

ILCへ向けた空洞型ビーム軌道傾きモニターの開発

岡本大典

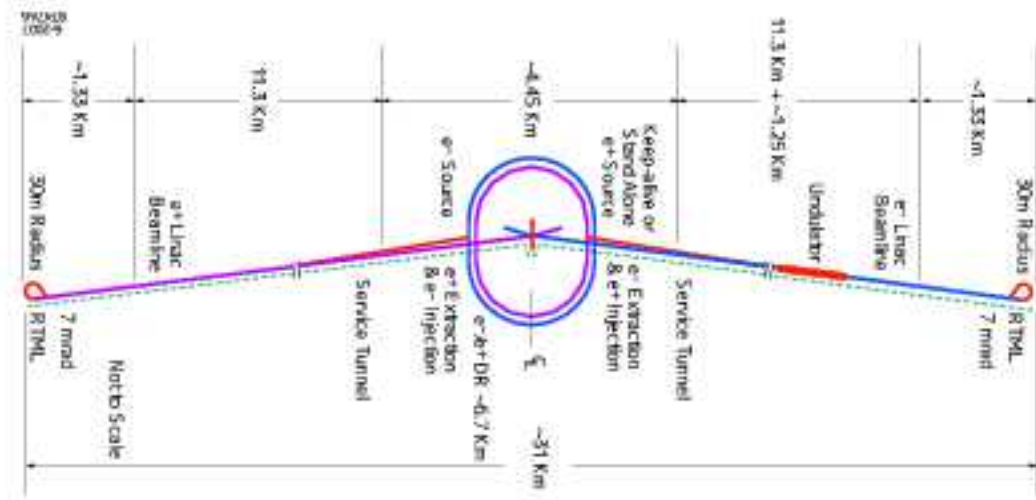
目次

- ILC及びATF2計画について
- 傾きモニターの基本原理
- 設計
- 基本パラメータテスト
- ビームテスト
- 問題点と考察
- まとめ

国際リニアコライダー (ILC)

次世代の電子・陽電子線形加速器衝突実験

重心エネルギー500GeV
積分ルミノシティ
500⁻¹fb (4年間)



ILCバンチパラメータ

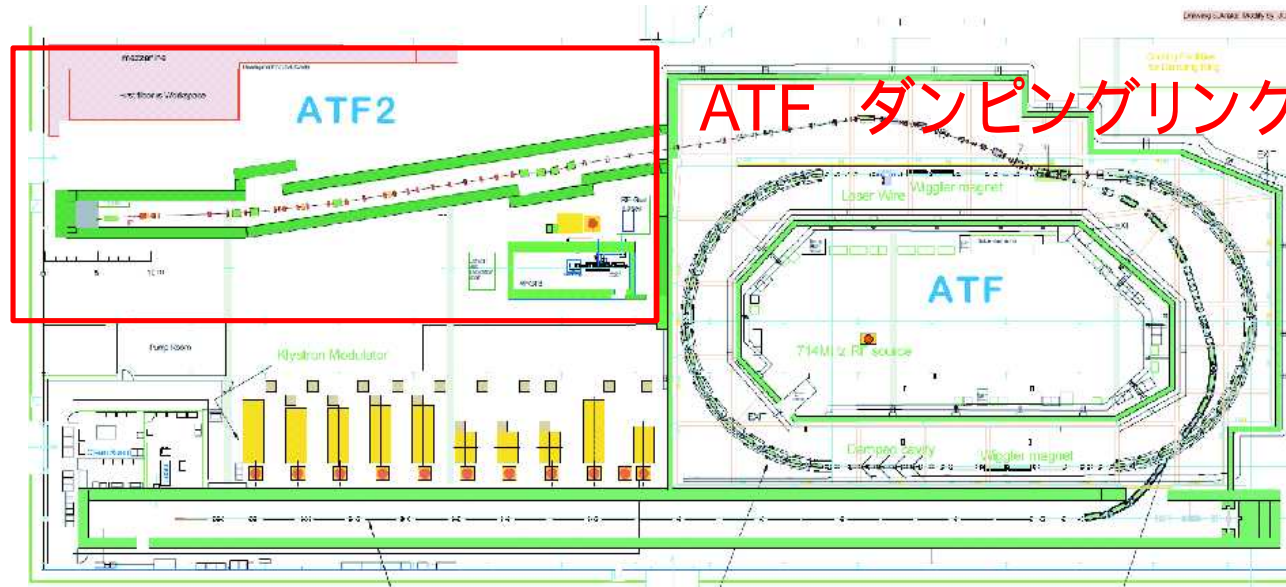
バンチ電荷	3.2nC(2 × 10 ¹⁰ e)
バンチ間隔	369 ns
バンチ長	300 μm
バンチ幅	640 nm
バンチの厚さ	5.7 nm

極小(5.7nm)までビームを絞り、それを衝突させる

ILCの最終収束系のテスト施設としてKEKにATF2ビームラインを建設

ATF2

ATF2ビームラインは、ILC最終収束系ビームエネルギー250GeVに対して1.3GeVにスケールダウンしたモデル



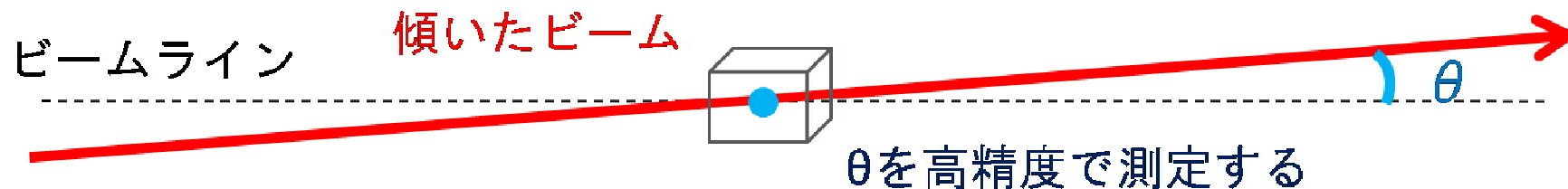
ATF2では、最終収束系の実証のために2つのゴールを設定

- 37nmのビームサイズの達成
- ナノメートルの精度によるビーム位置の制御

本研究の傾きモニターは、**ビーム軌道の傾きを高精度で測定し**、ナノメートルのビーム制御に利用するために開発を行っている

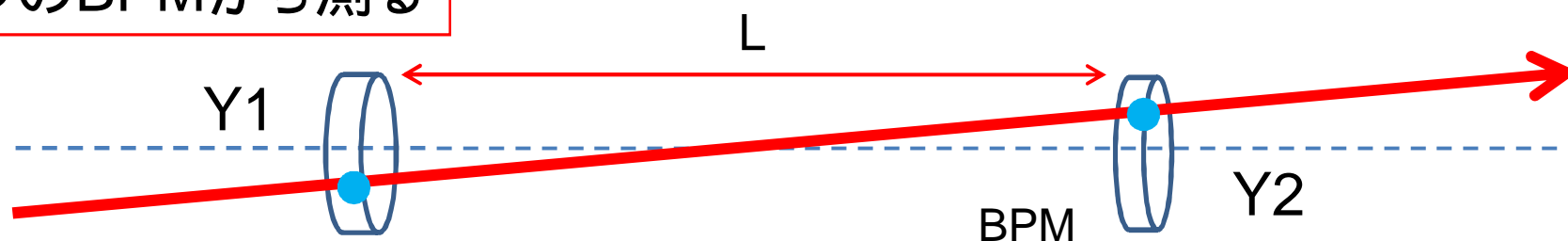
傾きモニタ特徴

1つの空洞から直接軌道傾きに依存した信号を取り出す



2つのBPMの相対的な位置関係に依存せずに測定できる

2つのBPMから測る



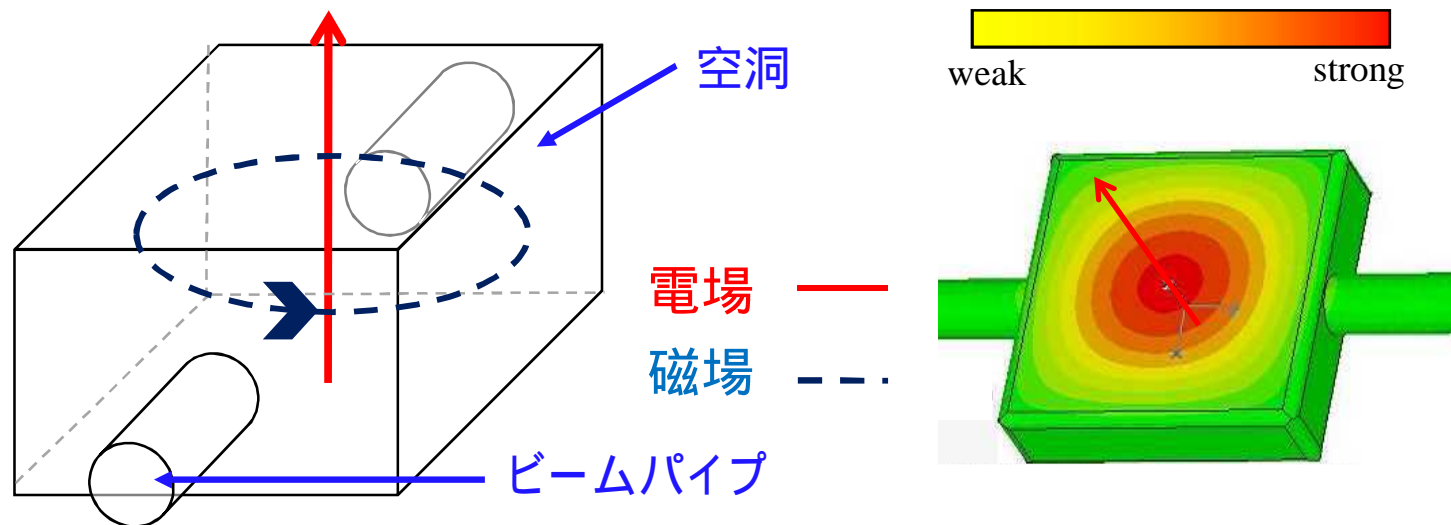
傾き $\sin\theta$ $\theta=(Y2-Y1)/L$

$$\text{誤差伝搬 } (\Delta\theta)^2 = \frac{(\Delta Y1)^2 + (\Delta Y2)^2}{L^2}$$

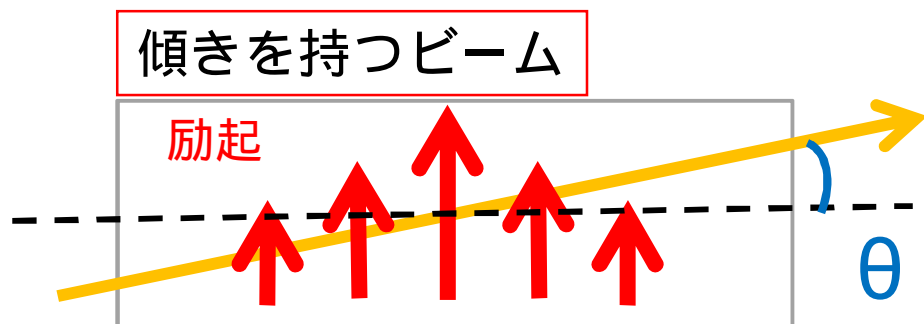
ビーム条件が変わらない遠距離2点による測定ならば高精度
近距離の測定では誤差が大きくなる。
各々の設置の誤差を考えれば、より誤差は大きくなる。

