



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ライナックビーム窓近傍で発生するウィーク場のビーム波形測定に与える影響
Author(s)	本間, 彰; Homma, A; 沢村, 晃子 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 173, 65-76
Issue Date	1995-05-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42445">https://hdl.handle.net/2115/42445</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	173_65-76.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

本間 彰 沢村 晃子 山崎 初男 田中 秀樹 青木 毅\*  
大熊 重三\*\* 奥田 修一\*\* 山本 保\*\* 末峰 昌二\*\* 津守 邦彦\*\*\*

(平成6年12月28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

A. HOMMA, T. SAWAMURA, H. YAMAZAKI, H. TANAKA, T. AOKI\*  
J. OHKUMA\*\*, S. OKUDA\*\*, T. YAMAMOTO\*\*, S. SUEMINE\*\*, and K. TSUMORI\*\*\*

(Received December 28, 1994)

#### Abstract

In order to study the response of a wire-line type beam monitor to an electron beam from a linear accelerator, detailed knowledge about the electromagnetic field produced by a beam is necessary. The wake-field of a beam caused by a beam exit window of an accelerator was studied by numerical analysis.

It was found that the radial electric field at a fixed position showed a complicated time variation lasting after the passage of the beam pulse. The wake-field was reduced by placing a flared conducting wall immediately after the window. Setting a metal disk with a beam entrance hole upstream from the measuring point was also found to suppress the effect of the wake-field.

#### はじめに

線形加速器 (linear accelerator 以下ライナックと呼ぶ) で加速された電子は半値幅 30 ピコ秒前後のパルス状ビーム (シングルバンチビーム), あるいはこのビームを微細構造とする数秒からマイクロ秒に渡るパルスビームである。高エネルギー物理学, 放射線化学, 放射線物理, 医療研究などその利用範囲は多岐に渡る。近年では, 自由電子レーザー等にもみられるように加速された電子から直接外場との相互作用により放射を得るコヒーレント光源としての利用が盛んである<sup>1),2),3)</sup>。これらのビーム利用の発展に伴い, ビームの操作技術もより高い精度が要求され, ビームの位置, 波形モニターの技術にもより高い分解能が要求されている。このような要求を満たすモ

---

原子工学科 基礎原子核工学講座

\*日本電子力研究所大型放射光施設

\*\*大阪大学産業科学研究所

\*\*\*住友電気工業株式会社

モニターは光学的な方法と電磁的な方法に大別される。前者はビームが大気中で誘発するチレンコフ光を測定する方法で時間領域ではすでにサブピコ秒の測定が可能である<sup>4)</sup>。但し、装置が複雑であることや取り扱いが容易でないこと、また高価であること等、現実面では問題も少なくない。電磁的方法は、ビームの形成する電磁場を電磁誘導等の原理を応用し検出する方法である。この方法で検出できるパルスの立ち上がり応答の上限は、伝送ケーブル、オシロスコープ等の測定系の分解能によって、数10ピコ秒程度であると考えられる。しかし、取り扱いやコストの面、位置測定の容易さなど優れた点がおおいため、電磁的な測定法は加速器建造の歴史と共に幾多の方法が考案され改良され続けている。電磁的方法によるビームモニターの応答は、1) ビームの形成する電磁場に対するピックアップの応答、2) ピックアップ出力に対する観測系の応答の二つの応答より構成される。相対論的ビームが円筒境界内の中心軸を通過する際に形成する電磁場は同軸線路のTEMモードで近似可能でありピックアップの応答も近似的にこのモードに対する応答として議論されることが多い。一方ライナックで加速されたバンチビームは、軸方向及び半径方向に対し境界の一様性が破られるとき(ビーム輸送管の径の急激な変化等)輻射場を生成することが知られている<sup>5),6),7)</sup>。特にライナックビーム取り出し窓通過の際に発生するマイクロ波領域の電磁輻射場は、先のTEMモードとは異なった伝播モードでビームの作る場の後方を追いかけて行き、観測対象とする電磁場に乱れを生じせしめる。このような場のことを進行する船の航跡になぞらえて航跡場(wake-field, 以下ウェーク場)と呼んでいる。従って、実験的に求めたピックアップの応答と解析結果との比較対応を行うためにはウェーク場についての評価が必要となる。このことはサブナノからピコ秒領域のビームモニターの開発、研究に関しては特に重要となる<sup>8),9)</sup>。

本研究の目的は、数値解析によってライナックビーム窓近傍で発生するウェーク場が電子ビーム波形測定に与える影響を調べることで、境界条件の設定によりこの場による影響の抑制を試みるものである。

最初に、数値解析に用いるアルゴリズムの説明と計算条件の概略を述べる。続く章では、ビーム取り出し窓付近におけるウェーク場の生成とフレア一境界による抑制、及び、穴あきディスクによる抑制の試みについての計算結果を述べる。最後にワイヤーラインを用いたビームモニターとその単バンチ応答の実測例について述べ、解析結果との比較検討を行う。

