

【第 38 話】 アンテナと空間のインピーダンス (その 6 平衡と不平衡(その 1))

濱田 倫一

第 37 話までの解説でアンテナの給電インピーダンスと放射抵抗の関係をご理解頂けたかと思います。我々が普段使用する同軸ケーブルは、特性インピーダンス $Z_0=50\Omega$ なので、アンテナに給電する際は、アンテナの給電インピーダンス R_f を Z_0 の複素共役($=50\Omega$)に変換すればよい。ということになりますが、実はもう一つ考慮せねばならないことがあります。

それが伝送線路やアンテナの「平衡(Balanced)」「不平衡(Unbalanced)」という問題です。第 38 話では「平衡」「不平衡」とは何かについて解説します。

■1. グラウンド(GND)とは何か

無線従事者の免許をお持ちの方なら、“GND”の回路記号は皆さんご存じかと思います。本連載では電流を解説する機会が多いので、GND 記号を極力使用せずに解説を行ってききましたが、図 1(a)に示す回路は、GND 記号を用いて図 1(b)のように書くことができます。両者はどう違うのでしょうか。

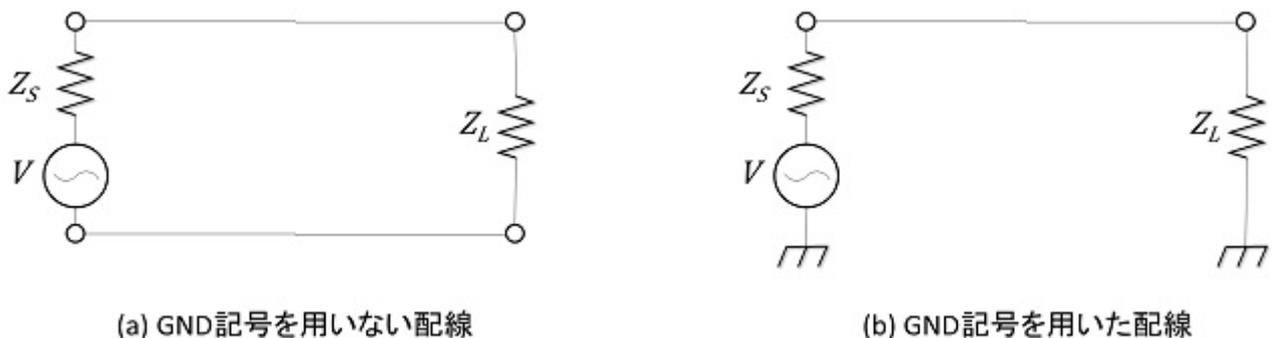


図 1 GND 記号を用いない配線図と用いた配線図

GND とは Ground(大地)の事であり、地面またはそれに準じる部分(面)に接続するという意味を持ちます。「地面に準じる部分(面)」とは、電位を $0V$ と見なす部分(面)です。理想 GND は、どれだけ電流が流れても $0V$ であり、回路の基準電位として取り扱います。→ 図 2

