

「2025年度 六方晶マンガン酸化物における
特異ドメイン構造を利用した物理リザーバーの
計算性能評価 補助事業」
実施報告書

九州工業大学 大学院
工学研究院 物質工学研究系

堀部 陽一

※ 本事業は競輪補助事業の助成を受けて実施しました



目次

1. 研究テーマの概要	3
2. 研究の動機と目的	4
3. 研究方法	5
4. 研究成果	8
4. 1 大型単結晶育成のための条件最適化	8
4. 2 ドメイン構造導入とサイズ最適化	12
4. 3 物理リザーバー作製とリザーバー計算性能評価	13
5. 成果報告リスト	31

1. 研究テーマの概要

リザーブ計算は、リアルタイムでの予測が可能な効率的な機械学習の一種であり、リザーブ部と出力部間の重みを学習することで実行可能となる。このリザーブ層を様々な実際の物理システムで置き換えた物理リザーブ計算は、高速かつ省エネルギーな計算が期待され、近年活発に研究が進められている。最近我々は、六方晶マンガン酸化物 YMnO_3 強誘電材料の単結晶において出現する特異なドメイン構造が、場所毎に異なる「非線形応答」「位相シフト」「高次元性」を示すことを見出した。これらは物理リザーブ計算のための材料として本質的に重要な性質であり、本材料に数多くの電極を設置することでリザーブ計算が可能になることを示唆している。そこで本研究では、 YMnO_3 を利用した物理リザーブの計算性能について調べる。本目的実現のため、(1) 大型で良質な単結晶育成のための条件最適化、(2) ドメイン構造の導入とサイズ最適化、(3) 単結晶への電極設置とリザーブ計算性能の評価、を行う。

2. 研究の動機と目的

リザーバー計算は、リザーバー部と出力部間の重みのみの学習による非常に効率的な機械学習であり、ロボットや機械システムのリアルタイムな自律制御に利用できることから、近年活発な研究が進められている。このリザーバー部を実際の材料に置き換えることで、高速かつ省エネルギーなリザーバー計算機の実現が期待されている。申請者らは従来の研究において、六方晶マンガン酸化物 YMnO_3 強誘電材料の単結晶が、方向性を持った特異なドメイン構造に起因する、半導体的ドメインと電導性・絶縁性ドメイン壁のネットワークを有すること明らかにした。また最近、このネットワークが、物理リザーバー材料として重要な非線形性・位相シフト・高次元性のすべての性質を示すことを明らかにしている。さらに本材料は低温～高温で化学的に極めて安定で、 $0.0005 \mu\text{W}$ 程度の電力でも非線形性を示す。これらの結果から申請者らは、本系が物理リザーバー材料として有望であり、切り出された単結晶をそのまま用いて、広い温度範囲で作製・作動できる消費電力の極めて少ない物理リザーバー計算が出来ると考えた。そこで本事業の目的は、強誘電材料 YMnO_3 単結晶に出現する特異なドメイン構造を利用した、物理リザーバーの計算性能について調べることである。この大目的のため、(1) リザーバー計算に必要な多数の電極設置のため、大型で良質な単結晶を育成する、(2) 計算に影響を及ぼすドメイン導入とサイズ調整のため、単結晶の熱処理条件を最適化する、(3) 得られた単結晶に電極を設置し、リザーバー計算性能について評価する、の各々を目的とする。

3. 研究方法実験方法

3. 1 試料作製方法

六方晶マンガン酸化物 $Y\text{MnO}_3$ を分極処理した場合のドメイン状態の観察およびリザバーコンピューティング応用の可能性を探るため、四楕円鏡型赤外線集光装置を用いた FZ 法による単結晶育成を行った。図 2.1 に試料作製の手順を示す。具体的な単結晶育成方法は以下の通りである。

FZ 法による単結晶育成に必要な、フィードロッドおよびシードロッドの作製は通常の固相反応法を用いて行った。原料粉には、 Y_2O_3 および Mn_2O_3 を用いた。

大気中の水蒸気により形成されたイットリウム水酸化物に起因する秤量誤差を避けるため、 Y_2O_3 原料粉について、 $900\text{ }^\circ\text{C} \cdot 20$ 時間加熱し、前処理を行った。前処理後、 Y_2O_3 と原料粉の Mn_2O_3 を乳鉢で約 1 時間混合した。混合粉について、プレス機を用いて 20 MPa で 10 分間プレスし、得られたペレットを $1200\text{ }^\circ\text{C} \cdot 24$ 時間で 1 回目の仮焼成を行った。その後、ペレットを再び乳鉢で粉末状にし、再度ペレット化を行った。得られたペレットを $1250\text{ }^\circ\text{C} \cdot 24$ 時間で 2 回目の仮焼成を行った。これを再び乳鉢で粉末状にし、ゴムチューブに詰めて直径約 6 mm、長さ 7 cm 程度のロッド状に成型した。脱気後、静水圧プレスで 70 MPa 、10 分間プレスを行った。このロッド状圧粉体を $1300\text{ }^\circ\text{C} \cdot 24$ 時間で本焼成することにより、棒状の圧粉体を作製した。

