

# 非線形回路の動作

## 線形素子と非線形素子

回路解析においてよく線形、非線形という言葉がでできます。これはいったい何の事でしょうか。これらは素子の特性を表しています。線形素子とは、その名の通り、入力に対して出力が線の形、つまり直線で変化するものです。例えば、抵抗について考えれば、抵抗に流れる電流は、 $I_r = V_r / R = G \cdot V_r$  になり、抵抗の両端の電圧に比例した1次関数になっています。このような入出力関係を持つ素子を線形素子と言います。キャパシタについても同様で、 $I_c = j\omega C V_c$  になり、やはり  $V_c$  の1次関数です。これに対し、非線形素子とは、出力特性が入力の1次関数でないものを言います。例えば、ダイオードは、端子電圧をリニアに変えても、電流は電圧の指数関数で変化し、比例して変化はしません。このような素子を非線形素子と言います。半導体が一般的にこれに相当します。図1にそれらの例を示します。(a)は抵抗のみの回路で、回路電流は電圧の変化に比例して増加しています。このような回路を線形回路と言います。(b)はダイオードが直列に入った回路で、回路電流は印加電圧が0.7Vに達するまではほとんど0Aで、その後は急激に増加している様子が覗えます。このように印加電圧に対して比例的に動作しないものを非線形回路と言います。

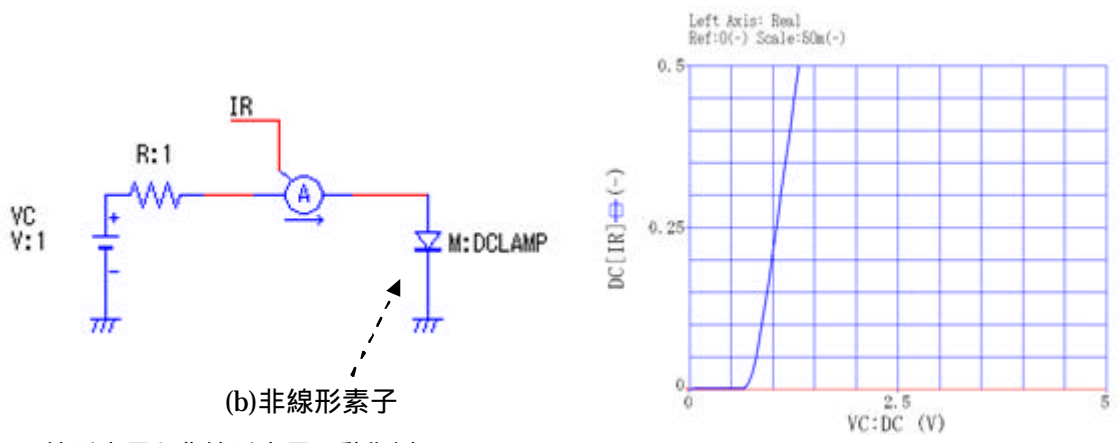
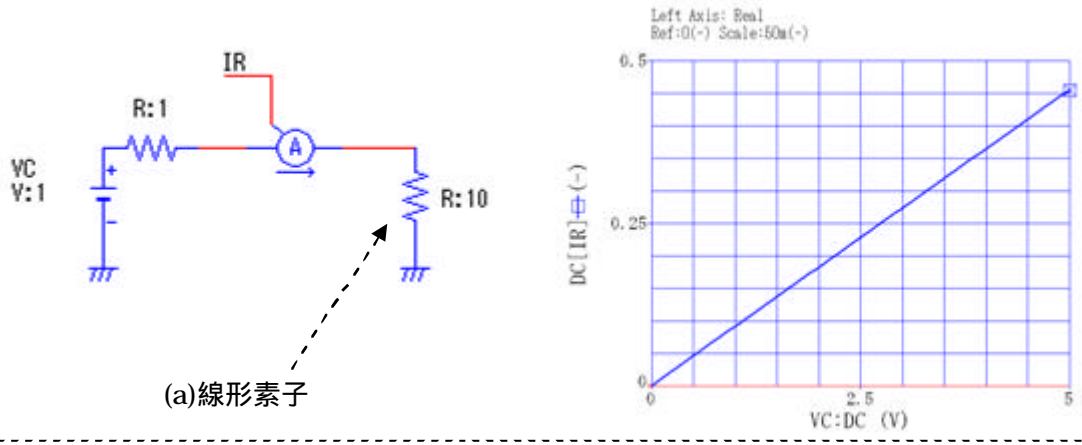