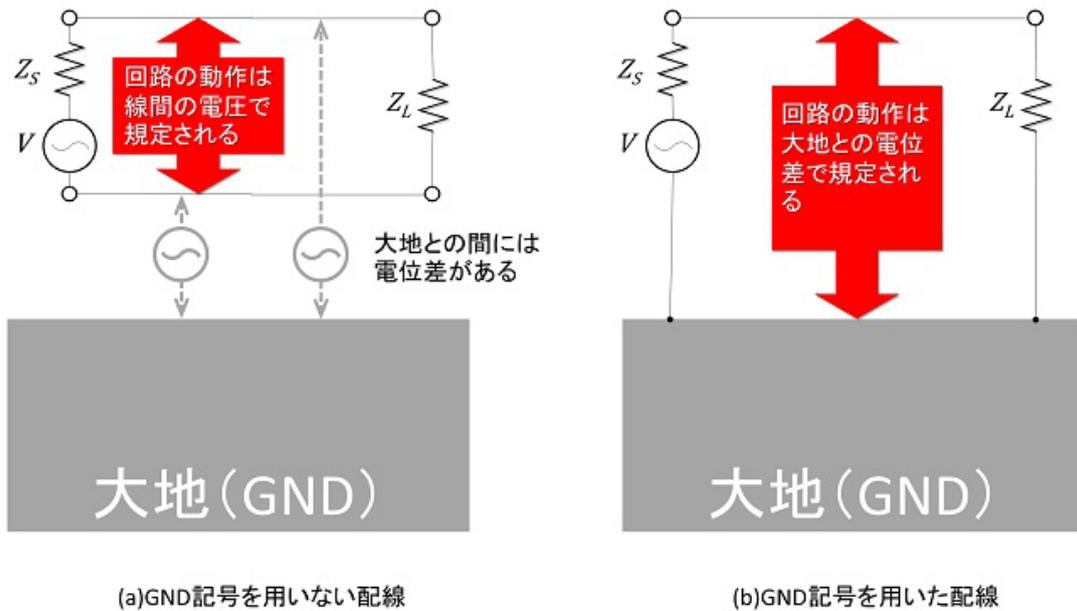


図 2 GND(Ground=大地)とは

一般に GND は装置の筐体の電位を示し、筐体は人が触れる為、感電防止の観点から人が立っている大地と同じ電位に保つ事が一般的なので、GND「グラウンド」という呼び方をします。→ 図 3

つまり図 3(a)は大地を基準に見た場合、回路の電位が定まっていない状態＝+(HOT)/-(COLD)のどちらに触れても感電する状態であるのに対して、図 3(b)の回路は大地を基準にして回路の電位が定まっている状態＝GND 側は触れても感電しない状態にあるということを示しています。

