

RF cable for ATF2 Q-BPM

Y.Honda, T.Nakamura

2007/7/6

概要

We tested candidates of RF cables for connecting a Q-BPM cavity and the hybrid-combiner. Stability in temperature variation and in handling, signal attenuation, signal interference between cables, and phase difference in a phase-matched pair were tested. One of the sample cables we had, S-04212B, seemed to be a good candidate.

1 はじめに

ATF2 Q-BPMで空洞からエレキまでの伝送に使用する短いRFケーブルを選定する。ハイブリッドコンバイナがコンクリート架台の横面に設置されることを考慮すると、必要な長さは余裕を持って1.5 m。BPMは全部で33台で、各BPMについて4本のケーブルが必要である。特性、扱い易さ、価格等を考慮して、購入するケーブルを決める。

要求される性能を簡単にまとめると、以下のようになる。

- ケーブルでの信号の減衰は6.426GHzにおいて3dB以下。短いケーブルなので、普通のRF用のものならばこれは特に問題ないはず。
- 環境の変化によって位相が変動してはならない。位相がずれるとIQ平面での軸の方向がずれることになる。位置成分は $\cos(\Delta\phi)$ 、角度成分は $\sin(\Delta\phi)$ の割合でずれを被るので、例えば、BPMのダイナミックレンジを $\pm 250\mu\text{m}$ 、位相のずれを5度とすると、位置成分が $2\mu\text{m}$ 相当ずれる可能性がある。Q-BPMには数 μm の測定精度が要求されているので、ビーム運転状態とメンテナンス状態を通しての温度変化(仮に1度とする)、あるいはちょっとしたメンテナンス作業でケーブルに触れるなどがあったとしても、位相変動5度以内を要求することにする。(BBAを頻繁に行えばこの要求を緩められる可能性はある。)
- 同様に、振幅の変動も1%以内でないと、ダイナミックレンジ $\pm 250\mu\text{m}$ で数 μm の精度が得られない。
- 隣り合ったケーブル同士の干渉はあってはならない。もともと空洞BPM自体のX-Yアイソレーションが40dBなので、これより十分よければ問題無い。遮蔽特性として6.426GHzにおいて60dBを要求する。
- ハイブリッドで足し合わされる2つのポートからの信号の位相関係が保たれなければならないので、2本組で長さの揃ったケーブルが必要である。ケーブルの伝送速度を5nsec/mとして計算すると、6.426GHzの信号の波長は3.1cmに対応する。波長の数%に対応する、0.5mmの精度でケーブル長を合わせた2本組を要求する。
- 小信号で、しかもパルスなのでパワー耐性は特に必要無い。

今回、カタログから2種類をピックアップして評価用サンプルとして2本組のものを用意してもらったので、ATF周りで良く使っている他の種類のものいくつかと比較してみた。表1、図1にテストしたケーブルについてまとめる。

ケーブル A,B が今回サンプルとして位相合わせした 2 本組として作ってもらったケーブルである。問題が無ければこのどちらかを選びたい。これらの場合で、ケーブル本体の価格と両端のコネクタ及び位相合わせの為の計測作業の価格が同程度位である。仮にこれより安価なケーブルを選んでも価格はそんなに下がらない。また、ケーブル A は ATF ダンピングリングのボタン BPM の接続に使用されているものと基本的に同じシリーズである、加速器内の環境での使用実績があると考えて良いだろう。ケーブル C は良い RF ケーブルとして良く使われているもの、今回は関係ないが特にパワー耐性は優れている。今回のテストで価格の違いが見られるか少し興味がある。ケーブル D は我々が nBPM で使用しているものなので、はたして温度安定性がどの程度か調べておきたい。ケーブル E は形状を保持する硬いものなので、今回の目的には合わないであろう。ケーブル F は SLAC グループがよく使っているもので、Q-BPM のシステムでもいたるところで使われることになりそうなのでテストしておく。ケーブル G,H は高周波用のケーブルでは無いが比較してみる。nBPM ではケーブル G の出来るだけ短いものを空洞からハイブリッドまで繋ぐのに使っている。

表 1: テストしたケーブルのリスト

ケーブル名称	種類	長さ	備考
A	S-04212B	1.5 m	林栄に作ってもらったサンプル (位相マッチした 2 本組)
B	Sucoform-141	1.5 m	林栄に作ってもらったサンプル (位相マッチした 2 本組)
C	Sucoflex-104	2.0 m	高級ブランドケーブル (A,B に比べて価格 5 倍くらい)
D	insulatedwire	2.0 m	温度安定化ケーブルとして nBPM で使っているもの
E	semi-rigid	2.0 m	モジュールの内部に良く使う形状を保持するもの
F	BELDEN-E	1.0 m	SLAC グループがよく使っているもの
G	良く知らない	2.0 m	ATF では IF 帯域で良く使われているもの
H	RG58	3.0 m	普通の信号線につかっている物



図 1: テストしたケーブル

2 温度特性の測定

温度を細かく設定できる恒温槽のようなものが手元に無かったので、ヒーターを使ってわざと大きく温度変化を与え、そのときの変動量を測定することで特性を調べることにした。

2.1 セットアップ

図2,3のようなセットアップを DR 内に用意した。発振器からの 6.426GHz の信号を 2 つに分け、一方はそのままダウンコンバートし、もう一方は測定対象のケーブルを通した後ダウンコンバートして、これら 2 つの信号を IQ 検出する。記録された I, Q の信号強度を振幅と位相に変換する。

図3に説明するように、測定対象のケーブルにはニクロム線ヒーターを沿わせて設置して熱を加える。(アルミホイルで包み、熱が逃げにくいようにしてある。) ケーブル上の適切な 2 点の温度を熱電対でモニターしている。

室温の 23 度からはじめ、ヒーターに 1.4A の電流を流して 10 分程度で 40 度を越える位まで温度を上げ、その後ヒーターを切り再び室温付近まで自然に冷ます、というサイクルを各ケーブルにつき 2 回行った。

