



Title	ライナックビーム窓近傍で発生するウェーク場のビーム波形測定に与える影響 II
Author(s)	本間, 彰; Homma, A; 田中, 秀樹 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 177, 25-34
Issue Date	1996-05-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42473
Type	departmental bulletin paper
File Information	177_25-34.pdf



ライナックビーム窓近傍で発生するウェーク場の ビーム波形測定に与える影響 II

本間 彰 田中 秀樹 北市 雅敏 沢村 晃子 成田 正邦
奥田 修一* 山本 保* 末峰 昌二*

(平成 7 年 12 月 27 日受理)

A Study of the Influence of a Wake-Field Generated by an Electron Beam Passing Through a Linac Beam Exit Window on Measurement of the Beam II

A. HOMMA, H. TANAKA, M. KITAICHI, T. SAWAMURA, M. NARITA,
S. OKUDA*, T. YAMAMOTO*, S. SUEMINE*

(Received December 27, 1995)

Abstract

The influence of a wake-field on measurements of a beam waveform and a method for suppressing that influence were studied. Beam entrance-holes of various dimensions were inserted in front of a pickup loop, whose function was to suppress the field generated by the beam passing through the entrance-hole end. The suppression was observed in experiments with a single-bunch electron beam at ISIR of Osaka University Linac. Numerical analysis with a beam cavity interaction code (BCI code) was also performed in order to corroborate the suppression in experiments. The main pulse caused by the electron bunch and the oscillating signal following the main pulse due to the residual wake-field was observed. The power-ratio of the former to the latter were compared with the calculation. There was fair agreement in several different hole geometries.

はじめに

線形電子加速器(以下ライナック)が射出するビーム測定においてビーム自身が境界の変化によって誘導する場が測定結果に影響を与える。前報告ではこのような場の生成とビーム測定に与える影響について述べた^{[1][2]}。本報告では更にこのビームバンチ自身が生成する場(以下ウェーク場)の低減を行なう目的で、いくつかの境界形状を有する貫通孔を採用し、実験と数値解析の対応によりこの効果を確認することにした。実験には阪大産研ライナック施設を用い、数値解析には T. Weiland の BCI(Beam Cavity Interaction) コードを参考とした^[3]。

はじめにウェーク場抑制のための境界形状について述べ続いてシングルバンチビームを用いた実験結果と数値解析によって得られた結果について述べる。

1. ウェーク場と抑制のための境界形状

1. 1 ウェーク場

無限円筒内を光速で進行する電子ビームバンチがつくる電磁場は、進行方向に垂直な平面内のみ存在し、その後方には存在しない。これに対して、ライナックで加速されたビームバンチは、ビーム窓等の急激な変化のある境界を通過する場合輻射電磁場を生成し、この場はビームバンチが進行するとその後方を追うようにして伝搬することが知られている。このような場のことを加速器の工学・物理学の分野ではウェーク場（航跡場）と呼んでいる。ライナックで加速されたビームバンチは輸送系、ビーム取り出し窓等の境界を通過する。従って一般にビームバンチの形成する場を測定し、ビームの時間的挙動を観測するときその結果はウェーク場の影響を受けたものとなる。ウェーク場の詳細については参考文献に譲る^{[4][5]}。