基本原理

空洞型ビームモニターは、空洞内に起きる共振モードを利用する。



モノポールモードはビームの傾きに依存して励起される

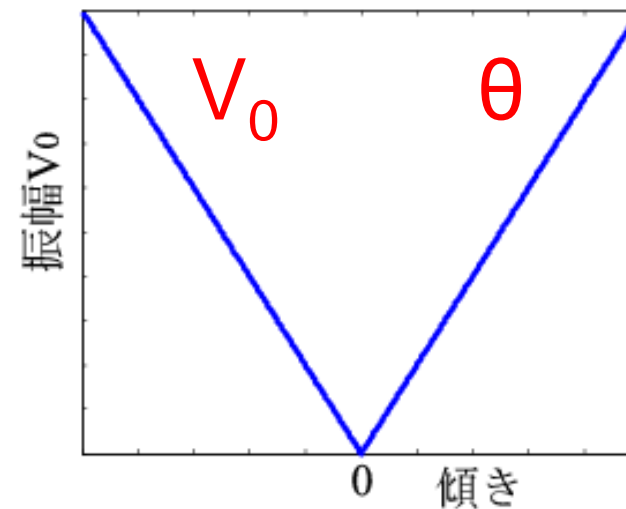
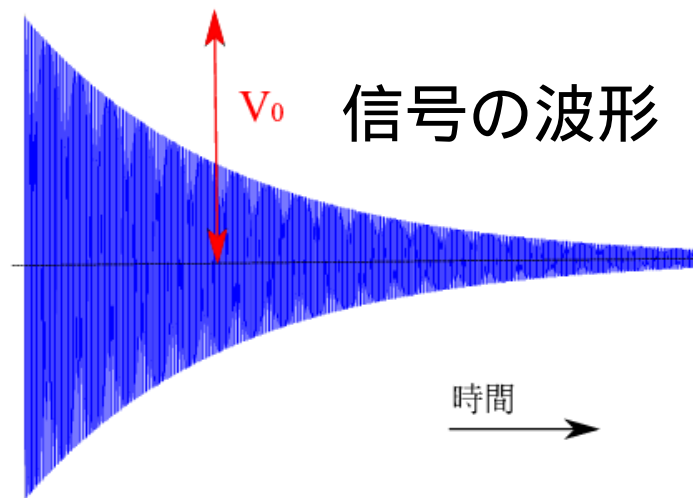
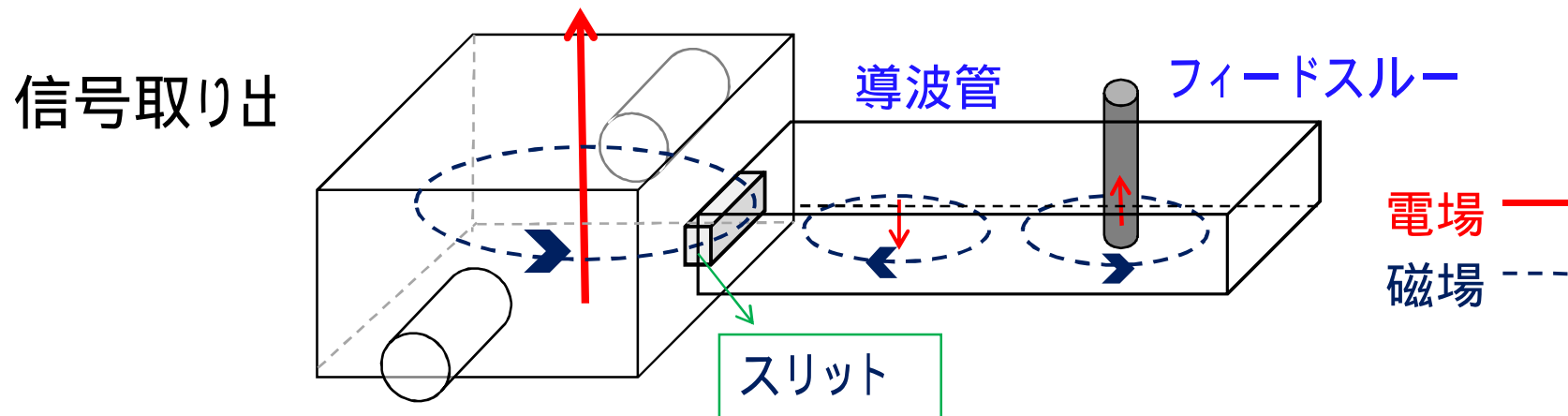


