

■ 添付資料

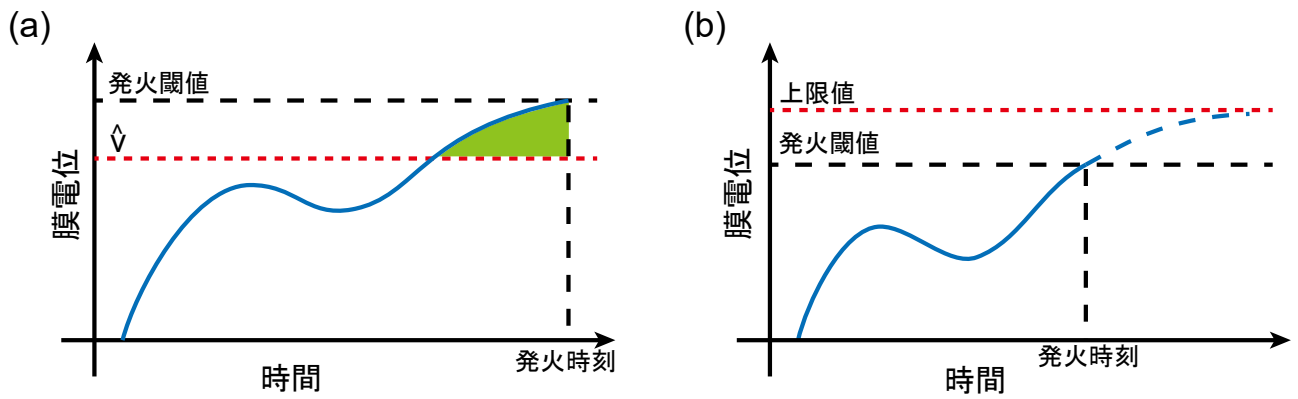


図 1: SSR 正則化の導出

(a) M-SSR 正則化は、膜電位がある電圧 \hat{v} よりも大きい場合に損失を発生させる（緑色の領域）。そして、電圧 \hat{v} を発火閾値(firing threshold voltage)と一致させることで、発火時刻(firing time)のみに依存した正則化関数が得られる。(b) F-SSR は、膜電位が発火後もリセットされずに時間発展した場合の上限値(upper limit)を正則化関数とする。

