

磁束量子回路によるスパイクニューロン回路とその応用

廣瀬 哲也[†] 浅井 哲也[†] 雨宮 好仁[†]

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科

〒 060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目

E-mail: †{hirose,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

あらまし 磁束量子 (SFQ; single flux quantum) 回路を用いたスパイクニューロンデバイスおよびそれを用いたネットワーク応用アプリケーションを提案する。提案するニューロンデバイスは、スパイクタイミング動作に基づいた積分発火型ニューロンモデル (integrate-and-fire model) を磁束量子回路により回路化したものである。入力パルスにより内部状態 (減衰積分ループ列の電流値) が増加し、その内部状態が発火しきい値を越えると SFQ パルスを出力する。遅延時間 100 ps 以下の高速動作する。また、提案するニューロンデバイスを応用したアプリケーションとして抑制性ニューラルネットワークを構築した。抑制性ニューラルネットワークモデルを構築し、コンピュータシミュレーションにより動作を確認した。

キーワード 磁束量子回路, スパイクニューロンデバイス, 積分発火型ニューロンモデル, 抑制性ニューラルネットワーク

Spiking Neuron Devices consisting with Single-Flux-Quantum Circuits and its Applications

Tetsuya HIROSE[†], Tetsuya ASAI[†], and Yoshihito AMEMIYA[†]

[†] Dept. of Electrical Engineering, Hokkaido University

Kita 14, Nishi 9, Sapporo 060-0814

E-mail: †{hirose,asai,amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract Single flux quantum (SFQ) circuits can be used for making spiking neuron devices, which are useful elements for constructing intelligent, brain-like computers. The device we propose is based on the leaky integrate-and-fire neuron (IFN) model and uses a SFQ pulse as an action signal or a spike of neurons. The operation of the neuron device is confirmed by computer simulation. It can operate with a short delay of 100 ps or less and is the highest-speed neuron device ever reported. An inhibitory pulsed neural network was developed for brain-like information processing, by using SFQ spiking neuron devices. It consists of spiking neuron devices that are coupled to each other through all-to-all inhibitory connections. The network selects neural activity. The operation of the neural network was confirmed by computer simulation. SFQ neuron devices can imitate the operation of the inhibition phenomenon of neural networks.

Key words Single-flux-quantum, Spiking neuron device, Integrate-and-fire neuron model, Inhibitory neural network

1. はじめに

近年、脳型コンピュータを実現するための研究が盛んに行なわれている [1], [2]。このような脳型計算処理システムを実現するためには、まず最初に生体ニューロンと相似な機能を実現する電子ニューロンデバイスを構築する必要がある。そしてニューロンからなる大規模ニューラルネットワークを集積回路チップ

上に構築することで脳型コンピュータを実現し、その工学的な応用を目指す。既知の、または将来明らかになる機能的ニューラルネットワークを工学的に応用するためには、ニューロンの特性を模する電子回路の開拓・蓄積が重要である。

これまで、ニューロンについては完全な動特性を説明するまでに至ってないにも関わらず、ニューロンの動作特性を説明する様々なモデルが提案されている [2]。これらのモデルの中で、積

分発火型ニューロンモデル (integrate-and-fire neuron model) はニューロンの動作特性を解析しやすく、電子回路で模擬するのが容易である。このため、このモデルを用いてニューロンの特性を模擬する試み、さらにはそれらを応用したニューラルネットワークシステムの構築が行われてきた。

これに対して、磁束量子 (SFQ; Single flux quantum) 回路は他の電子デバイスとは異なり、情報担体として磁束量子、またその SFQ パルスを用いて信号処理されるため [3], より正確にニューロンの動特性を模擬することが可能である。本稿では、磁束量子回路をアナログ的に扱うことにより大規模集積可能なダイナミックスパイクニューロン回路を提案する。提案するスパイクニューロンデバイスでは、SFQ パルスを信号として利用する。磁束量子回路によりニューラルネットワークを構築することで、システムサイズに関わらずその動特性を理解することが容易となる。また、このダイナミックスパイクニューロンデバイスを用いた機能的ネットワーク応用の一例として、提案回路を使ったニューロンの活動選択を行なう抑制性ニューラルネットワーク [4] を構成する。ネットワークのシミュレーションにより、提案回路を用いることでネットワークがニューロンの活動選択を行なうことを示す。