ビームは、自身が受ける電圧の2倍の電圧を空洞内に励起して通過する。

モノポールモードエネルギー θ^2

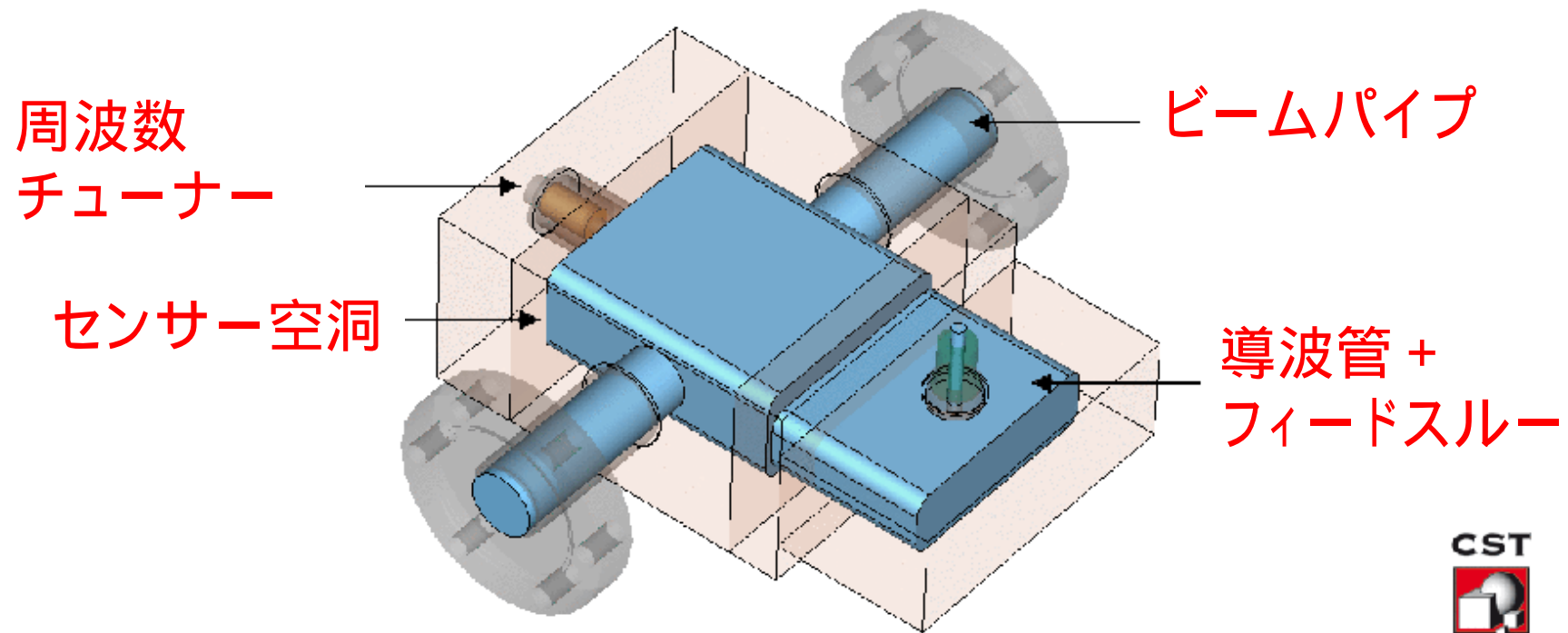
信号取り出し

信号はモノポールモードの磁場を、空洞壁に空けたスリットを通して取り出す。
取り出された磁場は導波管内をアンテナを通して、同軸ケーブルへと取り出される。



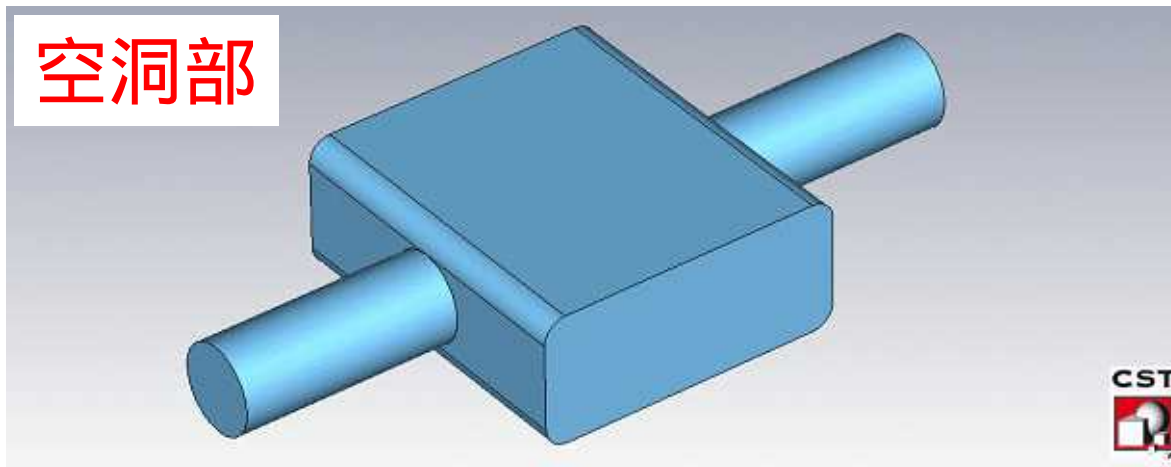
設計

設計は、CST studioという
3次元電磁場計算ソフトウェアを用いて行った



センサー空洞設計

共振周波数がSバンド2.856GHzを満たす中で、モノポールモードのエネルギーがなるべく大きく励起されるように設計



2.856GHz

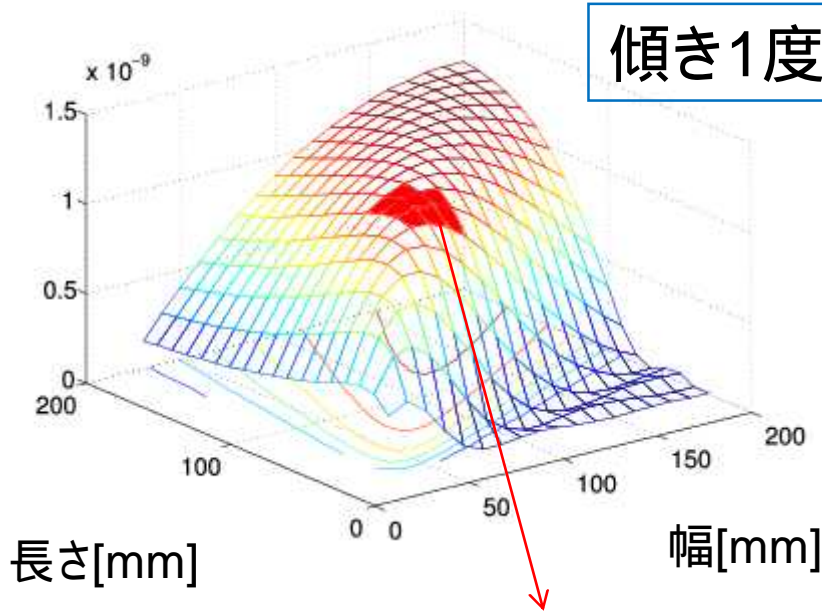
Sバンド空洞型BPM
と同じ、検出構成を
利用できるように

空洞の高さは低い方がエネルギー密度が大きくなり、大きな信号を期待できる。

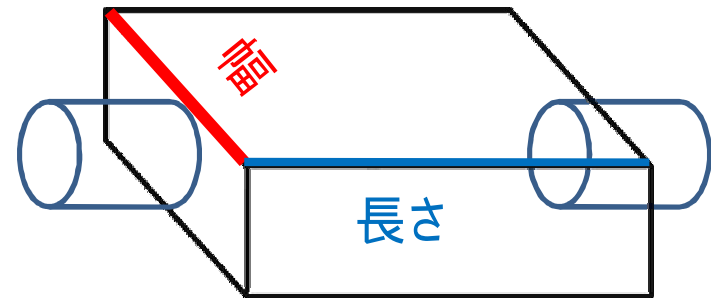
典型的なビームパイプ直径20mmに対して、
空洞高さ30mmを選択(機械加工による角の丸みを考慮)

センサー空洞設計2

エネルギー[J]



幅と長さを変えながら、モノポールモードのエネルギーを計算



2.8~2.9GHz

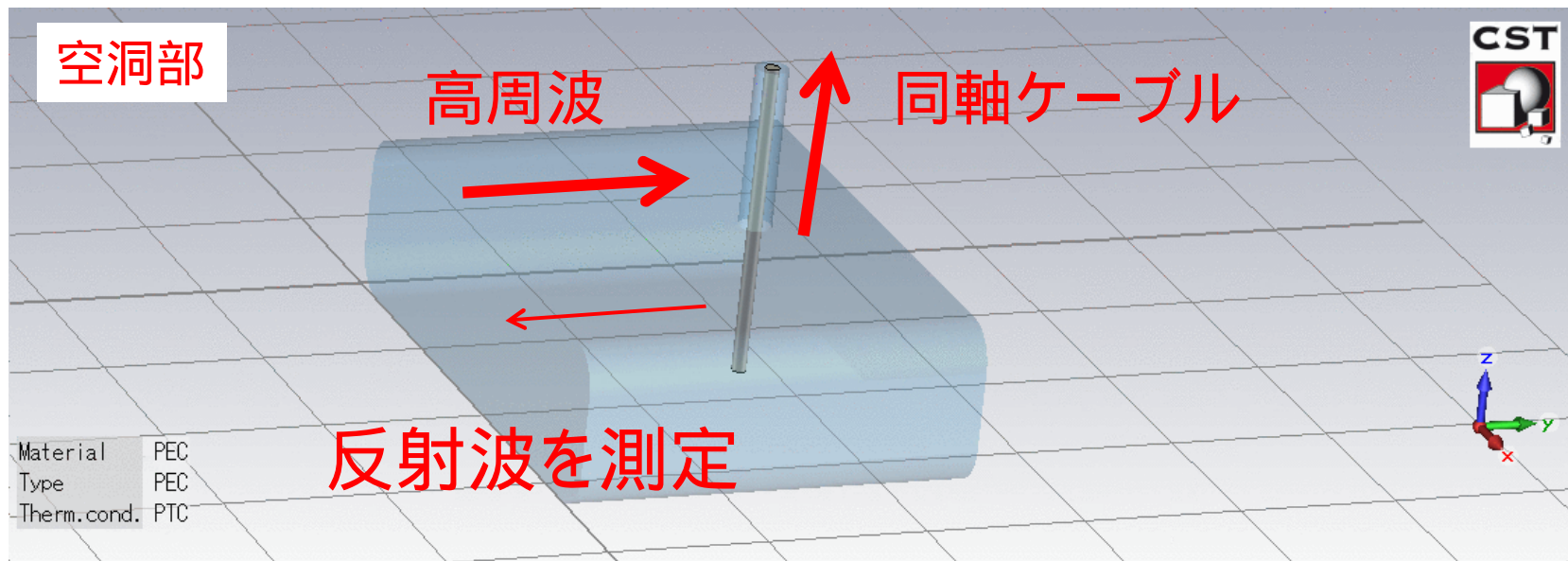
周波数が2.856GHzになるように
詳細に調整

幅:77.2mm
長さ:70.2mm

導波管 + フィードスルー位置の設計

スリットからの磁場が完全に取り出されるように設計する

TEモードがフィードスルー(アンテナ)と結合

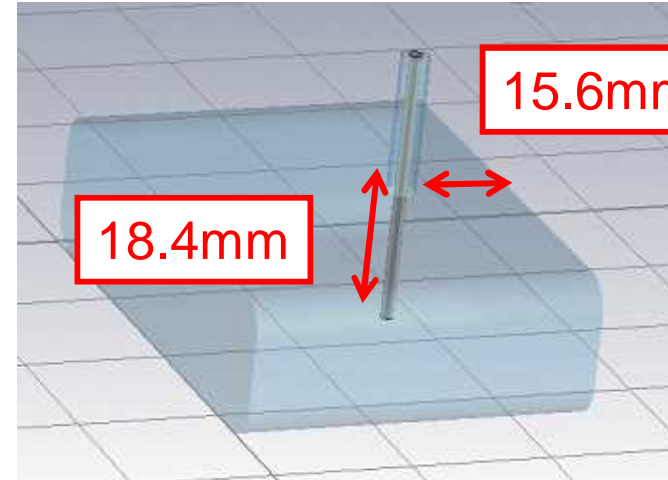
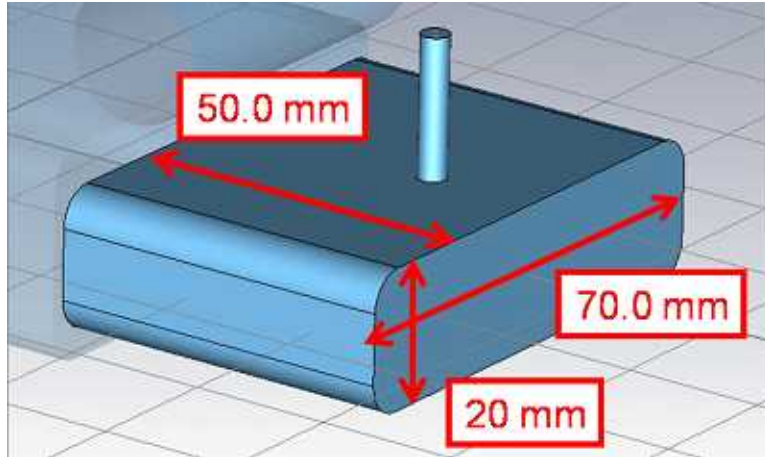


