

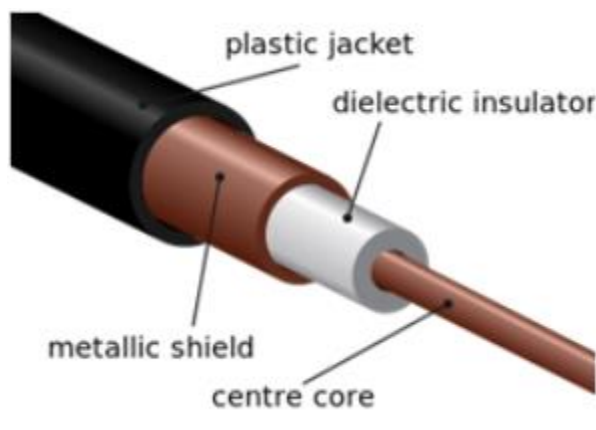
アプリケーションに適した RF 同軸ケーブル アセンブリの選び方

はじめに

RF/マイクロ波ケーブルアセンブリの正しい選択は、市場に出回っているさまざまな製品やそれらの特性を考慮すると、かなり面倒な作業になる場合があります。さらに、多くの製品は、「スプレッドシート」による比較には適していません。このガイドはスペックシート以上に、より多くの判断材料から迅速にニーズに合うケーブルを選択する手助けができるように書かれています。RF ケーブルにおける各種カテゴリとその属性を確認し、お客様のアプリケーションに必要なパラメータの優先順位の付け方について、いくつかのガイドラインを提供します。RF の基礎理論については既に多くの書籍があり、本書は学習ガイドというよりも現場エンジニアのための実用的な資料となることを目的としているため、省略させていただきました。また、コルゲートケーブルや CATV 同軸ケーブルについては、一般的にニッチな用途に限定されるため、割愛しました。

同軸タイプの概要:

すべての同軸ケーブルは、誘電体（通常は PTFE）に囲まれた中心導体と、信号の漏洩を防ぐための外側の金属シールド、および内層を損傷から保護するための外層被覆で構成されています。この構造のバリエーションは多く、また複雑であるため、同軸ケーブルの構造の様々なカテゴリとその違いを理解することはユーザーにとって有益です。



<https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/coaxial-cable-guide> (REDRAW)

同軸ケーブルのカテゴリとその属性の概要を次に示します。

セミリジッド(軟質焼鈍銅管)

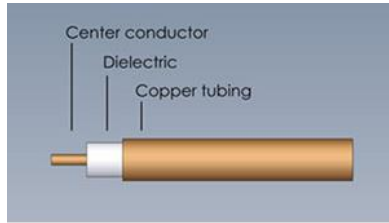


Figure 2. Cutaway view of a semi-rigid cable

(REDRAW)

セミリジッドケーブルアセンブリは、編組シースではなく固体銅チューブを外部シースとして使用しています。固体金属はシールド性に優れ高周波用途に有効ですが、柔軟性に欠けるのが大きな欠点になります。セミリジッドケーブルは、通常、長さ、曲げ形状、コネクタ形状がお客様の使用目的に合わせてカスタマイズされ、独自のシステムレイアウトで使用されます。一般的に、お客様が独自のシステムレイアウト内で使用する場合に指定された長さ、曲げ形状、およびコネクタ構成でカスタマイズされます。セミリジッドケーブルは、成形後に曲げたりたわませたりすることを想定していないため、取付ける間に簡単に破損する可能性があります。

長所：

- 効率的に RF 伝送が行える
- シールド性に優れる
- 厳しい曲げ半径が可能
- リターンロスが良好（正しくアセンブリされた場合）
- アセンブリ用の大規模なサプライヤベースがある（ただしケーブルメーカーの数は限られる）
- 圧着、クランプ、はんだ付け等コネクタの種類が豊富
- 50 Ω の基本 4 サイズは :0.047"、0.086"、0.141"、0.250"（086 と 141 が最も一般的）
- スズメッキ銅、スズメッキアルミ、低損失版もあるが一般的ではない
- 40 GHz 以上に対応する小口径