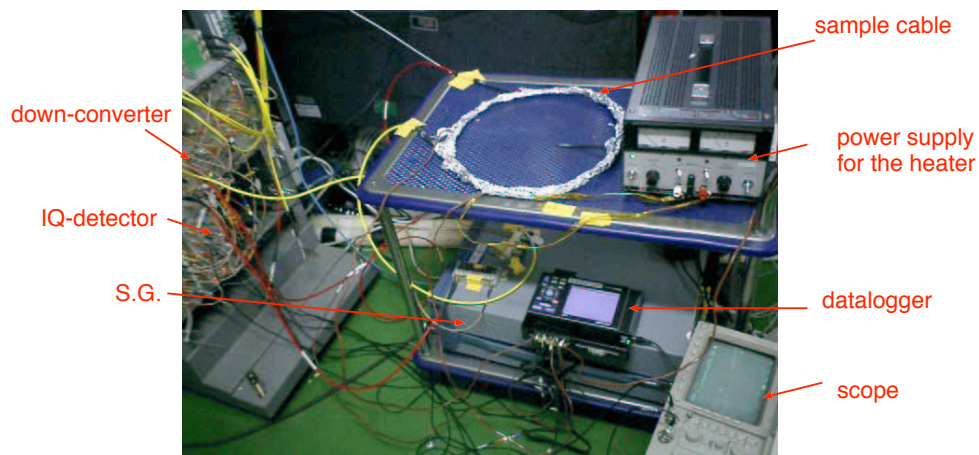


図 2: 温度特性テストのセットアップ (全体)

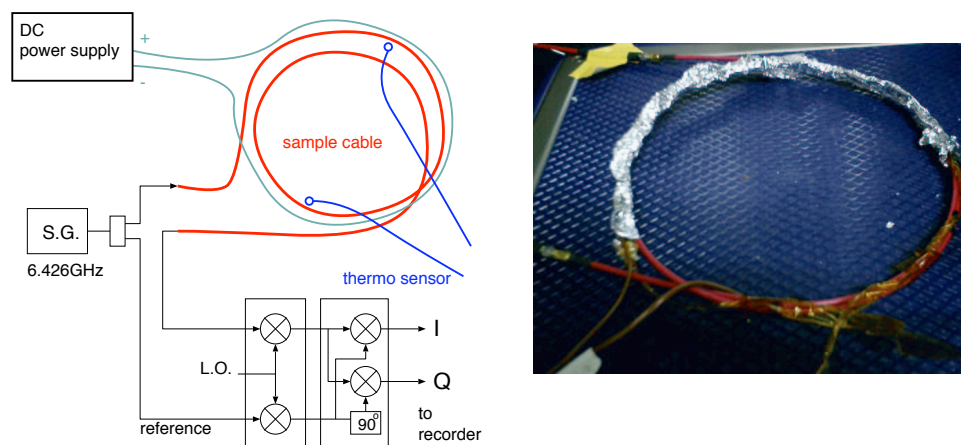


図 3: 温度特性テストのセットアップ

2.2 結果

各ケーブルについての結果を図4～図11に示す。cable C,Dの位相は他のものと比べて反対に位相がシフトしている。温度変動を補償する仕組みがあって、今の温度領域では過補償になっているのかもしれない。cable Eは温度変化に一致しない変動の周期が見られるが、硬いケーブルなので蓄積された歪みの具合でたまたまこのようになっていると思われる。

ケーブルの長さの違いを考慮し、変動量はケーブル長に比例するという仮定のもとで1.5mの場合に規格化して結果を表2にまとめる。今回は25～40度の温度変化を与えて測定したが、実際の温度変動幅は1度程度であろう。温度変動幅に比例すると仮定すると、一応どのケーブルも1度の温度変化に対して位相変動5度以内という要求を満たしている。

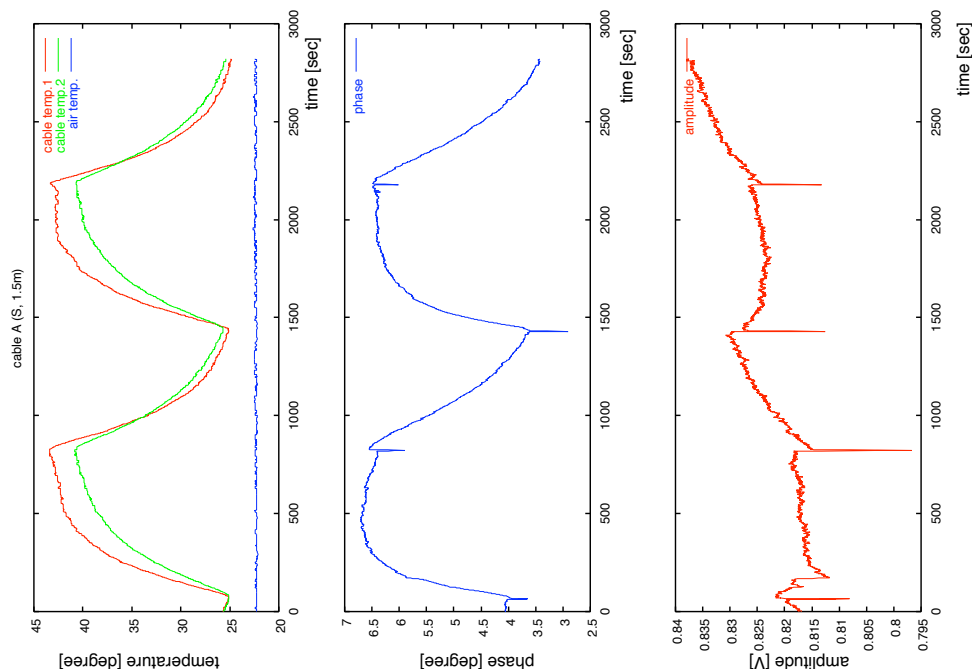


図4: 温度特性測定の結果 (cable A)

表2: 温度特性のまとめ (ケーブル長1.5mに規格化, 温度サイクル25～40度での変動)

