. Akai, *et. al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 499, 191-227 (2003).
- [3] I. Abe, *et. al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 499, 167-190 (2003).
- [4] T.Suwada, N.Kamikubota, H.Fukuma, N.Akasaka, and H.Kobayashi, Nucl. Instrum. & Methods. A 440 307-319 (2000).
- [5] E. Medvedko, *et al.*, in Proceedings of the 2008 Beam Instrumentation Workshop (BIW08), Tahoe City, California, U.S.A., pp. 190-193 (see <http://www-als.lbl.gov/biw08>).
- [6] S. J. Orfanidis, "Electromagnetic Waves and Antennas" (see <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidis/ewa>).