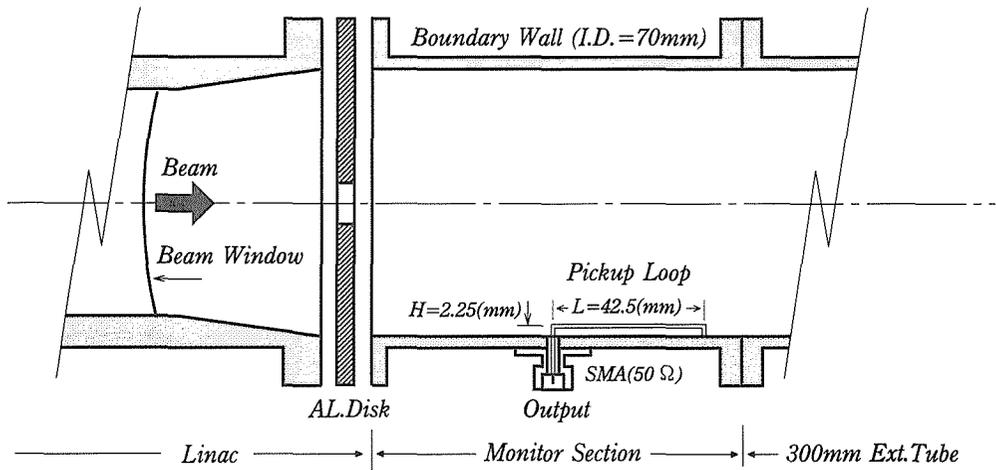


Fig. 1 The monitor section with copper disk and extension tube for the wake-field suppression experiment.

Fig. 1 はビーム波形観測に用いるワイヤーライン型ビームモニターの体系図である。ライナックで加速されたビームはビーム窓を通過し図に示された軸上を進行する。円筒境界壁に終端するビームバンチの電場はピックアップループによって測定することができる。実験の詳細は後に詳述する。この図ではライナックビーム窓で発生するウェーク場の伝搬を阻止する目的でディスクを挿入してある。(実際にはフランジ面は密着している)。また 300 mm の境界の延長はビームがモニターセクションを離れるときに新たに発生するウェーク場の影響を観測の時間領域に入れられないためである。この体系におけるライナックビーム窓で発生するウェーク場の伝搬の様子を数値解析によって得た。Fig. 2 参照。

$z=0$ がビーム窓に相当する。ビーム窓で生成したウェーク場はディスクにより伝播を妨げられるが貫通孔において新たにウェークが発生しているのがわかる。更にこの場はビームの後方を追いかけるように進行する。Fig. 3, は Fig. 2 における電場の時間変化を示したものである。観測位置はビーム窓から $z=92$ mm, 中心軸からの距離 $r=33$ mm である。はじめに現れるピークは主としてビームバンチに由来する電場であり、後続する波形はウェーク場による電場と考えられる。本報告では後述するようにディスクの代わりにディスクに厚みを持たせコリメータを用い、貫通

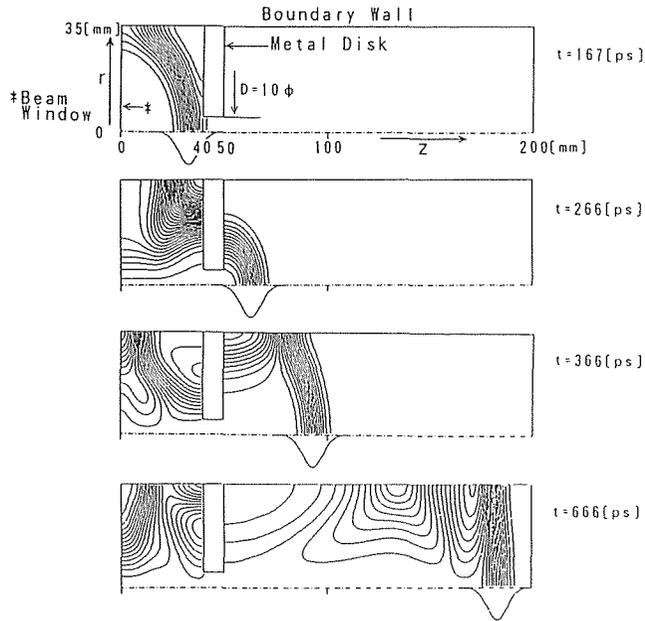


Fig. 2 The lines of electric field caused by a Gaussian bunch of beam passing through the entrance-hole of copper disk.