## 1. 数値解析

### 1.1 計算手法の概略

数値解析のために用いる電磁場の計算手法はT. WeilandのBCI(Beam Cavity Interaction)コードを参考とした<sup>10)</sup>。このコードは、進行する電子ビーム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。詳細は参考文献にゆずり、ここではその手法の概略について述べる。計算領域が軸対称の中空円筒境界であることから、計算領域を半径方向( $r$ 方向)と軸方向( $z$ 方向)の2次元領域とすることができる。また、電磁場の成分は、半径方向電場と軸方向電場と円周方向( $\phi$ 方向)磁場の3成分だけ考えればよいことになる。計算領域をメッシュ分割し、各メッシュごとにこの3成分を割り当てる。空間差分と時間差分を用いてマクスウェル方程式を差分化し、有限差分方程式の組とする。このメッシュ分割された計算領域内において、境界条件を満足させながら、有限差分方程式の組となったマクスウェル方程式を逐次時間領域で計算する。これにより、ある時刻における電磁場の空間分布を求めることができる。ここで、軸対称な加速

構造を  $z$  軸に沿って速さ  $v = \beta c$  で進行するビームバンチは、線電荷密度  $q_l$  により、1次元モデルに近似することができるので電流密度  $\mathbf{J}$  は、

$$\mathbf{J} = \delta(r) \beta c q_l (z - \beta ct) \mathbf{e}_z \quad (1)$$

で表わされる。 $\mathbf{e}_z$  は軸方向の単位ベクトルである。以上により差分化されたアンペール・マクスウェル方程式から軸方向 ( $z$  方向) 電場は、

$$E_z^{n+1/2}(I, J) = E_z^{n-1/2}(I, J) + 4 \frac{\Delta t}{\epsilon_0} \frac{4}{(2r_I + \Delta r_I)^2 - (2r_I - \Delta r_{I-1})^2} \\ \times \left( (2r_I + \Delta r_I) H^n(I, J) - (2r_I - \Delta r_{I-1}) H^n(I-1, J) \right) \quad (2)$$

となる。ただし  $I > 1$  である。 $Z$  軸上、 $I=1$  ではビームによるソース項が含まれるので、このときのアンペール・マクスウェル方程式は

$$E_z^{n+1/2}(I, J) = E_z^{n-1/2}(I, J) + 4 \frac{\Delta t}{\epsilon_0} \left( \frac{H^n(I, J)}{r_2} - \frac{v q^n(J)}{\pi r_2^2} \right) \quad (3)$$

と書き表される。半径方向 ( $r$  方向) の電場は

$$E_r^{n+1/2}(I, J) = E_r^{n-1/2}(I, J) + \frac{\Delta t}{\epsilon_0} \frac{2}{\Delta z_J + \Delta z_{J-1}} (H^n(I, J-1) - H^n(I, J)) \quad (4)$$

となり、またファラデーの電磁誘導の法則から円周方向の磁場は

$$H^{n+1}(I, J) = H^n(I, J) - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left( \frac{E_z^{n+1/2}(I, J)}{\Delta r_I} - \frac{E_z^{n+1/2}(I+1, J)}{\Delta r_I} \right. \\ \left. + \frac{E_r^{n+1/2}(I, J+1)}{\Delta z_J} - \frac{E_r^{n+1/2}(I, J)}{\Delta z_J} \right) \quad (5)$$

と書き表される。これら(2), (3), (4), (5)式を用いて計算を行う。電磁場計算のための各種条件は

- ・メッシュの形状  
1 mm × 1 mm の正方形メッシュ。
- ・境界条件  
金属境界は完全導体を仮定、損失は考慮しない。  
金属導体のメッシュにおいて  $E_r = E_z = 0$ ,  
フレアーを持つ場合の傾きは階段状にして近似する。
- ・初期条件は  $H^1 = E_r^{1/2} = E_z^{1/2} = 0$  とする。

## 1. 2 電子ビームの取り扱い

バンチの電荷密度分布は進行方向 ( $z$  方向) につき空間的にガウス分布をすると仮定した。さらに半径方向に広がりを持たない線状電荷であり、円筒の中心軸上を光速で進行するものとした。全電荷量は 20 nC、半値幅 (FWHM) は 39 ps とした (この値は阪大産研単バンチ LINAC で得られるビームの特性とほぼ同様の値である)。

以下に実際に使用したガウス形電荷密度分布の式を示す。

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma}\right)^2\right)$$

ここで $z$ はバンチが進行する円筒境界の中心軸上の距離であり、進行方向を正とする。

### 1. 3 解析結果

はじめに、ビームがビーム窓を通過する際に発生したウェーク場が、円筒境界内を伝播する様子を Fig.1 a, 及び Fig.1 b に示した。ビーム窓を通過した直後電場はビーム窓に終端するため半径方向の場に加え軸方向成分の場が生じる。更にビームバンチの作る電場は後方に引きずられ、前述の場と共に伝搬していく様子がわかる。また後方の場が前方の場（ビームバンチの作る電場）に追いつく様子もうかがえる。このことはこれらの場が TEM モードでなく分散性をもつことを示している。従ってウェーク場の影響は観測位置で大きく異なることが予測される。

