

GLC X-BAND TECHNICAL NOTE

RF characteristics evaluation and tuning process of X-band 60cm-long accelerator structure

K. Watanabe*, N. Kudo and T. Higo

KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1- 1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

* Tohoku Gakuin University
1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi, 985-8537, Japan

Abstract

The basic RF characteristics of the 60cm-long X-band accelerator structure was evaluated and the couplers were matched. In the present paper are described those methods relevant to such evaluation and tuning procedures. Basic measurements are such as S-matrix, pulse response and the bead pulling. These are key techniques for the evaluation and tuning of travelling-wave structures and become very important to make the structures well performed.

X バンド 60 cm 加速管の RF 特性測定とカップラーマッチング

肥後寿泰、工藤昇、渡邊謙*

KEK、高エネルギー加速器研究機構
つくば市大穂 1-1

*東北学院大学
宮城県、多賀城、中央 1-13-1

アブストラクト

X バンド 60 cm 加速管の RF 特性を測定し、カップラのマッチングを行った。このノートでは、それに必要な関連する測定技術に関して述べる。基本的な測定は、S マトリックス測定、パルス応答測定、それにビードプル測定である。これらは進行波型加速管の特性測定とチューニングに対して必須の技術であり、特性の良い加速管を実現するためには非常に重要である。

1. 序

リニアコライダーの主線型加速器に用いるために開発してきた X バンド加速管は、高電界対応の設計を経て、60 cm長のセル当たりの位相進み $5\pi/6$ のディスクロード型加速管である[1,2]。この加速管開発によって得られた精密な製作技術に立脚して、各種応用を含めた高電流・長パルスビームの安定運転を検討することができる。このノートでは、そのために必要な加速管に RF 計測とチューニング技術について、最近製作された 60 cm加速管の例を引いて記述する[3]。

想定する加速管は進行波型で、ダブルフィードのカプラーを有するディスクロード型である。製作には、超精密加工をベースとしたセルの製作から出発し、それらを拡散接合して、最後にカプラーにロウ付けする。こうして製作された加速管のカプラーに起因するミスマッチングを取り除き、必要があればセル自身の周波数をチューニングすること、また高電界運転による加速管の変化を評価する一方法として各セルの周波数、もしくは等価であるセルの位相進みを測定する方法について本報告を行う。

進行波型加速管の代表的なチューニング方法にはビーズ測定法がある。これは、非共振の摂動理論によりビードプル[4]の方法による。DESY にて S バンドリニアコライダー開発において $2\pi/3$ モードの加速管に関して展開された方法[11]に準拠し、位相進み $5\pi/6$ である本加速管への適用することができる。本稿では、この方法に必要な安定性、周波数校正、温度ドリフト等を議論するとともに、実際のチューニングへの適用方法について示す。また、カプラーのマッティング調整法についても述べる。

2. 加速管のRF計測とマッチング

KX01:60 cm加速管設計

60 cm加速管の基本構成をKX01の例にとってFig. 1に示した。この論文では、KX01 に関する測定に沿って殆どの技術を記述した。この加速管の本体部分は、SLAC の設計による H60VG3N18 に準拠しており[5]、カップラー部分をいわゆる導波管型として KEK にて設計したものである[6]。図から分かるように、カップラーと加速管本体レギュラーセルとの間にマッチング用のセルを有する配置であり、セルと呼べるのはマッチング用も含めて53セルである。

機械構造的には、カップラーはダブるフィード型であり左右対称に2方向に出ているが、その他のセル全ては回転対称型である。両端ビームパイプ側にはRFカットオフ用の細いパイプがあり、RFを遮断している。また、リニアコライダー用に設計された加速管であり、ビーム穴径は大きく、直径で8～10 mmである。

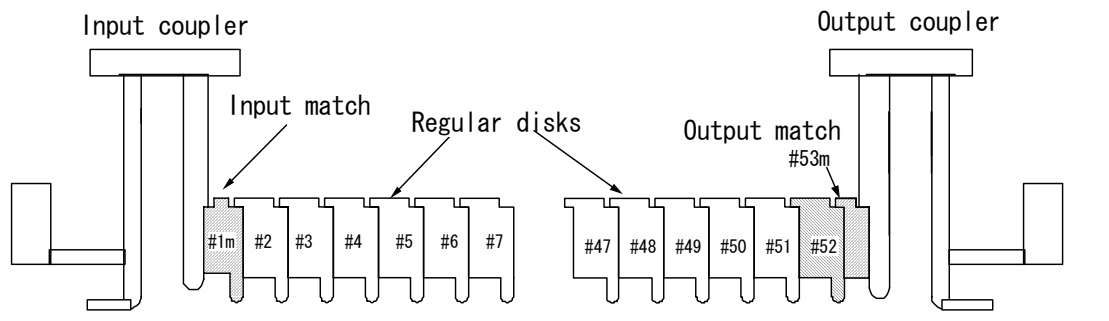


Fig. 1 Cell configuration of KX01. A matching cell (#1m or #53m) is inserted between waveguide coupler and regular section.

加速管製作工程

加速管のレギュラーセルは、超精密旋盤加工で形成され、周波数精度は2～3 MHz 以上の精度でコントロールされている。また、カップラー部は、導波管部分は精密ミリングで～10 ミクロン程度の精度で形成され、最後にカップリングを決めるアイリス部分を超精密

加工する。従って、その開口部精度は1～2ミクロンである。

カプラー以外の全てのセルは0.5ミクロン以下のエッチング洗浄を経て拡散接合され本体部分を形成する。カプラーは～3ミクロン程度のエッチング洗浄を経てまずロウ付けにより部分組立される。最後に本体部分とカプラーは50ミクロンのロウ付けシムを挟んで金ロウ付けされる。このキンロウ部分の厚さはほぼ25ミクロンと推定している。

組立後に真空ベーキングを施されたのち、RF計測、チューニングを経て実際の高電力運転に入るが、本論文ではこの最後のRF計測とチューニングに関する技術である。

マッチング工程に必要な項目

ビード測定を組み合わせたマッチングには下記に掲げた測定系や環境等が必要である。

1 測定環境

実機加速管内を汚さないケア

2 加速管の周波数決定要素

加速管温度

加速管内の誘電率（ガス種類、圧力等）

3 ビード測定のセッティング

ビードを保持するための糸

なるべく細く ϵ の小さい、ゴミのでにくい糸

ビードの形状

充分小さいこと

糸の加速管に対するアラインメント

ビードの加速管に対するビーム軸方向の位置

4 RF測定系

ネットワークアナライザー Sパラメータ計測

ネットワークアナライザーの周波数精度

5 チューニング機構

チューニング治具（ピン、スライドハンマー）

等である。

RF計測

RF計測は、入力、出力導波管から行う。Fig. 2に示した典型例では、加速管

の入力カプラー側を下にセットし、入力マッチング測定出力カプラーから見たマッチングの測定を行っている。ネットワークアナライザーを同軸導波管アダプターの導波管面で校正し、マジックティーを介して 2 分岐した後ダブルフィード型の入力ポート両側に対称につなぎ込む。反対側のカプラーは導波管終端器をセットする。Fig. 2 はアウットプットから見たマッチング測定風景である。

加速管の特性を調べるための RF 計測項目を下記にリストアップする。これらの内必要な測定のみを行う。

1 マッチング特性

$$S_{11}$$

2 透過特性

$$S_{21}$$

3 パルスレスポンス

実際にパルス特性を測定、又は
周波数スペクトルから時間領域への変換をソフト的に行う

4 セル周波数（又はセル間位相シフト量）

5 電界強度

ビードプル測定

測定・チューニングの概略フロー

典型的なフローを示す。

1. 各カプラーマッチング（反射特性） S_{11} 計測する。
2. 透過特性 S_{21} をとり、レギュラーセル本体部分のQ値の確認、加速管充填時間等の確認を行う。
3. S_{11} をモニターしながらカプラー付近の2～3セルの周波数を増減させることによりカプラーのマッチングをとる。インプット側、アウットプット側はそれぞれチューニングする側からフィードして S_{11} 測定して評価するのが直接的であり、カプラーのみによる反射量を減少させる。この際フィード側のカプラーの反射量を、パルス反射特性で下流からの反射の到達前までの時間帯での反射をもってするか、 S_{11} 周波数領域測定を Fourier 解析による時間領域に変換してフィードする側のカプラー部分の反射量として評価する。
4. ビードプル計測を行い、レギュラーセル（本体部）のセル間位相進み量

を測定する。

5. ビードプル計測を行いつつ、必要に応じて本体部分のセルの周波数をチューニングする。
6. 最終的なカプラーのマッチングを、2項と同様にチューニングする。この場合、フィードと反対側のカプラーでの反射も含めた定常状態での反射特性をも適当な小さい値になるように反射特性を微調整することがあり得る。

これらの工程をK X 0 1 に対して行ったので、主にそれを例に取り、本論文では、必要な測定方法、測定条件、等について述べる。

3. 測定環境整備

3. 1 測定環境：温度

測定環境は、完成後の加速管をオープン状態で測定する必要があるため、極力クリーンネスに気をつける必要がある。通常は、クリーン度 10^4 (Particles/ft³) のクリーンルーム内で行う。空調機は $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 仕様であるが、短期（数分程度）の空調制御周期での変動は実際は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度を維持している。但し、外界との熱絶縁が十分でないために、日周期、又は季節の変動は大きい。この状況は1日の変動を測定した Fig. 3 に示されている。HEPA から1 m程度離れている加速管本体上部の温度は赤で示しており 2°C 程度変動している。これは、加速管上部の環境温度（青）に依存していることが分かる。

長時間のかかるビード測定は現在 30 分程度で済むので、適当な時間帯を選べばほぼ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内を確保できることがわかる。加速管を水冷等で制御すると、早い挙動で $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度の変動が生じる可能性があり、正確な測定には向かないことが分かる。これは FNAL での X バンド加速管の測定での結論に同じである。[7]



Fig. 2 Tuning setup. Structure is vertically set. Double-feed ports are combined with magic tee to connect to network analyzer.

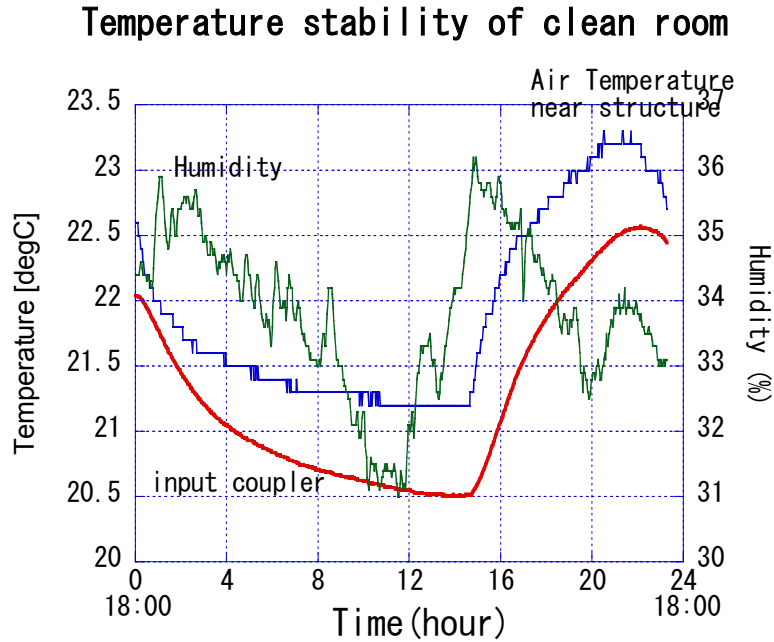


Fig. 3 Temperature of clean room for bead pull measurement. Measurement was performed from 18:00 in the evening till the same time of the next day.