モノポールモード周波数(2.856 GHz)にて

入射波が完全に同軸ケーブルへと取り出されるように設計

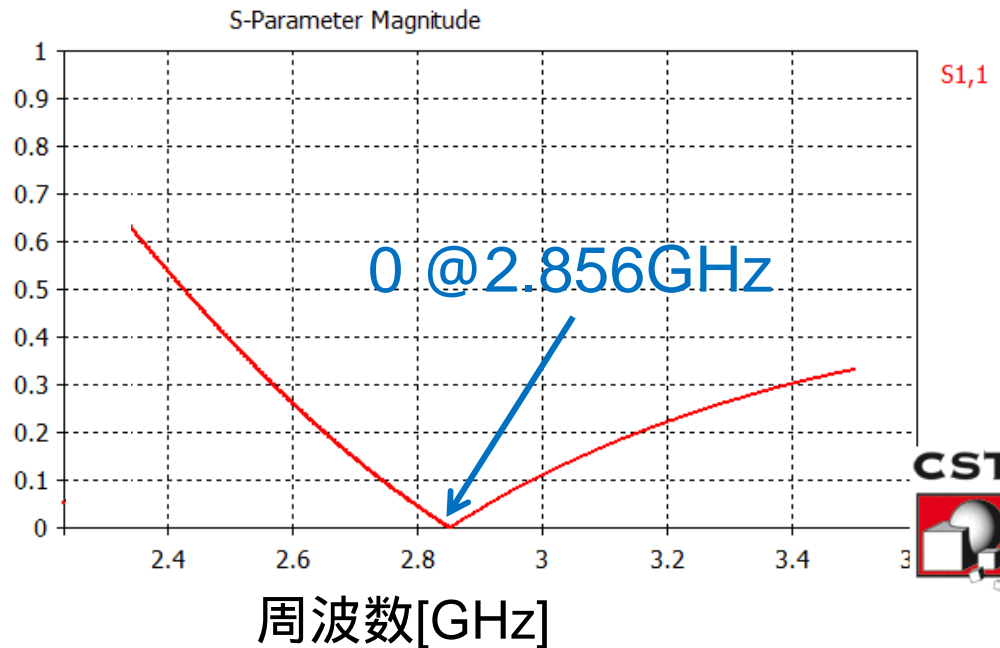
結果

アンテナの位置、深さにて調整。カットオフ周波数は導波管幅で決まる



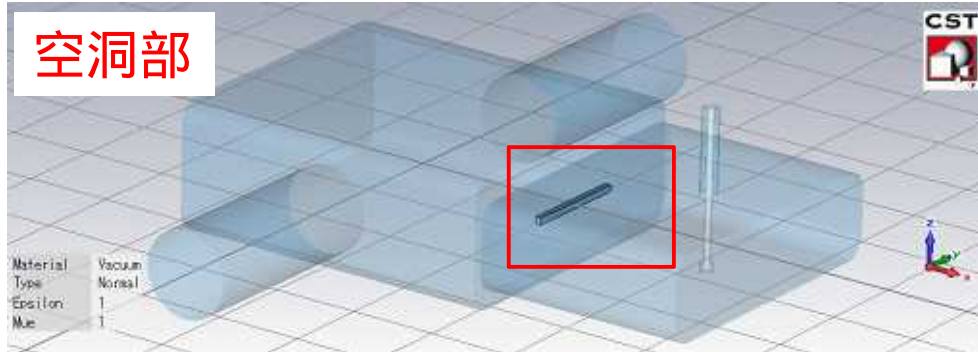
反射振幅比

$$\frac{\text{反射波}}{\text{入射波}}$$



2.856GHz入射波
は完全に
同軸ケーブルへと
取り出される

スリット設計



空洞部

センサー空洞と導波管を繋ぐ

スリットの役割

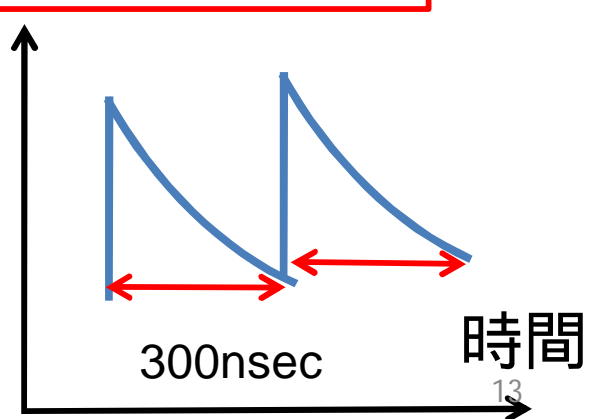
モノポールモード磁場に沿った方向

空間的に他のモードの混入を防ぐ

空洞内のエネルギーを取り出す

モノポールモードの取り出し電圧の時定数
300nsecになるように設計
信号の足し合わせによる信号の飽和を防ぐ

振幅



熱ノイズと比較した検出感度の見積もり

空洞型のビームモニターの感度は熱ノイズによって制限される

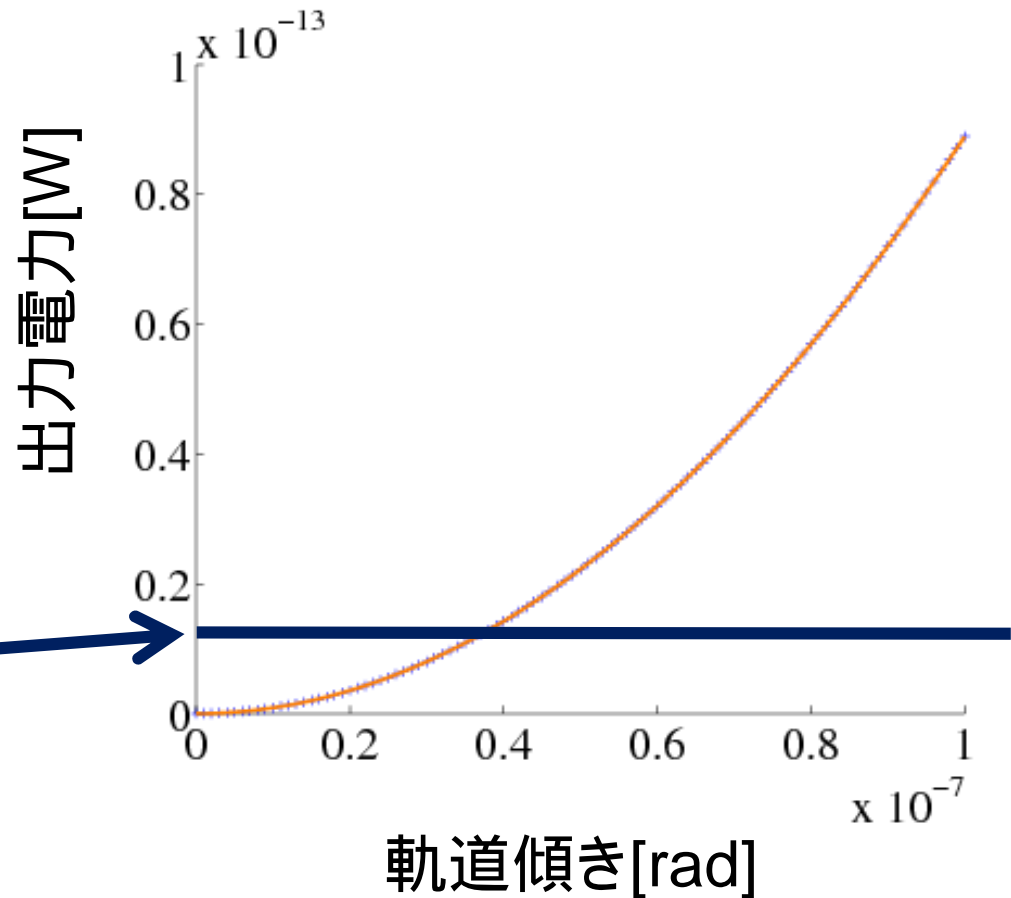
熱ノイズ

温度(T)
帯域幅(Δf)から決定

$$P_{TN} = K_B T \quad f$$

室温 300[K]
帯域幅 ~ 3MHz

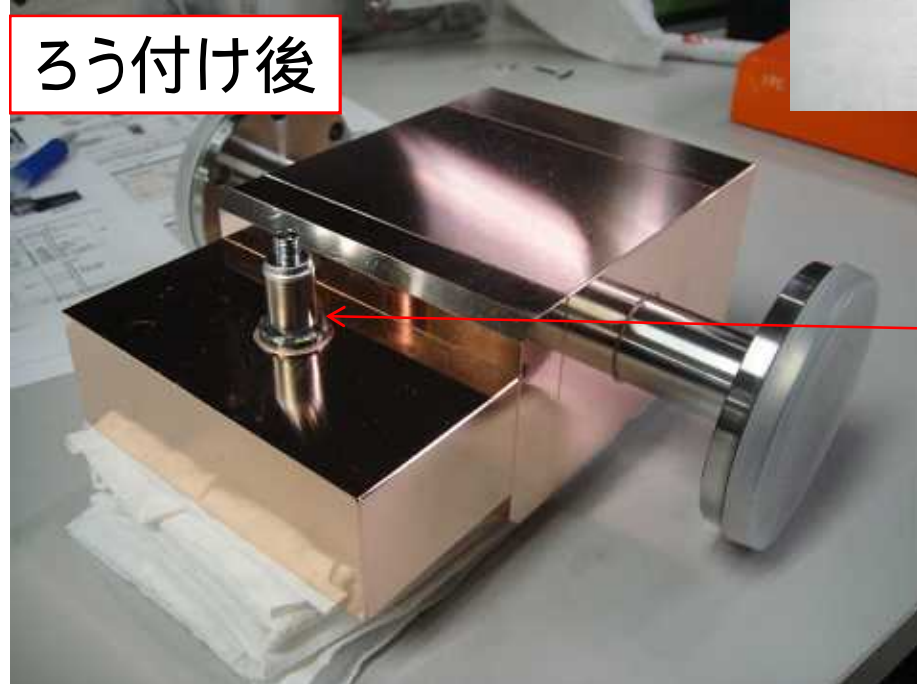
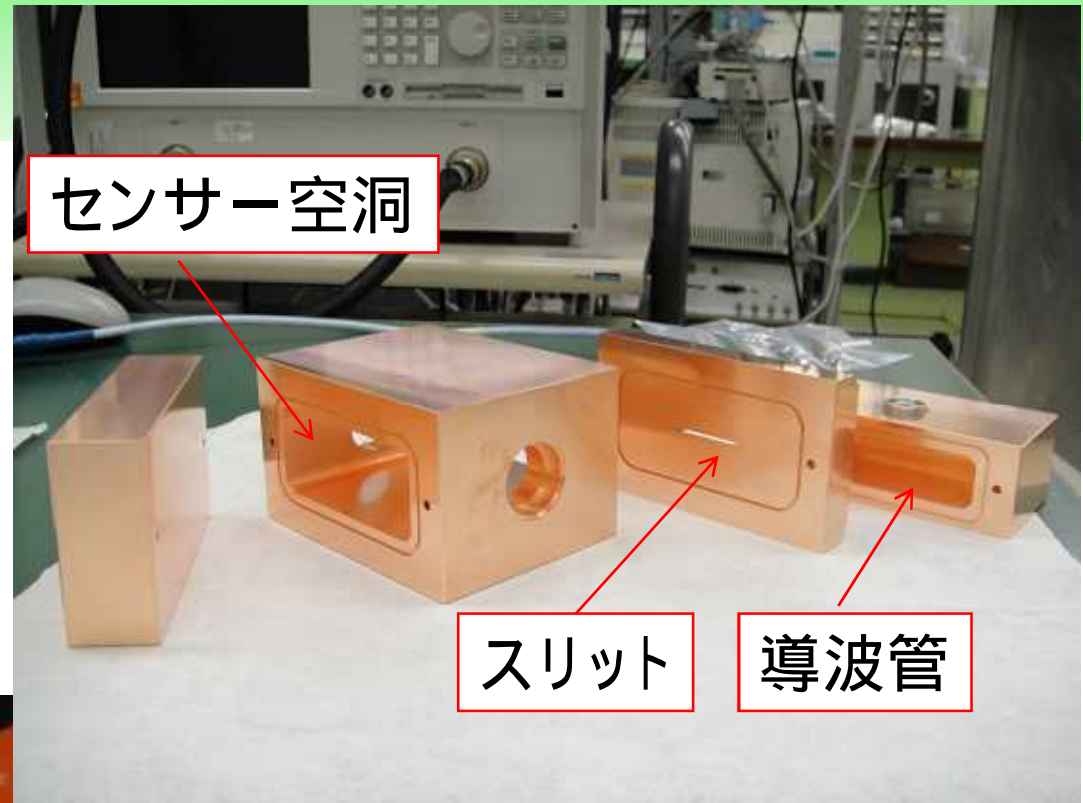
$$P_{TN} = 1.24 \times 10^{-14} \text{ [W]}$$



期待できる感度: **35 nrad**

試作器の製作

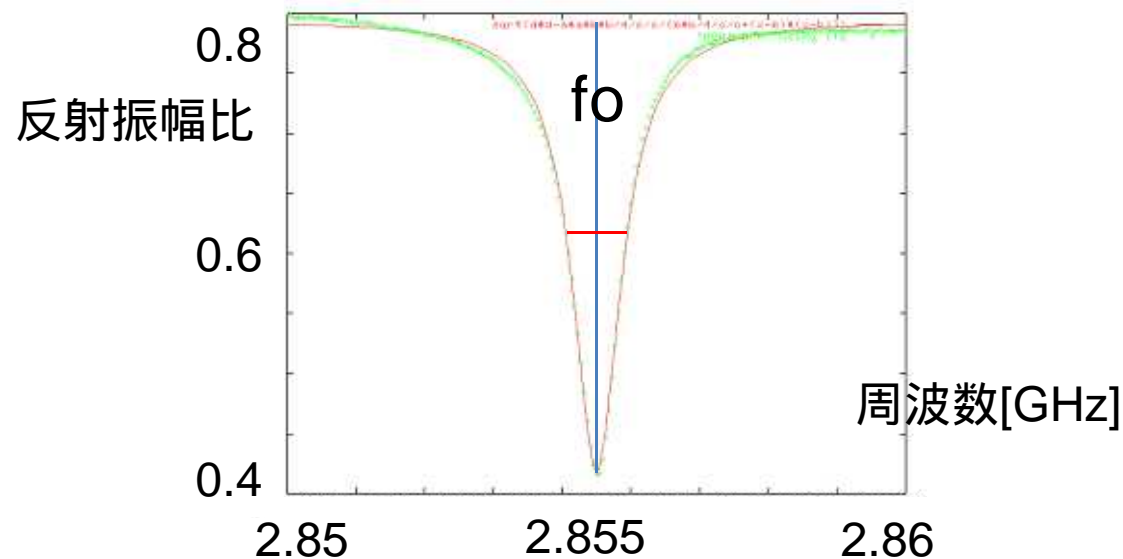
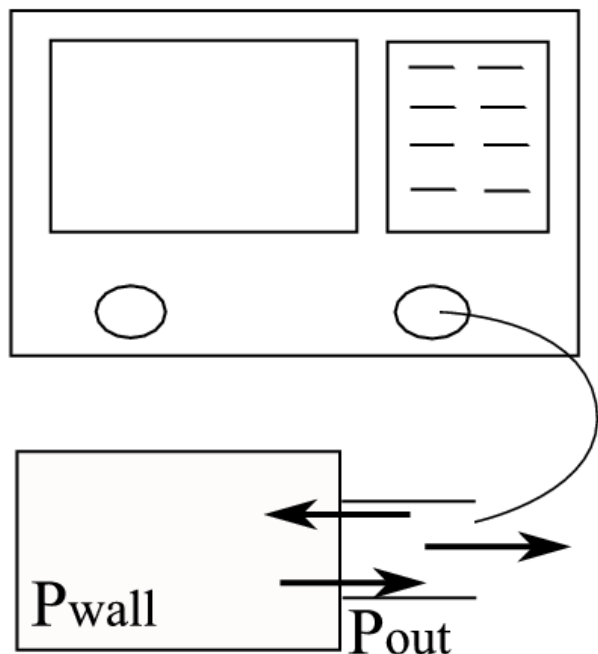
機械加工後、KEKにて
ろう付けを行い完成