以下にこれらのウェーク場、及びウェーク場の波形測定に与える影響を低減するような境界条件の設定を試みる。

#### 1) フレアー境界によるウェーク場抑制

ウェーク場発生の機構はビームの進行方向に垂直に存在する急激な境界の変化により軸方向電場が生じることに起因するものとする。そこでビーム窓にフレアー境界を設定し、このような急激な境界の変化による影響の緩和を試みた<sup>8),9)</sup>。フレアー形状はビーム入力側が 10 mm 径、長さ 180 mm、ビームの出口側が 70 mm 径の円錐形のものである。計算条件は観測位置が軸方向に 351 mm、半径方向に 34 mm である。

はじめにこの位置におけるフレアー境界の無い場合、すなわちウェーク場の混在した電磁場についての時間波形を Fig.2 に示した。第一の負の方向のピークはバンチビームの形成する電場であり後続する正負の波形はウェーク場によるものである。

Fig.3 はフレアー境界に変更を行った場合のウェーク場発生の様子を示したものである。フレアーの左端（ビーム入力側）はビーム窓に密着しているものとして扱った。この結果ウェーク場の発生がフレアー境界により抑制されている様子がわかる。Fig.4 はこのときの時間変化を表わす波形である。観測位置は Fig.2 の位置と同じである。

#### 2) ビーム貫通孔を有するディスクによるウェーク場抑制

フレアー境界の採用によりウェーク場の生成が低減可能であることが前述の解析によって示された。しかし、フレアー境界を用いることは実際の実験において装置が複雑になり、更にビーム取り出し窓よりの距離が長くなるために大気中における測定ではビームの発散の影響を考慮する必要が出てくる。またビーム輸送系の任意の位置に配置することが難しい等、実用性の点からより単純な境界が望まれる。そこでフレアーの長さを縮め、穴あきディスクをビームが貫通するような境界を採用した。これによってビーム窓で発生したウェーク場の伝播を阻止することを試みた。ディスク通過後に新たに発生するウェーク場はビーム窓通過の際の急激な境界の変化によるものより少なくなることを予想し解析を行ってみた。最初に、ビーム窓からの観測位置を指定する。この場合フレアーのように距離を必要としないので後にディスクを挿入できる距離を見越し軸方向に 100 mm とした。半径方向はフレアーの場合と同じ 34 mm である。Fig.5 は、この位置におけるビーム窓からのウェーク場の混在した円筒境界内電場の時間変化である。