加速管の温度は、加速管本体にあけてある熱電対挿入用穴（φ 3、深さ 1 0）に白金抵抗センサーを差し込み、上部、中央部、下部を測定する。読みとり精度は 0.01℃である。また、周囲環境の温度変化を確認しておくために同型のセンサーで加速管上部、下部、及びクリーンルームの H E P A フィルター吹き出し口をモニターしている。

3. 2 加速管温度の変動と RF 計測への影響

加速管全体にわたる平均周波数変化は、出力カプラーフランジで全反射をさせ、入力カプラーでの入射位相に対する反射波位相（ラウンドトリップ位相 $\Phi_{\text{RoundTrip}}$ ）の変化を調べることにより分かる。温度変化に伴う線膨張による周波数の変化から生ずるラウンドトリップの位相変化は、下のようにかける。

$$\frac{d\Phi_{\text{RoundTrip}}}{dT} = 4 \cdot \tau \cdot Q \cdot \alpha = 14 \text{ degree/deg C}$$

但し、 α は線膨張率、 τ は加速管の減衰定数、 Q は Q 値である。実際に Fig. 3 の測定期間の位相シフトを測定した結果を Fig. 4 に示した。変動の大部分はこの

式で推定される位相シフトに良く合っており、温度による線膨張が位相変化の主要素であることが分かった。加速管の温度が均一であれば、それを基準に校正することができ、位相精度は日周期のドリフトで1度程度におさまると予想される。但し、これ以上の精度を要求する場合は短期での測定を行う等の配慮が必要であることも分かった。

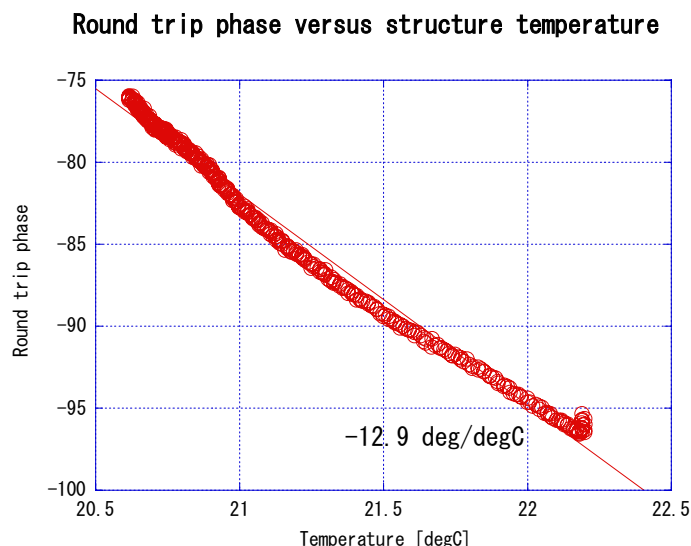


Fig. 4 Round trip phase versus temperature of structure.

3. 3 60 cm管に対する窒素フローによる置換

加速管内には、誘電率を一定にするために高純度窒素ガスをフローさせている。Fig. 2 に見える白いテフロンチューブを通してガスを導入し、フローゲージで流量をモニターする。測定時は窒素を～1 ㍈/分程度流しながら測定している。170 秒後に窒素ガスをそのレートで導入して、透過位相を測定した。総体積を V 、窒素挿入レートを Q とすると、内部の窒素酸素の混合が充分行われているという仮定をすると、内部の気体の内、窒素の割合 Y は、

$$Y = 1 - \text{Exp} \{ (Q/V) t \} = 1 - \text{Exp} (t / \tau)$$

の過渡特性を示すはずである。自定数 τ は、 $Q=1$ ㍈/分、 $V=0.5$ ㍈とすると 30 秒となり、Fig. 5 左図と矛盾しない。なお、窒素フローを止めたときの過渡応答は Fig. 5 右図により、数十分かかって空気の組成に戻るということが分かったが、これは自然置換によるので、窒素導入

時に比べて多大な時間が必要になるものと考えられる。

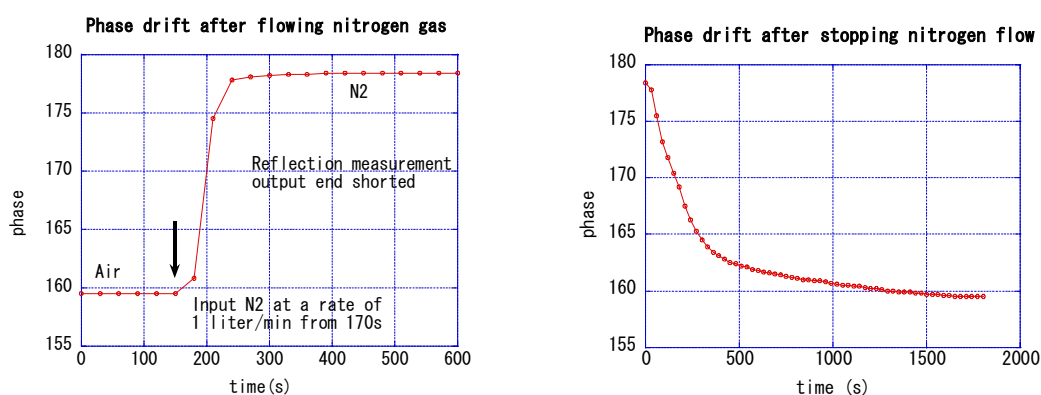


Fig. 5 Transient phase drift after flowing nitrogen gas and after stopping it.

3. 4 入力導波管系

加速管へは入力、出力共に二方向から対称的に結合させるので、このために通常はデバイダーFig. 6 を用いる。模式的には、Fig. 8 の上左図である。この例では入力加速管にフィードし、出力カプラー側は低電力RFロードで終端している。

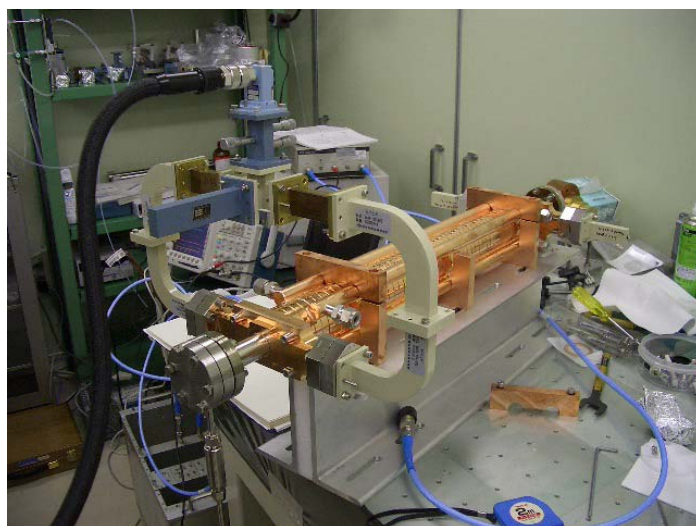


Fig. 6 Divider circuit consisting of magic tee, 3 stub tuner and two arms.

このためのデバイダーは、マジックティー(MT)と両腕で構成されており、MT の上流に 3 スタブを入れてデバイダー系からの反射を最小にしている。11.4GHz ではほぼ -40dB 程度に抑えている。また、両腕への位相差は 1 度 (導波管長 0.1 mm 相当) 以内に抑えるようシ

ムを入れて調整する。この状況を Fig. 7 に示した。この測定から分かるように、ネットワークアナライザの導波管校正を行う基準面を同軸導波管変換器の面として、加速管のポートまでに役 0.25dB 程度のロスが生じていることが分かる。また、この例で言うと 0.15dB 程度のパワーアンバランスが残っていることがわかる。

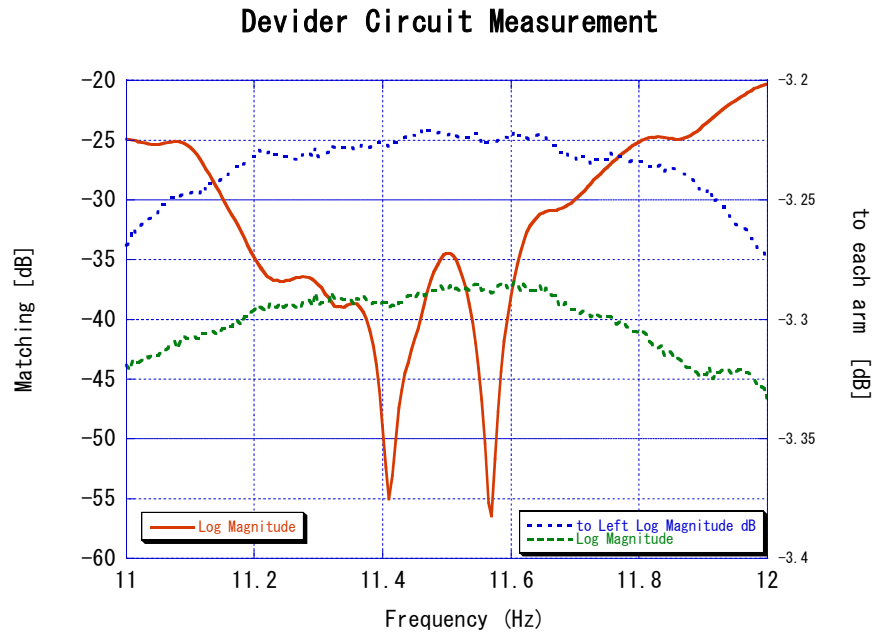


Fig. 7 Performance of RF feed divider circuit. Matching (red line) and transmission to each arm (dotted lines in blue and green).