ちなみにアマチュア無線機を始めとする無線通信機器は一般に同軸コネクタの外周(COLD ライン)が筐体に固定されており、図 3(b)の考え方になっています。

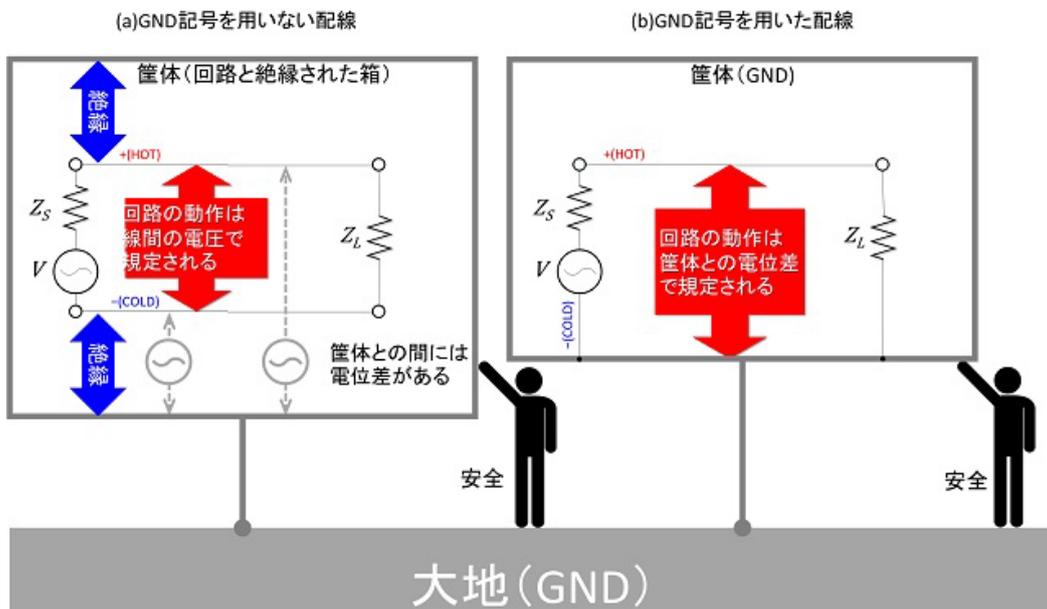


図 3 筐体の役割と GND

■2. グラウンド(GND)と電流、ならびに伝送線路の関係

図4は図1を実態配線図にしたものです。図4(a)ではSGの端子から負荷 Z_L に向かって流れる電流は、リターン(COLD)の配線を通してSGに戻ります。特に伝送線路の場合は外部に電磁波を放射させない為にリターンライン(COLDライン)は信号ライン(HOTライン)に平行させます。これに対して(b)の配線ではリターンラインが存在せず、代わりにGNDと称する導体板に接続されています。リターン電流はGND板を經由してSGに戻るのですが、その経路は直流(波長が無視できる領域)では曖昧になります(本連載でGND記号をあまり使用しない理由はここにありますが)、高周波回路においては、エネルギーが電磁波として伝搬している為、リターン電流がGND板上に無制限に広がることは無く、+(HOT)側の電位に引かれるかたちで誘起されます。この結果GND板には+(HOT)ラインが鏡に映っているような感じで電流が分布します。

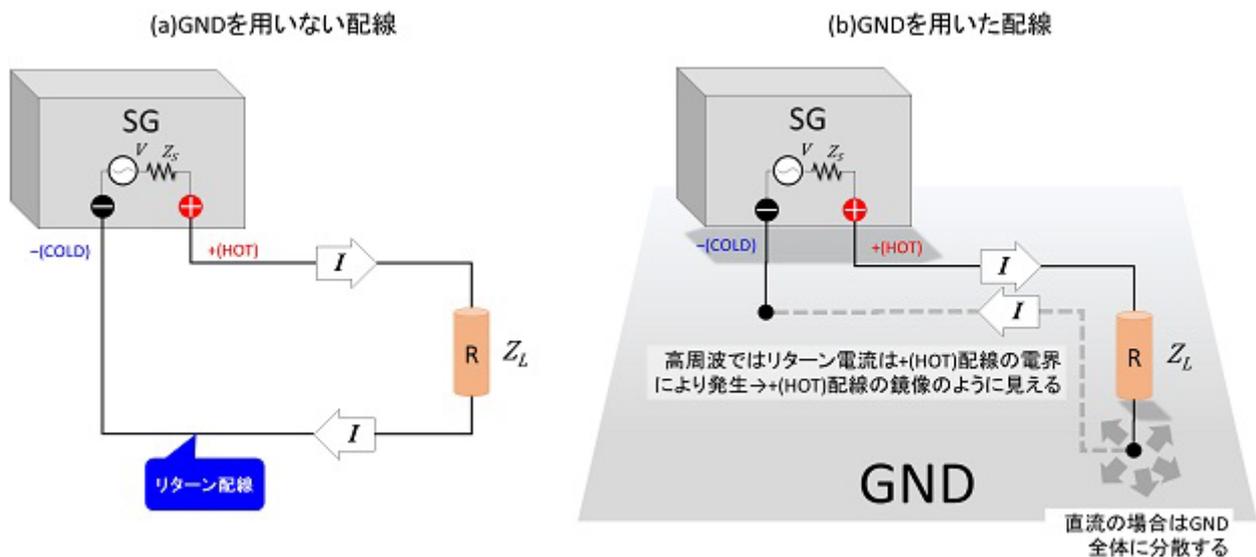


図4 実態配線図で考える

これは、GND板の中に仮想的なリターン配線が存在するのと等価であり、図4(b)の配線(線路)は、図5に示すような関係で、図4(a)の配線に置き換える事が可能です。