フィードスルー

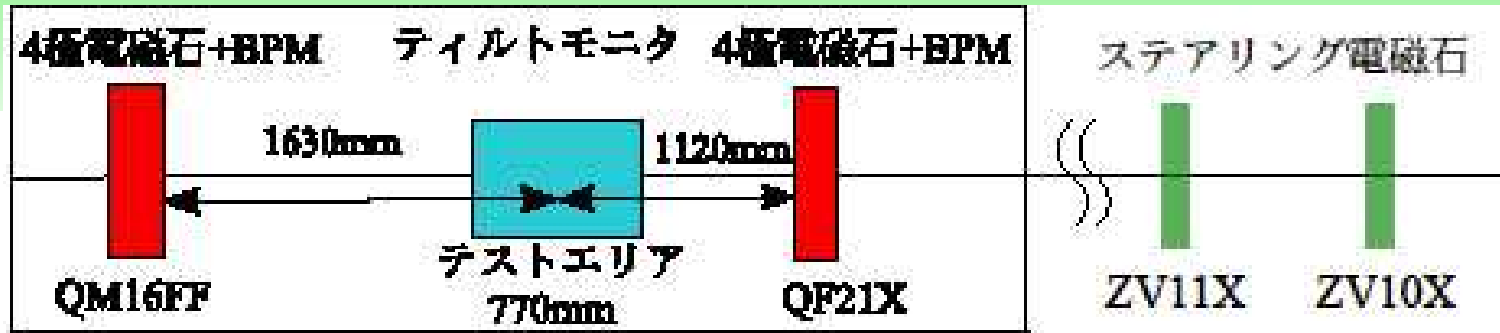
ネットワークアナライザによる基本パラメータ測定

ローレンツ型の共鳴曲線から、空洞の基本パラメータを求めることが可能

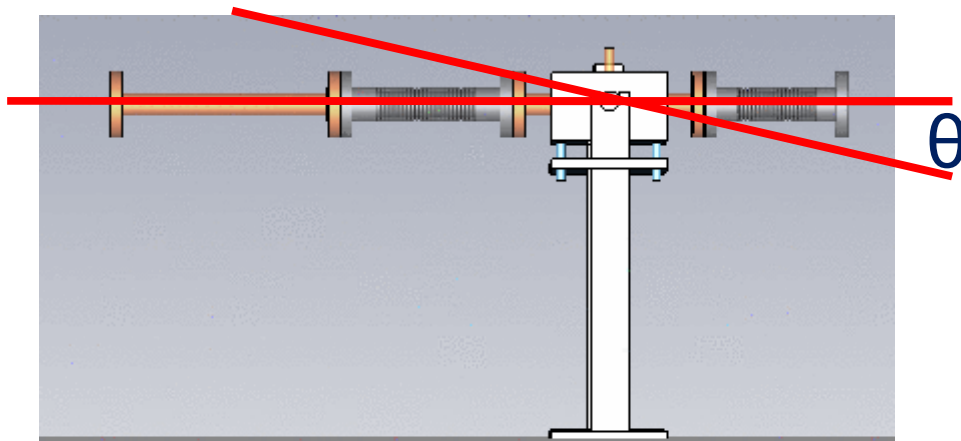
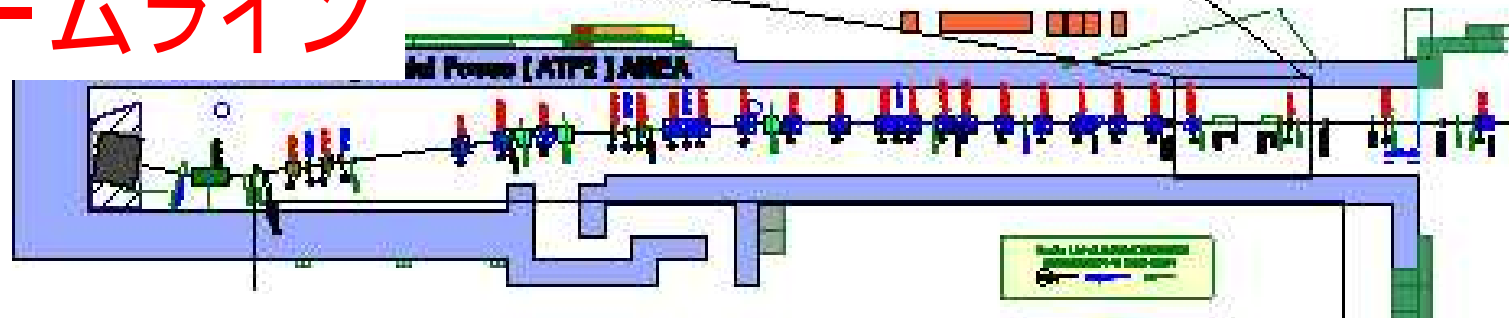


	ろう付け後測定	デザイン値
周波数	2.8546 GHz	2.856 GHz
Loaded Q	2978	2650
無負荷Q	10128	10000
外部Q	4220	3350
出力電圧の時定数	312nsec	300nsec