このハードウェアによる分岐を用いる方法には、分岐のための MT のマッチングや両腕の電気長、ロス等の違いによる左右のアンバランスが存在するわけだが、これを解消して精度の良い測定を行う方法として、正確に 2 ポート校正をしたネットワークアナライザでの Fig. 8 の上右図に示したような測定セットアップを用いる方法がある。実際には、カプラーの反射特性測定に対しては、カプラーの左右アームにネットワークアナライザのポート 1, 2 を各々接続したまま、 S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} の全てを計測する。これより、カプラーに対称に入力される場合のカプラーでの複素反射係数 Γ は

$$\Gamma = S_{11} + S_{12} = S_{22} + S_{21}$$

として計算できる。この場合はデバイダーの特性を気にすることはなく、ネットワークアナライザーの正確な校正とそれを維持する測定セットアップを組むことに注意すればよい。しかし、2ポートの測定を常に要求されるので、入力、出力両カプラーに関連した測定を行うためには4ポートの装置が必要であり、現状では採用できない。

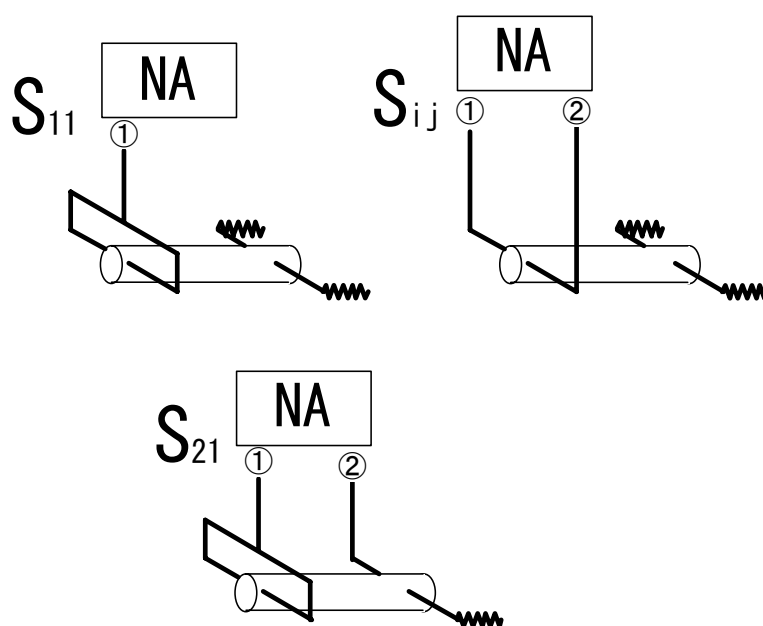


Fig. 8 Configurations for network analyzer measurement. Above figures are those for reflection measurement, while that below is for transmission measurement,

KX02 加速管の入力カプラーでのマッチング測定例を Fig. 9 に示した。同図の 0dB 付近の拡大を Fig. 10 に示した。この例からも、2ポートで測定すると、広範囲で減衰がなくマッチング特性の良いシステムを用いての測定値を得ることができるが見える。但し、 $S_{11}+S_{12}$ と $S_{22}+S_{21}$ 間に若干の違いが生じており、測定ケーブルの引き回しによる測定系の変化や、加速管自身の非対称性等によるものと推定でき、更に正確な測定を望むときはそれらを抑制して測定することが必要であることも分かる。

透過特性測定は、入力をデバイダー側とし、出力側は片側に RF ロード、もう一方にネットワークアナライザーのポート 2 を接続して 2 ポート校正で誤差補正して測定する。出力側のパワー分割が対称であることを仮定して測定結果を解釈する。

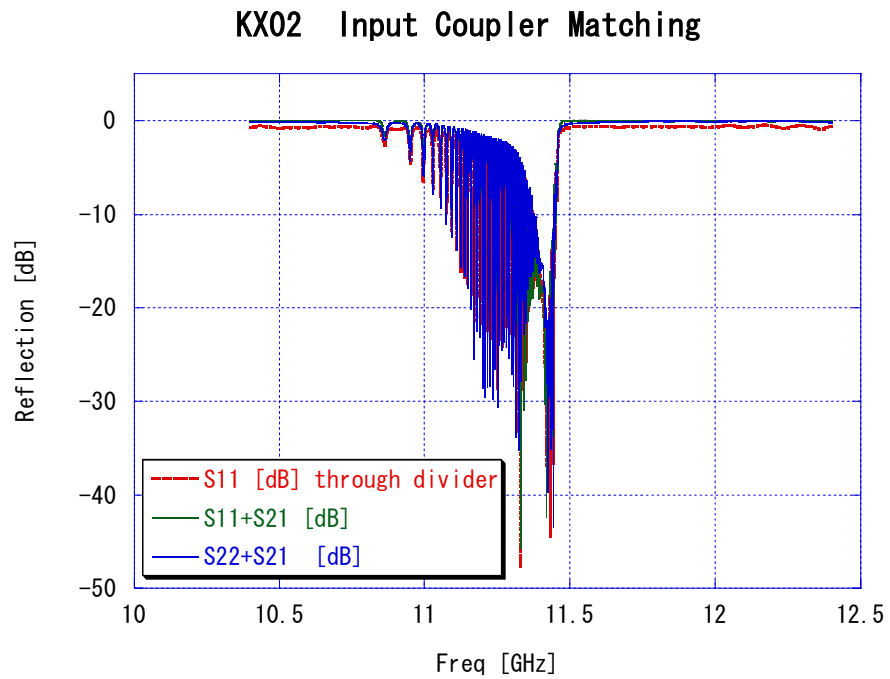


Fig. 9 Full spectrum of reflection of the KX02 input coupler.

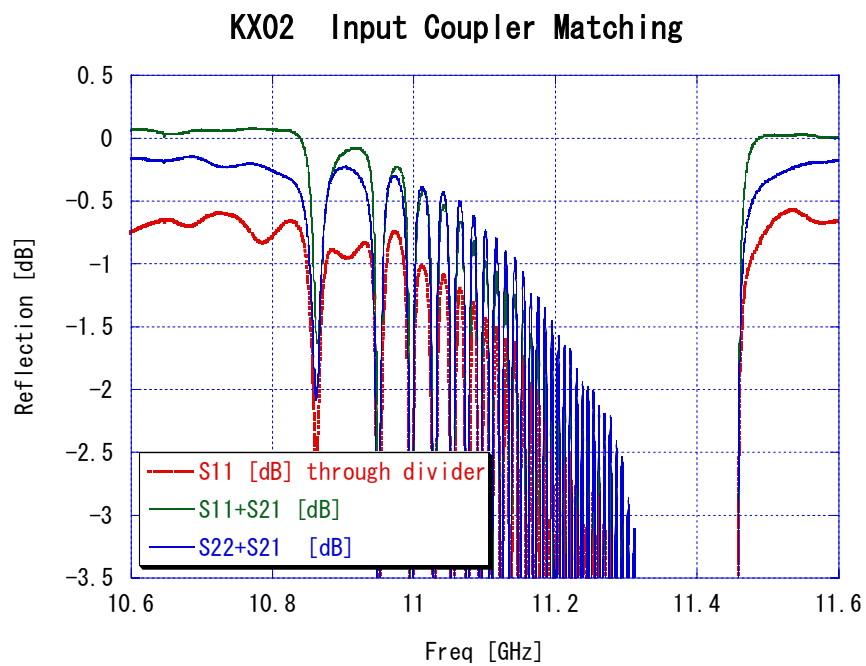


Fig. 10 Expanded view of Fig. 9.

4. RF 基本計測例

下記に、X バンド 60 cm 管の RF 計測例を示して、典型的な RF 計測の例とする。

4. 1 インプット、アウトプット S_{11} 計測

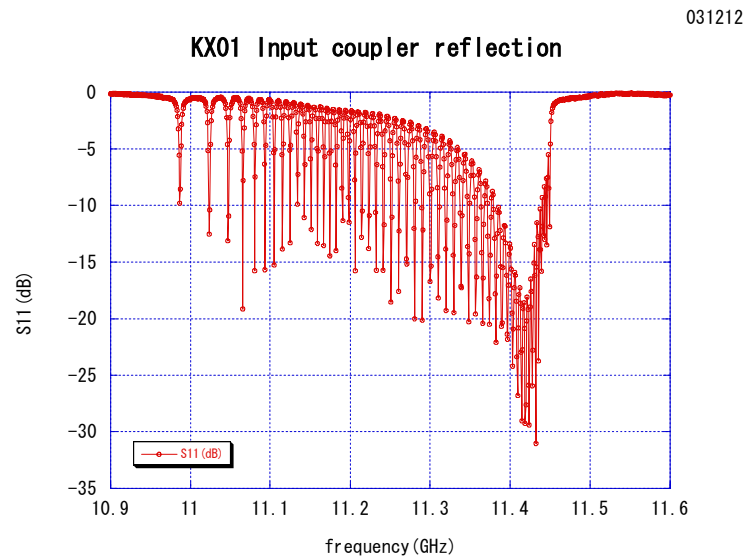


Fig. 11 Input coupler reflection S_{11} .

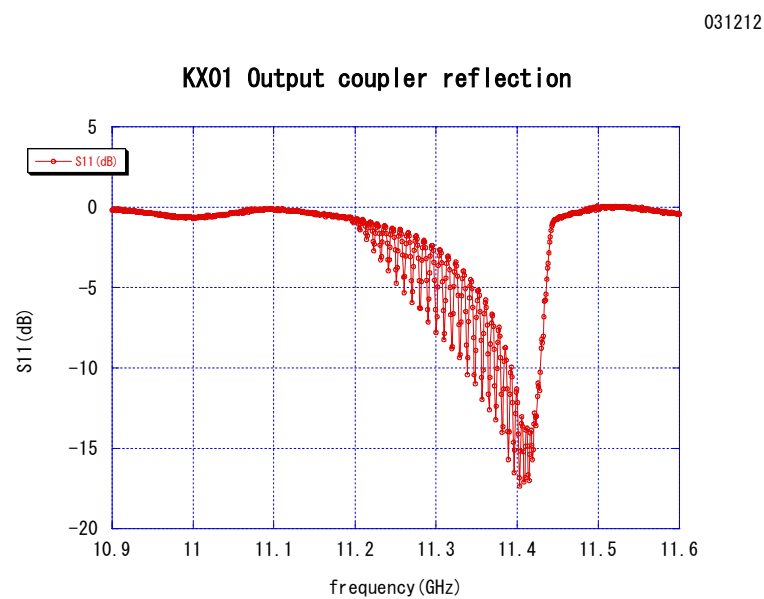


Fig. 12 Output coupler reflection S_{11} .

4. 2 透過特性

入力カプラー両腕にデバイダーを通してフィードし、アウトプットカプラーの片腕（他方はロード）から伝達されるパワーを計測する。Fig. 13 には KX01 の場合の測定例を示した。この減衰量と設計計算による τ を比較してセルの Q 値を評価できる。 $Q_{\text{actual}} / Q_{\text{ideal}} = \tau_{\text{ideal}} / \tau_{\text{actual}}$ である。Fig. 14 は、ネットワークアナライザーが、Fig. 13 の複素量を周波数で微分して得られる群速度に対応する遅延時間に変換したプロットであり、ネットワークアナライザーの機能と用いて行うことができる。

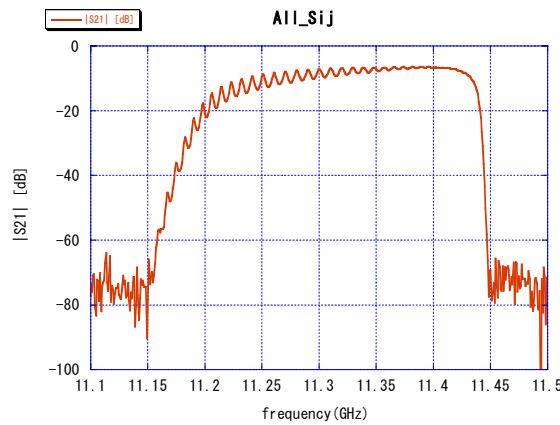


Fig. 13 |S21| measurement from input coupler double feed to one of the output coupler wave guide ports.

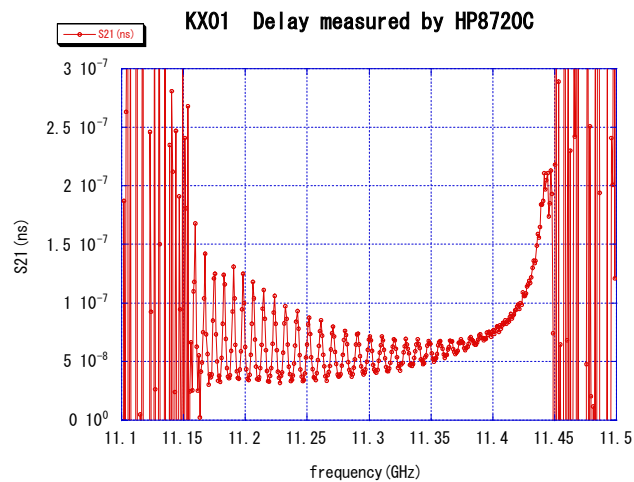


Fig. 14 KX01 Delay from S21 measurement.