ケーブル名称	位相変動幅	振幅変動幅
A	3度	1.9%
B	7.5度	2.3%
C	4.5度	2.4%
D	2.6度	1.9%
E	4.5度	1.3%
F	9.8度	0.2%
G	26.3度	11.1%
H	29.0度	12.5%

図 6: 温度特性測定の結果 (cable C)

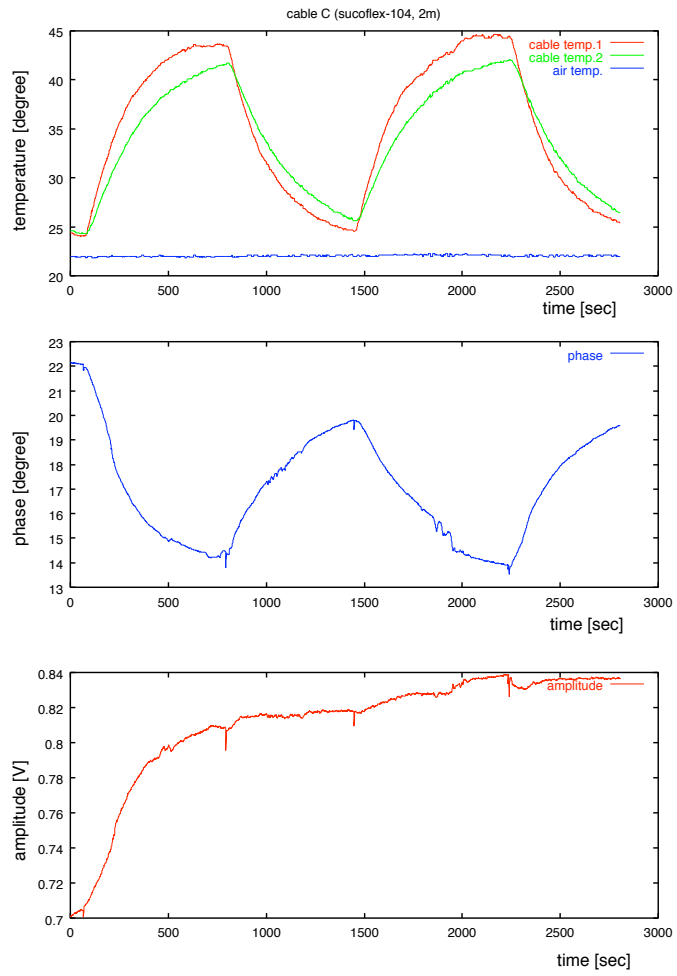


図 5: 温度特性測定の結果 (cable B)

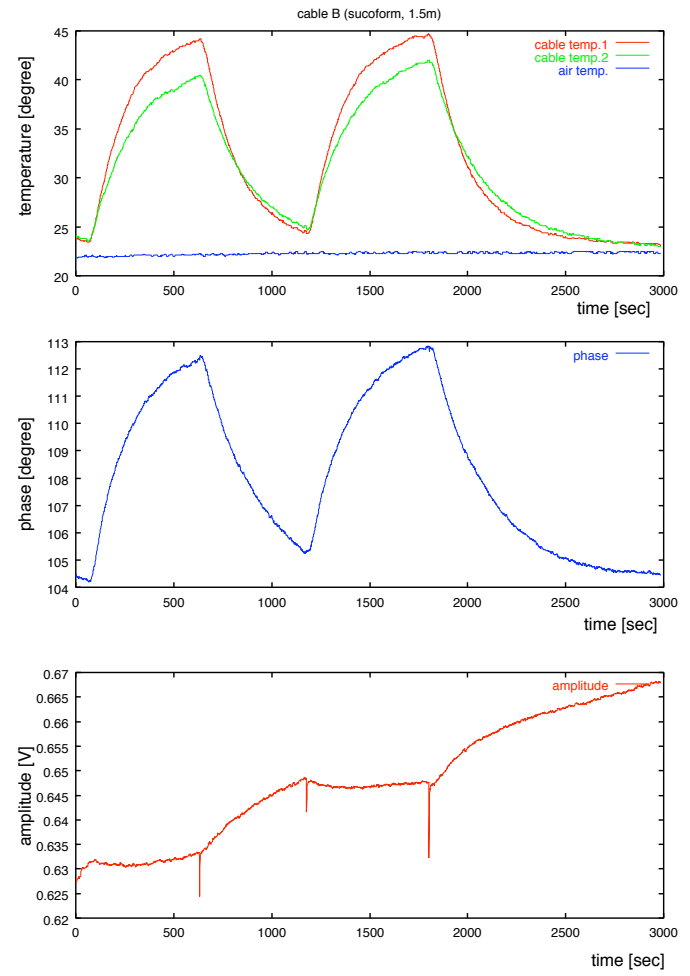


図 8: 温度特性測定の結果 (cable E)

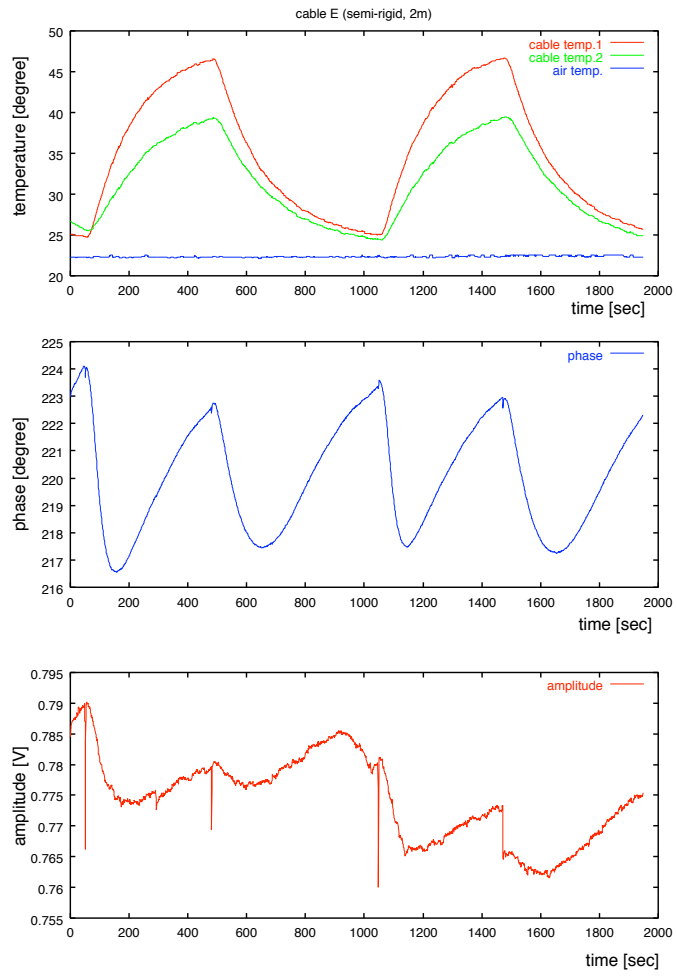


図 7: 温度特性測定の結果 (cable D)