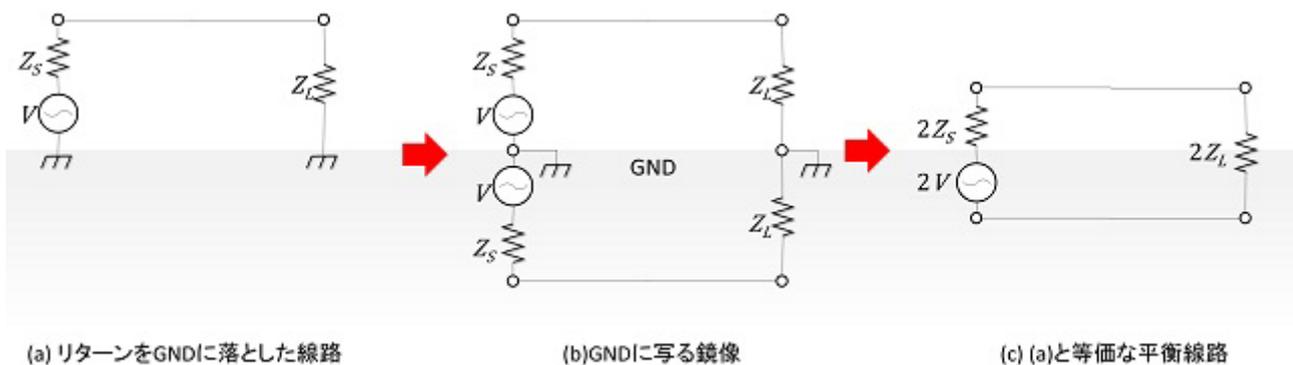


図5 鏡像をリターン配線と見なした場合の等価回路

GND を使用せず、リターン電流を+(HOT)ラインと対にして配線した線路を平衡線路(Balanced line)、リターン電流を GND に落とした線路を不平衡線路(Unbalanced line)と呼びます。図 6 に代表的な平衡型線路と不平衡型線路を示します。これまでの解説では、殆ど区別せずに解説してきましたが、平衡型線路の代表例は並行 2 線(並行フィーダとも呼ばれます)、不平衡型線路の代表例は同軸線路で、等価回路も異なります。

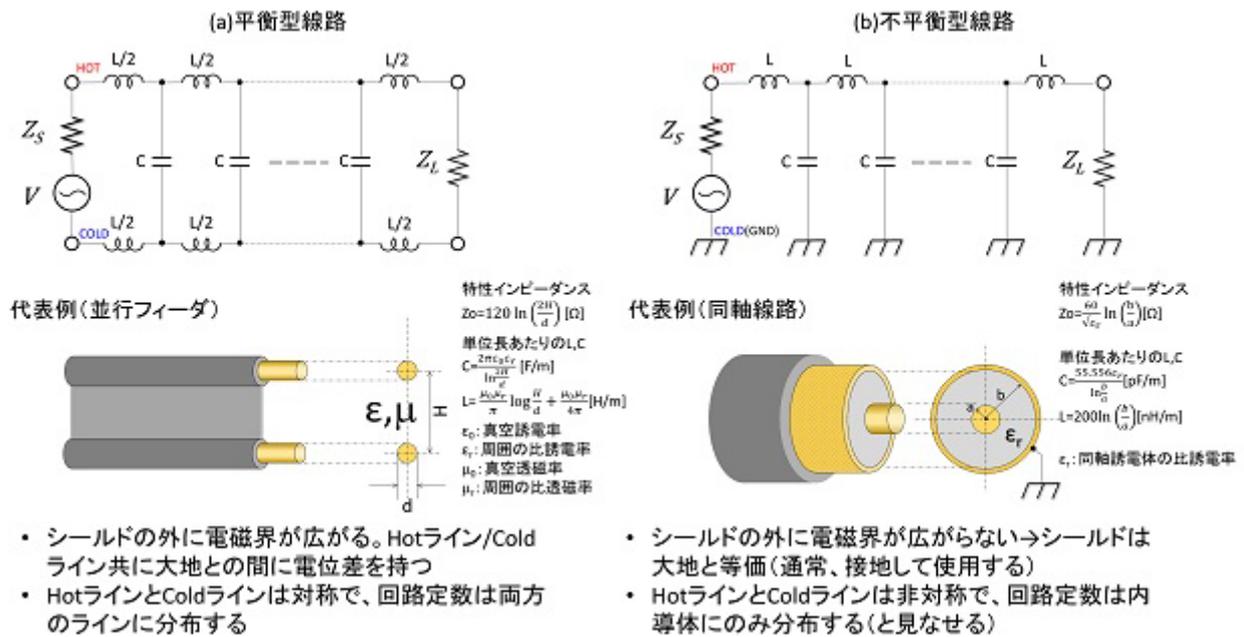


図 6 平衡型線路と不平衡型線路

似たようなカテゴリとして電子回路においても、二つの不平衡配線の電圧差分を信号電圧とする「差動回路(Differential circuit): 代表例は OPAMP の入力や RS-485 等」と GND 基準で信号を取り扱う「片線接地(Single ended circuit): 一般的な電子回路」というものがあり、両者は平衡線路と差動回路、不平衡線路と片線接地が対になる考え方です。