4. 3 パルス応答 (時間ドメイン) 測定

透過波のパルス応答を Fig. 15 に示した。入力赤、出力青である。Filling Time に関係したほぼ 100ns の時間遅れと周期構造による分散特性に起因するパルスのなまり、変形が見える。

031212

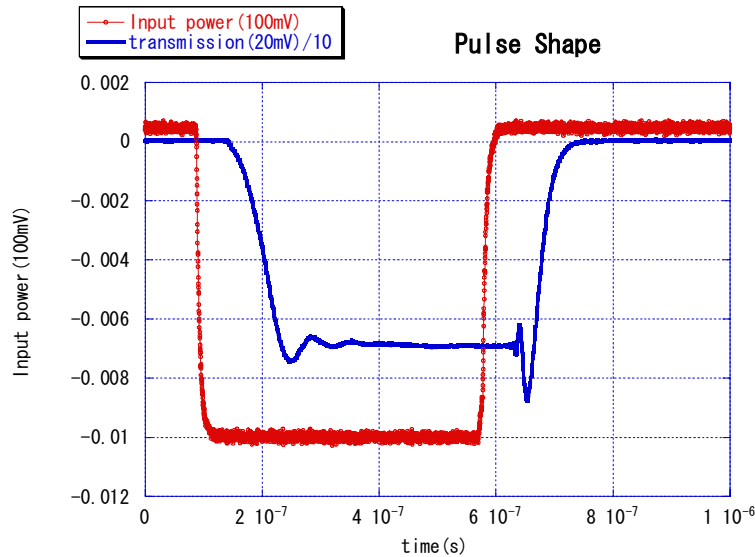


Fig. 15 Pulse response of reflection seen from input coupler side.

また、反射特性のパルスレスポンスも同様に測定できるが、それから定常状態における反射係数 S11 や、RF フィード側のカプラーでのミスマッチ特性を得ることができる。特に後者に関しては、下流側のミスマッチからくる反射波の到達が、加速管のフィリングタイムの 2 倍 ($2T_f$) だけ遅れることから、60 cm 加速管の場合を取ると ~ 200 ns もの時間遅れが生じて充分フィード側のカプラーでのミスマッチ量を分離測定できる。測定時のドライブ周波数を変えて下流の反射が到達するまでの反射振幅を入射振幅で割ると入力側カプラーでの反射係数の周波数依存性が得られる。KX01 の入力カプラーの例をプロットすると、Fig. 17 の赤実線となる。

任意の周波数のパルスを Fourier 展開し、これに周波数領域で測定した反射 S11 の複素反射係数をかけた積の積分を行うと、時間領域で測定するパルスレスポンスと同様の評価を得ることができる。一例を Fig. 16 に示した[8]。ここでも解析で得られる反射パルス波形の最初の 200 ns 間の振幅は、フィード側のカプラーによる反射である。これにより、フィード側のカプラーのみの反射特性を調べることができる。

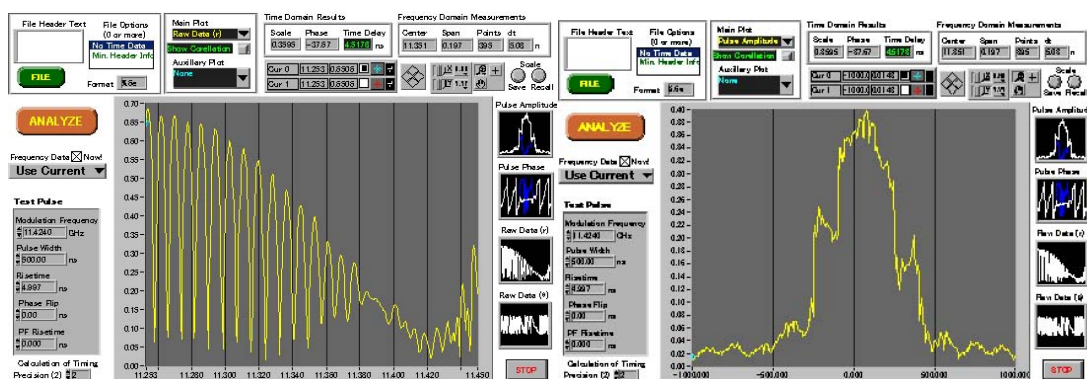


Fig. 16 Conversion from S11 measurement in frequency domain into time domain pulse shape.

Left: Frequency domain measurement. Right: Converted result into time domain.

インプットカプラーに関してこの解析を行ったものが Fig. 17 の緑点線◇であるが、これは実際にパルスで測定した赤線○と良く合っていることがわかる。この図で、×点線は同様の解析をアウトプットカプラーからの反射も到達している時間での解析により得たものであり、青□波線は対応する時間帯での実際のパルス計測によって得た反射係数であって、これらも良く合っていることが分かる。このように、RF フィード側の反射特性を調べるには、周波数ドメインでの S11 を必要な周波数範囲と周波数ステップで計測することにより充分得られることが分かった。

S11 on 031205

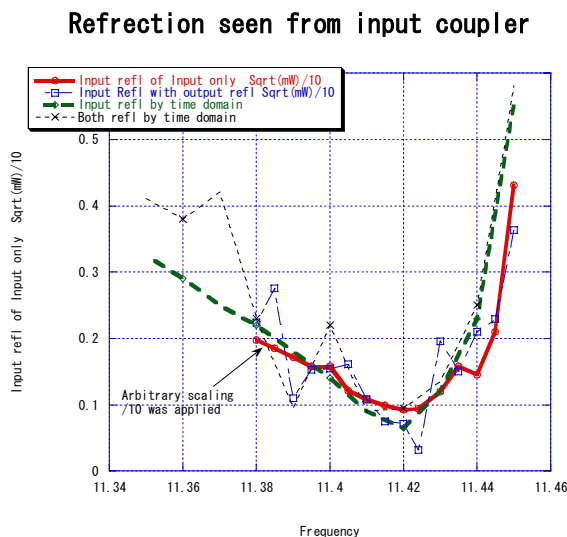


Fig. 17 Reflection seen from input coupler side. Red and blue lines are those measured by actual pulse, while the other two lines are those time-domain converted. Thick lines are reflections from input coupler only, while thin lines are reflections including that from output coupler.

5. ビードプル及びレギュラー部分のチューニング

5. 1 ビード測定関連パーツ、セッティング

ビードプル測定は、空洞内に摂動体（パータベータ：金属、セラミック等）を挿入し、それが無いときの電氣的測定との比較からビードの位置での電界、磁界等の大きさや方向を調べるものである。摂動体を測定したい位置に保持する必要がある、糸で吊って保持するが、その糸はなるべく ϵ の小さい細い糸を用いて糸の摂動を極小化する。摂動体は、今回のような軸方向（Z方向）のみの電場を測定するには、軸方向に細長いものを用いる。これは軸方向電場に対して高感度であり、しかも摂動体が軸上から離れたときに存在する磁場の影響を受けにくく低感度であるためである。摂動体駆動は例えば Fig. 18 のような簡単な駆動系で十分である。

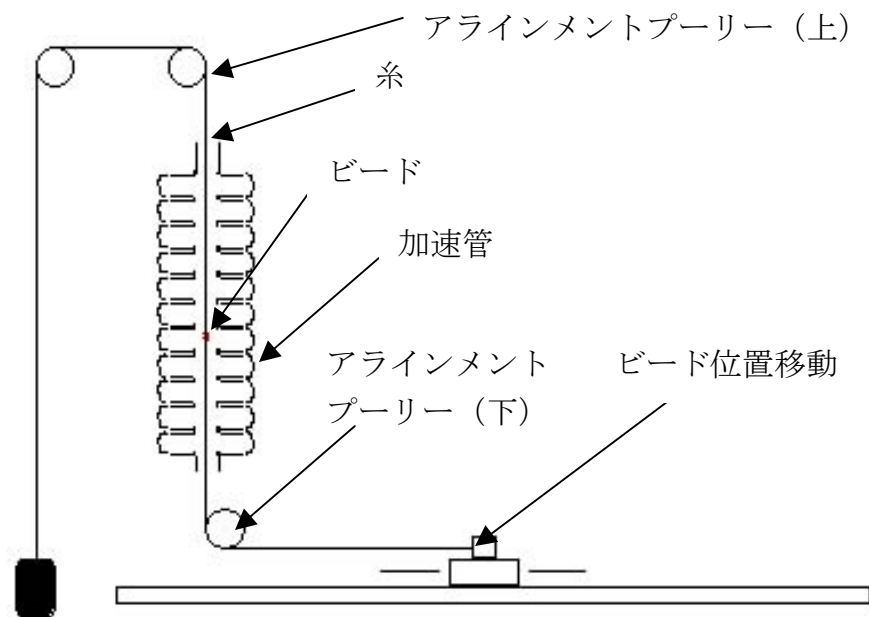


Fig. 18 Bead pull setup schematic.

今回測定に用いたビードとそれを保持する糸を Fig. 19 に示す。ビードはステンレス製で $\phi 0.4$ の筒をワイヤカットで1 mm程度に切断したものである。また糸は、鮎釣り用のフィッシング釣り糸[9]を用いた。これは数本の縫線からなるので若干均一性に不安が残るものだが、総直径が $50\mu\text{m}$ と小さく延びにくいことから測定への影響、ドリフト等が小さいと判断して用いた。

ビーズを支持する糸は、パルスモータで駆動するボールねじ機構で牽引し、他端は数十グラム程度の荷重をかけた。各種校正を必要とする場合、このシステムだと 70 cm 程度移動するのに 10 分程度かかり、不便であったり、種々のドリフトを気にする必要がある。これを避けるためには、早い駆動を可能にするリニア駆動のガイド等を導入することが良いと判断しているが、今回はこれにて計測した。



**Fig. 19 Used bead of ϕ 0.4mm in diameter and 1mm in length
supported with a fishing thread of 50 μ m in diameter.**

このビーズ振動体の大きさ及び形状は、反射量として ~ 0.03 程度の反射を発生する。これに対して、ドリフトは 0.005 程度以下であり、ノイズレベルはそれ以下であるので、今回のビード測定データ解析上それほど大きな問題にはなっていない。

ビーズのアラインメントは、加速管と同じ外径で中心に 1mm 程度の穴をあけたブロックを加速管の位置決め受けと同じ場所に設置し、糸をその中心の穴に対して ± 0.2 mm 程度の精度で合わせる。この位置で上下に位置するプーリーは固定し、加速管は同じ位置決め治具に受けることによりアラインメントを保証している。ビーム軸方向の位置決め校正は行わず、測定データ解析から電氣的セル中心を導出する。

5. 2 チューニング機構

各セルの周波数チューニングは SLAC の設計によるものである。セルはディスクをスタックすることにより形成されており、その周波数調整は外周部のディンプリングで行う。 $\phi 4\text{mm}$ 程度の範囲で、厚さ 2mm 程度の薄い部分に SUS 製のねじをロウ付けしておき、これを押し引きする。Fig. 21 に、各セルのチューニングポートにピンをロウ付けしてあるのが見える。これに Fig. 20 に示すスライディングハンマーの先をねじ込んで押し引きを可能にし、周波数の上げ下げを行うことができる。SLAC によると 1 本辺りのチューニング量は $\pm 10\text{MHz}$ であり、それ以上を必要とする場合は、再度加速管を 500°C 程度のアニールを行うこととしている[10]。前節のビードプル測定やカップラー反射特性を評価しながらチューニングを行う。



Fig. 20 Sliding hammer for tuning.