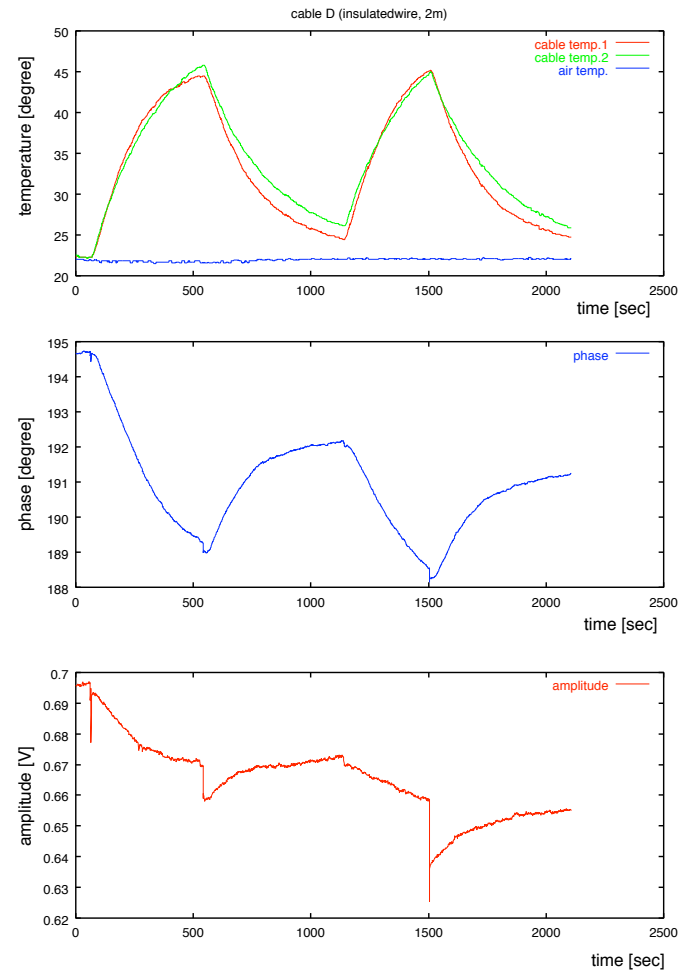


図 10: 温度特性測定の結果 (cable G)

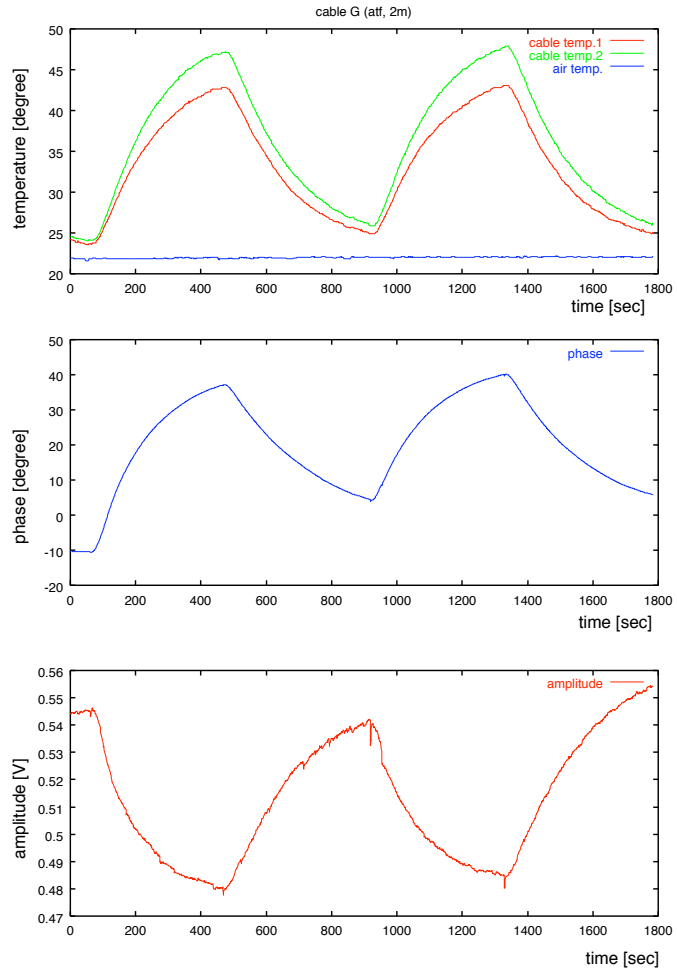
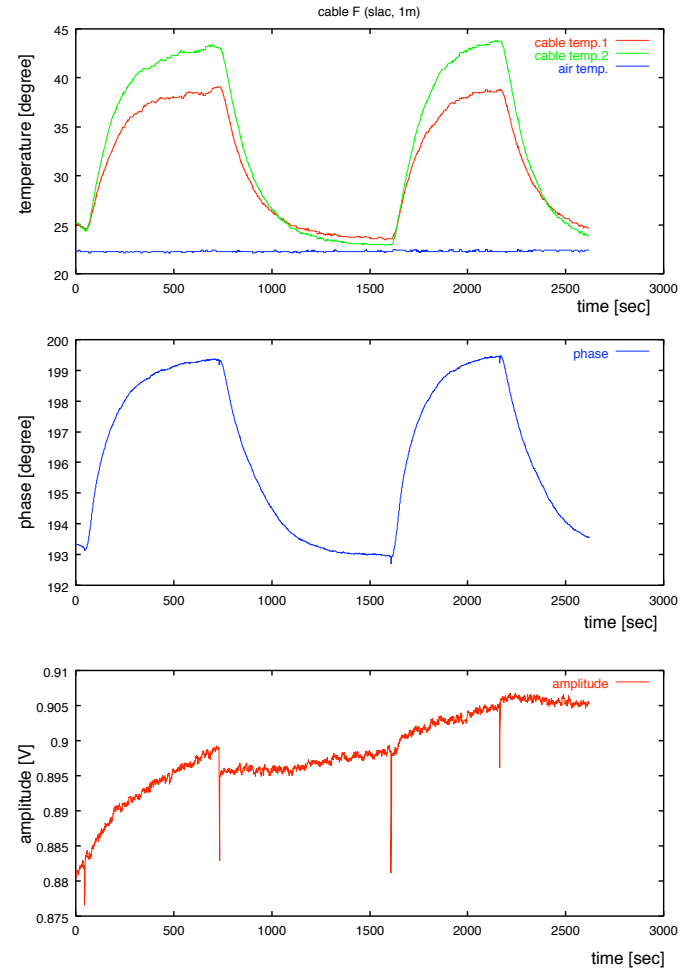


