

令和5年度 修士論文概要			
所属	情報創成工学専攻	指導教員	小田部 荘司
学生番号	226E0301	学生氏名	有田 拳
論文題目	超伝導リザバーの精度向上に関する研究		

## 1. 緒言

物理リザバーコンピューティングは Artificial Intelligence(AI)ハードウェアの分野で主軸となっている。しかし、リザバーコンピューティングの問題としてリザバーの内部状態と時系列予測の結果が不明瞭であるというものが挙げられる。ピンを含む第2種超伝導は磁束線の運動とピンニング効果により生まれる非線形性と記憶性を持つことからリザバーコンピューティングに有効である。また、第2種超伝導体はピンの入れ方によって内部状態を変化させることが容易である。そこで本研究では、超伝導リザバーに関する可視化シミュレーション及びパラメータを変更しつつの時系列予測を行った。これらを通して超伝導リザバーの精度向上およびリザバーの内部状態と時系列予測の結果との関係の明瞭化を図った。

## 2. 計算方法

### 2.1. 超伝導リザバーの可視化

まず、一定の磁束密度 $B_z$ がかけられ時間的に変化する電流密度 $J_y$ が与えられている場合の2次元超伝導体について、Time-Dependent Ginzburg-Landau(TDGL)方程式をAffine Integrator(AFI)<sup>(1)</sup>法で数値的に解き、磁束線の運動およびそれに伴う電磁現象を可視化した。オーダーパラメータ $\Psi$ に関する初期条件と境界条件を与え、時間刻み幅 $\tau$ ごとに座標 $(i, j)$ における $\Psi_{ij}$ を更新し、大きさと位相の情報を持たせてその描画を行った。同時に、超伝導体内部の磁束密度、電流密度、電界についても描画を行った。このとき与える電流密度 $J_y$ は $\tau$ ごとに、規格化された $-1 \leq J_y \leq 1$ の範囲で乱数で与えた。ここで可視化された領域から無作為に50個の点を選択し、その地点の電界を $\tau$ ごとに計算しこれをリザバー $X$ とした。

### 2.2. タスクと性能評価

本研究では時系列予測のタスクとして Nonlinear Autoregressive Moving Average(NARMA)2<sup>(2)</sup>タスクと非線形-メモリタスクを選択した。それぞれのタスクに用いる教

師データの生成式は、

$$d(n+1) = 0.4d(n) + 0.4d(n) \sum_{i=0}^{2-1} + 0.6u(n-2+1)u(n) + 0.1 \quad (1)$$
$$d(n) = \sin(v \times u(n-\tau)) \quad (2)$$

と表される。与えた電流密度を入力 $u(n)$ とし、それをもとに目標出力 $d(n)$ を計算した。これをもとに出力重み $\hat{W}_{out}$ をリッジ回帰を用いて計算した。また、この重みから出力 $y(n)$ が計算された。 $y(n)$ の評価として R Squared( $R^2$ )を用いた。 $R^2$ は一致度のことであり、

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^T (y(n) - d(n))^2}{\sum_{n=1}^T (d(n) - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

で表される。 $\bar{Y}$ は出力の平均である。

### 2.3. パラメータ変更

以上をピンの数を0から10ずつ50まで変化させた場合、ピンの配置を中心部、左右境界、上下境界と変化させた場合、ピン1つの力に関係するパラメータ $\alpha$ を0から5ずつ20まで変化させた場合のそれぞれについて行った。得られた $R^2$ の値を図および表にまとめた。

## 3. 結果および考察

### 3.1. ピンの数変化させた場合

ピンの数を変化させた場合の結果を Fig. 1 に示す。横軸はピンの数、縦軸はNARMA2タスクを行ったときの $R^2$ の値を表している。ピンの数が0から10に増えたときは $R^2$ の上昇が見られたが、それ以降のピンの数の増加に対して $R^2$ は減少していく様子が見られた。このような結果になった要因を2つの場合に分けて考える。まず、ピンの数の0から10に変化させた場合について、ピンの数が0のとき、超伝導リザバーの非線形性は一様である。そこからピンの数を10に増やす、つまり超伝導リザバーがピン無の状態からピン有の状態に変化したことで非線形性に