Fig.2 と比較すると距離の変化によりウェーク場の影響も変化する様子が分かる。そこで、ビー

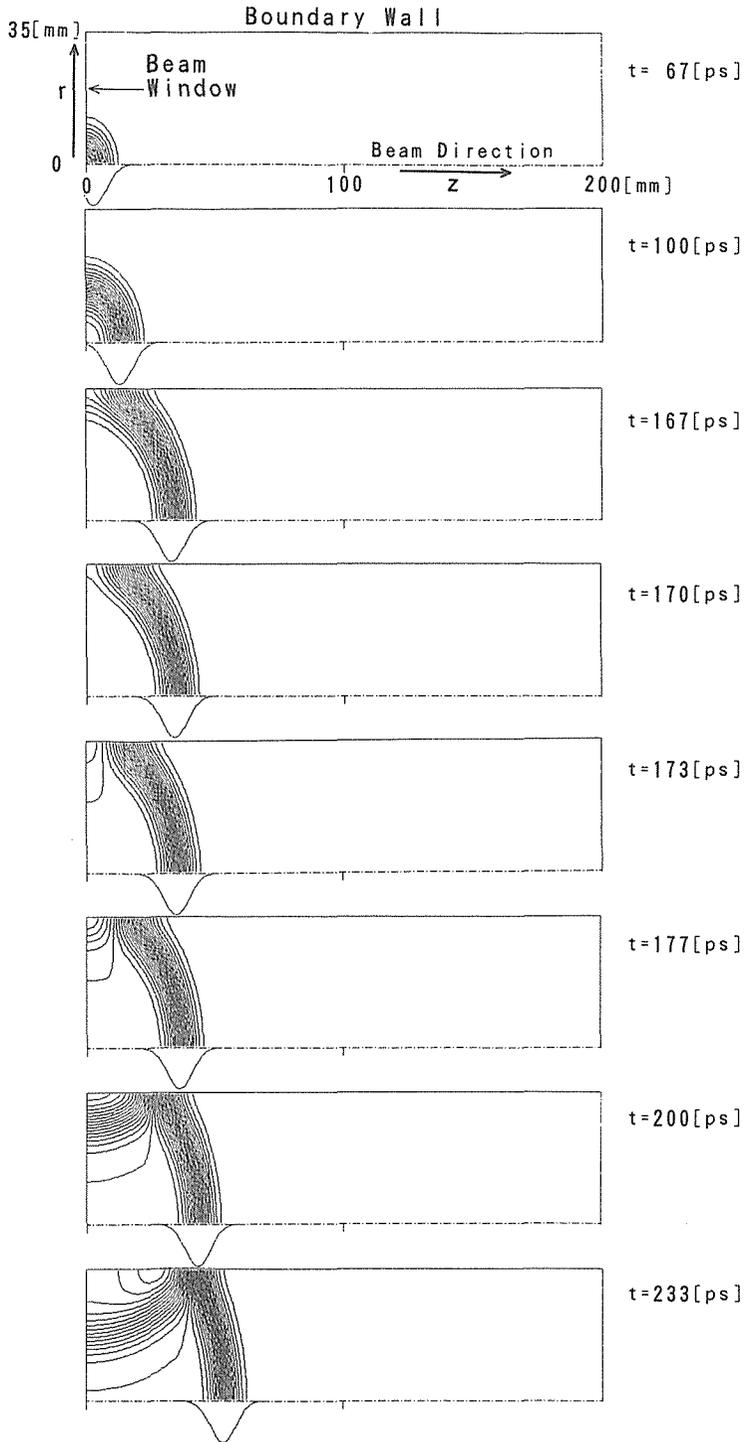


Fig. 1 a) Electric field lines of a Gaussian bunch of beam leaving a beam exit window.

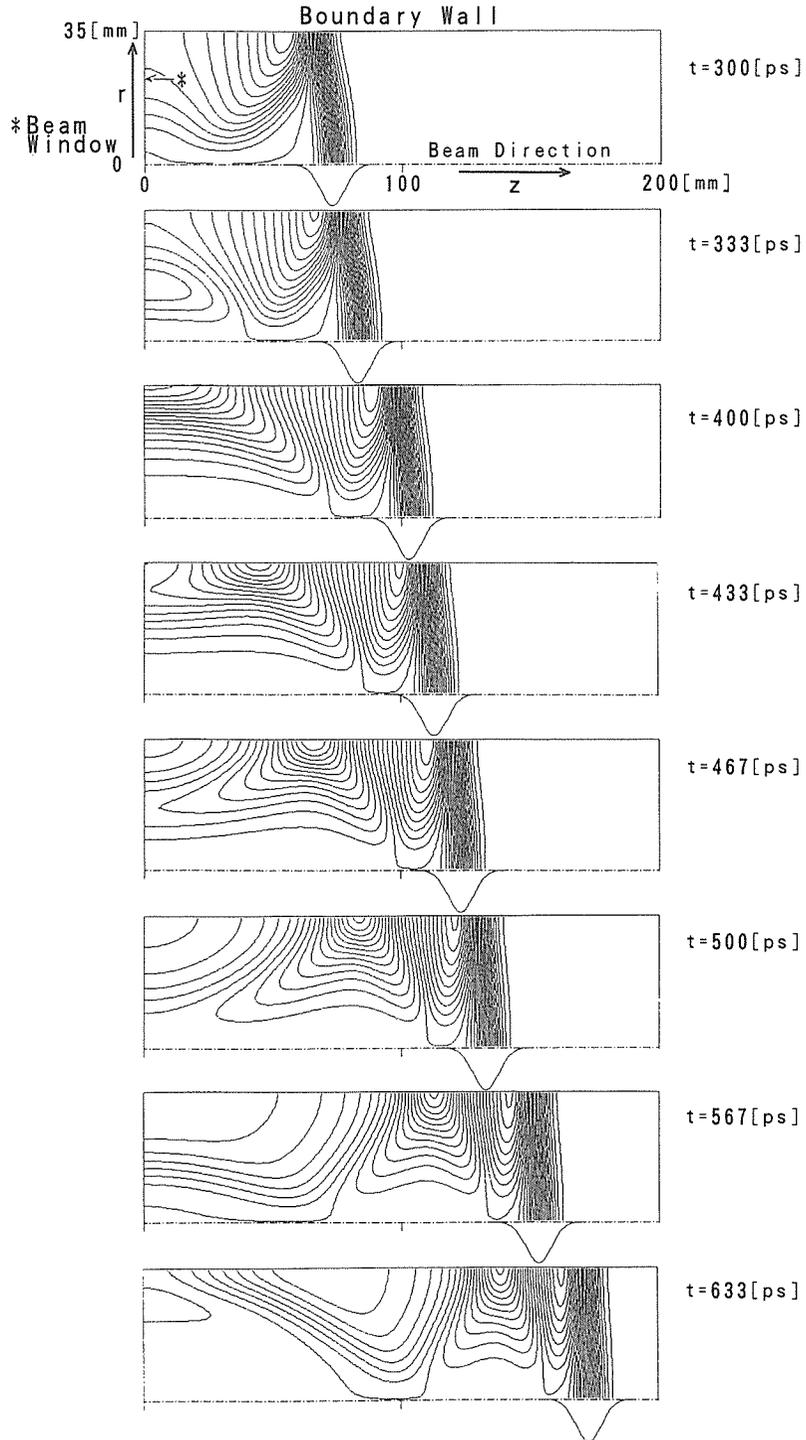


Fig. 1 b) Electric field lines of a Gaussian bunch of beam leaving a beam exit window.