短所：

- オーダーメイドの必要がある
- アセンブリは使用されるシステム専用で汎用性がない
- 曲げ形状の図面（設計製図の時間）が必要
- ケーブルには柔軟性がない
- サプライヤから NRE コストを要求される場合がある
- はんだ付け工程が悪いと、取り付け時にはんだ接合部にクラックが発生することがある
- 多くのサプライヤで、潜在的なフィールド障害につながる可能性のあるプロセスをパスしている場合がある

Mini-Circuits では、その固有コストと汎用性の低さからセミリジッドケーブルは提供しておりませんが、接続用の代替ケーブルは、総合的な価値と汎用性で優れた性能を達成しています。下記の錫溶融メッキケーブルを参照ください。

編組フレキシブル同軸 (RG スタイル)

<NEED FIGURE>

「RG」（ラジオガイドの略）ケーブルは、セミリジッドケーブルに使用される固体チューブではなく金属編組の外部シールドを使用します。これにより柔軟性と弾力性が向上し、さまざま

な曲げ形状に再利用でき、セミリジッドに比べると比較的安価になります。RG スタイルのケーブルは、高性能編組フレキシブルケーブル（下記の高性能編組フレキシブル同軸ケーブル参照）より短期間で製造することができ、コストとリードタイムを抑えることができます。導体、誘電体、シールドの種類はこのカテゴリでも大きく異なりますが、一般的には編組シールドは固体チューブよりも本質的に損失が大きいため、減衰が大きくなり使用可能な最大周波数も通常は 3～6GHz が最大値になります。

長所：

- 種類が多い（ケーブルおよびアセンブリのサプライヤが多い）
- 曲げ形状の図面は不要
- 再屈曲が可能で適度な屈曲寿命
- 低単価、短納期
- 圧着、クランプ、直ハンダなど、ケーブルに応じて豊富なコネクタが選択できる

短所：

- セミリジッドよりはシールド性能が劣る
- 同サイズのセミリジッドよりは若干減衰が大きい
- ロットやサプライヤによって性能にばらつきがある場合がある
- 約 6GHz 以上の使用は規定されていない
- 組み立て技術やストレインリリーフが不十分な場合に、コネクタ取り付け初期不良が起きることがある

高性能 編組フレキシブル同軸

Mini-Circuits は、より高度なケーブル設計、材料選択、製造プロセスにより、編組フレキシブルケーブル構造で優れた高周波性能を達成しました。これらの高性能ケーブルアセンブリは、編組フレキシブル同軸ケーブルの柔軟性と汎用性を維持しながら、最低 18GHz、最大 67GHz まで仕様が拡張されています。Mini-Circuits の高性能編組フレキシブルケーブルの選択肢には、位相安定性対曲げ特性、温度安定性などを目的に設計され、仕様化されたモデルが含まれています。図 1～図 5 に、さまざまなアプリケーションや動作環境向けに設計された、このタイプのケーブルのいくつかのバリエーションを示します。

長所：

- 特定の技術的課題に対応できる多種多様な設計
- 高いシールド性
- 67 GHz まで非常に良好なリターンロス
- 長い屈曲寿命
- 屈曲に対する RF 安定性能
- 低損失のオプション

短所：

- セミリジッドや RG フレキシブル同軸より高価でリードタイムが長い
- ケーブルおよびアセンブリのサプライヤが限定される
- 多くのケーブルはアセンブリとしてのみ入手可能
- 曲げ半径が制限される場合がある（粗雑に扱おうと劣化しやすい）
- 最大性能を引き出すためには、一般的に高い組み立てスキルが必要
- コネクタの種類に制限がある