偏りが生まれ精度が上がったと考えられる。次にピン 10 からピンの数を増やしていった場合、むしろ偏りは減っていくため精度も共に下がっていったと考えられる。

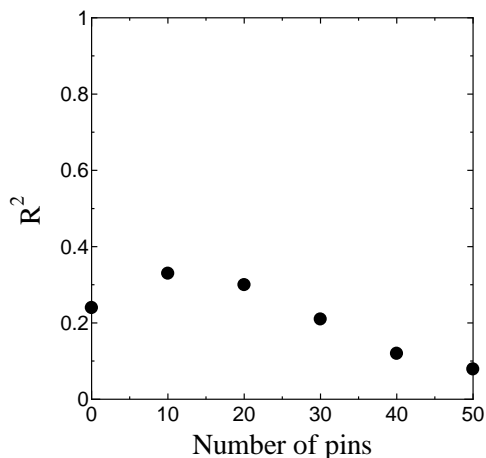


Fig. 1 R<sup>2</sup> with respect to the number of pins.

### 3.2. ピンの配置を変化させた場合

ピンの配置を変化させた場合の結果を Table 1 に示す。ピンを中心部に配置した場合、左右境界に配置した場合、上下境界に配置した場合についてそれぞれの NARMA2 タスクにおける R<sup>2</sup> の値をまとめている。いずれの場合においても R<sup>2</sup> の値は 0.3 程度であった。大きな違いが見られない原因としては、配置を変えたとしても超伝導リザーバー内部は磁束線がよく止められる場所と磁束線がまったく止められない場所の 2 種類の状態になっているという点が共通しているためであると考えられる。

Table 1 Comparison between the two cases.

Pin Placement	Accuracy R <sup>2</sup>
Center	0.319
Up and Down	0.327
Left and Right	0.301

### 3.3. ピン 1 つあたりの力を変化させた場合

ピン 1 つあたりの力に関するパラメータ  $\alpha$  を変化した場合の結果を Fig. 2 に示す。横軸は  $\alpha$  の値、縦軸は R<sup>2</sup> の値を表している。 $\alpha = 0$  を除き  $\alpha$  が大きくなると R<sup>2</sup> も大きくなっていく結果が得られた。この結果の原因として以下のように考察する。 $\alpha$  が大きくなることでピンの無い超伝導部分と、ピンのある常伝導部分とのエネルギー差が大きくなるためピン力が大きくなる。したがって、ピンに磁束線が引き込まれる勢いおよびピンから磁束線が出る勢い

も大きくなり、その部分において非線形性が強くなりこれが結果として精度の上昇につながったと考えられる。しかしながら精度の上昇はわずかなものであるため今後も別の方法を模索していく必要がある。

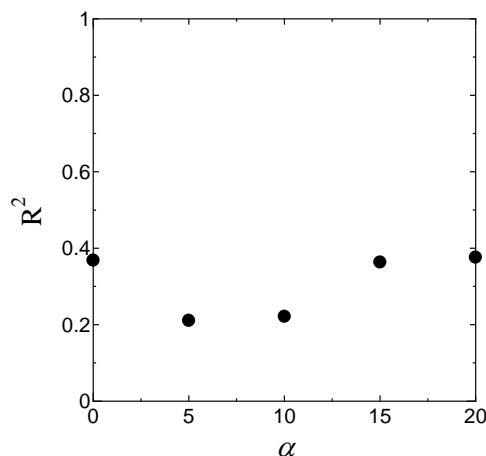


Fig. 2 R<sup>2</sup> with respect to the parameter  $\alpha$ .

## 4. 結言

本研究で、超伝導リザーバーの精度向上およびリザーバーの内部状態と時系列予測の結果との関係の明瞭化のために超伝導リザーバー内部の可視化とパラメータ変更を伴う時系列予測のタスクを行った。ピンの数においてはピン 10 個から数を増やすと精度が低下することがわかった。ピンの配置に関しては精度に大きな差異は生じないことがわかった。ピン 1 つあたりの力の強さについてはピン力が大きくなるほど精度が向上することがわかった。以上のことから超伝導リザーバーの精度向上においては少数の強いピンを入れることが最善であると言える。

## 参考文献

- (1) T. Matsuno, E.S. Otabe, Y. Mawatari, J.Phys. Soc. Japan 89 (2020) 054006.
- (2) 田中剛平, 中根了昌, 廣瀬明. リザーバーコンピューティング-時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア. 森北出版株式会社. 2021 年 3 月

## 研究業績

1. K. Arita, T. Ueda, E.S. Otabe, Y. Usami, H. Tanaka, T. Matsuno. "Possibility of using the pinning phenomenon of superconductors as a reservoir computing". ISS2022. WINC-AICHI. December 1, 2022.