2. 積分発火型ニューロンモデル

図 1 に生体ニューロンの模式図を示す [2]。ニューロンは樹状突起 (dendrite)、細胞体 (soma)、そして軸索 (axon) の 3 つの領域から構成される。樹状突起は他のニューロンからの信号パルスを受け取る役割を果たし、細胞体はその入力を受けとって内部信号処理を行なう。これにより、内部状態を変化させてしきい判定処理を行なう。この内部状態が、あるしきい値を越えるとニューロンは発火パルスを出力して内部状態をリセットする。発火パルスは軸索を通して他のニューロンへと伝達される。この発火パルスは活動電位と呼ばれ、細胞体の膜電位の短いパルス電位である。このようなスパイクニューロンのダイナミクスは Hodgkin-Huxley の式に代表されるような微分方程式で記述できることが分かっている。しかし、Hodgkin-Huxley の式は複雑でニューラルネットワークシステムをハードウェアとして実現するには適していない。このため、簡略化したモデルである積分発火型ニューロンモデルが良く用いられる。

ニューロンの内部状態を $u(t)$ とすると、積分発火型ニューロンモデルは次式で表せる。

$$\frac{du(t)}{dt} = I(t) - \frac{u(t)}{\tau}, \quad (1)$$

ここで、 $I(t)$ はニューロンの入力、 τ は減衰時定数、そして t は時間である。ニューロンは他のニューロンから入力を受け取ると内部状態を増大させ、時定数 τ で表される減衰時定数で減衰する。頻繁に入力を受け取るとニューロンの内部状態は増大し、しきい値を越えるとパルスを出力し、そして内部状態 $u(t)$ をゼロにリセットする。ニューロンは、以上の動作を繰り返して上式に従う信号処理を行なう。

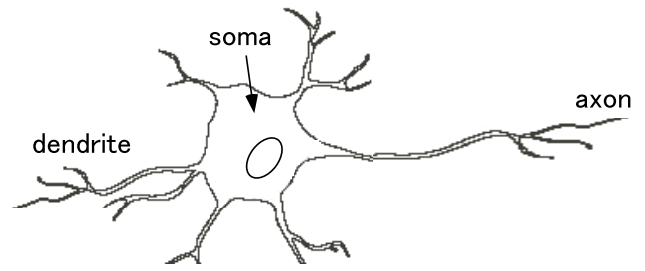


図 1 生体ニューロンの模式図。樹状突起 (dendrite)、細胞体 (soma)、軸索 (axon) の 3 つの領域から構成される。

3. 磁束量子回路によるスパイクニューロン

3.1 スパイクニューロンデバイスの構築

先に説明した積分発火型ニューロンモデルに基づいた磁束量子回路によるニューロンデバイスを提案する。この SFQ ニューロンデバイスは、入力サブサーキット、減衰積分サブサーキット、そして出力サブサーキットの 3 つのサブサーキットから構成される。これらはそれぞれニューロンの樹状突起、細胞体、そして軸索に対応する。入力サブサーキットは、簡単なジョセフソン伝送線路 (Josephson Transmission Line; JTL) [3] から構成されており、他のニューロンからの入力 SFQ パルスを受け、減衰積分サブサーキットへ入力 SFQ パルスを伝達する。減衰積分サブサーキットは、入力された SFQ パルスをメモリーループ中に累積・蓄積し、ある一定値以上となると SFQ パルスを出力する。出力サブサーキットは SFQ パルスを他のニューロンデバイスへ伝達するとともに、積分サブサーキットの内部状態をリセットするパルス群を生成し、減衰積分サブサーキットへ入力する。