図1 線形素子と非線形素子の動作例

## 非線形回路の特徴

非線形回路にはどのような動作の特徴があるのでしょうか。簡単に言うと、波形歪みが発生します。しかも入力には存在しなかった周波数成分が出現し、それらの波の合成として歪波が生まれます。この様子を図2の回路を用いて確認してみます。入力信号には1KHz、DCオフセット1Vの正弦波を入力しています。ダイオードに流れる電流波形は、図のように電圧が0.7Vを切ったあたりで0Aになっており、正弦波は脈流に変わっています。スペクトルを観察してみると、入力信号の成分は、DCと1KHzにしかないにもかかわらず、電流のスペクトルは高次にわたって発生していることがわかります。

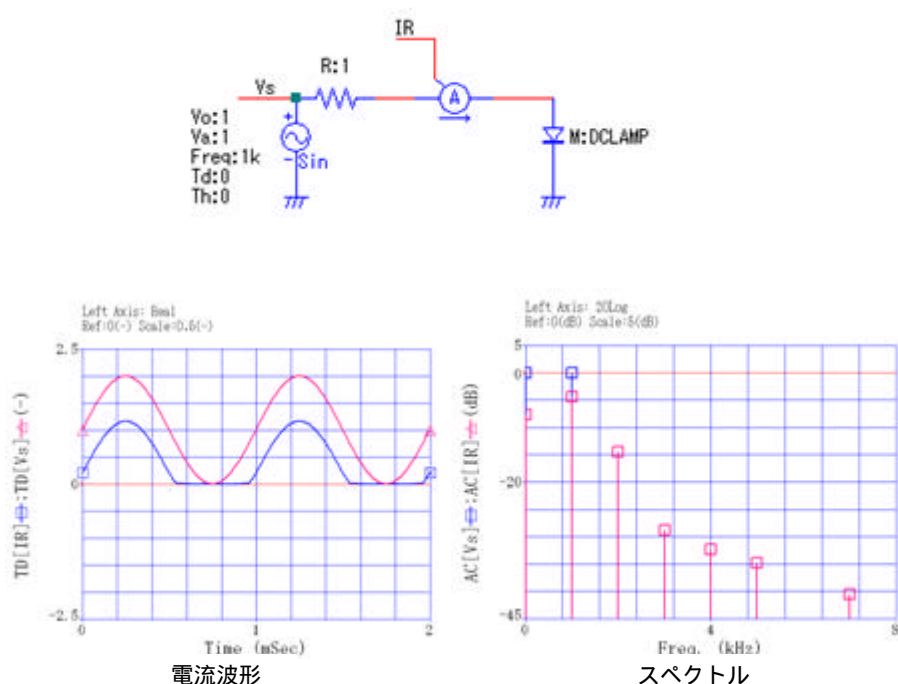


図 2

### < ちょっと一言 >

歪むといえば、デジタル回路でクロック波形が歪む、なまるなどと言いますが、この歪みは非線形による歪とはちょっと違います。デジタル波形は多くの高調波成分を含んでおり、これらの波の合成の上に成り立っています。おのおのの周波数成分の波が適切な振幅と位相で重なり合っはじめてきれいなデジタル波形が現れるわけです。デジタル信号を、LCを含む回路や長い配線長を含むパターンなどに入力した場合、回路の周波数特性によりおのおの高調波での振幅、位相の伝送量が異なってしまう、出力端での成分の割合が変わってしまいます。このため合成した波形はもとのデジタル波形とはならず、波形が歪んだようにみえます。したがって、デジタル波形の歪みは非線形要素の影響ばかりではなく、むしろ回路の周波数特性による影響が大きいと言えます。非線形要素が関与しない信号の歪は、周波数成分に着目すると、どのように歪んだ波形でもその成分は変わらず同じです。非線形要素が関与したばあいの波形歪は、周波数成分が変わって歪んでいるのです。この点が大きな違いと言えます。

## 数学的な理解（１）

図 3 の回路を用いて、解析的に回路を考えてみます。下の図の枠付きの抵抗はマクロで作成した非線形抵抗で、電流特性が端子電圧の 2 乗に比例する、つまり、 $I_r = V_r^2 / R$  になるように設定したものです。グラフは、直流解析で  $V_c$  を 0 から 10V まで可変したときの電流を表しています。 $Y=X^2$  のグラフになっていることがわかります