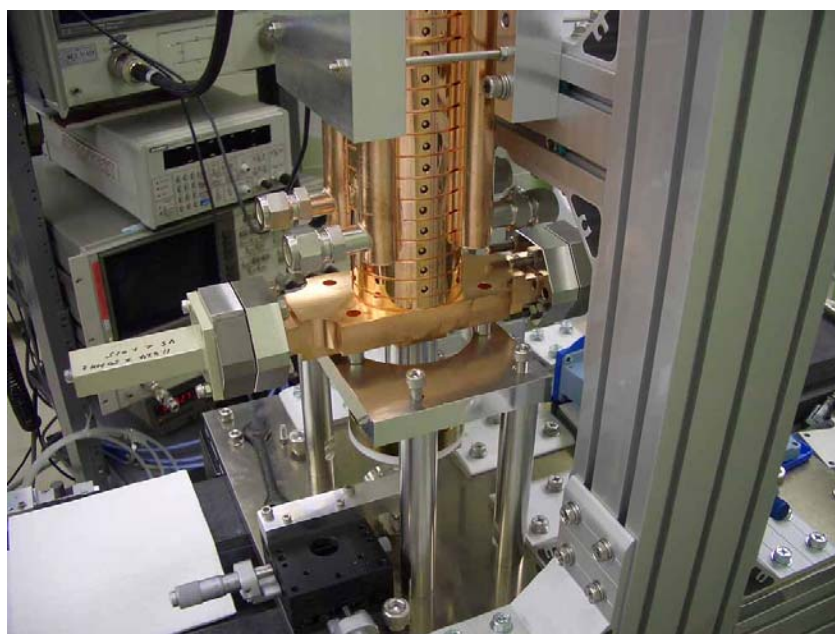


Fig. 21 Two tuning pins are brazed on each regular cell.

5. 3 糸による周波数変化

今回 60 cm加速管の測定に用いた糸及びそれとほぼ同様のフィッシング糸に対して、20 cm加速管 (T20VG5N) を用いて、周波数に与える影響を定量した。入力カップラーから出力カップラーへの透過の位相変化により求めた周波数の低下量を Fig. 22 に掲げた。これから分かるように、周波数の変化は糸の断面積にほぼ比例することが分かった。今回の 60 cm加速管の計測には $\phi 50\mu\text{m}$ [9]用いることにした。但し、Fig. 22 から分かるように、今回用いる糸の周波数への影響はフィットラインから若干はずれているが、Fig. 19 から太さを推定すると直径 $\sim 55\mu\text{m}$ であり、ほぼフィット直線に載ることからすると、使用した糸の直径は1割程度太いと判断すべきかも知れない。数十 kHz での正確な周波数情報を必要とする場合は、糸の効果を精度良く校正することが必要である。

021225

del_F due to string measured in T20VG5N

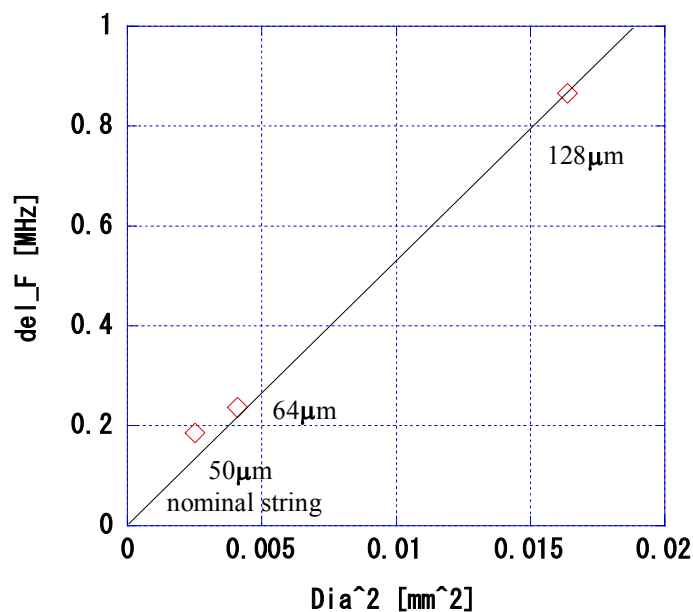


Fig. 22 Frequency lowering due to insertion of string for bead pull.

5. 4 ビードプル生データ

ビードを 0.5 mm ステップで動かしながらとった反射係数のプロットを Fig. 23 に示す。ビード位置によらない 0.05 程度の反射と 1 セル動く毎に 60 度ずつ位相の動く花柄模様が特徴的である。

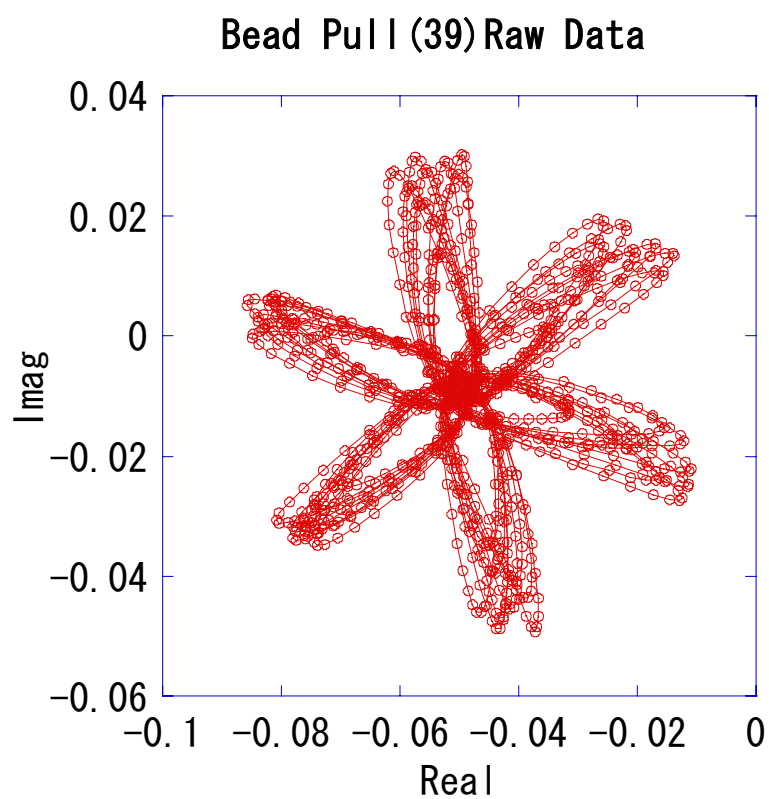


Fig. 23 Reflection coefficient for all bead points moved in 0.5mm step.

セルからセルへの動きを詳細に示すと Fig. 24 の例のようになる。これは、ネットワークアナライザの S パラメータの位相定義

$$e^{j(\omega \cdot t - k \cdot z)}$$

及び例にあげた加速管のセル間位相進みが 150 度であることに対応している。反射位相は、ビードがセル $n \rightarrow$ セル $n + 1$ へと進んだとき、往復の位相遅れが $150 \text{ 度} \times 2 = 300 \text{ 度}$ 増すことに対応する。

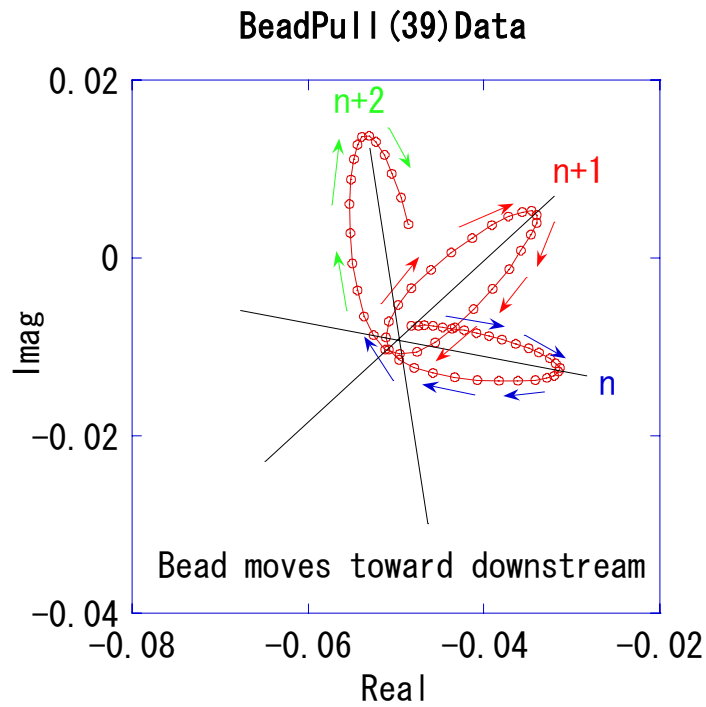


Fig. 24 Reflection measurement with a bead from a cell n to the next.

5. 4 ビードプル解析フロー

進行波型加速管でのインプット側からフィードした場合のビードプル測定では、反射係数は Fig. 25 に示すように、インプット側カップラー部でのミスマッチ（反射：緑）、アウトプットカップラー側でのミスマッチ（反射：赤）、及びビードによる反射（セル n での反射：青）の合成となる。

各反射量が小さいと仮定すると、測定反射量は、各反射の複素和で与えられるとしてよい。

$$\Gamma_{Measure}^n = \Gamma_{Input} + e^{j2n\gamma} \varepsilon E^n + \Gamma_{Output} \cdot e^{j2N\gamma} \quad (\text{式 1})$$

但し、各セルの伝達関数を γ 、電場 E に対するビードの反射を $\varepsilon \cdot E$ とした。セル n での電場は、実際には本来のフィードされている R F の進行波成分による分とアウトプットカップラー部での反射により形成される逆行波による電場分の複素和からなることに注意を要する。但し、これもアウトプットからの反射が小さければ本来の成分のみとしても良い近似になる。

実際には、 Γ_{in} にはインプットカップラーでの反射やデバイダーでの反射等が含まれ、 Γ_{out} にはアウトプットカップラーやロードからの反射である。また、 Γ_{bead} は局所電磁場におけるビードによる散乱で、電氣的、磁氣的ダイポール振動子と見なすことができるが、この反射の解析には後で（§ 5.4.4）述べる非共鳴摂動理論[4]によりデータの解析を行うことになる。

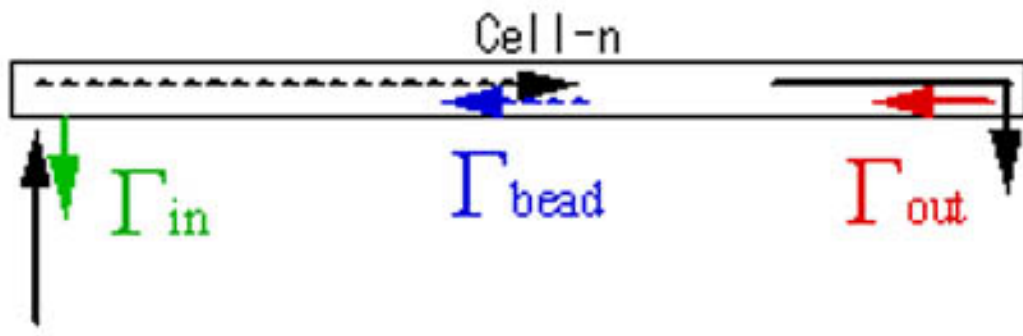


Fig. 25 Bead Pull RF power flow and reflections.