以下では、提案するニューロンデバイスの主要な構成要素である減衰積分サブサーキット、および出力サブサーキットについて詳細に説明する。

3.1.1 減衰積分サブサーキット

図 2 に減衰積分サブサーキットを示す。減衰積分サブサーキットは複数のジョセフソンメモリーループ (LA_1-LA_N) から構成されており、終端に減衰抵抗 R_1 が接続された構成である。ジョセフソン接合 J_0 を除く各接合は DC バイアス電流 idc でバイアスする。ジョセフソン接合 J_0 は他の接合よりも大きな臨界電流値となるように設計し、DC バイアス電流は印加していない。

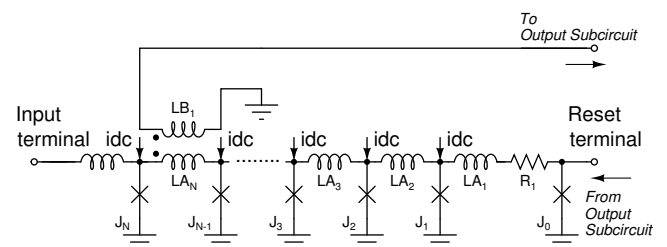


図 2 減衰積分サブサーキット。

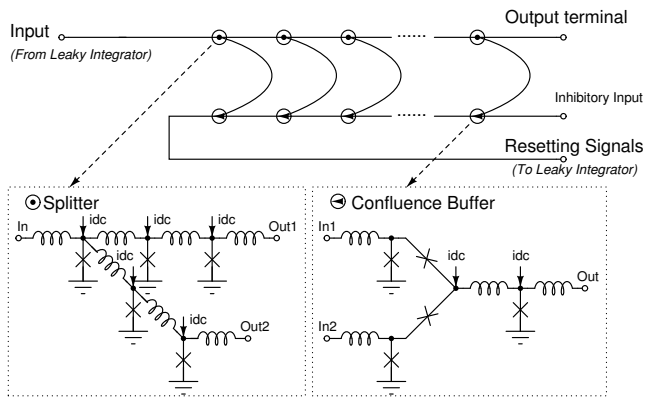


図 3 出力サブサーキット.

これにより、減衰積分サブサーキットは入力された磁束量子を順次メモリーループ中に保持することが可能となり、積分動作を実現できる。減衰抵抗 R_1 により、右端のループ (J_1 - LA_1 - R_1 - J_0) 中の磁束量子は一定の時定数で減衰する。ここで、メモリーループ中の全電流、すなわちインダクタ LA_1 - LA_N を流れる電流の総和をニューロンの内部状態として定義する。したがって、ループ中の磁束量子の数が発火のためのしきい値に対応する。多くの入力 SFQ パルスが短時間に入力された場合には保持された磁束量子の数が発火しきい値に到達し、カップリングインダクタ LB_1 を通じて発火パルスを出力する。一方、疎らな入力 SFQ パルスの場合には、減衰抵抗 R_1 による減衰時定数でパルスは消滅していき、内部状態は減少する。

3.1.2 出力サブサーキット

図 3 に出力サブサーキットを示す。SFQ パルスを複製するパルスプリッタ、SFQ パルスを合流（マージ）させるコンフルエンスバッファを用いた JTL から構成される。ここでプリッタとコンフルエンスバッファをメモリーループ数と同一に設定する。出力サブサーキットは減衰積分サブサーキットからのパルスを出力端子から出力すると同時に減衰積分サブサーキットをリセットするパルス群を生成する。このリセットパルス群を図 2 に示すリセット端子を通して減衰積分サブサーキットに入力する。これにより、リセットパルスがジョセフソン接合 J_0 へと到達すると、ジョセフソン接合の臨界電流値以上の電流が流れることになり、接合は超伝導状態から常伝導状態へと遷移し磁束量子は消滅する。メモリーループ数と同数のリセットパルス群を生成することで、積分メモリーループ中に保持されたすべての磁束量子を打ち消すことができ、ニューロンの急峻なリセット動作を実現する。