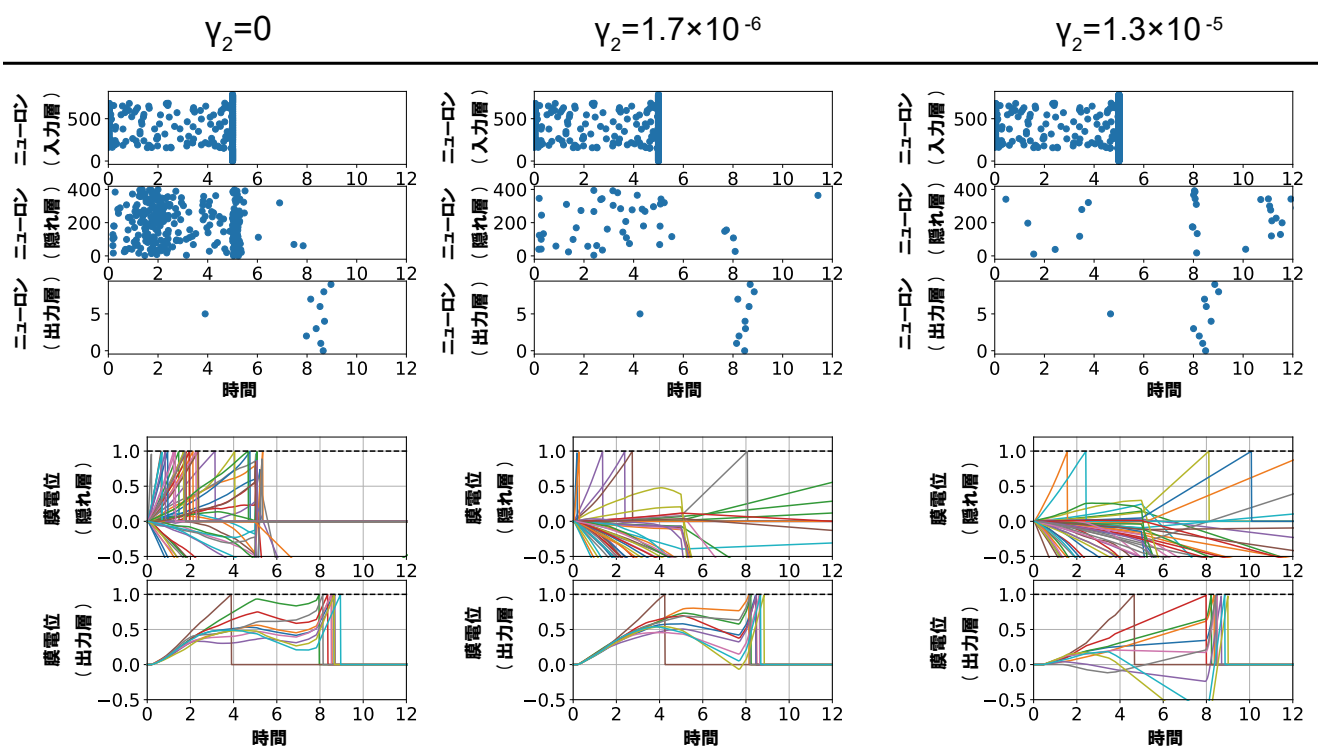
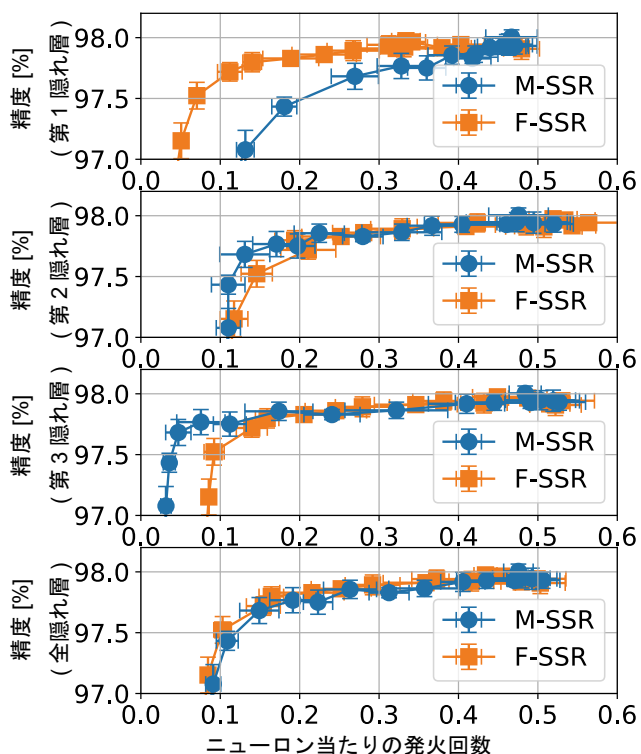


図 2: 発火抑制効果の典型例

隠れ層が1層のみのSNN(784-400-10)においてM-SSR正則化の強度 γ_2 を変化させた時の学習結果の変化を示している。上図は各層の発火時系列(ラスタプロット)を示しており、下図は各層の膜電位の時間発展を示している。正則化強度が強いと($\gamma_2 = 1.3 \times 10^{-5}$)、中間層ニューロンは発火が強く抑制されるが、出力層ニューロンの発火分布に大きな変化がないことがわかる。