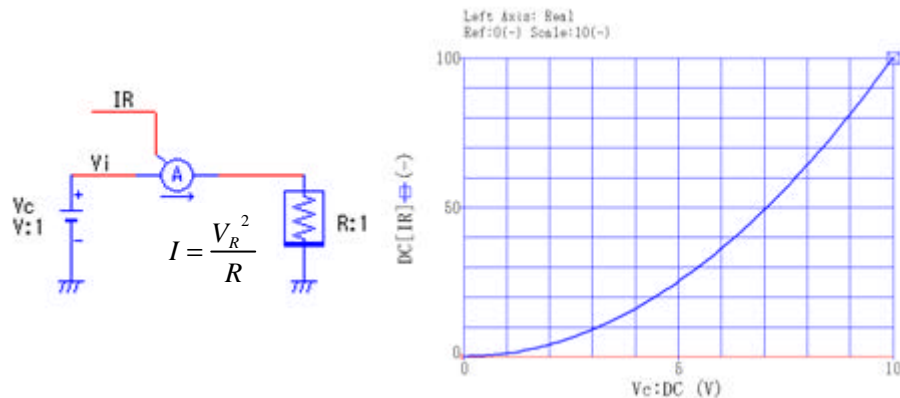


図 3 非線形抵抗回路の直流特性

次に DC 電源の代わりに交流電源を接続し、図 4 のようにハーモニック・バランス法で解析してみます。グラフは波形とスペクトルを表しています。電流のスペクトルから、直流成分が 0.5A、そして 2KHz の周波数成分、いわゆる 2 倍の高調波が 0.5A 表れているのが確認できます。電流波形は 0.5A のオフセットで、入力電圧の 2 倍の周波数であり、位相が  $\pi/2$  送れていることがわかります。

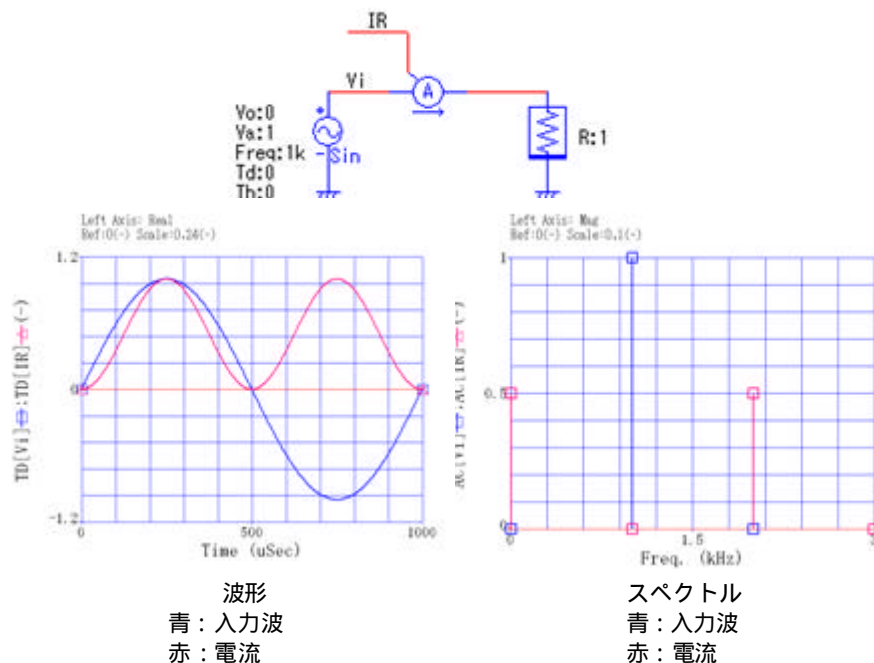


図 4 非線形回路のハーモニック・バランス解析

この非線形抵抗回路の特性は単純ですので、解析的にも簡単に電流が計算できます。この回路の電流は、

$$I = Vr^2 / R = \text{Sin}^2(\omega t) / 1 = 0.5\{1 - \text{Cos}(2\omega t)\} = 0.5 + 0.5\text{Sin}(2\omega t - \pi / 2) \quad \text{---(1)}$$