3.1.3 回路構成と動作シミュレーション

図 4 に提案する SFQ ニューロンデバイスを示す。磁束量子メモリーループ数 N を 5 に設定している。入力サブサーキットは自身以外のニューロンからの SFQ パルスを受け取り、減衰積分サブサーキットへ SFQ パルスを伝達する。減衰積分サブサーキットは内部しきい値判定処理を行ない、発火しきい値を越えた場合には出力サブサーキットを通して SFQ パルスを出力する。また同時に、出力サブサーキットはリセットパルス群を生成し、減衰積分サブサーキットを初期状態へとリセットする。

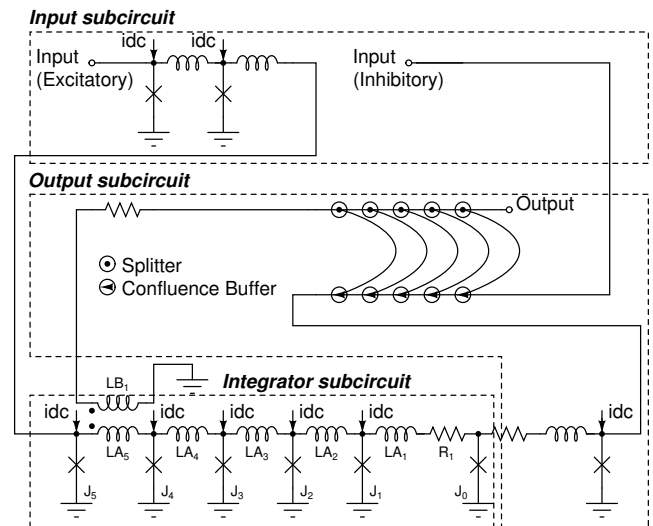


図 4 磁束量子回路によるニューロンデバイス。ジョセフソンメモリーループ数を 5 に設定している。

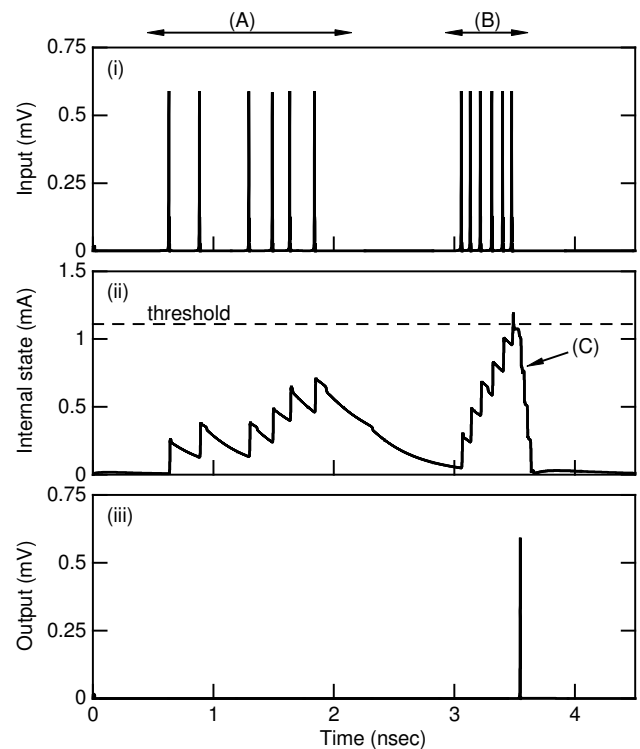


図 5 SFQ ニューロンデバイスの動作シミュレーション。上から (i) 入力 SFQ パルス波形、(ii) 内部状態、そして (iii) 出力 SFQ パルス波形。

SFQ ニューロンデバイスの回路動作をコンピュータシミュレーションにより確認した。回路パラメータは $N=5$, $LA_N=8$ pH ($N=1-5$), $LB_1=8$ pH, $idc=0.1$ mA, $R_1=30$ m Ω , そして LA_5 と LB_1 の相互インダクタンスは 0.7 とした。ジョセフソン接合は、並列抵抗 4 Ω , 並列キャパシタンス 0.1 pF に設定した。ジョセフソン接合の臨界電流値は、積分動作を行なう接合 J_0 については 0.3 mA とし、他の接合はすべて 0.13 mA とした。