図 9: 温度特性測定の結果 (cable F)



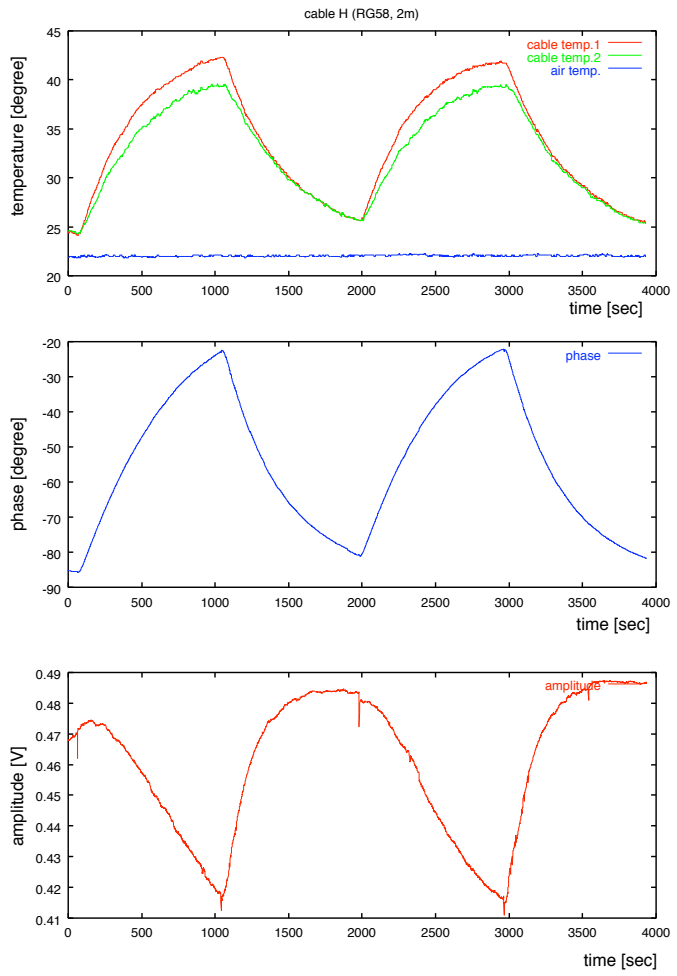


図 11: 温度特性測定の結果 (cable H)

3 ハンドリングに対する安定性の測定

ケーブルを手で触れたり、設置するときの曲がり具合がどのくらい影響するか調べた。

3.1 セットアップ

前節と同様のセットアップで、測定対象のケーブルを手で何度か曲げたり伸ばしたりしながらデータを採った。図 12 のように、直径 13cm の円筒に 1 周巻き付けるようにして曲げることで曲げ量をコントロールしたつもりである。

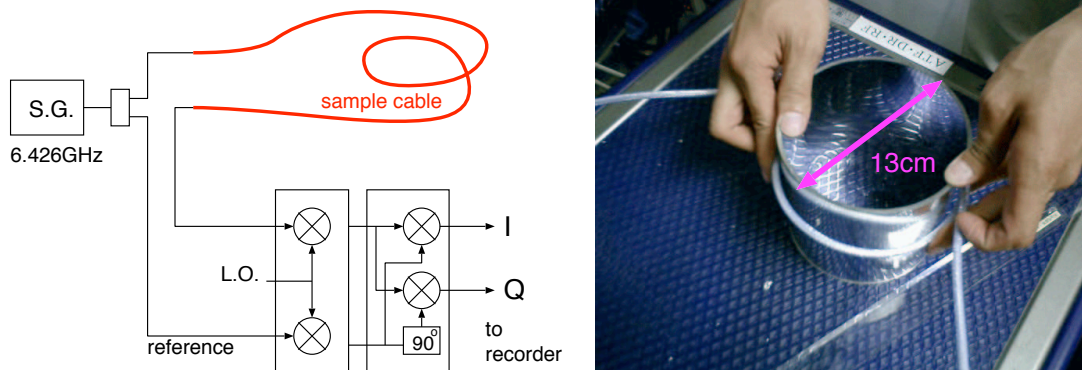


図 12: ケーブルハンドリングテストのセットアップ

3.2 結果

図 13~18 に結果を示す。位相と振幅の変動幅の結果をまとめたのが表 3。このくらい極端な扱いをしないと要求を数倍越える程度の変動が発生することが分かる。まあ、普通に丁寧に扱えば問題無いであろう。

表 3: ハンドリング安定性のまとめ

ケーブル名称	位相変動幅	振幅変動幅
A	9 度	5.5 %
B	10 度	16.3 %
C	13 度	8.1 %
D	14 度	10.7 %
G	8 度	6.0 %
H	30 度	3.8 %