MNIST



Fashion-MNIST

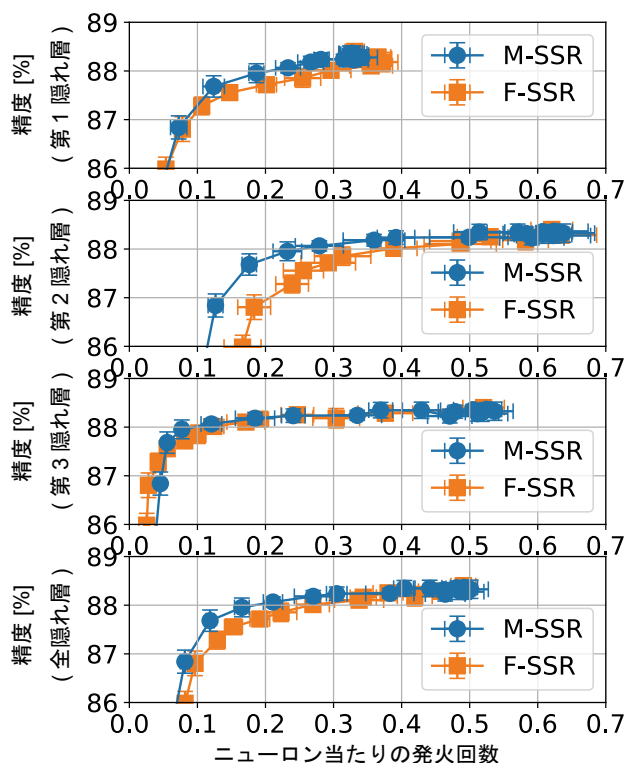
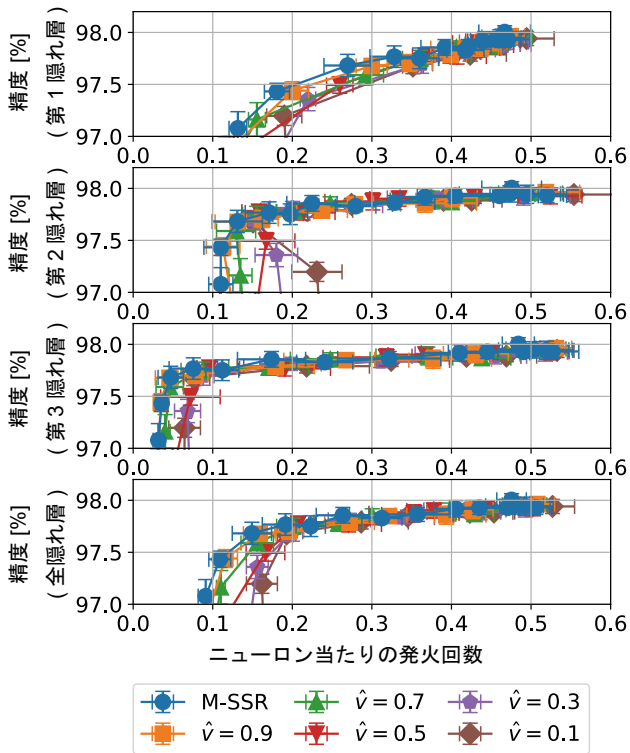


図 3: SSR 正則化による発火率と認識精度のトレードオフ

中間層を3層含むSNN(784-400-400-400-10)においてSSR正則化を導入した時の発火率(横軸)と認識精度(縦軸)のトレードオフの関係性を示しています。左図はMNISTデータセットを用いたときであり、右図はFashion-MNISTデータセットを用いたときの結果です。各図において、上から、第一隠れ層、第二隠れ層、第三隠れ層の結果を示しており、一番下のパネルは、発火頻度を全隠れ層で平均した結果を示しています。SSR正則化強度を大きくすることで、各パネルにおいて右上の点から、左下の点へと推移していくトレードオフ関係が得られました。M-SSRおよびF-SSRの場合も、正則化を導入することで発火頻度が0.5程度から、0.2程度へと、認識精度をほとんど損なわずに抑制できていることがわかります。

MNIST



Fashion-MNIST

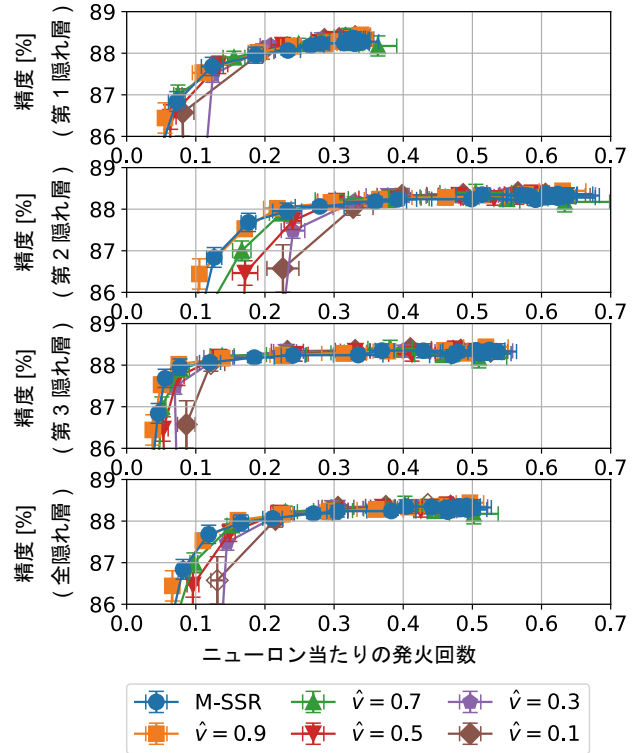


図 4: M-SSR 正則化と積分損失による正則化の比較

中間層を 3 層含む SNN(784-400-400-400-10)において膜電位に損失を与える正則化項と M-SSR の発火率—予測精度トレードオフ特性の比較。膜電位損失の正則化項は様々な参照電圧 \hat{v} の場合の結果を示している。 \hat{v} が大きいほどトレードオフ特性が良くなり M-SSR ($\hat{v} = V_{th} = 1$ に相当、図 1 参照) が最もよいことがわかる。