インストール



ATF2ビームライン



回転機構をもつ台座

10 μ rad ステップで ± 15 mrاد
空洞中心を軸に傾きをつくる

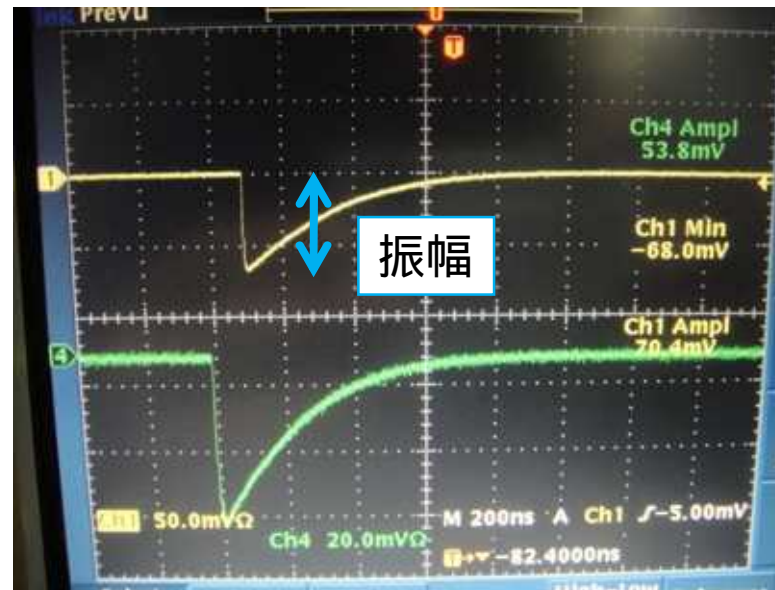
LAN経由でリモート操作が可能

オシロスコープによる信号確認



増幅器で増幅後、ダイオードにて検波し、
オシロスコープ及びフラッシュADCで測定を行った。

傾きモニター信号



ビームの空洞内通過によって、傾きモニターから信号
が出力されていることが確認できた。

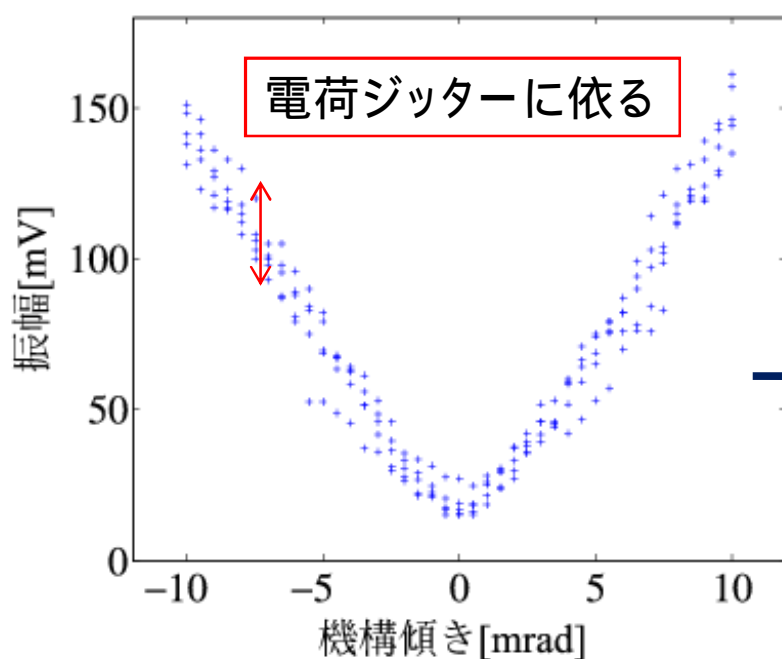
電荷ジッター補正

大きな機構傾きの大きさに比例した信号が得られている

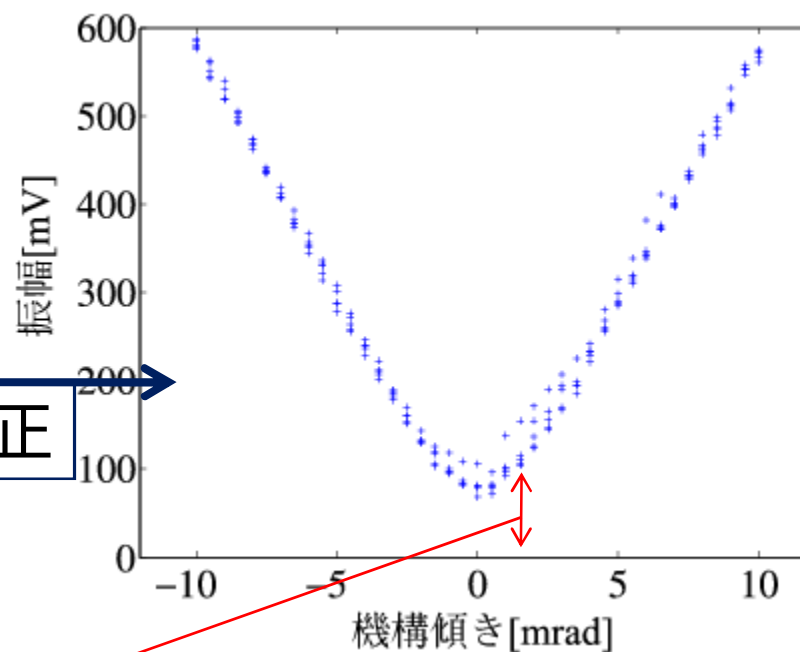
測定値のばらつきは、電荷ジッターによるもの

1.6nC(1.0×10^{10} e/bunch)を基準に補正

$$\text{検出振幅} \times \frac{1.6\text{nC}}{\text{電荷測定値}}$$

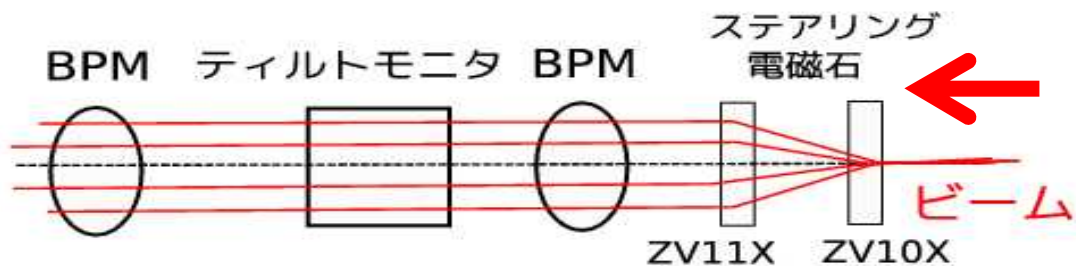


補正

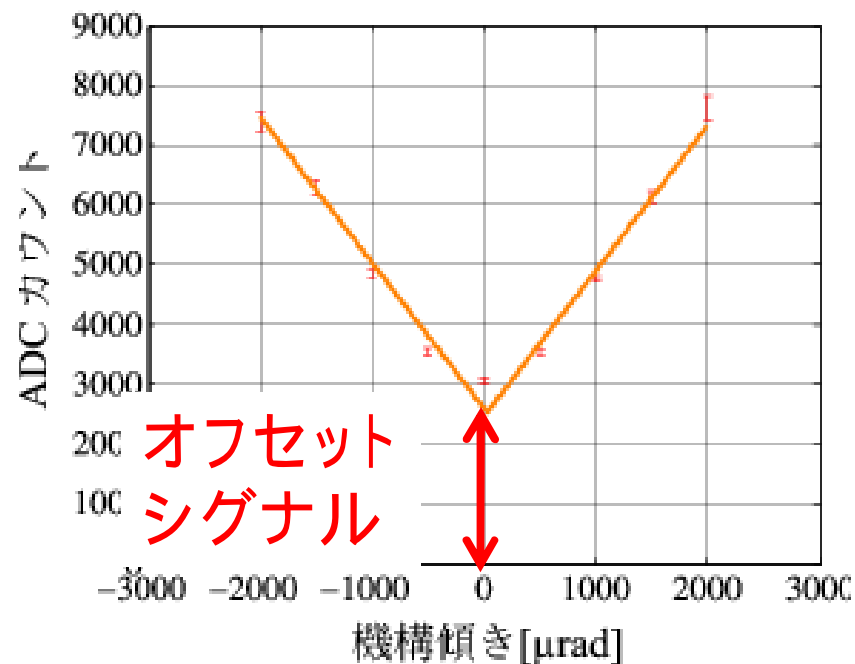
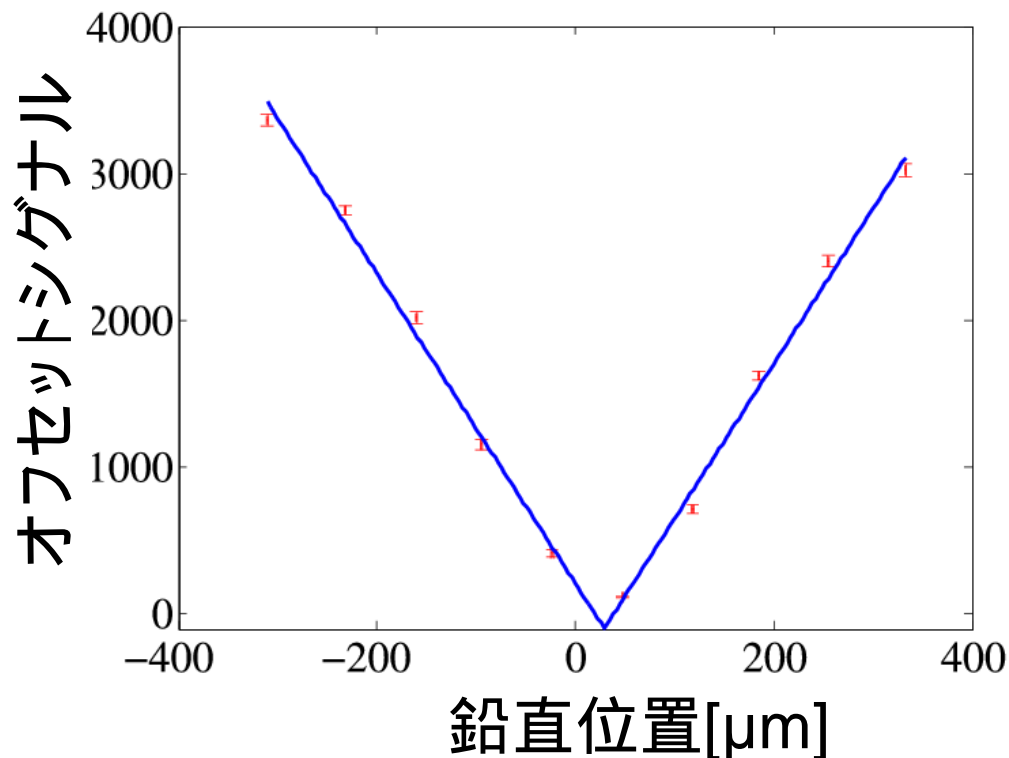


オフセットシグナルの測定を行った

ビーム位置補正

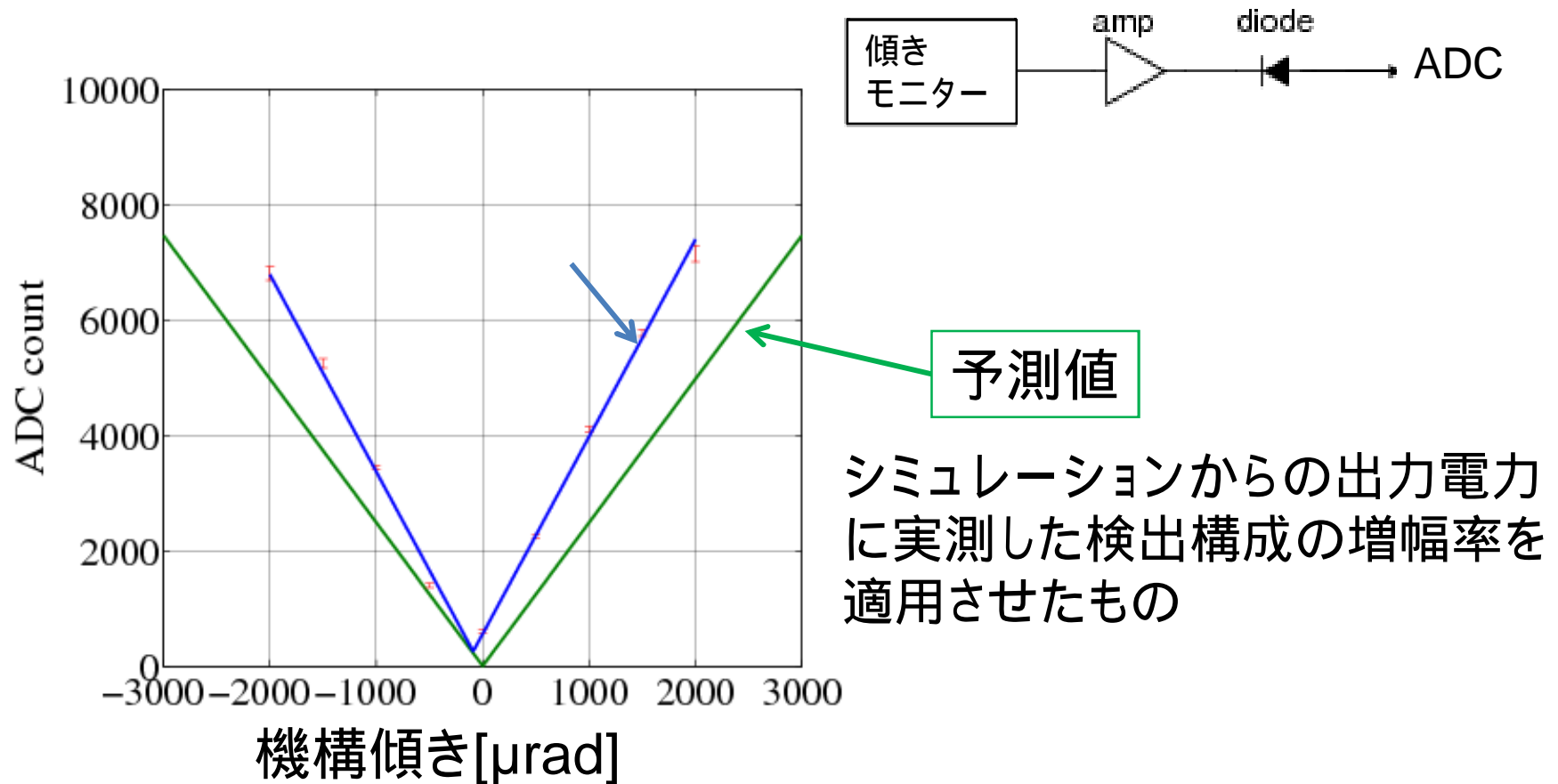


傾きは0に固定、2つのステアリング電磁石を用いてビーム軌道を平行に振る



機構傾きを0に設定しても、発生する信号(オフセットシグナル)が鉛直位置に比例関係を持つ

原理の確認(フラッシュADCによる測定)