図5にSFQニューロンデバイスのコンピュータシミュレーション結果を示す。上から(i)入力SFQパルス波形、(ii)内部状態、そして(iii)出力SFQパルス波形である。入力SFQパルスおよび出力SFQパルス波形は、入力端子および出力端子におけるノード電圧を表しており、内部状態はメモリーループ中の電流の総和を表している。図5-(A)の領域で示す疎な入力SFQパルス群に対しては、入力に対応して内部状態は上昇するが、減衰抵抗により内部状態は大きく減少する。このため、発火しきい値に到達することができず、発火SFQパルスを出力することができない。また入力SFQパルスがなくなると内部状態は減衰抵抗 R_1 の影響で次第に減少することがわかる。一方、図5-(B)の領域で示す密な入力SFQパルス群に対しては、内部状態は入力にしたがって上昇し、発火しきい値に到達する。SFQニューロンデバイスの内部状態は発火しきい値を越え、発火パルスを出力する。同時にメモリーループ中のSFQパルスをリセットし、ニューロンデバイスは初期状態へと移行する(図5-(C)の領域)。

以上のシミュレーションにより、磁束量子回路を用いた積分発火型スパイクニューロンデバイスがニューロンデバイスとして利用でき、その有用性を確認した。

これまでの議論では、入力パルスはすべて興奮性入力のみを想定してきた。しかし、実際のニューロンでは抑制性の入力も存在する。この抑制性の入力を模擬するために、出力サブサーキットの抑制性入力端子を用いることで対応することができる。この端子からSFQパルスを入力することで積分ループ中の磁束量子を打ち消すことが可能となるため、ニューロンの抑制性入力を実現できる。

4. ニューラルネットワークへの応用

これまで、スパイクニューロンによるニューラルネットワークが生む様々な機能的な性質が研究されている[4]-[6]。これらの生体ニューラルネットワークにおいて、ニューロンは発火パルス群を利用してお互いに信号処理を行なっている。情報信号は時系列のパルス列にコード化され、このパルス列のタイミングに基づいて信号情報処理を行う。これらのコードはニューロンおよびニューラルネットワークによって処理され、ネットワークは生き生きとした時間的な特性-同期、ノイズ耐性、活動選択性-を示すことが明らかになっている。

本節では、発火パルスタイミングに基づいたニューロンの活動選択特性[4]を示すニューラルネットワークを、提案SFQニューロンデバイスを用いて構築する。これにより提案磁束量子ニューロンデバイスの有用性を示す。

4.1 抑制性ニューラルネットワーク

スパイクタイミングに基づくニューラルコードによって、ニューロンの活動選択が行なわれる。このようなニューラルネットワークの活動選択性は発火スパイクタイミングに依存する[4]。図6に活動選択特性を示す抑制性ニューラルネットワークを示す。このネットワークは、複数のスパイクニューロン群とグローバルインヒビタから構成される。すべてのニューロンの出力はまとめられ、お互いに等しい結合強度ですべてのニュー