Mini-Circuits の高性能編組フレキシブル同軸ケーブルの例を、以下の図 1～5 に示します。

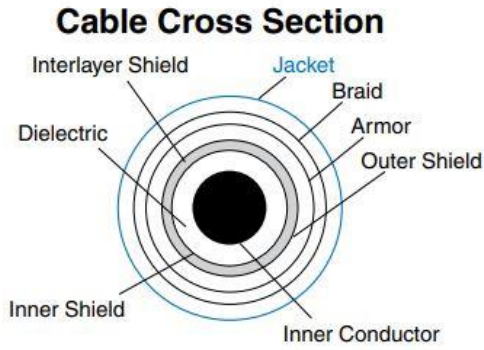


図1: Minu-circuits の APC シリーズ装甲テストケーブルの断面

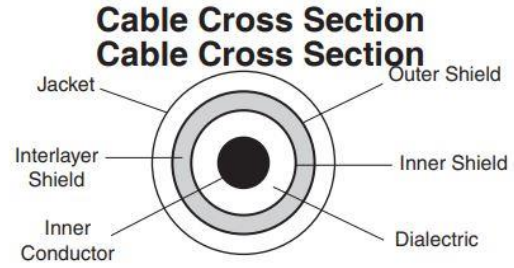


図2: Minu-circuits の CBL シリーズ精密テストケーブルの断面

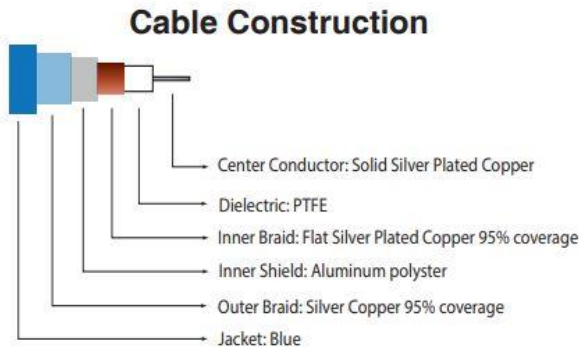


図3: Minu-circuits の FLC シリーズフレキシブルテストケーブルの構造

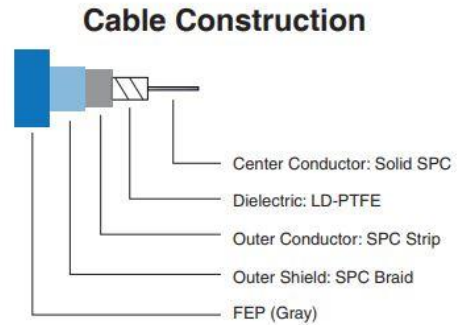


図4: Minu-circuits の TMP シリーズ温度安定テストケーブルの構造

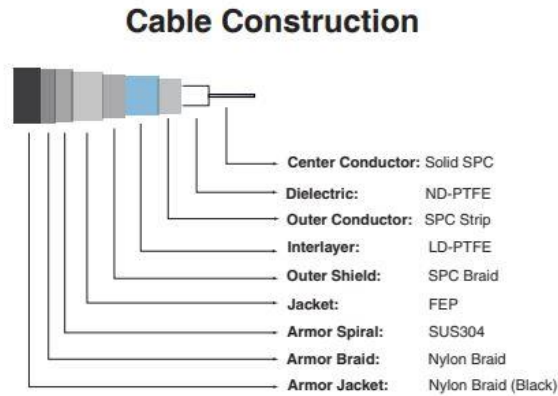


図5: Minu-circuits の VNAX シリーズVNA 精密ケーブルの構造



錫溶融メッキケーブル (Mini-Circuits HandFlex®)

Mini-Circuits の HandFlex®接続ケーブルは、錫溶融メッキを施した銅編組外部シールドで構成されています。これらのケーブルは、柔軟性と40GHz までの優れた性能を両立しています。また、曲げ形状を保持するため、曲げ仕様が不要なくセミリジッドケーブルの代替品として優れています。また、手加工が可能のため、狭い場所での接続も容易で、ケーブルやコネクタインターフェースの破損の心配がありません。

長所：

- セミリジッドと編組フレキシブル同軸の両者の特性を併せ持つハイブリッド
- セミリジッドに近いシールド性能と伝送効率
- 多少の再曲げが可能
- 曲げ加工図が不要
- リターンロスが非常に良好
- セミリジッドと同程度の減衰量
- 費用対効果が高く、既製の納品 または短いリードタイム
- 0.047"、0.086"、（ともに 40 GHz まで）および 0.141"（26.5 GHz まで）で提供可能
- 一般的なコネクタオプションは直接はんだのみ。
- 低損失とジャケット付きの提供可能