実測値は、予測値の1.14倍
測定に対して、十分な大きさの比例関係が得られている

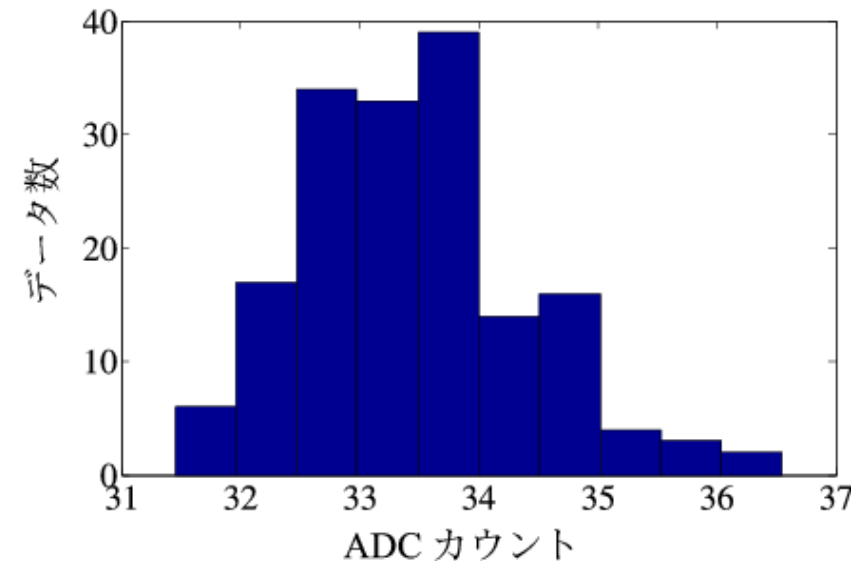
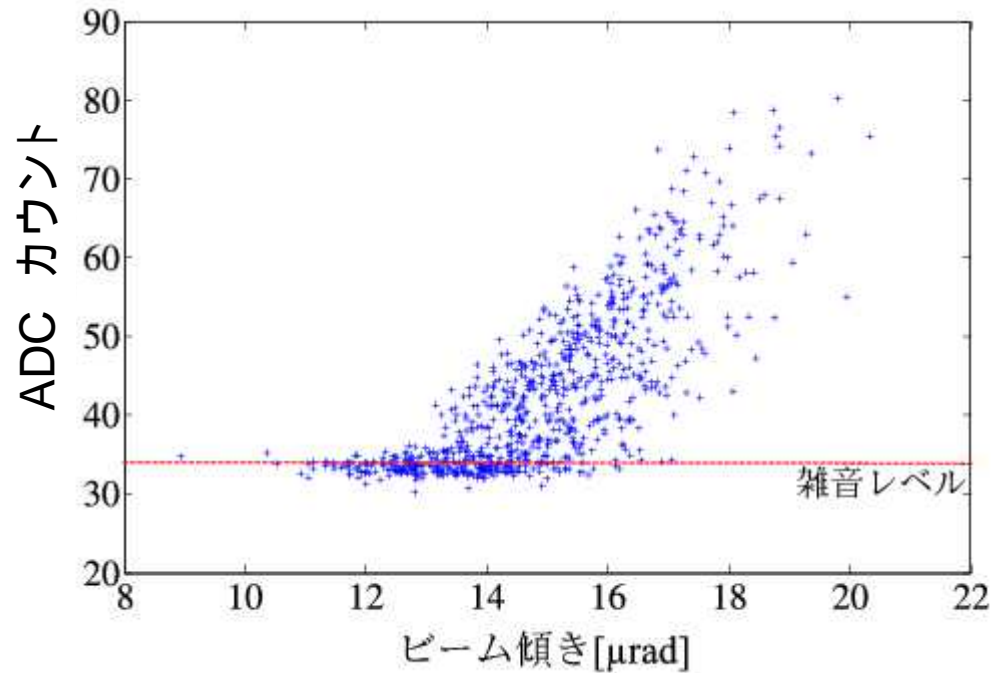
基本原理を確認した

μrad 軌道傾きに対する応答

機構傾きは0に固定

軌道傾きジッター($\sim 10\mu\text{rad}$ 程度)に対する応答をみる

軌道傾きは前後のBPMのデータから求めている



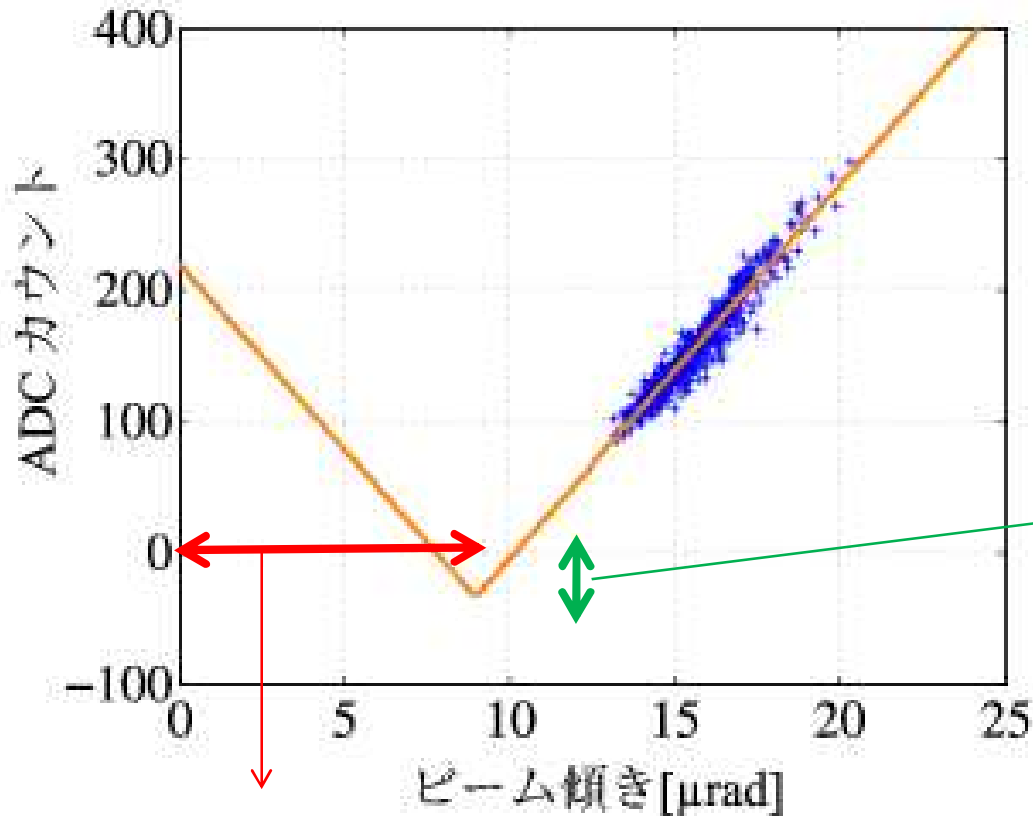
ビームのない状態でのノイズ

37以下のデータを除去、電荷補正と位置補正をかけた



V字応答のずれ

軌道の傾き0に対して、信号0となるはず
0点のずれは、BPMとの相対的な設置のずれだと考えられる

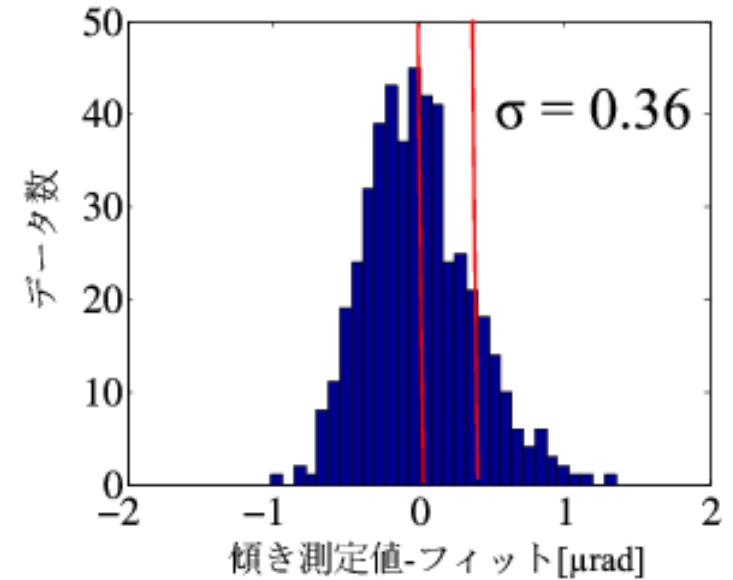
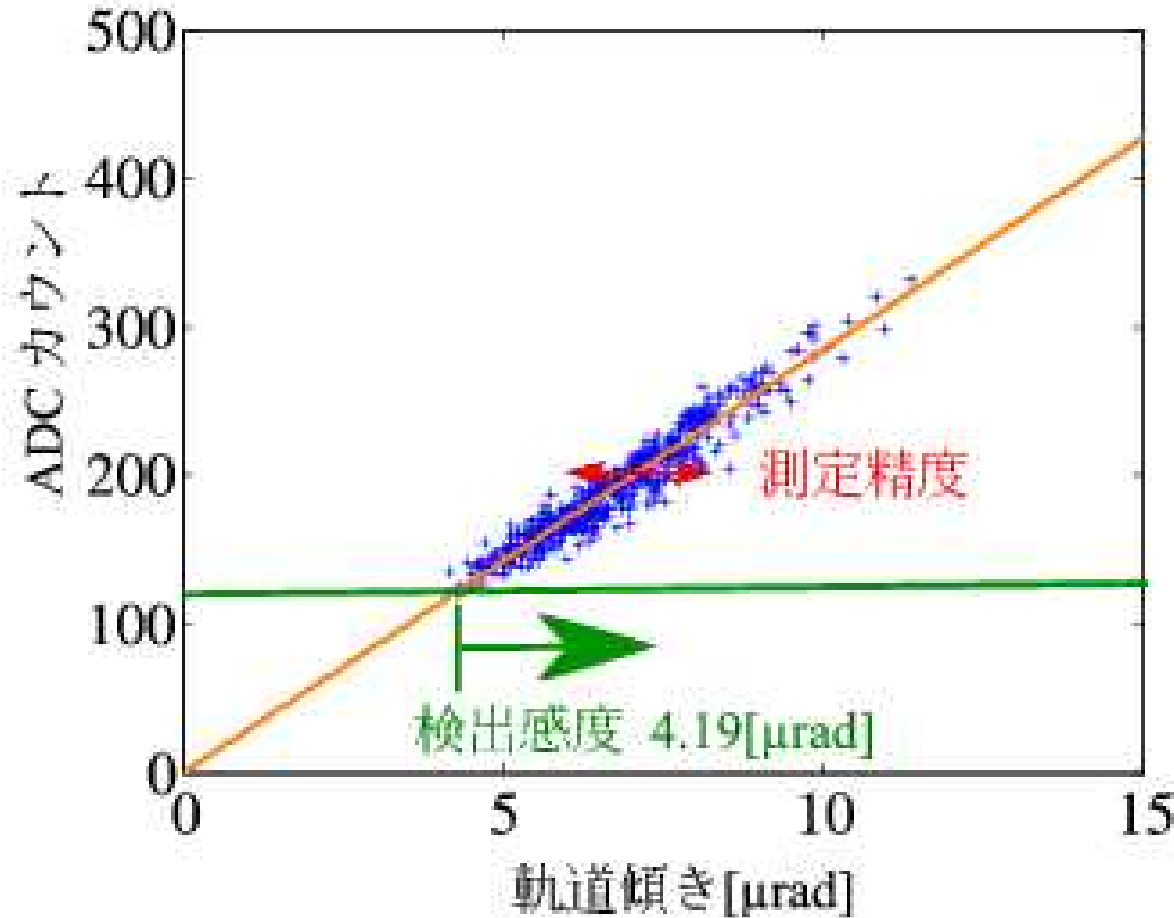