■3. グランド(GND)とアンテナの関係

伝送線路と同様、アンテナにも平衡型、不平衡型が存在します。図 7(a)は第 37 話までで題材としたダイポールアンテナです。ダイポールアンテナは電源の+(HOT)側、-(COLD)側のそれぞれにアンテナエレメントが接続され、大地との間に電気的な接続を持ちませんから平衡型の空中線です。前項で解説した通り、このアンテナに給電するためには平衡型の伝送線路が必要です。

一方、図 7(b)に示すモノポールアンテナは GND に垂直に $\lambda/4$ の素子を立てたものですが、この素子に給電すると放射された電磁波は GND で反射されるため、やはりエレメントの鏡像が発生し、垂直に設置した $\lambda/2$ ダイポールアンテナと等価の特性を有します。図 8 はこの様子を模擬したものです。鏡の上に白い棒(消しゴムです)を立てたものですが、鏡に映った像によって、長さが 2 倍に見えています。この時、図 5 の関係から放射抵抗は同じ長さのダイポールアンテナの半分となります。

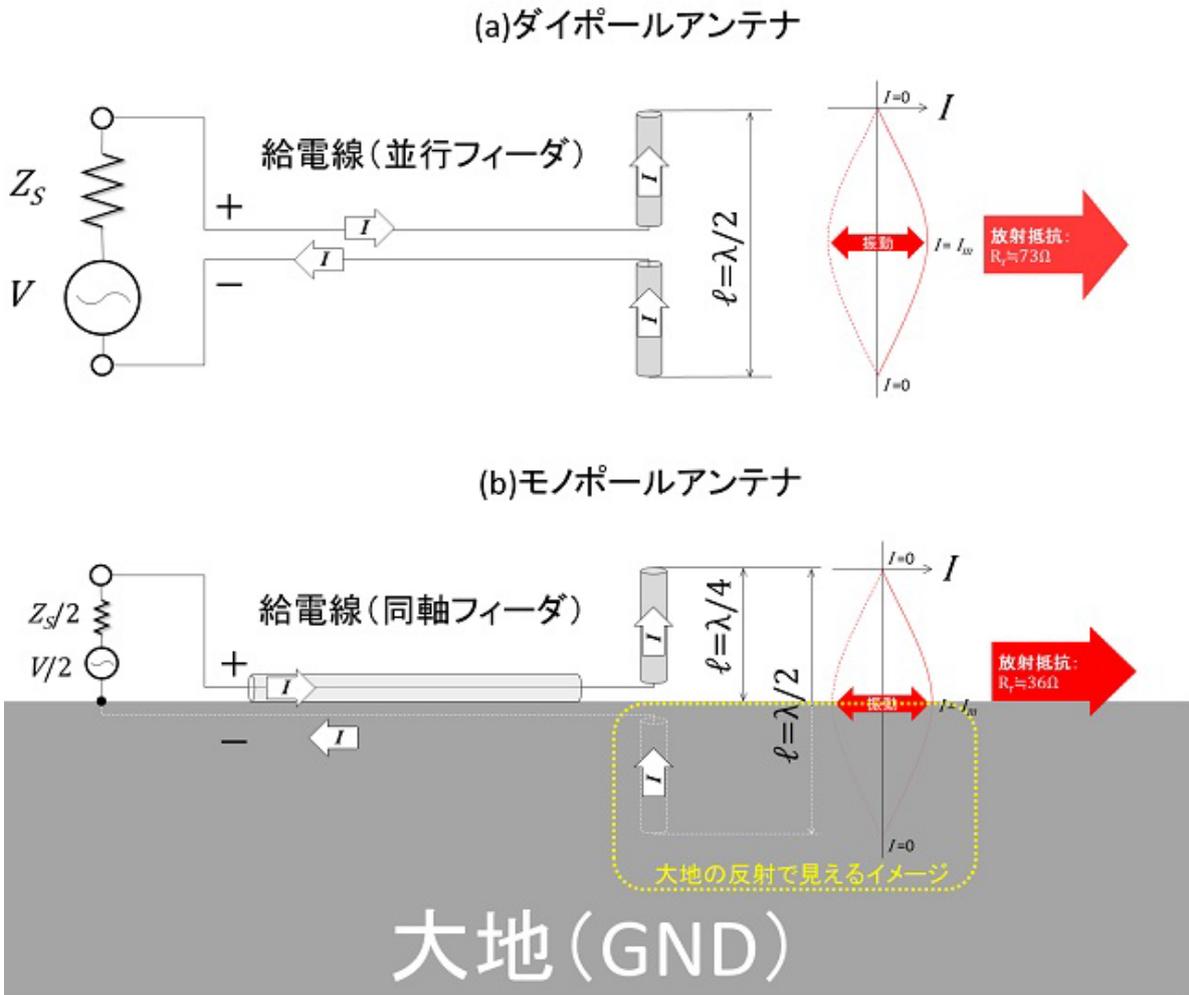