短所：

- コネクタの取り付けが難点になる可能性がある
- 過度の曲げ加工による損傷/劣化の可能性はある

コネクタの種類と接続方法:

コネクタは、アプリケーションの周波数要件と、ケーブルが接続される機器の入出力コネクタの種類に応じて選択する必要があります。下表は、最も一般的なコネクタの種類と、それぞれに対応する周波数の制限を示しています。

コネクタの種類	周波数制限
F 型 (75Ω)	2.5 GHz
BNC	4 GHz

MMCX (マイクロミニチュア 同軸)	6 GHz
N 型	11 GHz
SMA	24 GHz
SMP (スナップオン)	25 GHz
3.5 mm	34 GHz
2.92 mm	40 GHz
2.4 mm	50 GHz
1.85 mm	67 GHz
1 mm	110 GHz

一般的に、ケーブルアセンブリには、ケーブルの中心導体および誘電体の直径と同様の直径を持つ中心接点と誘電体を備えたコネクタを選択する必要があります。取り付けが正しく行われていれば、サイズを一致させることで最適なリターンロスが得られます。

コネクタのケーブルへの取り付けは、通常、クリンプ、クランプまたははんだ/クランプ、直接はんだの 3 つの方法のいずれかになります。この 3 つの方法を理解することは、ケーブルの性能と信頼性を評価するのに役立ちます。

クリンプ:

セミリジッドケーブルで使用されることもあります。クリンプコネクタは低周波の RG ケーブルによく使われます。クリンプコネクタは、作業量は少ないですが専用の圧着工具が必要な場合もあります。頻繁に取り扱うことがないケーブルに使用する場合は最適です。意外にも試験用ケーブルにこのクリンプコネクタを使用するサプライヤが多いのですが、これは適切ではなく、信頼性に影響を与えます。試験用ケーブルとして販売されているアセンブリにクリンプアタッチメントが使用されていると、ユーザーは品質に関する疑問を感じるはずですが。

<FIGURE>

クランプまたははんだ/クランプ:

クランプまたははんだ/クランプアタッチメントは、軍事および航空宇宙用途向けのケーブル設計でかなり頻繁に使用されています。これらは組み立てが複雑でコストがかかりますが、クリンプよりもはるかに信頼性が高く、はんだ接合部分に潜在的なクラックをもたらすことはありません。ひび割れたはんだジョイントにはなりません。Mini-Circuits は、CBL、ULC、その他テストケーブルシリーズにはんだ/クランプを使用して、優れた信頼性を実現しています。

<FIGURE>

直接はんだ:

この方法は、セミリジッドケーブルやハンドフォーマブルケーブル（例：Mini-Circuits HandFlex®）でよく使われています。皮肉なことですが、直接はんだコネクタはコストが最も低いにもかかわらず単純で RF の不連続性が少ないため、最も高性能になります。このカテゴリには、分離型と非分離型のコンタクト設計があります。分離型コンタクト設計では、バンプ

方式、エポキシ方式、メカニカルショルダ方式など、メーカーによりさまざまなコンタクトの接触保持機構が採用されています。はんだ付けの技術は、製品の性能と信頼性にとって非常に重要です。製造工程における技術力不足は、多くの場合、コールドはんだ接合やはんだ接合部のクラックを引き起こすことにつながります。現場における不具合解消に、改善コストがかかることは明らかです。<FIGURE>

アプリケーション要件の確認

様々な同軸ケーブルのタイプ、コネクタのオプションとそれぞれの属性を念頭に置いて、論理的な出発点としてアプリケーションの具体的な動作要件を検討します。

システム性能を最適化し、コストを抑さえる最善の方法は、システム設計の早い段階でケーブルの要件に対応することです。相互接続ケーブルの選定を機構設計や筐体設計のエンジニアに任せる場合は、意思決定プロセスに彼らを参加させること。多くの場合、システム性能を犠牲にすることなく与えられたスペースにすべてを収めることが難しくなります。納期が迫ってくると選択肢が狭まり、ケーブル接続のコストが上昇する可能性があります。