5. 4. 1 上流からの固定反射、及びスロードリフト成分

KX01 (H60VG3K1 : Bead 測定、1 2 月 1 9 日)のビードプル測定例を Fig. 26 に示した。ビードによる花卉の振幅が 30mu 程度に対して、10mu もあり、結構大きな補正となっている。但し、全反射振幅 1000mu に比べると充分小さく、単純に複素量として差し引くことが良い近似であると考ええる。

また、ビードが加速管内に入る前（始点部：赤）と加速管通過後（終点部：青）の群間は 0.005 程度ドリフトしていることが分かる。これは $\Gamma=0.1$ (-20dB) 以下の反射を目指すチューニングにとって無視できない量である。このドリフトは、糸の不均一性による系統誤差、時間ドリフトによる誤差等を含んでいるが、後者の効果が大きいことが分かっている。従って今回は時間の関数として直線的にドリフトしているとして生の測定値からベクトルの的に差し引くことにした。更に正確な測定チューニングを目指す場合は、このドリフトの原因を同定し精度の良い校正を行いが必要になる。

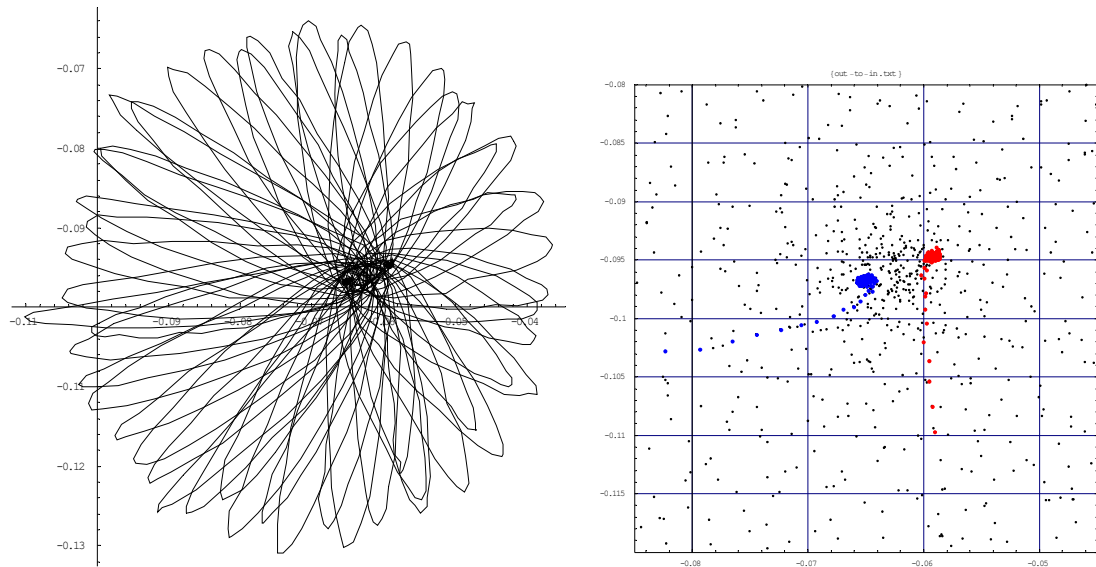


Fig. 26 Bead pull raw data (LEFT) and central area of the data (right), where data starts from red area and ends in blue area.

5. 4. 2 Dwell point の読み値

各セルを代表する反射ベクトルは通常原点からの振幅最大の点を、複素平面上での内挿補間により計算して求める。(Fig. 27 参照) 但し、複素平面上でのサンプリング点あたりの動きが最小になる点をもってしても大きな違いは通常生

じない。これらの点はドウエル点 (Dwell point) と呼び、セル特徴を代表する点となる。ドウエル点の総数は KX01 の場合 53 点あり、Fig. 1 でのセル数に一致する。カプラーは導波管型であり、独立の共鳴セルとしての体をなしておらずドウエル点にはならない。

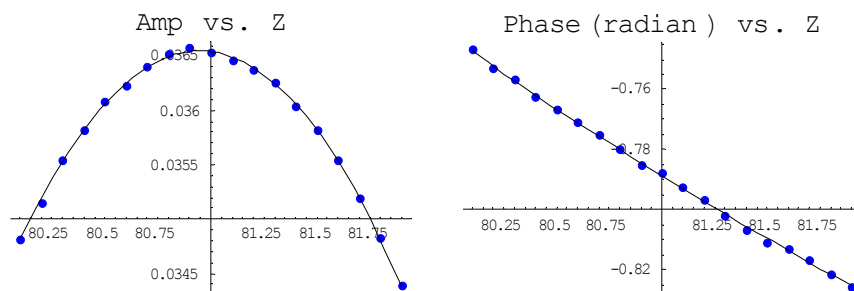


Fig. 27 Deduction of dwell point. Left: amplitude versus bead position in mm and Right: corresponding phase reading.

5. 4. 3 下流端からの反射の差し引き

これらのドウエル点の複素表示をすると、Fig. 28 のような点群が得られる。この図で赤点は最初と最後のドウエル点を示し、緑はそれ以外のすべての平均値である。(セル数が充分多ければ平均値が円上に並ぶ点の中心を精度良く表すことができる。) 緑の点は下流側のカプラー部での反射 Γ_{out} による各セルでの電磁場のからのミスマッチに代表されるベクトルであり、(式 1) の第三項ではなく、第二項の E^n に含まれる後進波部分に相当する。インポートポートでの反射係数でみると、この寄与からの位相は、アウトプットカプラーからセル n までの位相遅れとセル n からインポートカプラーまでの位相遅れの和になるので、一定となる。このベクトルから、アウトプットカプラーでのマッチング情報を得ることができる。

この緑の点 (レギュラーセル部分の平均値) をすべての測定値から差し引くと Fig. 29 となる。これは入力側からフィードして測定した場合であり、赤が入力カプラー側マッチングセルのデータ、緑が出力側マッチングセルの測定点、その他が通常セルであり、実線でそれに続く数セルをつなげてある。これらの点は、内部のセルの情報をもっており、内部セルのチューニングに用いることになる。

point BLUE= regular cells, RED=enc

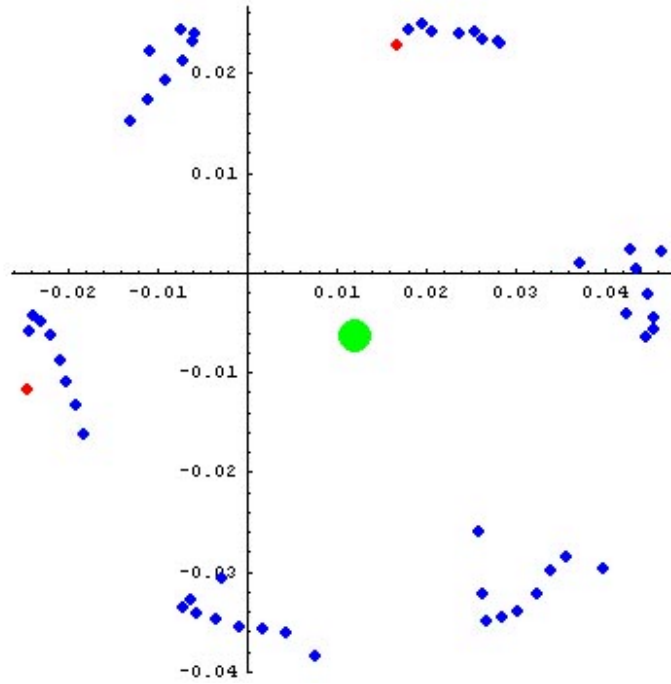


Fig. 28 Dwell point plot for KX01.

reflection coefficients of shifted dwell points (Red is first, Green is last)

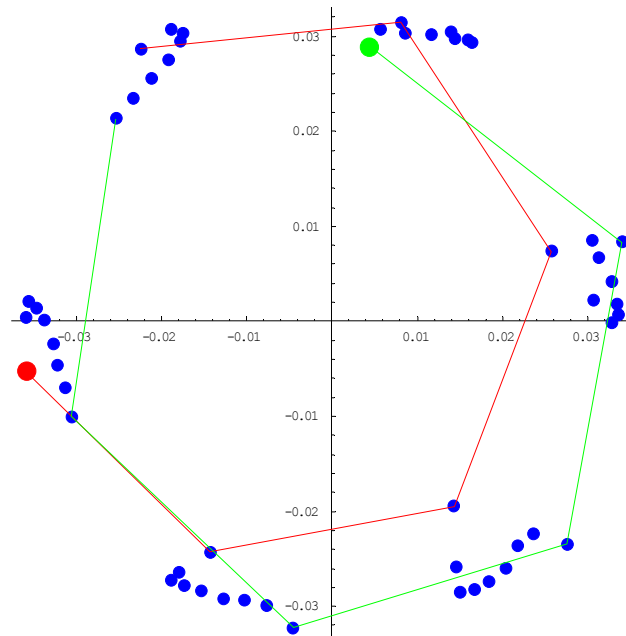


Fig. 29 Dwell point reflection data shifted to make the average of all of the middle to be zero. Red point is the first point, input matching cell, while green the last, output matching cell. 5 cells following to the end cell are connected by solid line to show the sequence.

5. 4. 4 各セルの情報の取り出し

測定時にフィードするパワーを P_i 、ビードの挿入時(Perturbed)、引抜き時(Absence of perturbation)の複素反射係数をそれぞれ Γ_p 、 Γ_a 、測定場所の電場の複素量（電場の大きさと位相）を E_a とすると、

$$2P_i(\Gamma_p - \Gamma_a) = j\omega\epsilon\alpha_e E_a^2 \quad (\text{式 2})$$

とかける[4]。但し、 α_e はビードに関連した定数、 ϵ は誘電率である。そこで、ビードの有無での反射測定の差を測定するか、ビード無しのデータを何らかの条件で推定することによりビードの位置での電界 $E_a(z)$ を求めることができる。

Fig. 29 の各点は、対応するセルの電場の振幅、位相に直結した量 ($\Gamma_p - \Gamma_a$) を含んでおり、加速管の内部特性を評価することができる。これらの振幅分布を Fig. 30 に、セル間の位相シフト量を Fig. 31 に表した。前者からは加速管の電界分布を、後者からは位相進み（周波数に密接に関係）を得られる。ここで、電場振幅は反射係数の平方根であり、また位相は反射係数での位相変化の半分であることに注意すること、また測定ポート（例ではインプットカプラー部）にビードからの散乱波が届くときの減衰や位相遅れなどは、（式 2）の反射係数に自動的に繰り込まれていることに注意すること。

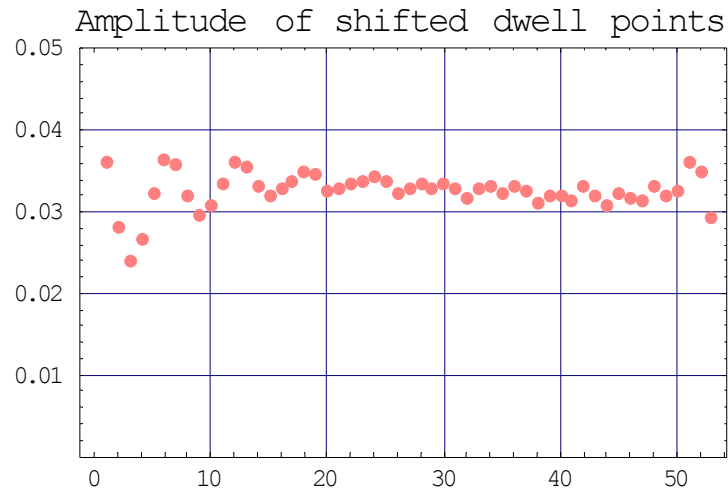


Fig. 30 Amplitude of dwell points in complex plane. These are equivalent to the electric field strength (with arbitrary scaling factor) of each cell along the structure.