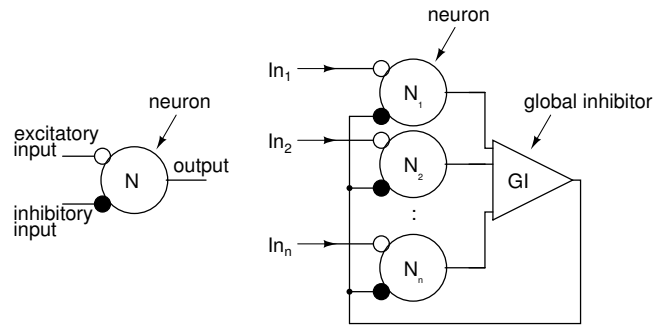


図6 抑制性ニューラルネットワークの構成。左にニューロンの模式図を、右にニューラルネットワークの構成を示す。

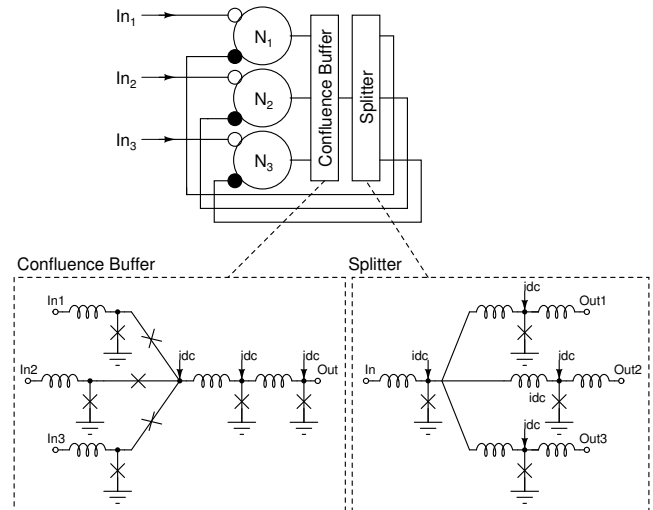


図7 磁束量子回路による抑制性ニューラルネットワークの構築。

ロンと抑制結合している。

入力パルスを頻繁に受け取るニューロンは、それによって発火パルスを頻繁に出力する。この発火パルスはグローバルインヒビタを通してすべてのニューロンに伝えられ、そしてそれぞれのニューロンの内部状態を抑制する。したがって、疎な入力パルスを受け取るニューロン、つまり発火活動が少ないニューロンはその内部状態を上昇させることができず、不活性となる。したがって、ニューロンの活動選択性を実現する。

4.2 磁束量子回路によるネットワークの構築

磁束量子ニューロンデバイスを用いて抑制性ニューラルネットワークの構築を行なった。使用したニューロンデバイスは、前節と同様の回路パラメータを使用した。全体のネットワーク構成を図7に示す。ここではニューロンの数を3に設定している。グローバルインヒビタは、3入力のコンフルエンスバッファと3出力のスプリッタから構成されている。それぞれのニューロンデバイスは入力SFQパルスを受け取り、そして発火SFQパルスを出力する。グローバルインヒビタはニューロンの発火SFQパルスを受け、すべてのニューロンの抑制性入力端子にSFQパルスを印加する。