図 7 平衡型アンテナと不平衡型アンテナ

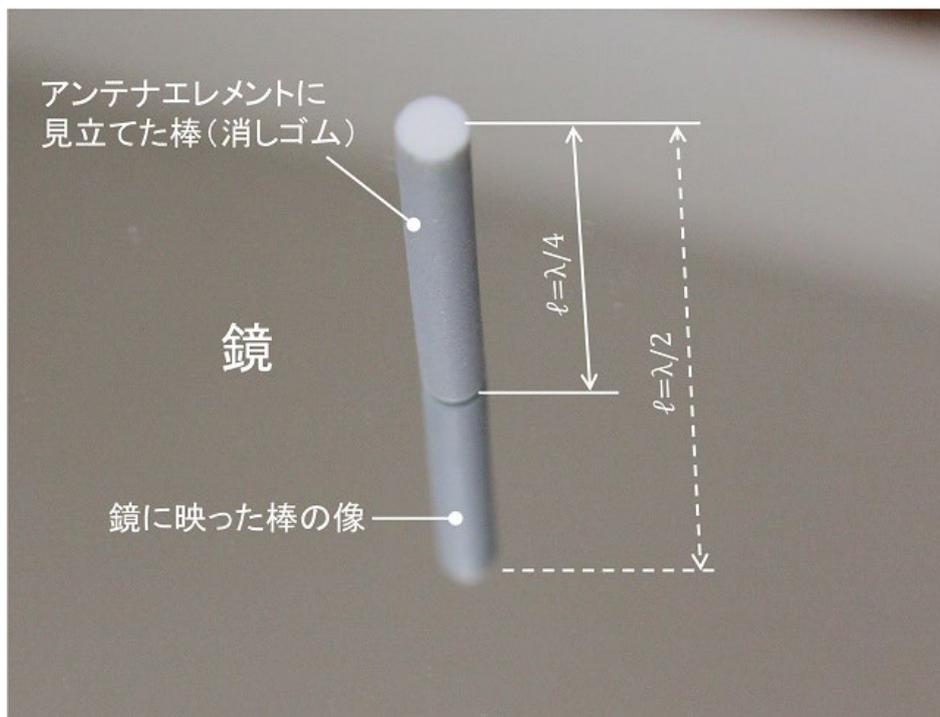


図 8 アンテナエレメントが大地に写って 2 倍の長さに見えるイメージ

陸上移動通信で多用されるホイップ型のアンテナの大半が、この $\lambda/4$ モノポールアンテナ、もしくはその変形型です。 $\lambda/4$ モノポールアンテナは水平偏波の電波を放射するには不向きですが、同軸ケーブルで直接給電することができるので、もっぱら垂直偏波が使用される陸上移動通信機器を中心に多用されています。しかし、一定の広さの GND が存在しないと図 8 に示したような鏡像が得られないので、特性が劣化します。このためグランドプレーンと称するエレメントを付加したりして鏡像を得る工夫がなされたり、ハンドヘルドタイプの無線機(ハンディ機) などでは人体を GND に見立てて設計するというような手法が採られています。

■4. 第 38 話のまとめ

回路・伝送線路、アンテナの 3 つに分けて平衡／不平衡の違いを解説しました。改めて整理すると以下のようになり、通常は①と③、または②と④の組み合わせで使用されます。

