

第5章 付録DVD-ROMの実験用回路を動かしてみよう

# LTspice & ブレッドボードでシリコン・ニューロンを作ってみる

これまでに見てきたように、複雑な非線形システムである脳神経ネットワークと「互換性」のあるSiNNを実現するためにはデバイスからアルゴリズムまでさまざまな新技術が必要です。非線形数学を活用した、**超低電力アナログ・シリコン・ニューロンの設計技術**もその中核技術の1つです。先にCMOS集積回路によるシリコン・ニューロンを紹介しましたが、紙面の都合もあり細部まで解説できませんでした。そこで、シリコン・ニューロンを実際に組み立てることで、本技術を体感していただきたいと思います。また、LTspiceでシミュレーションするためのファイル群を付録DVD-ROMに収録しています。

● 製作する回路の概要

本回路は気軽に製作、実験できるよう、個人で入手できる比較的安価なディスクリートMOSFETを用いて、トランジスタ数になるべく少なくなるよう留意して設計しました。したがって、**神経スパイクを生成する機能に絞られており、FS細胞だけ実現できます。**

FS細胞にはホジキン分類クラス1と2とがあります。クラス1だけでなく、**IF型回路で実現の難しいクラス2も実現できるよう設計されています。**

また、紹介したCMOS集積回路と同様に、電圧固定アンプによりナルクラインを描出し、パラメータ電圧の調整に使用します。MOSFETのサブスレッショルド領域を利用している点も同様です。

● 必要な機材など

ブレッドボード上で組み立てられるようTO-92パッケージの提供されているトランジスタと、DIPパッケージで入手できるOPアンプを使っています。

実験に必要な機材は、電圧計、電源装置、オシロスコープとファンクション・ジェネレータです。電源は5Vです。私はブレッドボード用USB電源SBM-007を使用しました。

オシロスコープは2チャンネル以上(最低3チャンネルあると便利です)、帯域は100 KHz以上あれば十分です。ファンクション・ジェネレータは、パルス刺激波形(時間幅500 μs程度)の生成とナルクラインの描出(周期1 Hz以下ののこぎり波が必要)で使用します。

● 回路構成

本回路の回路を図1に示します。LTspiceを用いて

いるため、トランジスタの記号が異なります。V<sub>mem</sub>、V<sub>n</sub>のラインより上(下)に配置されているトランジスタがP(N)型MOSFETです。N型MOSFETにはVN2106(マイクロチップ・テクノロジー)を、P型MOSFETには同社のVP2106を使用しました。

電圧固定アンプには、入力バイアス電流がpAオーダーのNJU7032(新日本無線)を採用しました。いずれのデバイスのSPICEモデルもメーカーのウェブ・ページよりダウンロードできます(注1)。**刺激入力用を含めてトランジスタ数は13個、パラメータ電圧は7個です。**

v-block、n-blockが、それぞれ集積回路版 [前章の図5] のvブロック、nブロックに対応します。stimulusブロックでは、刺激入力dV<sub>stim</sub>をトランジスタM<sub>13</sub>で刺激電流に変換しています。voltage clampブロックが電圧固定アンプの回路です。入力ncmodeが1のとき電圧固定アンプの出力が、-1のときV<sub>n</sub>のラインがM<sub>11</sub>のゲートに接続されます。前者が**ナルクライン・モード**、後者が**ニューロン・モード**です。実機ではトグル・スイッチを使います。ナルクライン・モードでは、入力端子V<sub>c</sub>の電圧をゆっくりスイープし、電圧固定アンプの出力V<sub>vnc</sub>とV<sub>n</sub>とを測定します。

● 理想回路モデル

本回路の理想モデルの数式は、次のとおりです。

$$C_v \frac{dv}{dt} = f_v(v) - g_v(v) + I_a - r_v(n) + I_{stim} \dots\dots (1)$$

$$C_n \frac{dn}{dt} = f_n(v) - r_n(n) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、v: 神経細胞の膜電位に相当する変数。  
n: イオン・チャネルの活動を抽象的に表現する変数で、それぞれキャパシタC<sub>v</sub>、C<sub>n</sub>の端子間電圧、つまり、回路図中のV<sub>mem</sub>、V<sub>n</sub>ラインの電位に対応。  
I<sub>a</sub>: M<sub>12</sub>のドレイン電流でパラメータ電圧端子dV<sub>a</sub>へ与える電圧で決まる。  
I<sub>stim</sub>: 刺激電流でM<sub>13</sub>のドレイン電流。  
f<sub>v</sub>(v)、f<sub>n</sub>(v): 差動対回路 [回路図のf<sub>v</sub>(v)、f<sub>n</sub>(v)の枠] の入出力特性。

(注1)  
・VN2106/VP2106のSPICEモデル(下記URLの4ページ目)  
<https://www.microchip.com/doclisting/TechDoc.aspx?type=Spice>  
・NJU7032のSPICEモデル  
<https://www.njr.co.jp/products/semicon/products/NJU7032.html>