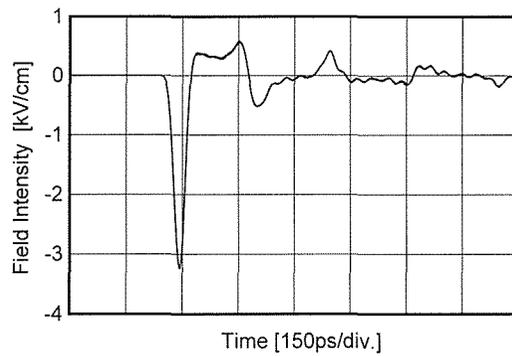


Fig. 3 Radial component of electric field intensity $E_r(r, z, t)$ at $z=92$ mm and $r=33$ mm in Fig. 2.

孔の形状を変化させることにより貫通稿孔を通過する際に発生するウェーク場の変化，すなわち抑制効果（以下単にウェーク場の抑制）について試べた。

1. 2 境界形状

本研究で採用したウェーク場抑制のための境界形状を図に示す。Fig. 4 a)はコリメータ状境界である。ビーム出口の角に曲率を持たせ半径を $R=10$ [mm], 20 [mm], 30 [mm] と変化する。便宜上この境界のことを collimator boundary と呼ぶ。b)は出口孔をフレア状としコリメータの直線部分からフレア一部に変化する変曲点に曲率を持たせたものであり $R=10$ [mm], 20 [mm], 30 [mm] と変化させた。便宜上 flared boundary と呼ぶ。c)は円筒境界近傍の境界形状変化によるウェーク場の影響を調べる目的で採用されたもので同様に $R=10$ [mm], 20 [mm], 30 [mm] と変化させた。この境界形状を同様に bowl boundary と呼ぶことにする。これらの境界とその形状変化によりウェーク発生の機構についての知見を得る。R を境界形状パラメータと呼ぶことにする。

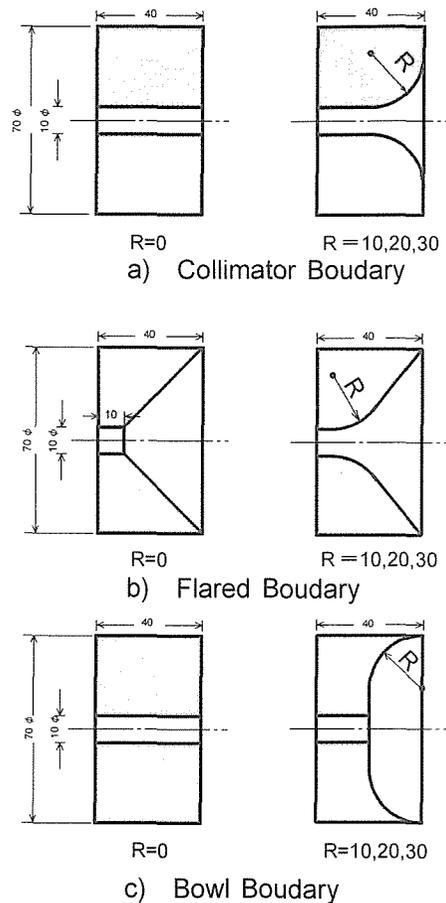


Fig. 4 A beam entrance-hole with different boundaries : a) the collimator boundary, b) the flared boundary and c) the bowl boundary.

2. シングルバンチ応答実験

2. 1 シングルバンチビーム測定体系

実験に用いたモニターは直径 70 mm の円筒境界内部に、直径 0.5 mm、長さ 42 mm のループを設置、一端を接地し他端を SMA 型コネクタに接続したものである。

Fig.1 参照。モニターの設置場所は放射線場となるため測定はライナック制御室で行ない、この間（およそ 10 数 m）の信号伝送を行なう必要がある。測定対象とする信号は 30 ps 前後の半値幅を持つパルス信号である。以上、本実験で用いた測定体系を Fig.5 に示す。テクトロニクス社製