となり、シミュレーションの結果と一致します。このような素子があれば、非線形性を利用して、2てい倍器を作れることがわかります。

## 数学的な理解 ( 2 )

今度は2つの信号源を使った例として、振幅変調器を考えてみます。振幅変調波は一般に次の式で定義されています。 を搬送波、 p を信号周波数とすると

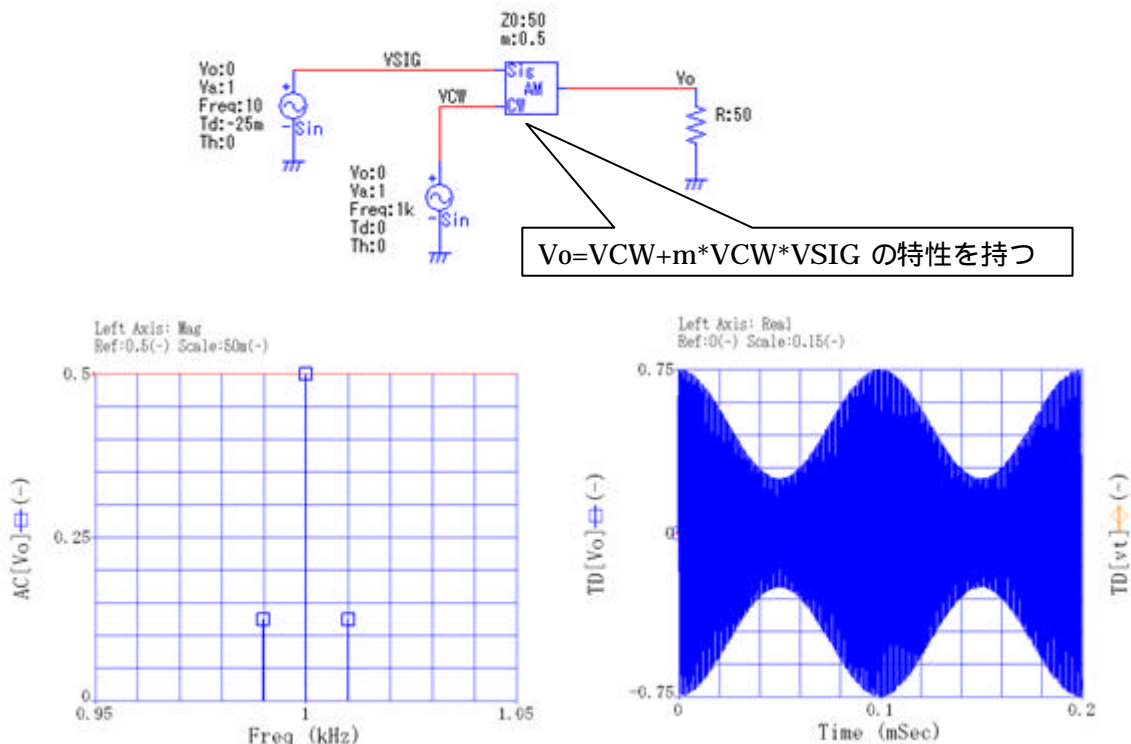
$$Vm = (1 + m\text{Cos}(pt))\text{Sin}(\omega t) \quad \text{---(2)}$$

ここで、 m : 変調指数

( 2 ) 式を和の形に変形すると、

$$Vm = \text{Sin}(\omega t) + \frac{m}{2}\{\text{Sin}(\omega + p)t + \text{Sin}(\omega - p)t\} \quad \text{---(3)}$$

となり、搬送波を中心に ± p だけ離れた位置に側波帯があることがわかります。図 5 は AM 変調器コンポーネントを用いて、1KHzの搬送波に 10Hzの信号を変調指数 0.5 で AM 変調シミュレーションを行った例です。グラフは、スペクトルと変調波形を示しています。M=0.5 ですから、側波帯のレベルはキャリアの 1/4 になっています。このことは、(3)式の第 2 項からも明らかです。



AM 変調波は、2つの信号の積により作られます。したがって、このような積の形をつくることのできる非線形素子があれば、AM 変調器を作ることができるとわかります。ちなみに、S-NAP/Pro の AM 変調器は、多項式制御電源により、理論的な  $V_o = V_1 + m * V_1 * V_2$  の関数を作成しています。