4.3 シミュレーション結果

図8にニューロン N_1 と N_2 の動作特性のコンピュータシミュレーション結果を示す。上から(i)入力パルス、(ii)内部状態、

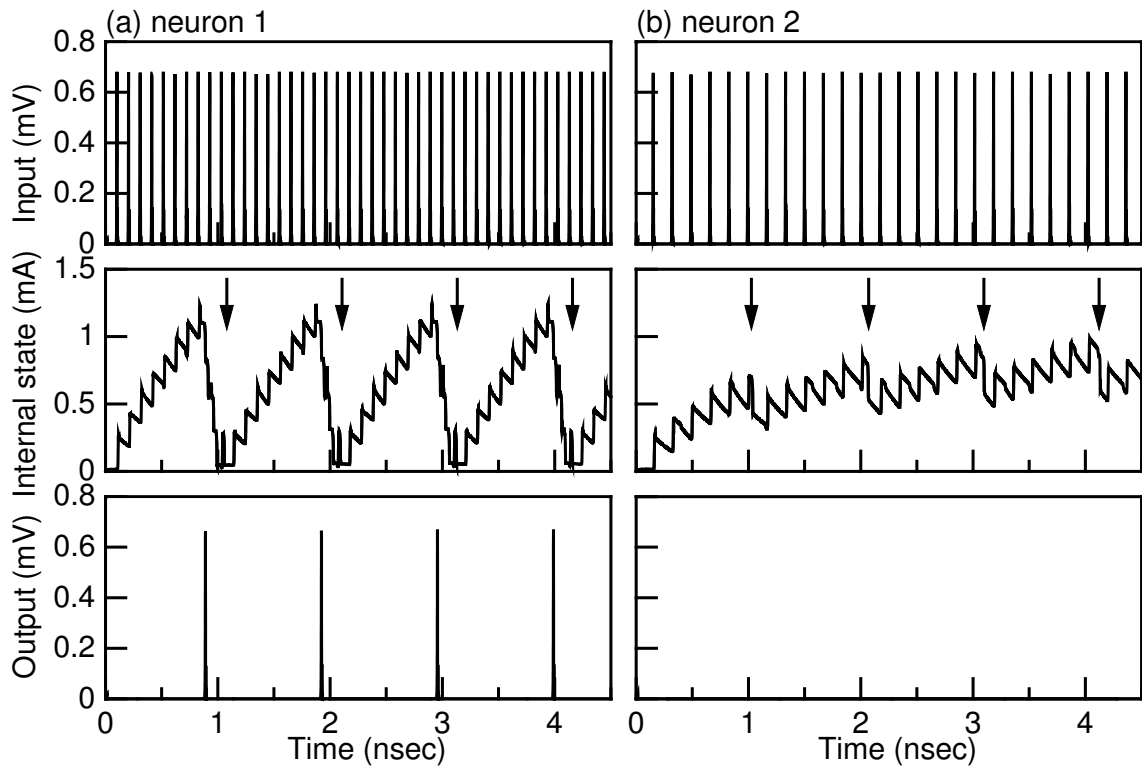


図 8 抑制性ニューラルネットワークの動作シミュレーション. 上から (i) 入力 SFQ パルス波形, (ii) 内部状態, そして (iii) 出力 SFQ パルス波形.

(iii) 出力パルスを表している. 頻繁に入力パルスを受け取るニューロン N_1 は活発なままであり, 一方疎らな入力パルスを受け取るニューロンは非活性となることがわかる. これは, 頻繁に入力パルスを受け取るニューロンの発火パルスが生成されてパルスがグローバルインヒビタを通して抑制結合端子に入力されることで内部状態が抑制され, 発火しきい値に到達することができないためである. この状態を図 8 中の矢印で示している. したがって, 疎らな入力を受け取るニューロンは発火することができず, 非活性となる.

提案 SFQ ニューロンデバイスを用いることでニューラルネットワークが示すネットワーク特性を実現できることがわかる.

5. ま と め

磁束量子回路を用いたスパイクニューロンデバイスの構築を行なった. 提案デバイスは, 積分発火型ニューロンモデルに基づいたものであり, 入力サブサーキット, 減衰積分サブサーキット, そして出力サブサーキットの 3 つのサブサーキットから構成される. コンピュータシミュレーションにより, SFQ ニューロンデバイスの動作を確認した. さらに, 提案したニューロンデバイスを用いた抑制性ニューラルネットワークを構成し, ニューロンの活動選択を実現するネットワークを構築可能であることを示した.

文 献

- [1] Wolfgang Maass, Christopher M. Bishop, "Pulsed Neural Networks", MIT Press., Cambridge, 2001.
- [2] Wulfram Gerstner, Werner Kistler, "Spiking Neuron Models", Cambridge University Press., 2005.

- [3] Theodore Van Duzer, Charles W. Turner, "Principles of Superconductive Devices and Circuits -second.ed.-", Prentice-Hall PTR., New Jersey, 1999.
- [4] T. Fukai, "Competition in the temporal domain among neural activities phase-locked to subthreshold oscillations", Biol. Cybern. 75, p.453, 1996.
- [5] P. Fries, P.R. Roelfsema, A.K. Engle, P. Konig, W. Singer, "Synchronization of oscillatory responses in visual cortex correlates with perception in interocular rivalry", Proc. Natl. Acad. Sci. USA 94, p.12699, 1997.
- [6] T. Fukai, S. Kanemura, "Noise-tolerant stimulus discrimination by synchronization with depressing synapses", Biol. Cybern. 85, p.107, 2001.