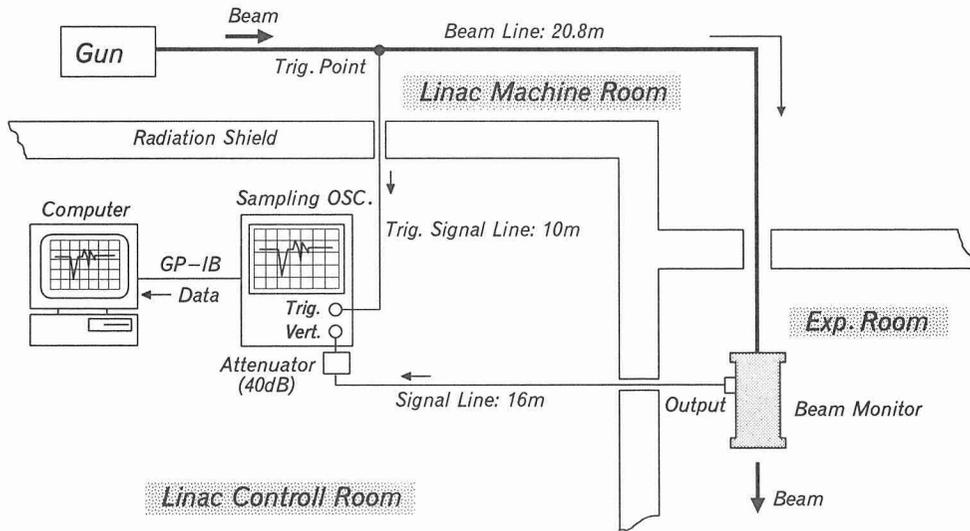


Fig. 5 Schematic diagram of the single-bunch beam experiment. Trigger signal was obtained from a beam core monitor(BCM 1) mounted on upstream of a beam transport tube of the linac.

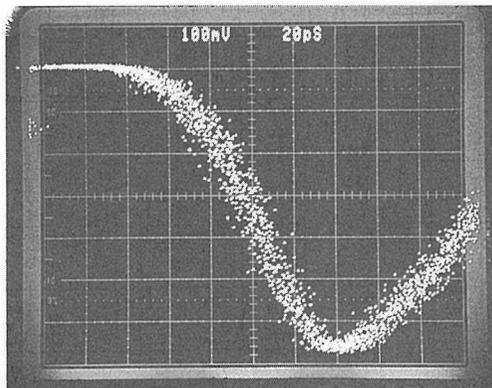


Fig. 6 The rise-time response of the measuring system. The picture was composed by the responses of the number of beam pulses.
V : 100[mV/div.] , H : 20[ps/div] .

サンプリングオシロスコープ（以下オシロ）メインフレーム 7904 に垂直ユニット 7 S 11 + S 6 (HEAD) とサンプリング掃引ユニット 7 T 11, タイムベース発生器 7 B 80 を用いた。信号伝送系は宮崎電線 MCT-358 T (16 m, 26 GHz) である。モニター出力は数 V となるのでサンプリングヘッド入力には信号減衰器 (-40 dB, 18 GHz) を挿入した。検出信号とトリガー信号の間のジッターをより小さくするために、トリガー信号を加速管の最終段に設置されているビームコアモニター (BCM 1) から得た。本測定体系では入力信号に対しトリガー信号はおよそ 100 nS 秒先進している。Fig. 6 は検出信号の立ち上がり応答である。縦軸は 100[mV/div.], 横軸は 20[psec/div] であり多数回の掃引を重ね合わせ表示したものである。ビーム自身の揺らぎ, トリガー信号とビーム間のジッター, オシロスコープのジッター等が反映された結果と見ることができる。この図から, 本実験における測定系のジッターは凡そ 20 pS 前後と見積もることができる。サンプリングヘッド S 6 の立ち上がり応答特性はおよそ $Tr > 30$ ps である。

