

熱電対 <タイプT:銅-コンスタンタン>と <タイプK:クロメル-アルメル> のmodel

電子回路システムの中で、さまざまなセンサーやアクチュエータが使われるようになって久しい。しかし、これ等の部品・装置の多くは電子回路の信号源であったり、電子回路によって駆動される装置にもかかわらず、SPICE系のシミュレーションに使えるモデルがない。アナログ回路的なシグナル・チェーンはSPICE系のシミュレータでシミュレーションできるにもかかわらず、多くの入力（センサー）や出力（アクチュエータ）などは、SPICEとのコンパチビリティがあるモデルがなかなか見つからないのが実情である。

そのような状況の中で、「熱電対」はメカニカルな部分がなく、2種の金属接合における温度に依存した起電力（ゼーベック効果）は、おおむね規格化されていると考えられる。そこで、外部から温度を電圧値として与える温度入力端子をそなえた、熱電対モデルをつくってみた。

熱電対の基本データは「理科年表2020年版」に基づいている。理科年表の注釈によれば・・・精密な測定を行うには、使用する熱電対ごとに、ITS-90に基づいた各種の温度定義定点をを使って構成する必要がある。

Type-K (SUBCKT 回路)

はじめに、熱電対の特性を表す高次多項式を「サブ・サーキット」にする部分を示す

高次係数の係数は「理科年表」2020年版(丸善)を参照しました。

プラス側の展開式は9次まで、と指数関数項がついていて、マイナス側は、10次まで・・・という級数の構成になっている。

高次の係数が、10の-23乗という小さな値だが、1000(°C)を9乗すると10の27乗なので、計算誤差として切り捨て難い。

高次多項式級数の係数は「理科年表」2020年版(丸善)を参照しました。

入力 (温度設定) ハッファ

出力のプラス・マイナスの選択と倍率設定

セルシウス温度のプラス側の級数展開

セルシウス温度のマイナス側の級数展開

係数計算の工夫

たとえば、Type-Kのプラス側の2次の電圧設定式は・・・

$$V = \text{if}(V(T) > 0, 1.8558770032e-2 * V(T) ** 2, 0)$$

のようにした。この定義には、IF文で入力の温度設定がプラスかマイナスかを判別してから、各次数の値を計算している。

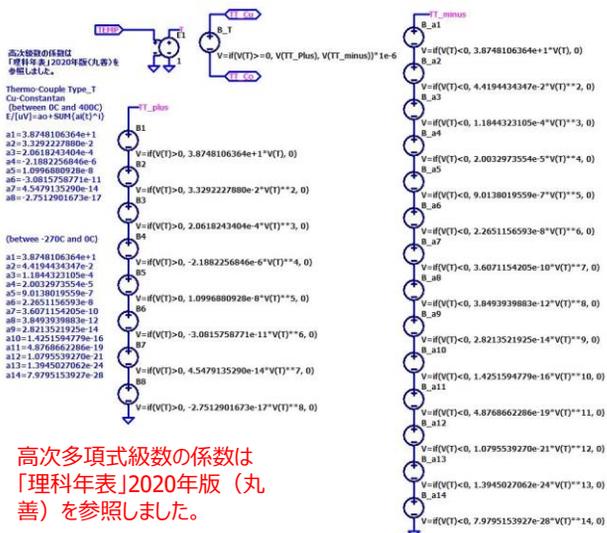
また出力部分には、プラスの高次式の総和とマイナスの高次式の総和を入力のパラス・マイナスに応じて切り換えつつ、係数を掛けている（下図）。

このように、（入出力）端子を付けることでGNDに対してフロート電極として使える。



Type-T (SUBCKT 回路)

基本的な級数展開式は、Type-Kと酷似しているが、プラス側の展開式は8次まで、マイナス側は、14次まで・・・、という部分に大きな違いがある。



熱電対・SUBCKTの使い方

添付のZIPファイルにある、ライブラリ・ファイルとシンボル・ファイル「TC_K.asc」「TC_K.asy」「TC_T.asc」「TC_T.asy」と、それらを使ったテスト用のサンプル・ファイル「TC_K_subckt-test.asc」「TC_T_subckt-test.asc」を、どこか任意のフォルダーを作って保存する。サンプル回路を確認するだけなら、この「TC_subckt-test.asc」のファイルをダブル・クリックすればシミュレーションできるはずである。

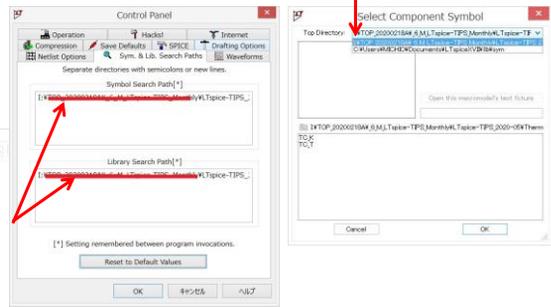
自分が作った回路の中に、新規にこの「Thermo Couple model」を組み込むには、メニューのComponent (ホット・キー : F2) から「Select Symbol」の窓を開き、上にある「Top Directory」の選択窓で、先ほど保存したフォルダーを選択する。

