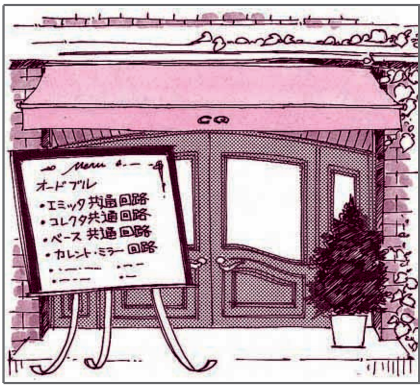
連　載



トランジスタCooking!

〈第13回〉

トランスリニア回路の応用

柴田 肇
Hajime Shibata

前回は，いくつかのベース-エミッタ接続が形成するループが必ず示す性質(トランスリニア原理)を紹介しました．この原理を利用することで，乗算，除算，多項式関数などの複雑な動作を行う回路が，数個のトランジスタを組み合わせることで実現できることを示しました．今回は，トランスリニア・ループの応用例としてベクトルの振幅を計算する回路と1：Nのカレント・ミラー回路，そして絶対値回路を紹介します．

複数のトランスリニア・ループがある場合の解析方法

● 各ループについて式を立てる

応用編の一番手として，**図13-1**の回路を解析してみましょう．トランスリニア回路を解析するためには，まず回路の中からベース-エミッタだけで構成されるトランスリニア・ループを探さなければなりません．そのようなループを**図13-1**の回路から探すと，同図に示すループ1～3が見つかります．

このように，ループが回路中にいくつもある場合は，どのように解析すればよいのでしょうか？

トランスリニア原理は，キルヒホッフの電圧則から導かれた関係則ですから，キルヒホッフの電圧則と同様に，複数のループをまたがって共有している部分があっても，個々のループに対して関係式を立てることができます．

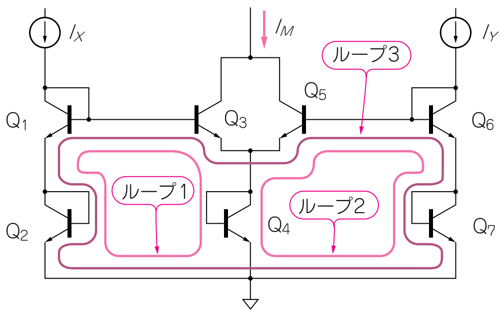


図13-1　ベクトルの大きさを計算する回路
$I_M=\sqrt{I_X{}^2+I_Y{}^2}$が成り立つ

図13-1に示すQ_1，Q_2，Q_3，Q_4からなるループ1について式を立ててみます．時計回り(CW)にベース電流が流れるトランジスタはQ_3とQ_4です．反時計回り(CCW)のトランジスタははQ_1とQ_2です．

ここで，次のトランスリニア原理，

$$\prod_{CW} I_{Ci} = \prod_{CCW} I_{Cj} \quad \cdots\cdots (13\text{-}1)$$

をループ1に対して適用します．左辺にCWのコレクタ電流を，右辺にCCWのコレクタ電流を書き入れます．

$$I_{C3}\,I_{C4} = I_{C1}\,I_{C2} \quad \cdots\cdots (13\text{-}2)$$

が得られます．同様にループ2は，

$$I_{C6}\,I_{C7} = I_{C4}\,I_{C5} \quad \cdots\cdots (13\text{-}3)$$

ループ3は，

$$I_{C3}\,I_{C6}\,I_{C7} = I_{C1}\,I_{C2}\,I_{C5} \quad \cdots\cdots (13\text{-}4)$$

となります．ループ1にもループ2にも存在するQ_4は，電流を共有しており，式が連立します．ただし，式(13-4)は式(13-2)と式(13-3)から導くことができます．