設置鉛直位置のずれ
9.3 μm

設置傾きのずれ
6.29 $[\mu\text{rad}]$

傾き0に対して信号0となる
ように校正

性能評価



検出精度 $\sigma = 0.36[\mu\text{rad}]$

軌道の傾きは前後のBPMから求めている
BPM分解能 $1\mu\text{m}$ に対する検出誤差 $\frac{\sqrt{2} \times (1\mu)}{2.75[\text{m}]} = 0.51 [\mu\text{rad}]$

軌道傾き算出においてBPM分解能からくる誤差が支配的

考察

測定精度

測定精度 $\sigma=0.36[\mu\text{rad}]$ に対して、ビーム位置モニタの分解能 $1\mu\text{m}$ 程度から計算する軌道傾きの誤差は、 $0.51[\mu\text{rad}]$ 従って、傾きモニタ自身の測定精度はもっと良い精度であることが期待できるが、今回のテスト結果においては、評価できない。

傾きモニタの測定精度の評価には、遠く離れた位置にある高分解能のビーム位置モニターを利用する必要がある。

位置依存性

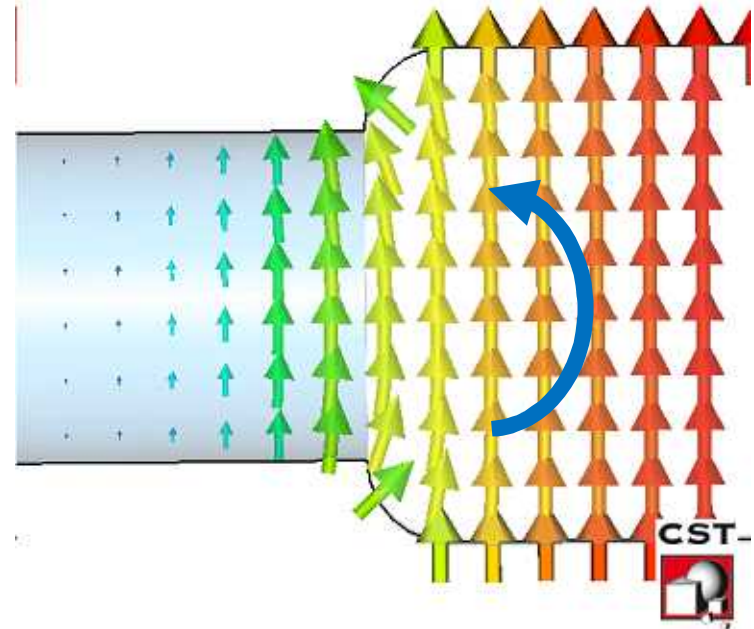
傾きモニタの出力信号が位置にも依存性を持ってしまうことを確認した。ビーム位置の分解能に依存
問題の解決案として、空洞の形状によって位置依存性を小さくすることを考えている

位置依存性の原因

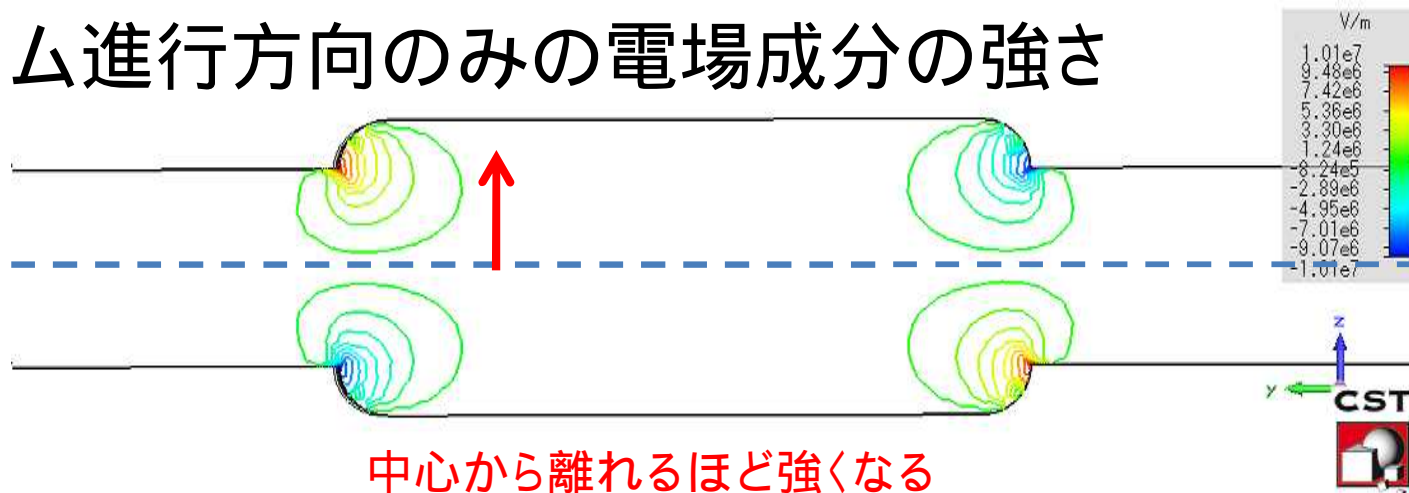
そもそもなぜ鉛直位置に依存する？

モノポールモードの電場分布が、
ビームパイプ部により変化する

ビームの進行方向に、電場成分を
持つことになるので、傾きのない
ビームに対してもモードが励起され
る



ビーム進行方向のみの電場成分の強さ

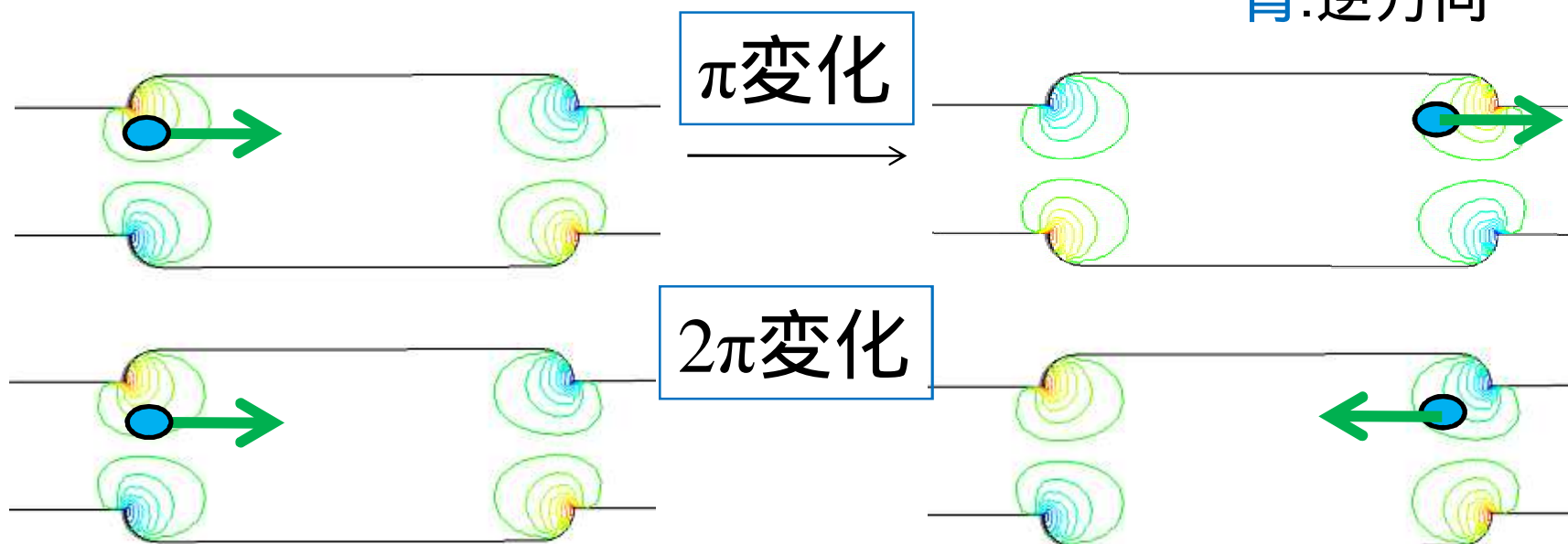


中心から離れるほど強くなる

解決案

空洞内通過による位相変化を調節する

赤:進行方向
青:逆方向



π だと入口、出口の2回の励起、 2π だと位相が反転しているので打ち消し合う

現在モデル $\Phi = \omega t = 2\pi f \times \text{空洞長}(0.0702\text{m})/\text{光速} = 1.336\pi$

打ち消し合うようにセンサー-空洞形状を調整する

まとめ

ILCへ向けて、軌道の傾きを1空洞にて測定する傾きモニター
の設計開発を行っている。

プロトタイプ的设计が完成し、ATF2ビームラインにインストール

ビームテストにより、軌道傾きに対する出力振幅の比例関係を
を測定、基本原理を確認

問題点として、出力振幅の鉛直位置依存性を確認
これはビームパイプ部の電場分布によるものだと考察している。

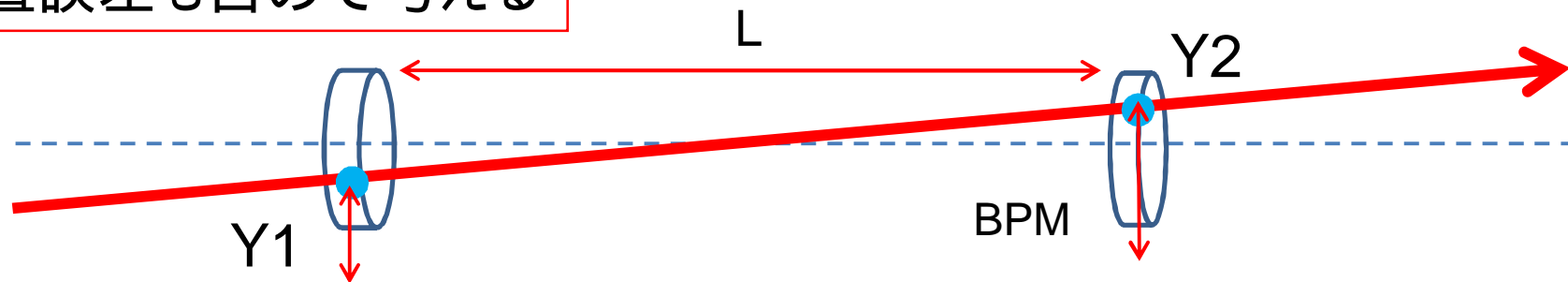
今後

センサー空洞形状を改良することで、位置依存性を小さくする

Back up



設置誤差も含めて考える



傾き $\sin\theta$ $\theta=(Y2-Y1)/L$

空洞型BPM 空洞中心からの距離を測定 誤差 = 測定誤差(ΔY) + 設置誤差(ΔS)

$$\text{誤差伝搬 } (\Delta\theta)^2 = \frac{(\Delta Y1)^2 + (\Delta Y2)^2 + (\Delta S1)^2 + (\Delta S2)^2 + (\Delta L \cdot \theta)^2}{L}$$