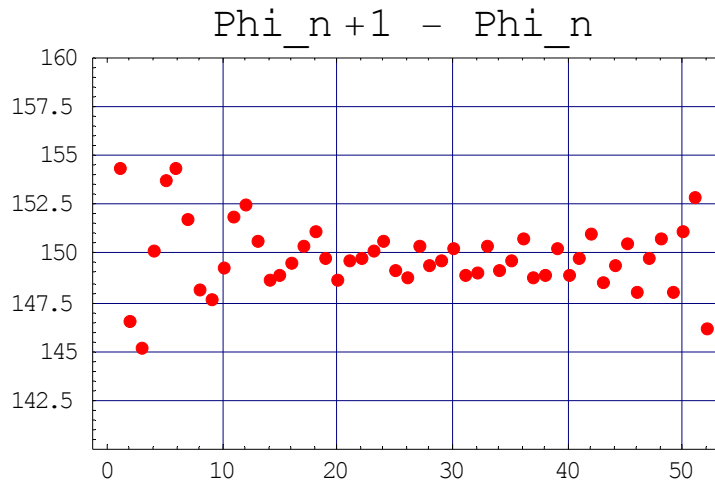


Fig. 31 Phase advance from a cell to next.

5. 4. 5 周波数（セル当たりの位相すすみ）の平均値評価

ネットワークアナライザー（Agilent Technology 社）の位相定義は

$$S_{11} = |S_{11}| \cdot \text{Exp } j(\omega t - kz)$$

であり、また反射位相測定から進行波型加速管の位相進みを導出する際に往復分2倍になって測定されることに注意を要する。

さて、この測定から加速管の周波数を導出するが、この際の測定周波数の校正には、加速管測定温度と運転温度の差、及び加速管内のガス誘電率と真空誘電率の差、の2項が主に問題になる。例えば、測定温度が 21.9℃、運転温度が 45℃の場合、加速管を構成する無酸素銅の線膨張係数を 1.65×10^{-5} として、

$$45^\circ\text{C} \rightarrow 21.9^\circ\text{C} \quad 1.65 \times 10^{-5} \times (45 - 21.9) \times 11424 = +4.35\text{MHz}$$

から、基準周波数よりこの分高い周波数での測定を行うべきである。また、通常純窒素ガスを充填して測定するので、その場合、窒素ガスの標準状態の誘電率[理科年表]を考慮して、測定周波数は

$$\text{真空} \rightarrow \text{窒素} \quad \epsilon = 1 + 5.47 \times 10^{-4} \quad \text{at } 20^\circ\text{C} \rightarrow -3.12\text{MHz}$$

従ってこの分低い周波数で測定すべきである。両者はほぼキャンセルし、この場合は

$$11424 + 4.35 - 3.12 = 11424 + 1.23 = 11425.23、$$

即ち 11425.23MHz で測定したときに 150 度/セル となる設計のはずで、この周波数で測定することになる。

実験的には、Fig. 31 に示したように、レギュラー部分の多くの点の平均値として平均位相すすみを算出することができる。また、周波数がずれたときの位相すすみのずれ量は、加速管の位置（その場所での群速度）により異なるが平均値でいうと、KX01 での測定例 Fig. 32 ではで 0.7 (度/セル) / MHz であることが測定された。この量は理論値

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}, \phi = \beta d, f \cdot \frac{d}{c} = \frac{\phi}{2\pi} \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial f} = \frac{5\pi/6}{v_g/c} \cdot \frac{1}{f} \approx +0.66 \text{ deg/MHz}$$

に一致しており、絶対周波数の測定が精度良くできていることを示している。

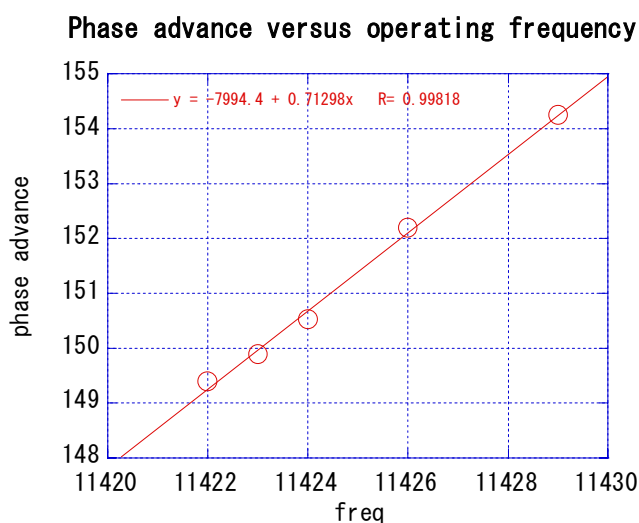


Fig. 32 Average phase advance versus measurement frequency evaluated by bead pull.

5. 4. 6 各セル周波数（位相進み）チューニング

Fig. 29 から得られる周波数情報は Fig. 31 に含まれている。但し、周波数誤差 δf と位相進み誤差 $\delta \phi$ の関係は、標準位相シフト量を ϕ_0 として

$$\delta\phi = \frac{\phi_0}{v_g/c} \cdot \frac{\delta f}{f}$$

であるから局所的な群速度 v_g を考慮して評価することになる。反射波が共存するときの解析として、T. Khabiboulline [11]らの開発した $2\pi/3$ モードの進行波管に対する解析方法を今回の例である $5\pi/6$ モードの加速管に適用すると、セル n での反射ベクトル S_n は、

$$S_n e^{j\theta_n} = jE_{n-1} + \sqrt{3} j E_n + jE_{n+1} \quad (\text{式 3})$$

とかける。 S_n はセル n からの反射振幅、 θ_n はセル n からの反射位相であり、この虚数成分よりこのセル n に対する周波数チューニング量を導出することができる。

例として、KX02 加速管におけるチューニングの一段階で、セル番号 #40 ~43 の周波数を上昇させる前後の $\text{Im}(S)$ 測定を Fig. 33 に示した。チューニングしたセルの $\text{Im}(S)$ が変化していることが分かる。これを指標にチューニングを行うことができる。但し、#40 ~43 のセルのチューニングに関連して若干周辺に変化が見られるが、このあたりは改善の余地があるようだ。

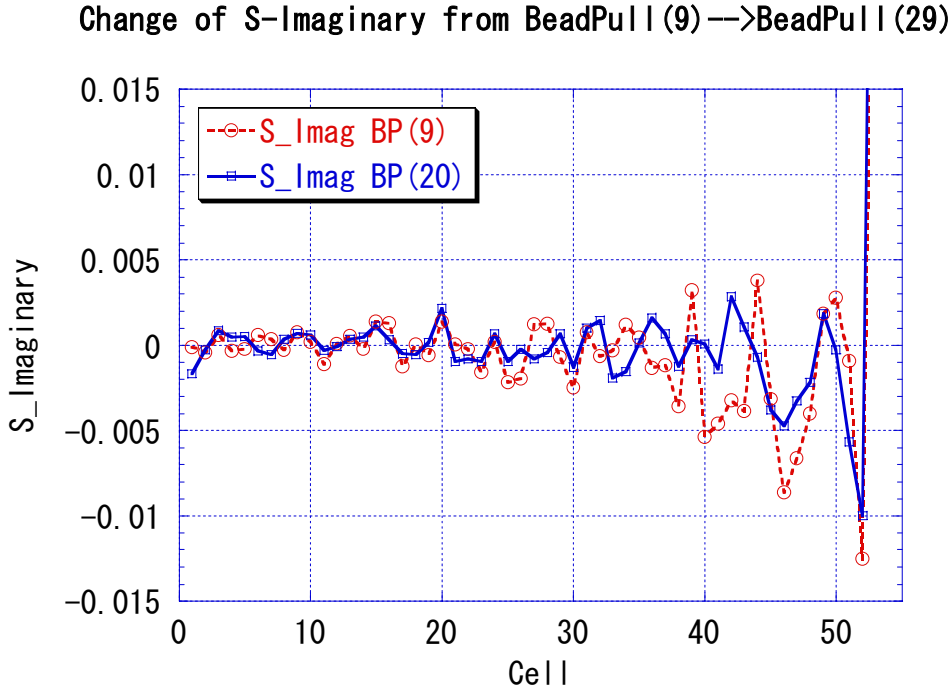


Fig. 33 Change of S-Imaginary profile due to tuning of cells #40 --- #43 toward higher frequency direction. Red circles are those before tuning, while blue squares are those after.

6. カプラーチューニング

6. 1 カプラーチューニング

Fig. 34 に、KX01 (Fig. 1) のアウトプットカプラーに関するチューニング履歴の一部を示した。各実線は、測定周波数範囲 (11.42~11.426GHz) でのアウトプットカプラー側から見た S_{11} の動きを複素表示したものである。シンボルは、運転周波数に対応する周波数 11.423GHz と、その両側 0.25MHz の点である。図中の矢印は、各セルの周波数を上げ (++) 下げ (--) した時の動きである。これより、1セル奥の方へ (インプットカプラー側へ、例えばセル#51 からセル#50 へ) ずれると相対的に反射位相が $-150^\circ \times 2 (=+60^\circ)$ 変化することが分かる。従って、あるセルを若干チューニングしてそれによる S_{11} の変化を確認すれば、原理的には直交する成分をもったどの2セルのチューニングをすればミスマッチングのキャンセルができることが分かる。この例では、特定のセルのチューニング量を極端に増やさないように、3セルにわたってチューニングをとっている。

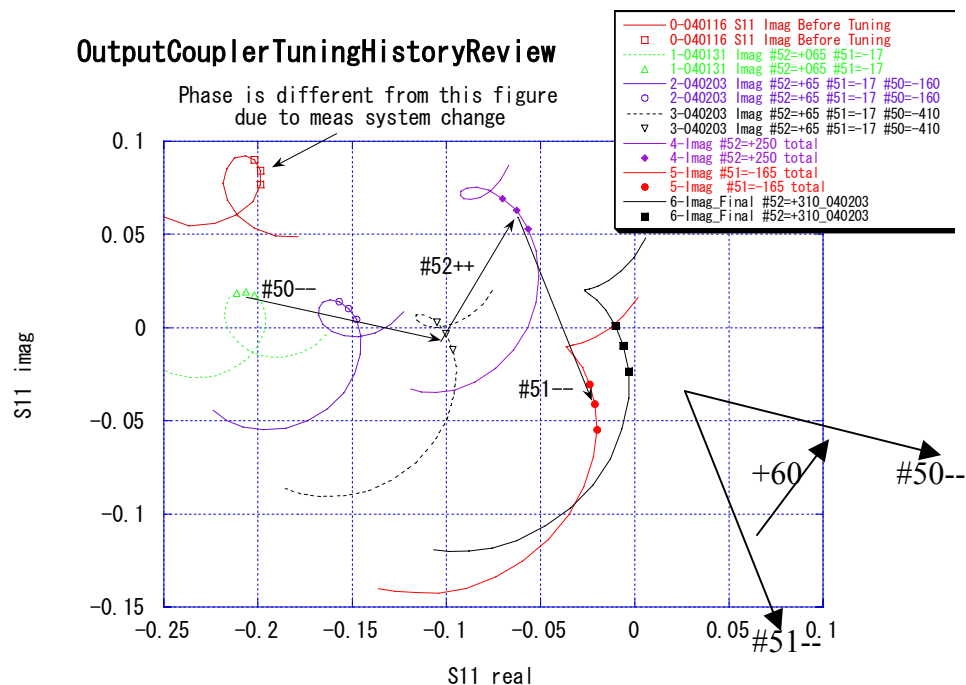


Fig. 34 Reflection seen from output coupler side in KX01, showing output coupler tuning record until reaching best matching.