希望するパラメータの特定と優先順位付けを開始するには、すくなくとも下記の項目の確認が必要です。

1. ケーブルは取り付け後、外すことはないか（ケース内のように）、またはテストケーブルと同様に頻繁に取り外しが行われるか？
2. 静止時またはアンテナ回転台ケーブルのように移動時に、規定の性能を発揮する必要があるか？
3. 恒温槽を使用した温度でも RF 特性を維持する必要があるか？
4. ケーブルは飛行中などのように高い高度、湿度、振動などの極端な環境条件にさらされるか、それとも実験室（RF ブレッドボード）のような安定した環境か？
5. 必要とするコネクタの種類はアプリケーションに適しているか？ 検討しているケーブルのサイズは一般的なものか、それとも特殊なものか？

これらの項目を確認することで、理想的なケーブルカテゴリが明確になり、ケーブルの特定や適切なサプライヤ検索の絞り込みに役立ちます。

ケーブル検索のためのシンプルなフレームワーク:

同軸ケーブルの選択は、理想的な状況にあっても妥協の必要がある場合が多いため、Mini-Circuits は、以下の枠組みに従ってニーズを分析することを提案します。

1. **必要不可欠:** 妥協できない属性。
2. **ある程度必要:** 望ましいが必ずしも必須ではない属性。

これらの特性は、そのキーになる属性に従ってさらに4つのカテゴリに整理することができます。

1. RF 特性
2. 材質/構造
3. コネクタの種類
4. 機械的/環境的動作条件

おおまかな方法：

最初の3つの必要条件を満たすケーブルが、最良の価格で選択したケーブルあるいはアッセンブリになっている可能性があります。さらに必要な特性やある程度は必要な特性を含めてサプライヤと交渉を続ければ、価格とのトレードオフが明確になり、より多くの情報を得た上での判断ができるかもしれません。

システム設計においては、上記のようなトレードオフが許容できない場合があります。このような場合、高性能同軸が唯一の解決策になる可能性があります。たとえば、サプライヤが、高コストながら高性能同軸を使うことで、損失量やケーブル径の制約の範囲内に抑えられる場合があります。あるいは、他の目標を同時に達成することができるかもしれません。しかし無料のランチというのは存在せず、より多くの電氣的、機械的、環境的要件を満たすためには、通常、より高い価格、より限られたコネクタの選択、あるいはより長いリードタイムが必要なのです。

性能パラメータと一般的なトレードオフ

見やすくするために、RF 同軸ケーブルの最も一般的な性能パラメータを以下の表に要約しました。

電氣的	機械的	環境的
周波数範囲	外径	温度範囲
減衰量（最大損失）	柔軟性（最小曲げ半径）	湿度
電力供給	屈曲寿命	振動
RF 安定性	直径、デザイン、編組、質量	耐溶剤性/耐 UV 性
シールド性	誘電体材料	脱ガス
リターンロス/VSWR	コネクタの種類/脱着方法	高度

RF の世界にあるほとんどのものと同様に、適切なケーブル選択にはトレードオフが伴います。以下は、エンジニアがニーズに合うケーブルを選択する際に、主なパラメータの間で考える必要のある最も一般的なトレードオフの例です。

インピーダンスは、電力供給と減衰の間の妥協点であって、内部と外部の導体サイズの比率を変えることで変化します。通信システムの大半は 50Ω で、CATV システムでは 75Ω が標準であ

るため、上記の表にインピーダンスは記載していません。Mini-Circuits では、50Ω と 75Ω 両方のテストケーブルを販売しています。

ケーブル直径は他の多くの属性に影響するため、これは通常、選択プロセスのリストの最上位に位置付けられます。ケーブルの外径を大きくすると、挿入損失を減らし、電力供給と端末部分の強度を向上させることができます。しかし、ケーブル径が大きくなると定格最大周波数は下がるとともに、最小曲げ半径は大きくなり柔軟性は下がり質量が増加します。またケーブル径が大きくなると、コネクタの種類も制限され、その結果次に示すような影響が生じます。

曲げ半径、柔軟性、屈曲寿命はすべてケーブル径に依存するため、これらに対して厳しい要件があるお客様は、より小径のケーブルを求めることとなりますが、これは通常、ある程度の電力供給と挿入損失性能を犠牲にすることを意味します。

経験則:

- ケーブルの 1 回の最小曲げ半径は、ケーブルの外径の 5 倍です。
- ケーブルの最小再曲げ半径は外径の 10 倍です。
- 曲げ後の RF 劣化は頻度と許容範囲に応じて、この経験則には多少のばらつきがあります。

ケーブル径に伴って電力供給は増加します。したがって、高電力を必要とするユーザーは、ケーブルの柔軟性と高周波性能を犠牲にする必要があるかもしれません。さらに、コネクタの種類が少なく、コネクタの脱着機構の品質が悪いとリターンロスが低下し、電力供給能力が低下する可能性があります。また電力供給は高地や高温でも劣化するため、これらの動作条件に対応するシステムを構築するユーザーは、選択したケーブルが適切に検証されていることを確認する必要があります。

動作周波数範囲は、通常システムの帯域幅によって定義されるハード要件ですが、周波数はシステム設計者が考慮すべき他の多くの要素を決定します。たとえば、ケーブルの減衰量は周波数の関数であり、周波数が高いほど信号は漏洩します。周波数が高いほどリターンロスの改善は困難になります。周波数に依存する損失は、シールドを追加することで軽減することができます。三重シールドケーブルは、セミリジッドケーブルと同様のアイソレーション得るためによく使用されています。シールドの強化には一般的に外部導体層を追加する必要があり、製造工程が複雑になり最終製品にコストが加算されることとなります。

RF の安定性は、ケーブルが通常の扱いや曲げの対象になるか（実験室レベル）、あるいは設置されたままで固定されるかなど、いくつかの要因に左右されます。ほとんどのケーブルには、最小曲げ半径と RF 性能の低下し始める曲げ回数に関するメーカーの評価があります。曲げ加工が位相安定性に与える影響については、こちらをご覧ください。RF 安定性は温度などの多くの環境要因にも影響され、また高温動作寿命（HTOL）試験用の恒温槽でケーブルを使用する場合や、極端な温度が予想されるシステムでケーブルを使用する場合に重要となります。Mini-

Circuits は、[位相安定性対曲げ](#)、[温度安定性用](#)に対応するようの特別に設計された[ケーブル](#)を提供します。

その他の環境要因、耐 UV 性、耐溶剤性、脱ガスなどその他の環境要因は、ケーブル被覆を含むすべての材質を慎重に選択する必要があるニッチなアプリケーションであるため高い専門性が要求されます。脱ガスに関しては、ケーブルの構造、熱収縮ストレインリリーフに使用される接着剤、ガスケット材料、エポキシなど、すべてに特殊な材料が必要になります。航空宇宙用アプリケーションでは、電圧破壊を防ぐために、特殊な内部設計と接続プロセスを備えたベントコネクタも必要です。これらは容易なことではなく、RG ケーブルでは到底対応できません。

パッシブ相互変調 (PIM)は、RF 接続またはデバイスの非線形性によって生じる高調波であり、受信信号の劣化をもたらす可能性があります。低 PIM ケーブルアセンブリには、PIM を削減するために特別に作られたケーブルとコネクタが必要になります。歴史的にみるとコルゲートケーブル（ここでは説明していません）は最高の PIM 性能を発揮してきましたが、今日では一部の編組同軸ケーブルがコルゲートに近い性能を持っています。

まとめ

これまで見てきたように、特定のアプリケーションに適したケーブルを選択するには、電氣的、機械的、環境的変数が複雑に絡み合います。さまざまな種類の同軸ケーブルの構造、RF コネクタと取り付け方法、主要性能パラメータと一般的なトレードオフに関するしっかりとした基礎があれば、より多くの情報に基づいて判断することができます。

Mini-Circuits [オンラインケーブル検索ツール](#)は、ケーブルの種類、直径、コネクタの構成やその他の要素で検索を絞り込むスタート地点として適しています。弊社の既製品は 375 以上のモデルがありますが、被覆なしケーブルや特殊なコネクタ要件など、カスタムオプションでもお客様をサポートしております。必要な情報が弊社のウェブサイトで見つからない場合は、apps@minicircuits.com にお問い合わせいただき、お客様のニーズに合ったソリューションについてご相談ください。