①平衡線路(配線)

信号配線とリターン配線が対称構造になっていて GND と絶縁されている配線

②不平衡線路(配線)

リターン配線を全て GND で処理する配線

③差動回路(ディファレンシャル)

+/- の 2 つの入力端子を持ち、両者の電位差に従って動作する回路

④片線接地回路(シングルエンド)

GND 基準の端子電圧に従って動作する回路

これらの代表例を表 5-1 に、メリット／デメリットを表 5-2 に示します。

表 5-1 平衡・不平衡の代表事例

適用箇所	平衡配線 / 差動回路	不平衡配線 / 片線接地回路
回路・ 回路基板	<ul style="list-style-type: none"> ● オペアンプの入力回路 ● オーディオアンプの BTL 出力回路 ● マイクロ波 IC の入出力回路※ 	<ul style="list-style-type: none"> ● 一般的な IC の入出力回路 ● 一般的な配線全般
伝送線路	<ul style="list-style-type: none"> ● RS485 通信線、USB、LAN ケーブル等 (ツイストペア線) ● LVDS 接続ケーブル ● TV 受信用フィーダー線 ● 高圧送電線 	<ul style="list-style-type: none"> ● RS232C 通信線 ● 同軸ケーブル ● マイクロストリップ線路
アンテナ	<ul style="list-style-type: none"> ● ダイポールアンテナ ● ループアンテナ 	<ul style="list-style-type: none"> ● モノポールアンテナ

※全てが平衡線路というわけではありません

表 5-2 平衡・不平衡のメリット／デメリット

適用箇所	メリット(上段)／デメリット(下段)	
	平衡配線	不平衡配線
回路・回路基板	<ul style="list-style-type: none"> ● 回路を差動化することで耐雑音性能が良い ● 平面構造で実現できるので IC チップ上で実現しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ● リターンを共通化する事で複雑な回路を高密度に実装する事が可能
伝送線路	<ul style="list-style-type: none"> ● 伝送途中で干渉する雑音はコモンモード雑音(+/-同電位の雑音)となるので、分離・除去しやすい。 ● ダイポールアンテナに直接給電可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 同軸構造にすることで高周波においても外部影響を遮断し特性インピーダンスを維持できる。
アンテナ	<ul style="list-style-type: none"> ● GND の位置と関係なく偏波面を決めることが可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 同軸ケーブルで直接給電可能 ● エレメントサイズを半分にできる
	<ul style="list-style-type: none"> ● 常に 2 本の配線を併走させる必要があるので高密度配線に不向き 	<ul style="list-style-type: none"> ● GND 電位の変動がそのまま回路雑音になる
	<ul style="list-style-type: none"> ● 高周波においては、シールド構造が採りにくく、周囲環境の影響で特性インピーダンスの管理が難しい 	<ul style="list-style-type: none"> ● 電位差のある複数の GND と外導体を接続した場合、外導体に電流が流れて雑音になる。
	<ul style="list-style-type: none"> ● 同軸ケーブルで直接給電できない 	<ul style="list-style-type: none"> ● GND 面に対して電界が垂直になる方向(垂直偏波)にしか配置できない(偏波の方向が GND 基準で固定される)

一般的な傾向としてオーディオ回路や制御系機器の機器間インタフェースは、雑音排除性能や絶縁設計との親和性の観点で平衡回路、平衡線路を採用することが多く、回路の GND も筐体とは直接接続しない設計が多いのに対し、高周波回路、特に無線通信機については、伝送線路に、その作りやすさから同軸線路が多用される事や、放熱のしやすさの関係で、ほぼ全て筐体を回路の GND とする不平衡回路、不平衡線路が採用されています。

第 38 話では平衡／不平衡の概念と balan についてご説明しようと考えていましたが、平衡／不平衡のお話で力尽きてしまいました。平衡線路／不平衡線路の考え方はそれほど難しいものではありませんが、最大の問題は平衡型のインタフェースを持つ機器と不平衡型のインタフェースを持つ機器を接続せねばならなくなった場合です。これについては次号にて解説することにします。