2. 2 ウェーク場抑制の実験

Fig. 1 のモニターセクションにおいてディスクを取り除き, Fig. 4a) のコリメータ境界を境界内に挿入して実験を行った。Fig. 7 にこのような設定での単バンチビームに対する応答波形を示す。上から境界形状パラメータ $R = 0, 10, 20, 30$ [mm] の結果について重ねて表示した。なお実験に用いたビームはエネルギー 35 MeV, 電荷量 4.5 nC, 半値幅およそ 30 ps である。

Fig. 4b), Fig. 4c) の境界形状についても同様の実験を行った。いずれの場合においてもメインピークの高さは R によってほとんど変化せずメインピーク以降の波形の振幅, 特にメインピークのすぐ後に続く正のパルス信号の振幅が, R の増大にともなり変化する傾向を示した。しかしこ

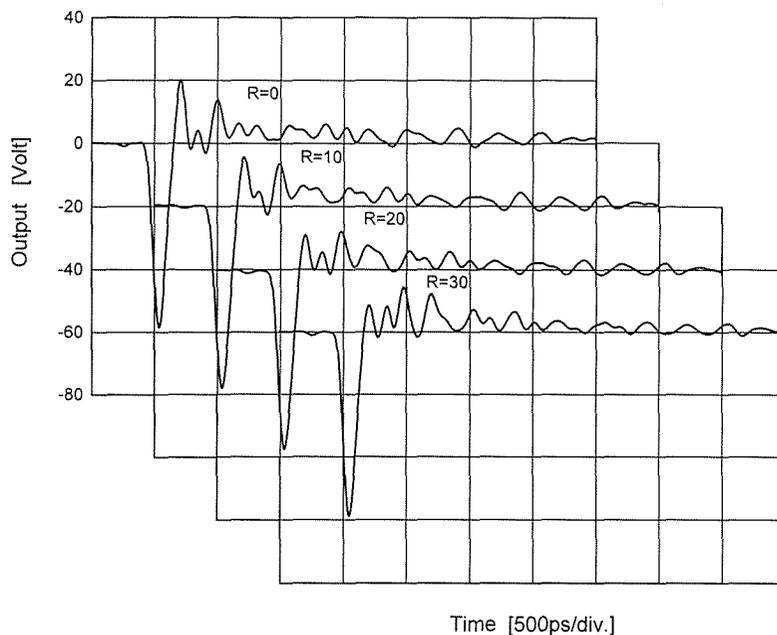


Fig. 7 The output signals from the measurement of a single bunched beam with collimator boundary. R is boundary parameter. $V : 20$ [mV/div.], $H : 500$ [ps/div.] .

のような応答波形から境界形状の変化（エッジ部分やコリメータと境界円筒の接する部分）によるウェーク場の抑制効果を定量的に評価することは困難である。そこで各々の境界における実験結果から得られた出力波形についてウェーク場の波形（メインピークに後続する波形）を二乗積分し、全領域の波形の二乗積分値で規格化して全エネルギー（メインピークを含む全波形）に対するウェーク場のエネルギーの占める割合を比較した。この比のことをウェーク場に対するパワーレシオ（電力比）と呼ぶことにする。Fig. 8に結果を示した。

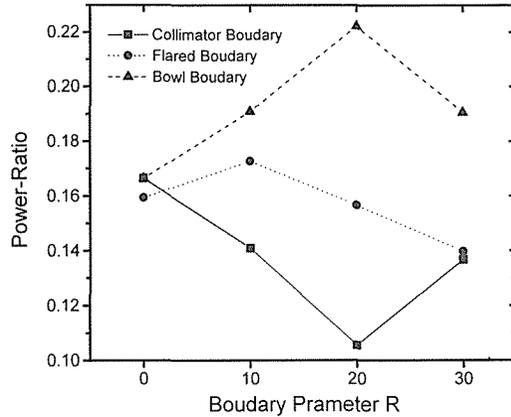


Fig. 8 The power-ratio of main pulse to the residual wake-field vs boundary parameter R obtained by the output signal in Fig. 2.