6. 2 フィールドの均一性

カプラーのミスマッチは近傍の 2～3 セルの周波数調整でキャンセルアウトできるが、そのみを追求すると KX01 の場合に経験した例を Fig. 35 に示したように、電界の不均一性を作る原因になる可能性がある。同図には、インプットカプラー側から見たビードプル測定による反射ベクトルのうち、最下流の 6 セル分を示してある。この例の緑点線や青実線は、アウトプットカプラーのマッチング特性を追求したために生じた電界の不均一性が大きい場合である。カプラーチューニング前の赤□に比較すると悪化がよく分かる。これは、Fig. 1 の設計配置より明らかなように、マッチングセルにチューニング機能をつけなかったために、カプラーでのミスマッチのチューニングを、1 セル分とばしてその次のセルからの周波数チューニングにより行っているために生じざるを得ないと認識している。このような場合は適宜ミスマッチを許容して電場の一様性を保つこととの妥協を計る必要がある。

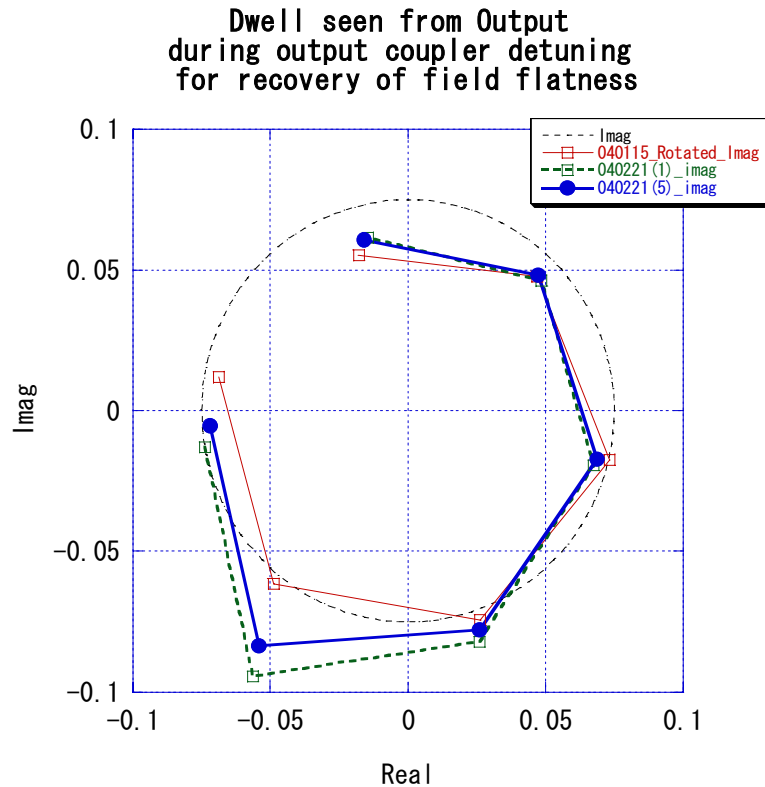


Fig. 35 Bead pull S11 plot for the cells near output coupler. Red squares are those before coupler tuning, while blue and green are those after best coupler matching.

実際のデチューニング例を Fig. 36 に示した。要領はチューニングの逆であり、ビード測定とマッチング測定を行いながらマッチングをあまり崩さないように行うことが必要である。対応する反射特性 S11 の変遷を Fig. 37 に示した。反射特性は-20dB 程度で妥協し、Fig. 35 に示したような初期の電界の一様性に近づけるよう回復させている。

このように、チューニングに関してはビード測定を行いフィールドの均一性を確認しながらマッチングをとる必要がある。

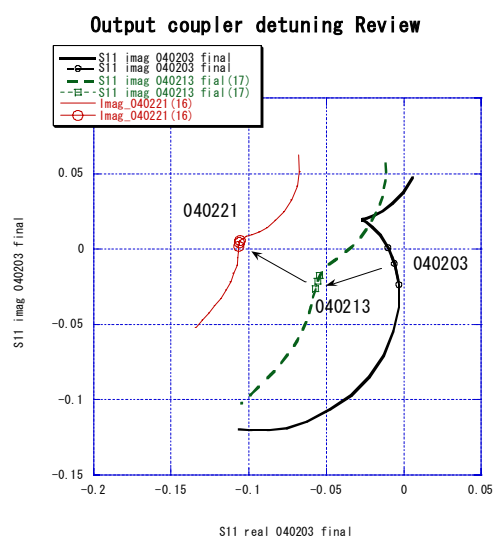


Fig. 36 Detuning of output coupler matching to recover field uniformity.

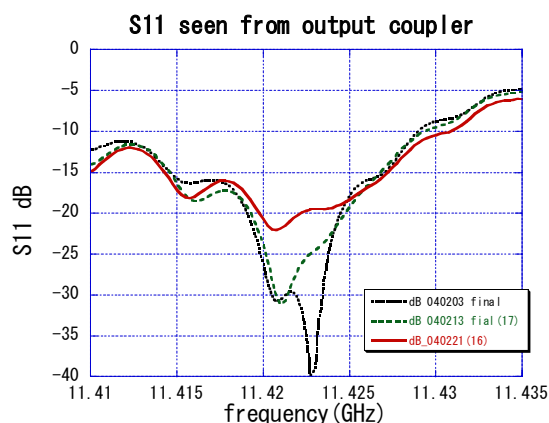


Fig. 37 Output coupler reflection measurement. Black line is the S11 as of best matching, while green one is that on the way to recover field uniformity by sacrificing coupler matching. The red line is the final S11 value, which is a compromise of mismatch of -20dB level while recovering field uniformity by 20-30% level.

7. 結論

60 cm長のXバンド加速管のRF特性測定とチューニングを行う機会を得たので、それに必要なRF関連計測方法、必要環境、各種の誤差要因に関する考察と実際上の安定化の状況を述べた。ここで記述した測定環境・方法を参考にすればXバンド加速管の測定、チューニングを行うことができる。

その際に得られた重要な知見を下記に列挙する。

1. マッチング測定は、MT（マジックティー）等を用いた分配器を用いて1ポート測定、又は2ポート校正したネットワークアナライザーの両ポートを接続しても可能である。
2. カプラーのみの反射量は、パルス応答から測定もできるが、反射測定S11の周波数依存性からFourier解析により求めることもできる。両者は良く合う。
3. カプラーのマッチングはカプラーに続く2～3セルの周波数を調整することにより、 $\delta \Gamma \sim 0.1$ 程度のチューニングは容易である。しかし、局所的な電界の上昇が内容にある程度分散してチューニングを行うケアが必要であることを経験した。また、カプラーに続くセルにチューニング機構を設けておくことが重要なことも分かった。
4. 測定時の窒素ガス導入は、1 $\frac{1}{2}$ 分程度なら、2分程度待てば一様に充填され、この時間応答は導入された窒素が迅速に内部で一様に分散するという仮定に良く合う。また、流量による周波数の変化は小さいので1 $\frac{1}{2}$ 分程度の揺らぎは測定上問題ない。
5. ビード支持用50 μm 程度の鮎釣り糸での周波数低下は $\sim 0.2\text{MHz}$ 程度である。
6. 直径0.4 mm、長さ1 mm程度の円筒形ビードによる反射量は ~ 0.03 程度であり、下記第6項目に述べるドリフト量等を考慮すると妥当な大きさと考えられる。これより大きい（長い）と、セル長 ~ 10 mmに対して相当量になるので好ましくない考える。
7. 反射測定でのドリフトが30分の測定中に大きいときには0.005程度生じた。現時点ではこの原因をつかんでいないが、精度を高めるためにはこれを小さくする必要があり、測定時間の短縮、条件の安定化等の検討を

要する。

8. レギュラーセル (本体部) の平均周波数はビード測定より正確に分かる。
但し、その各セルの周波数評価とチューニングは今後の課題である。

これらを参考にして、X バンド加速管チューニングへの実際の準備を行うことができる。

謝辞

本件の X バンド加速管は、リニアコライダーの主線型加速器用に開発を進められてきたものであり、SLAC の X バンド関連の方々との共同開発によるところが大きく、多大な貢献をして頂きました。特に本稿に関しては、J. Wang、G. Bowden、C. Pearson 氏らの貢献は大きく、ここに深く感謝致します。

特に本稿のビードプル解析に関しては、F N A L の T. Khabiboulline 氏や SLAC の J. Lewandowski 氏により実際のデータ解析を行ったり、解析プログラムの提供をして頂いたりしており、大いに感謝致します。

また、KEK の X バンド加速管関連の方々の協力、特に機械工学センターのサポートは必須であり、深く感謝致します。

参考文献

-
- ¹ Z. Li et al, “Traveling Wave Structure Optimization for the NLC”, PAC2001, SLAC-PUB-9049, 2001.
 - ² GLC Project Report, KEK-Report-2003-7, 2003.
 - ³ K. Watanabe, ”High Gradient Test of X-band Accelerating Structure at GLCTA”, Proc. 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and The 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Japan, Aug. 2004.
 - ⁴ Charles W. Steel, “A Nonresonant Perturbation Theory”, IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-14, No.2, 1966.
 - ⁵ SLAC H60VG3N18
 - ⁶ A. Lounine and T. Higo, “Precise Design of Coupler for Accelerator Structure”, The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, p317, Tsukuba, Japan, 2003.
 - ⁷ T. Khabibourine, FNAL: 私信
 - ⁸ J. Lewandowski, “A program to analyze pulse response from frequency domain measurement”, Private communication, 2003.
 - ⁹ GOSEN 社 : 「テクミー鮎スペシャル」AYU 0.23 号、品番 G A - 1 1 0、素材 : 高密度ポリエチレン (ダイニーマ (東洋紡製))、形状 : 縐り線形状。
 - ¹⁰ J. Wang, SLAC, Private communication.
 - ¹¹ T. Khabiboulline et al., “Tuning of a 50-cell constant gradient S-band traveling wave accelerating structure by using a nonresonant perturbation method”, DESY M-95-02, 1005.