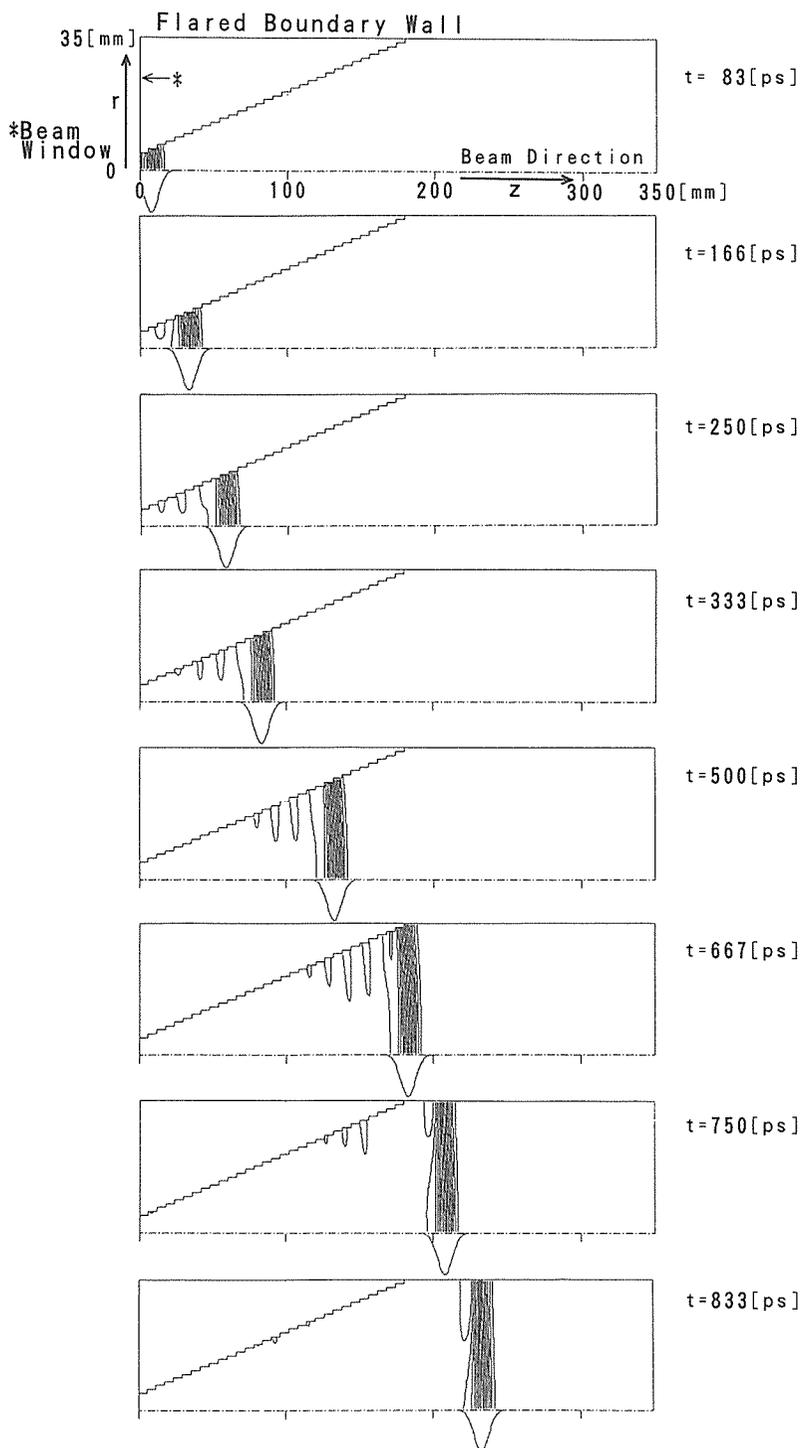


Fig. 3 Electric field lines of a Gaussian bunch of beam leaving a beam exit window with a flared boundary wall.