そのフォルダー名が表示されない時は、まずファイル・エクスプローラで、先ほど保存したフォルダーを開き、その上部のURL (パス) を表示している部分 (文字列) を全選択し、「コピー (Ctrl+C)」し…、



LTspiceのControl Panel (メニューアイコンの「ハンマー・マーク」) から、「Sym. & Lib. Search Path」を開き、上下の窓の中にそのURL (パス) をペースト (Ctrl+V) する。

これでもう一度「Select Symbol」開けば「Top Directory」の選択肢に、このPathが表示されているはずである。



SUBCKTのサンプル回路

「.meas」でグラフから読み出した値は
どちらのTypeも理科年表の早見表の値と
よく一致している

Type-Kのサンプル回路。

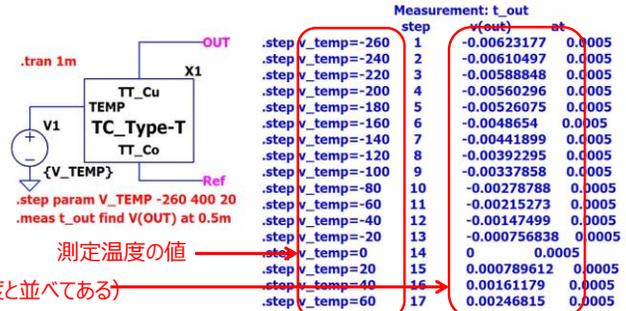
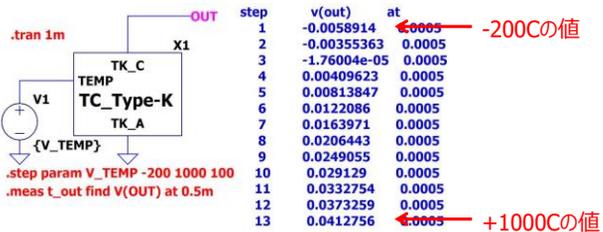
.stepで温度を変化させながら (1°刻み) シミュレーションしている (右の回路図では100K刻みになっているが、グラフにするときには滑らかに表示したいので1°刻みにした)。

同時に、.measコマンドで.tranのシミュレーション時間の中点の値をLogファイルに保存するようにし、そのLogファイルのデータからグラフをプロットしている (次ページ参照)。

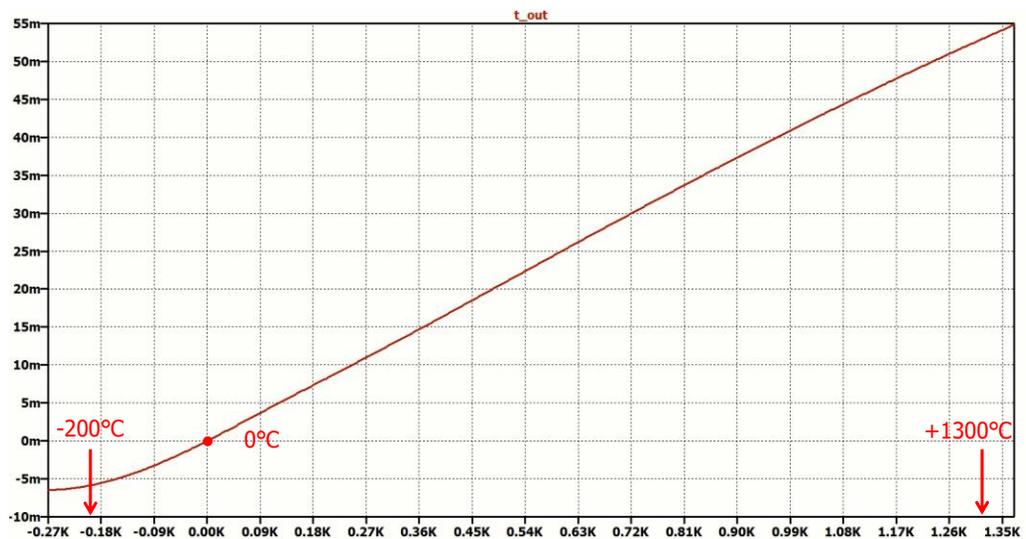
Type-Tのサンプル回路。

上の例と同様に、.stepで温度を変化させながら (20°刻み) シミュレーションしている (次々ページ参照)。

その温度の出力電圧の値
(実際のLogファイルの表示を、再編集して温度と並べてある)



Type-K (クロメル-アルメル熱電対)



Type-T (銅-コンスタンタン熱電対)