ベクトルの振幅を計算する回路

● 2次元のベクトル振幅を計算する回路

図13-1の回路がどのような回路なのかを解析してみましょう．

各トランジスタのコレクタ電流と入出力電流の関係を調べます．ベース電流を無視して考えると，

$$I_X = I_{C1} = I_{C2} \quad \cdots\cdots (13\text{-}5)$$

$$I_Y = I_{C6} = I_{C7} \quad \cdots\cdots (13\text{-}6)$$

$$I_M = I_{C3} + I_{C5} \quad \cdots\cdots (13\text{-}7)$$

が成り立ちます．まず式(13-2)，式(13-3)，式(13-5)，式(13-6)，式(13-7)を連立させて，出力電流I_Mについて変形します．すると，

$$I_M{}^2 = I_X{}^2 + I_Y{}^2 \quad \cdots\cdots (13\text{-}8)$$

が得られます．ここで，出力電流I_Mは，常に正($I_M>0$)であることを考えると，出力電流I_Mと入力電流I_X，I_Yの関係は次のようになります．

$$I_M = \sqrt{I_X{}^2+I_Y{}^2} \quad \cdots\cdots (13\text{-}9)$$

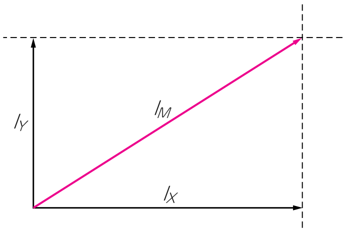


図13-2　2次元ベクトルI_X，I_Yとその合成ベクトルI_Mの関係

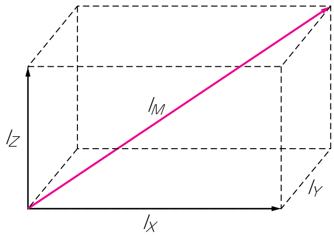


図13-3　3次元ベクトルI_X，I_Y，I_Zとその合成ベクトルI_Mの関係

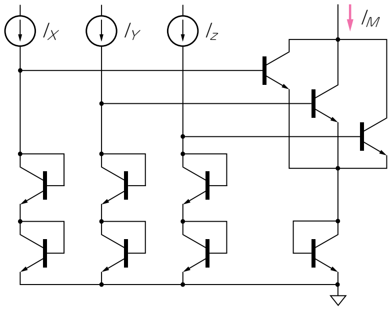


図13-4　3次元ベクトルの大きさを計算する回路
$I_M=\sqrt{I_X{}^2+I_Y{}^2+I_Z{}^2}$が成り立つ

式(13-9)は，幾何学的には**図13-2**に示すように直交するI_XとI_Yの合成ベクトルの振幅I_Mを算出する式です．したがってこの回路は，I_XとI_Yが作るベクトルの大きさI_Mを計算する回路といえます．

● 3次元のベクトル振幅を計算する回路

図13-1の2次元ベクトルの大きさを計算する回路は，簡単に多次元へ拡張できます．

図13-3のような3次元の場合には，各成分の大きさをX，Y，Zとするとそのベクトルの大きさMは，

$$M=\sqrt{X^2+Y^2+Z^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(13\text{-}10)$$

です．この式を実現する回路は，**図13-1**の回路を3入力へと拡張することによって簡単に作ることができます．**図13-4**に3次元のベクトル振幅を計算する回路を示します．

入出力の関係は，**図13-1**の回路と同様に電流で表すことができます．つまり，

$$I_M=\sqrt{I_X{}^2+I_Y{}^2+I_Z{}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(13\text{-}11)$$

となります．この関係もトランスリニア原理を適用することで，簡単に確かめられます．

1：*N*カレント・ミラー回路

● ループ内に並列接続のトランジスタがある場合の解析方法

カレント・ミラー回路は，最も基本的なトランスリニア回路ですから，トランスリニア原理を適用すれば，簡単に入出力関係を解析できます．しかし，**図13-5**のように，複数のトランジスタを並列接続して電流比を変化させているカレント・ミラー回路では，式(13-1)をそのまま適用することができません．

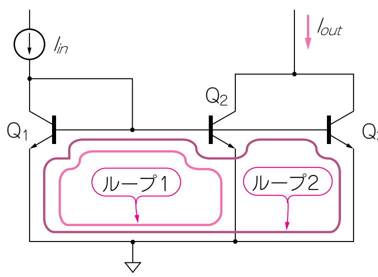


図13-5　1：2カレント・ミラー回路を例にして，トランスリニア・ループにトランジスタの並列接続が存在する場合の解析方法を考察する

電流比が1：2のカレント・ミラーを考えてみましょう．入出力関係は連載 第4回(2004年1月号)で調べたように，

$$I_{out}=2I_{in} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(13\text{-}12)$$

となります．この式は，回路内の二つのループ，つまりQ_1とQ_2からなるループ1と，Q_1とQ_3からなるループ2についてトランスリニア原理を適用することで，容易に得ることができます．しかし，並列接続されるトランジスタの数が増えたり，入力側も並列化されたりするとループを数えるときに頭が混乱します．

そこで，並列接続されたトランジスタを一つのトランジスタとして扱うことができるように，式(13-1)のトランスリニア原理を拡張します．

● トランスリニア原理をエミッタ面積比の異なるトランジスタを含むように拡張する

図13-6を例にして，エミッタ面積比の影響を考えてみます．ここでエミッタ面積比は，トランジスタの並列数だと考えてください．

カレント・ミラー回路の入力側にA_1個のトランジスタが並列接続されると，入力電流I_{in}は，個々のト

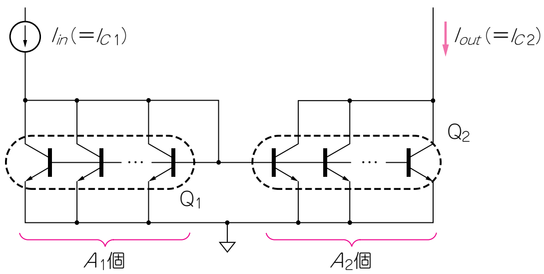


図13-6　A_1：A_2カレント・ミラー回路の解析