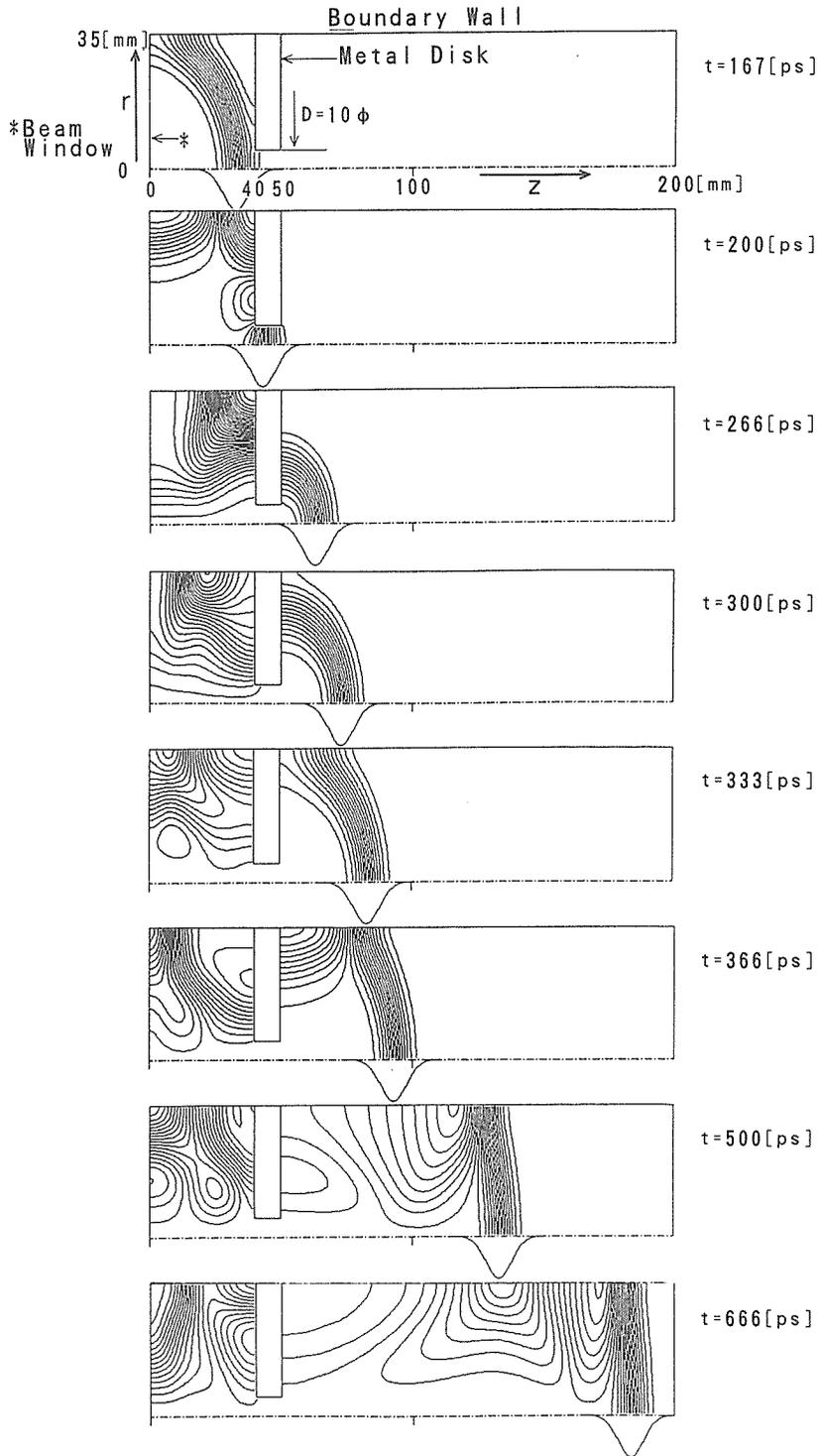


Fig. 6 Electric field lines of a Gaussian bunch of beam leaving a beam exit window and passing through a beam entrance-hole (10 mmφ) of a disk.

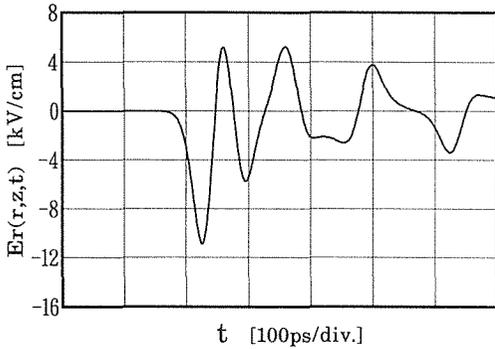


Fig. 2 Radial component of electric field  $E_r(r,z,t)$  at  $z=351\text{mm}$  and  $r=34\text{mm}$ .

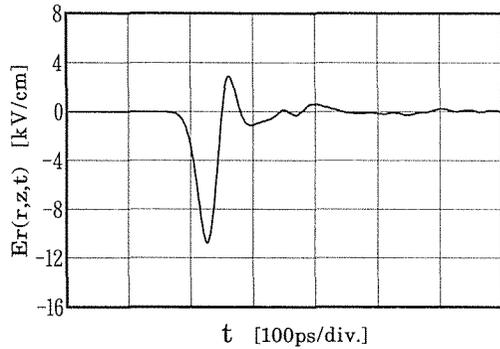


Fig. 4 Radial component of electric field  $E_r(r,z,t)$  at  $z=351\text{mm}$  and  $r=34\text{mm}$  with a flared boundary wall.

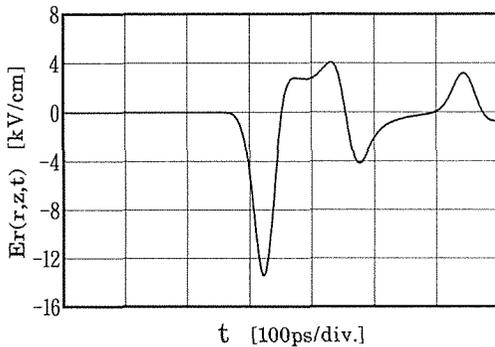


Fig. 5 Radial component of electric field  $E_r(r,z,t)$  at  $z=100\text{mm}$  and  $r=34\text{mm}$ .

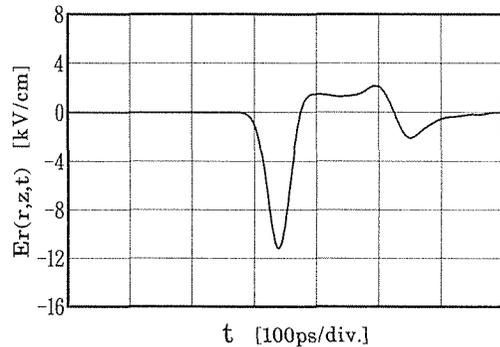


Fig. 7 Radial component of electric field  $E_r(r,z,t)$  at  $z=100\text{mm}$  and  $r=34\text{mm}$  with the disk in Fig. 6.