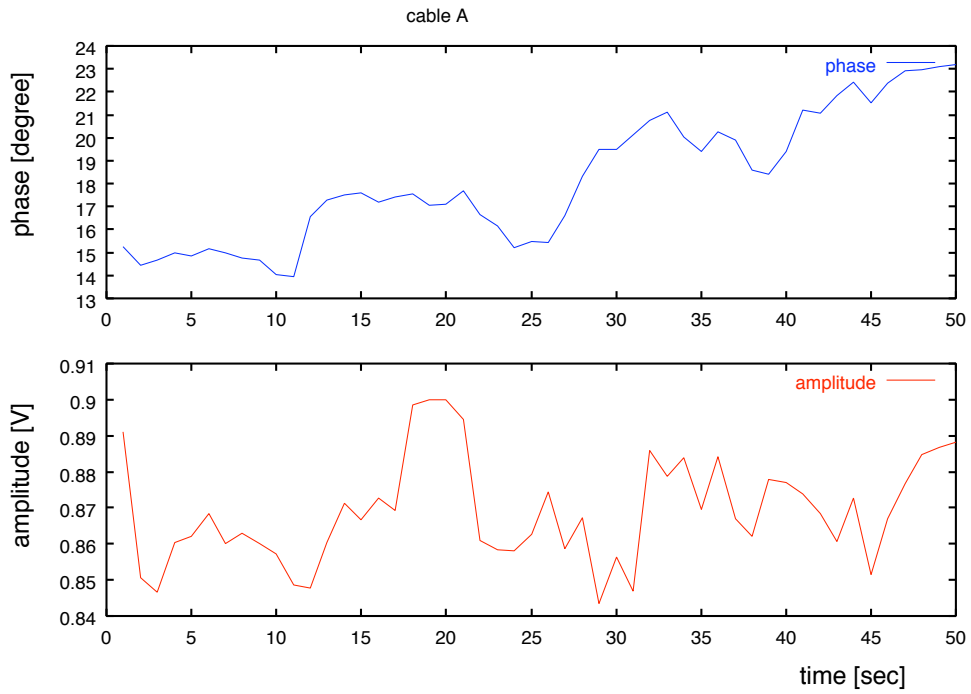


図 13: ハンドリング安定性の結果 (cable A)

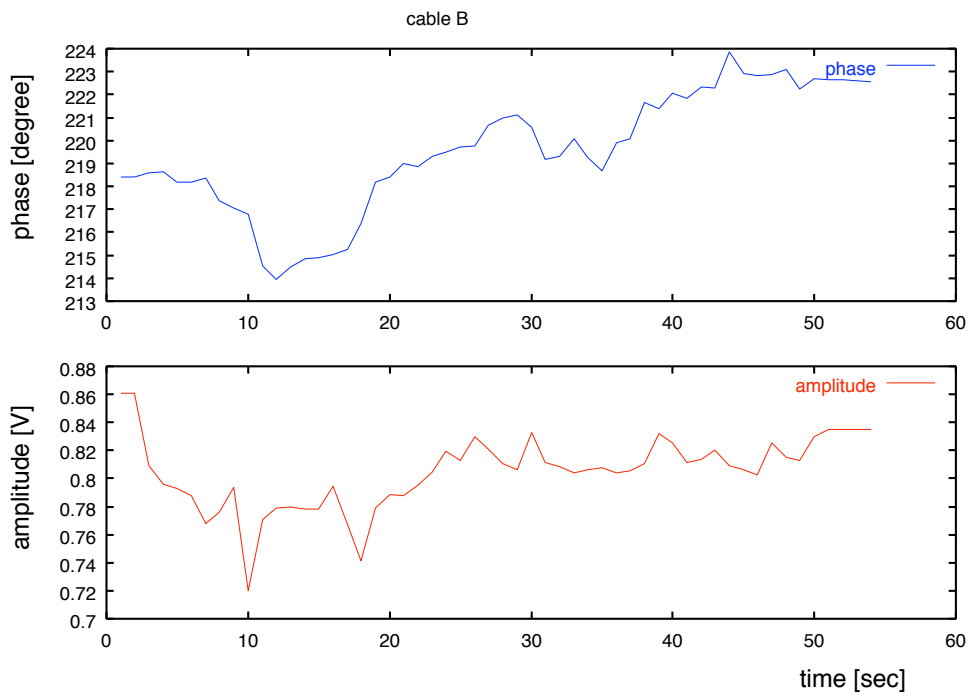


図 14: ハンドリング安定性の結果 (cable B)

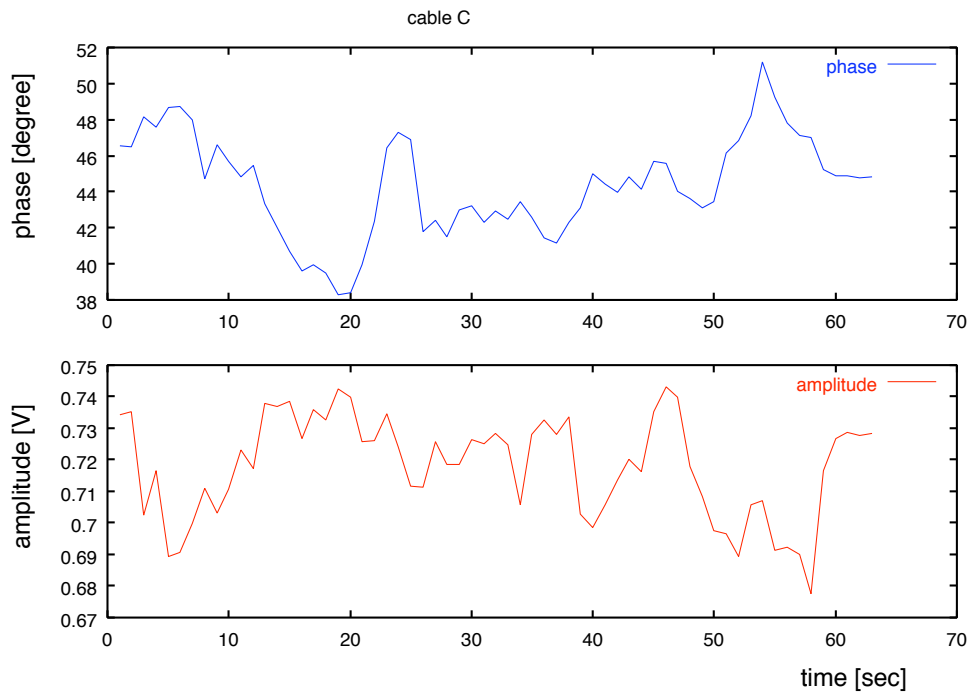


図 15: ハンドリング安定性の結果 (cable C)