flared boundary, collimator boundary とともに Rが大きくなると残存するウェーク場が減少する傾向にあることが示された。これに対し円筒境界との連続する bowl boundary では Rの増大に伴いウェーク場の割合は増大する傾向を持つことが示された。このような境界を設定しない場合、すなわち単にビーム窓を通過した場合にはウェーク場に対するパワーレシオは 0.5 と測定された。

3. 数値解析

3. 1 数値解析概略

以上、実験で見たように境界形状パラメータ Rによってウェーク場の影響を低減せしめることがわかる。次に数値解析により円筒境界内の電場の変化を調べてみる。数値解析に用いた BCI コードは、光速で進行する電荷が軸対称の加速構造内に励起する電磁場を計算するプログラムである。時間と空間の差分化アルゴリズムを用いて Maxwell の方程式を解く。このコードについての詳細は昨年報告に示した^[3]。今回の計算では精度の向上を図り 1 メッシュあたり 0.2 mm の精度で計算した。以下に述べる結果は実験と対応を得るため円筒境界上 2 mm の位置（ピックアップアップループの位置）における半径方向電場を示している。縦軸は電場の強度を、横軸は時間を表わす。

3. 2 シングルバンチの形成する電磁場のシミュレーション

シングルバンチ実験の実験体系 Fig. 1 において Fig. 4a) のコリメータ境界を用いた場合の電場の変化を Fig. 9 に示す。

上から $R = 0, 10, 20, 30$ [mm] に対する計算結果を重ねて表示した。Fig. 4b), Fig. 4c) の境

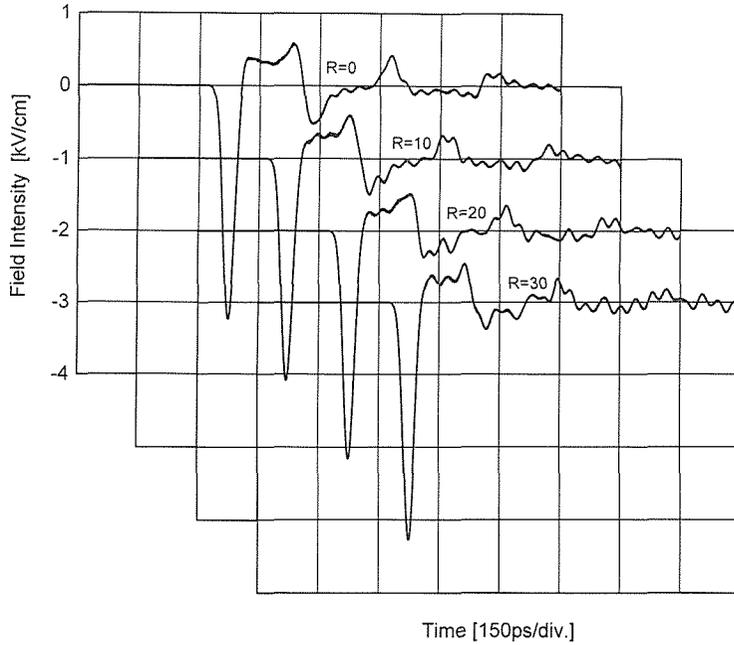


Fig. 9 The electric field determined by the calculations. A Gaussian bunch of beam leaving a beam exit window and passing through beam entrance-hole with the collimator boundary.
V : 1 [V/div.] , H : 150 [ps/div] .

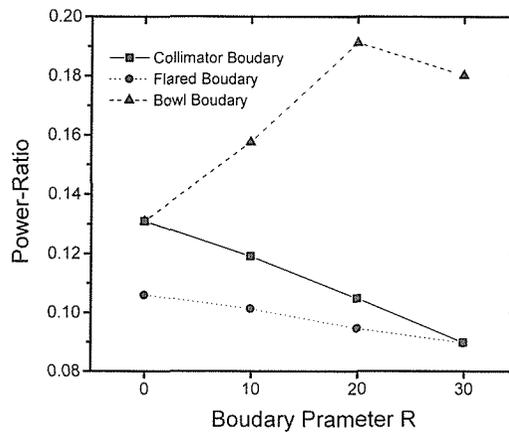


Fig. 10 The power-ratio of main pulse to the residual wake-field vs boundary parameter R obtained by the calculated results in Fig. 9.