ム窓から 40 mm の位置に厚さ 10 mm, 穴径 10 mm のディスクを設置した。Fig.6 はこのときの円筒境界内部の電磁場の様子を表したものである。

ビームがビーム窓を通過した直後に発生したウェーク場はディスクによって抑制することができるが、ディスクを通過した直後に新たなウェーク場が発生する様子が分かる。Fig.7 はこのときの時間変化を示したもので Fig.5 と比較して見るとウェーク場の影響が減っているのがわかる。

以上の解析からビーム窓近傍で発生するウェーク場について定性的な知見を得ることができた。またビーム波形測定に与える影響を低減できることも示された。

## 2. ウェーク場とその測定波形に与える影響, 及び低減に関する実測例

これまでの章で行った解析結果を確認するための実験の例を示す。実験に用いたビームは阪大産研ライナックで加速された単バンチビームである。ビームエネルギーは 28 MeV, 電荷量およそ 6 nC である。ビームモニターを Fig.8 に示す。

ライナックのビーム出口に取り付けた内径 70 mm の銅製ビームダクト内に太さ 0.5 mm, 高さ 2.25 mm, 長さ 42 mm のワイヤーラインピックアップを配置しビーム上流側を SMA コネクター

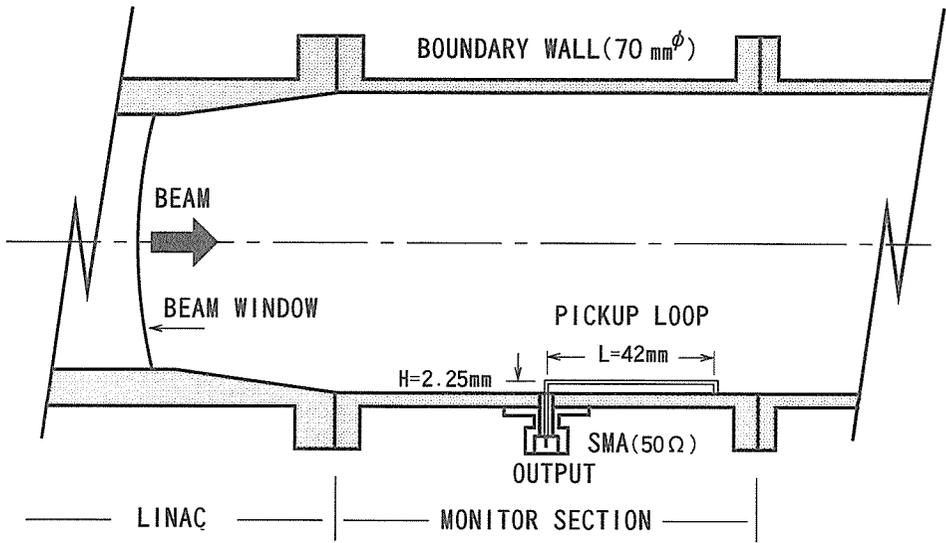


Fig. 8 Schematic diagram of a beam monitor of pickup loop.

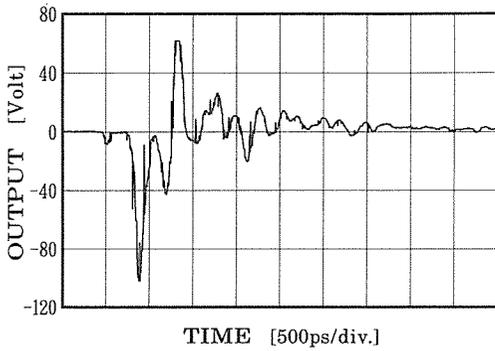


Fig. 9 Experimental result for the measurement of a single bunched beam with the beam monitor in Fig. 8.

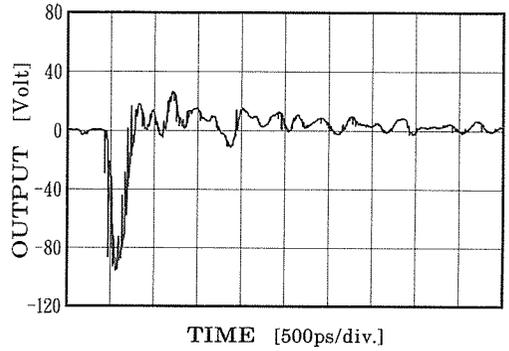


Fig. 10 The experimental result for the measurement of a single bunched beam with a wake-field suppression by using a metal disk with a beam entrance hole (10 mm φ).