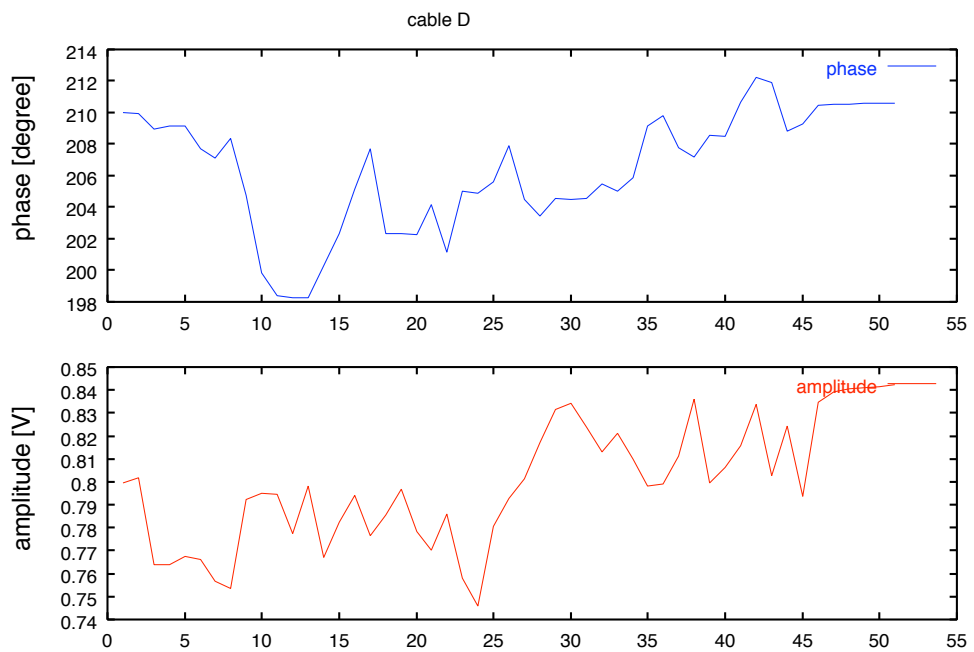


図 16: ハンドリング安定性の結果 (cable D)

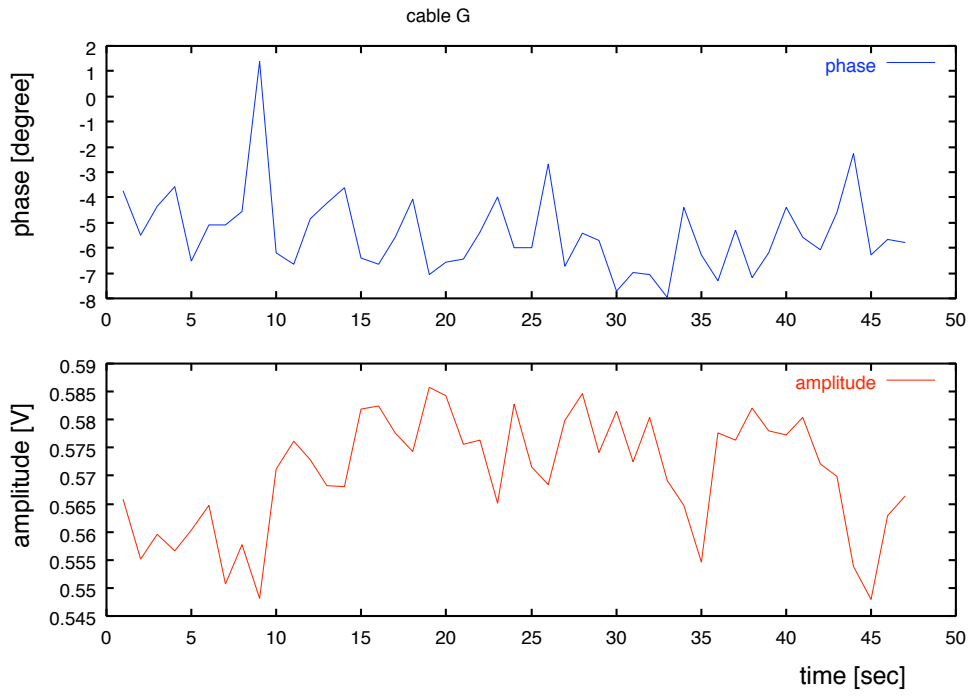


図 17: ハンドリング安定性の結果 (cable G)