界形状に対しても同様の解析を行った。実験結果と同様にいずれの場合においてもメインピークの高さは R によってほとんど変化せずメインピーク以降の波形の振幅－ウェーク場の振幅が、R の増大にともなう変化する傾向を示す。ここでもウェーク場の波形を二乗積分し、全領域の二乗積分値で規格化して全エネルギーに対するウェーク場のエネルギーの占める割合、パワーレシオを比較した。Fig. 10 に結果を示した。

実験結果と比較すると顕著な極大や極小の点を示さなかったが flared boundary, collimator boundary とともに半径が大きくなるとウェーク場の占める割合が減少することが示される。これに対し円筒境界との接続部に当たる bawl boundary については逆に増大する傾向を示している。

4. ま と め

実験値は測定系の分解能の制限により立ち上がり応答は $Tr > \sim 70$ ps と見積もることができるが、計算は単バンチビームの半値幅 (代表的な値) にあわせ ~ 30 ps とした。実験結果ではメインピーク内にもウェークが混在すると考えられる。これらは測定系の分解能の中に埋もれている可能性が高い。これについては測定系の分解能とのデコンボリューション操作によりビームモニター出力端で得られる分解能での出力波形に戻すことを考えている。メインピーク内に混在するウェークの影響については解析結果にも反映されていると考えられる。しかし実験、解析ともにメインピークの変化はウェーク場の変化に比較して少なかった。従って今回の報告では上述の影響は無視しパワーレシオを求めることにした。

両者において flared boundary, collimator boundary, bawl boundary の示した傾向は実験の精度内では良い対応が得られたものとする。これより、ウェークの発生の主な原因はビームが境界を離れるときの境界の変化, すなわち孔の形状に強く依存していることが示されたといえる。bawl boundary においては境界パラメータの変化によるウェーク場抑制に対する効果は期待できず、接続をなめらかにすると (R を増大すると) この部分でのウェークの発生が大きくなっていくことも示された。

おわりに

前回の報告に引き続きウェーク場抑制について実験と解析から検討してみた。30 pS の時間領域での測定はサンプリングに技術に頼らざるを得ない。本実験においては測定の不確かさの尺度となるジッターの時間幅はサンプリングスコープ入力ヘッド (S6) の立ち上がり応答 ($Tr > 30$) と同程度で行うことができた。現在、逆演算によって伝送系の特性による影響を除去する作業が進行中である。これによってより詳細に実験と解析の比較が可能になると考える。

実験を行うに当たり阪大産研ライナック施設の皆さんには多大なるご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 本間 彰 他 『ライナックビーム窓近傍で発生するウェーク場のビーム波形測定に与える影響』北海道大学工学部研究報告, [173], (1995), 65-76.
- [2] A.Homma, T.Sawamura, H.Yamazaki, et al., "MEASUREMENT OF TIME PROFILE OF SINGLE

-BUNCH ELECTRON BEAM WITH WIRELINE PICKUP BY CONSIDERING WAKE-FIELD EFFECT” Nucl. Instr. and Meth. in press.

- [3] T.Weiland , “On the Computation of Electromagnetic Fields Excited by Relativistic Bunches of the Charged Particles in Accelerating Structures” CERN/ISR-TH/80-07, (1980).
- [4] K.L.F. Bane et al., “Wake fields and Wake field Acceleration” ’83 Summer School on High Energy Particle Accelerators, AIP Conference Proceedings No. 127 (1985) 875.
- [5] 竹田誠之, “リニアックの基礎”, OHO’90 高エネルギー加速器セミナー, Aug., (1990).