に取り付け、下流側を接地する。ピックアップによる検出信号は低損失ケーブル（宮崎電線 MCT-358 T, カットオフ周波数 26.5 GHz, 長さ 16 m）を経由してサンプリングオシロで観測される。信号伝送時の高次モード発生等の影響を可能な限り低減する目的からモニター出力とオシロの垂直軸入力等の伝送線路からは変換コネクター類を除去した。ただし、オシロの入力には 40 dB (18 GHz) のアッテネータが挿入されている。これらの結果、測定系全体の時間応答（立ち上がり）はおおよそ 50 ps と見積られる。Fig.9 にこの体系で測定した応答波形を示す。

ストリークカメラ等の測定では加速電子のバンチ波形はガウス型に近いことが確認されておりこの測定結果にはこれまで議論したウェーク場の混在が予想される。この実験結果にはモニターの応答も含まれるが、ウェーク場による影響の方が大きいと考えられる<sup>11),12),13)</sup>。そこで、Fig.8 に示したライナックとモニターセクションの間に厚さ 3 mm, 孔径 10 mm の穴あきディスクをはさ

んでウェーク場の影響を低減することを試みた。ビーム条件等は変わらない。結果を Fig.10 に示した。Fig.9 と比較してみるとよりガウス波形に接近しているのがわかる。計算結果 Fig.5, Fig.7 が半径方向電場を示しているのに対し、Fig.9, Fig.10 の実験結果は電圧であることなどから解析の結果との間には一対一の対応を行うことはできない。しかし、波形がよりバンチ波形（ガウス関数）に近いものとなることは、解析が示唆する結果に従い、検出ループ近傍でのウェーク場が低減したことによる効果と考えられる。

## おわりに

ビームモニターの時間応答にウェーク場が与える影響を数値解析により調べた。本研究では便宜上の理由からパソコンを用いて計算を行った。使用したパソコンは NEC-PC 9801 AP, 言語はマイクロソフトウェア社の MS-FOTRAN Ver 5.1 を同社のオペレーティングシステム上で用いた。以上のメモリー制限内で解析を行ったためメッシュサイズは 1 mm 正方となり着目する領域のサイズに比較して十分な精度を維持しているとはいえない。しかしながら実験結果との比較からウェーク場の存在ならびに波形観測に与えるウェーク場の影響とその抑制が可能であることが示されたものとする。

今回の計算結果によるとウェーク場の分散性により、伝播速度の速い成分はビームバンチに伴う場（ビーム電荷から境界に終端する場）に追いつき、この領域の電場の強度に変化を与えることが示された（力線密度の増大、Fig.1 後半の時間領域参照）。従って観測波形は軸方向の位置の関数となることがわかる。軸方向 351 mm の位置（フレアーを用いた計算結果）及び、軸方向 100 mm の位置（ディスクを用いた計算例）では対象とする観測波形-ビームバンチの形成する波形（最初の負のピーク）はウェーク場によって強められる方向に作用している。Fig.2, Fig.4 及び Fig.5, Fig.7 参照。また Fig.9, Fig.10 の実験結果でもウェーク場によって振幅が強められていることがわかる。ウェーク場のこのような影響はフレアーを用いた実験でも成立することが他大学の研究グループによっても確認されている。<sup>14)</sup>以上の研究よりビームモニターによる波形観測、及びモニターの応答の決定にはウェーク場の影響を十分考慮する必要があることが示されたといえよう。

## 参考文献

- 1) J. Ohkuma, S. Okuda et al., "Performance of a bunch width control system for coherent radiation with a high-current linear accelerator" Nucl. Instr. Meth. A 339 (1994) 420-424.
- 2) S. Okuda, J. Ohkuma et al., "Self-amplified spontaneous emission at wave length of 20 and 40  $\mu$ m from single bunch electron beam" Nucl. Instr. Meth. A 331 (1993) 76-78.
- 3) S. Okuda, K. Tsumori et al., "FEL amplifier and oscillator experiments with the ISIR linac" Nucl. Instr. Meth. A 301 (1992) 81-84.
- 4) 古澤孝弘 他, "サブピコ秒電子線シングルパルスの発生と数値解析" 日本原子力学会北海道支部第 12 回研究発表会 (札幌) Sep., 1994, p 550
- 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.
- 6) U. Happek, A. J. Sievers et al., "Observation of Coherent Transition Radiation" Phys. Rev. Lett. 67, Nov. 1991, p 2962.
- 7) Dushan Mitrovich, "Magnetic field evolution and measurement of fast rise-time electron beams" Rev. Sci. Instrum. 59(7), July 1988.
- 8) 青木 毅他, "ビームモニターのための円筒境界内部の電磁場解析" 日本原子力学会北海道支部第 9 回研究発表

会 (札幌) Dec. 1991, p 5

- 9) A. Homma, T. Aoki et al., "Electromagnetic field in a tapered-cylindrical boundary for an electron beam monitor" in Proceedings of the 16 th Linear Accelerator Meeting in Japan, Nihon University, 1991, edited by Yoshiharu Torizuka, 1991, p 286.
- 10) 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).
- 11) W. Barry, "A general analysis of thin wire pickups for high frequency beam position monitors" Nucl. Instr. Meth. A 301 (1991) 407-416.
- 12) R. L. Carlson, R. N. Ridlon, and L. E. Stout "Multigigahertz beam current and position monitor for relativistic electron beams" Rev. Sci. Instr. 57 (10), October 1986, p 1139.
- 13) A. Homma, T. Sawamura et al., "Response of beam monitor using trans mission-line pickup" in Proceedings of the 18 th Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, Tukuba, 1993, edited by Isamu Sato, 1993, p 21.
- 14) 細野米市 (東大工), 私信