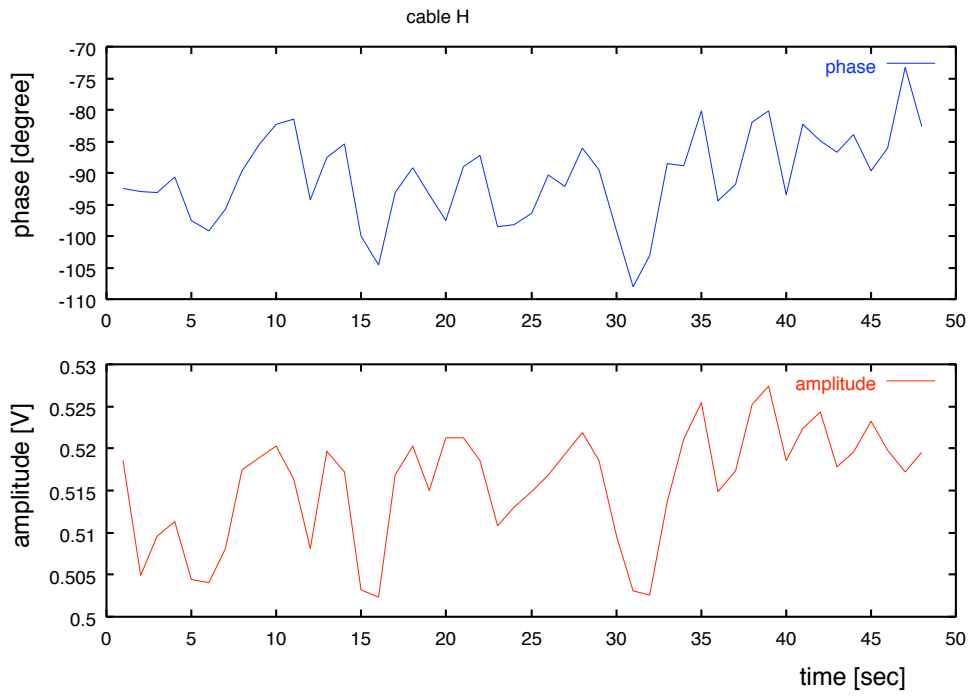


図 18: ハンドリング安定性の結果 (cable H)

4 遮蔽特性の測定

隣り合って設置されたケーブルの信号の干渉を調べる為、図 19 のセットアップを組んだ。同じケーブルを 2 本用意し、発振器から片方のケーブルに 6.426GHz,+20dBm の信号を通した (反対端は 50Ω で終端)。隣に沿わせたもう一方のケーブルに洩れ出て来る信号をスペアナで測定した。表 19 に示すような結果が得られ、どの場合も観測されたパワーは入力のパワーの 140dB 落ちである。入力ケーブルからの洩れだしと、読みだしケーブルでのピックアップの 2 回の効果が入っているため遮蔽の特性としては 70dB と理解するのが適当かもしれない。遮蔽特性についても問題は無い。

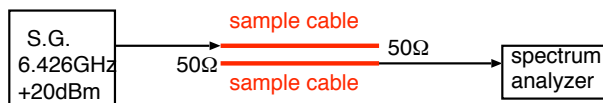


図 19: 遮蔽特性テストのセットアップ

表 4: 遮蔽特性のまとめ

ケーブル名称	観測された信号強度
A	-125 dBm
B	-124 dBm
D	-125 dBm
G	-124 dBm

5 減衰の測定

ケーブルでの信号の減衰量を図 20 に示すセットアップで測定した。測定対象のケーブルの有り、無しでの信号強度をスペアナで測定してそれらの差から減衰量を計算した。(実際はコネクタ部での減衰を別に扱うべきかもしれないが) ケーブル長さの違いを 1.5m の場合に規格化してまとめたものが表 5 である。ケーブル A~F は要求を満たしている。

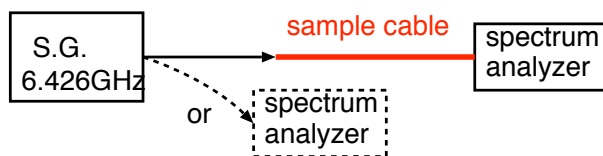


図 20: 減衰テストのセットアップ

6 2本組みの位相

今回新しく作ってもらったサンプルケーブル A,B は、長さを揃えた 2 本組になっている。0.5mm の精度を指定してあるので、位相にして 5.8 度で合っていると期待している。図 21 のセットアップで 2 つのケーブルを繋ぎ変えてみて位相と振幅の違いを調べた。表 6 にまとめるように、組になったケーブルは特性が良く揃っていることが分かる。

表 5: 信号減衰のまとめ

ケーブル名称	観測された信号強度	1.5mあたりの減衰
no cable	16.6 dBm	
A	15.3 dBm	1.3 dB
B	14.2 dBm	2.4 dB
C	14.0 dBm	2.0 dB
D	13.8 dBm	2.1 dB
E	13.5 dBm	2.3 dB
F	14.9 dBm	2.6 dB
G	11.1 dBm	4.1 dB
H	8.9 dBm	3.9 dB

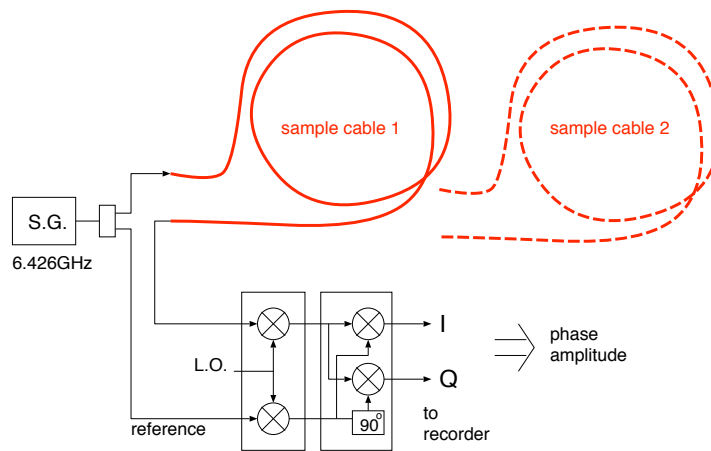


図 21: 位相一致テストのセットアップ

7 まとめ

今回作ってもらった2つのサンプルケーブルはどちらも我々の要求を満たしている。また、我々の使用条件では、より高価な Sucoflex 等のケーブルを用いてもメリットは無い。S-04212Bの方が若干結果が良いことと、取り扱い易い (Sucoform はやや硬い) こと、価格が若干安いこと、等から Q-BPM で使用するケーブルとして S-04212B を選定したい。

表 6: 位相調整のまとめ

ケーブル名称	1本目		2本目		変化量	
	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅
A	206.0 deg.	0.690 V	209.3 deg.	0.696 V	3.3 deg.	0.9 %
B	116.8 deg.	0.645 V	114.4 deg.	0.651 V	2.4 deg.	0.9 %