2.1.2 単結晶試料作製

単結晶試料作製は、作製した棒状の圧粉体をフィードロッドおよびシードロッドとして、FZ 法を用いて行われた。四楕円鏡型赤外線集光装置は FZ-T-4000-H-CU-1 を用いた。単結晶の育成条件は育成速度 2.0 mm/h 、供給速度 $0.06\sim 2.00\text{ mm/h}$ 、シードロッドを右回転で速度 20 rpm 、フィードロッドを左回転で速度 20 rpm でそれぞれ回転させて育成を行った。単結晶育成後、熱応力を取り除くために $1000\text{ }^\circ\text{C} \cdot 12$ 時間保持の条件でポストアニール処理を行った。

3. 2 試料観察方法

1°C/hで降温を行った YMnO_3 単結晶試料について、原子間力顕微鏡観察(AFM)を用いて、ドメイン観察を行った。AFM用の試料は機械化学研磨法を用いて作製した。ダイヤモンドカッターを用いて単結晶をc軸に垂直な方向で切断し、熱処理を行った後、ダイヤモンドドラップを用いて粗研磨を行った。その後、粒度 $0.05\ \mu\text{m}$ の中性懸濁液を用いて、表面を平滑化した。さらに、リン酸を用いて、エッチングを行い、単結晶表面にnmスケールの凹凸を導入することでAFM観察適合性を向上させた。

3. 3 試料特性評価方法

FZ 法で得られた YMnO_3 単結晶を用いて、エコー状態特性について調査を行った。ポストアニール後の単結晶試料について、 c 軸に沿った面を持つ試料($\text{YMnO}_3 //c$ 軸)と c 軸に対して垂直な面を持つ試料($\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸)の 2 種類に切断し、表面研磨を行った。研磨後、 $\text{YMnO}_3 //c$ 軸は約 1.07 mm、 $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸は約 0.85 mm の厚さとなった。2 種類の単結晶に対し、Printed Circuit Board (PCB) を用いて、単結晶試料に片面 16 個、裏面 16 個の電極をそれぞれ取り付けた。図 2.2.1.1(a)および図 2.2.1.1 (b)に単結晶試料を取り付けた PCB の画像を示す。(a)は $\text{YMnO}_3 //c$ 軸試料、(b)は $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸試料となっており、PCB には計 32 個の電極が取り付けられている。これらの電極を用いて、電気伝導特性測定と入力電圧に対する出力電圧の測定(電圧測定)を行った。これらの測定は、生命体工学研究科 田中啓文研究室によるご支援のもと行った。また、得られた電圧測定結果について、Python を用いたフーリエ変換を行った。さらに、RC 材料として用いた場合の精度を調査するため、Python を用いた機械学習である、リザーバー波形生成タスクを実行した。リザーバー波形生成タスクとは、入力された訓練波から予測波を出力し、ターゲット波である 6 種類の波形に対しての正解率を導出するタスクである。6 種類の波形は、Square/Sawtooth/Cos/Sin3W/Triangle/Sin2W となっている。

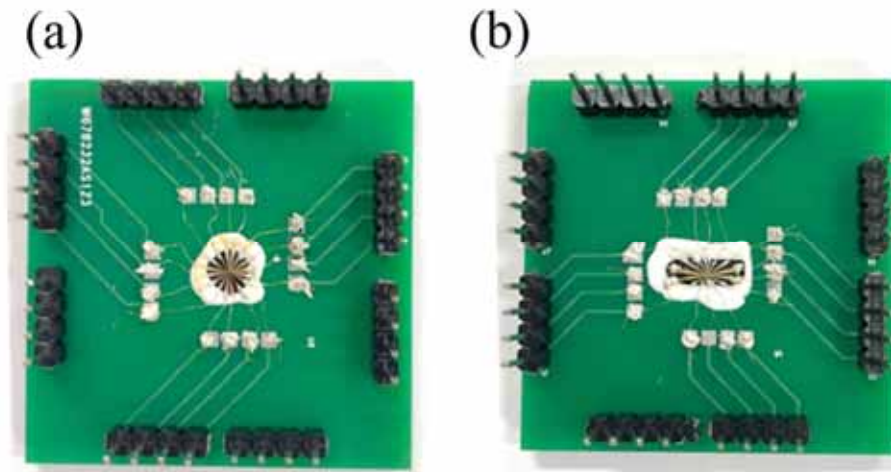


図 2.2.1.1 単結晶試料を取り付けた PCB
(a) $\text{YMnO}_3 //c$ 軸 (b) $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸

4. 研究成果

4. 1 大型単結晶育成のための条件最適化

作製したフィードロッドおよびシードロッドを用いて、FZ 法による単結晶育成を試みた。単結晶育成時のようすを図 3.1.1 に、作製した単結晶試料を図 3.1.2 にそれぞれ示す。単結晶表面の拡大像と平面部における拡大像をそれぞれ図 3.1.3、図 3.1.4 に示す。図 3.1.1 より、単結晶育成時には熔融部および育成単結晶部分の形態がほとんど変化せず、本条件下での長時間安定した育成が明らかとなった。また、図 3.1.2、図 3.1.3 より、得られた単結晶表面には直線的なコントラストが観察される。一方、図 3.1.4 では、 c 軸方向に沿って向かい合う約 2 cm の大型なファセットが確認された。これらの結果から良質な大型単結晶が育成されたと考えられる。従来研究と比較すると、育成速度が遅い場合に単結晶成長がより安定化することが示唆された。



図 3.1.1 単結晶育成時のようす

(a) 育成開始直後 (b) 育成開始から 10 時間 6 分後 (c) 育成開始から 14 時間後



図 3.1.2 化学量論組成 YMnO_3 単結晶

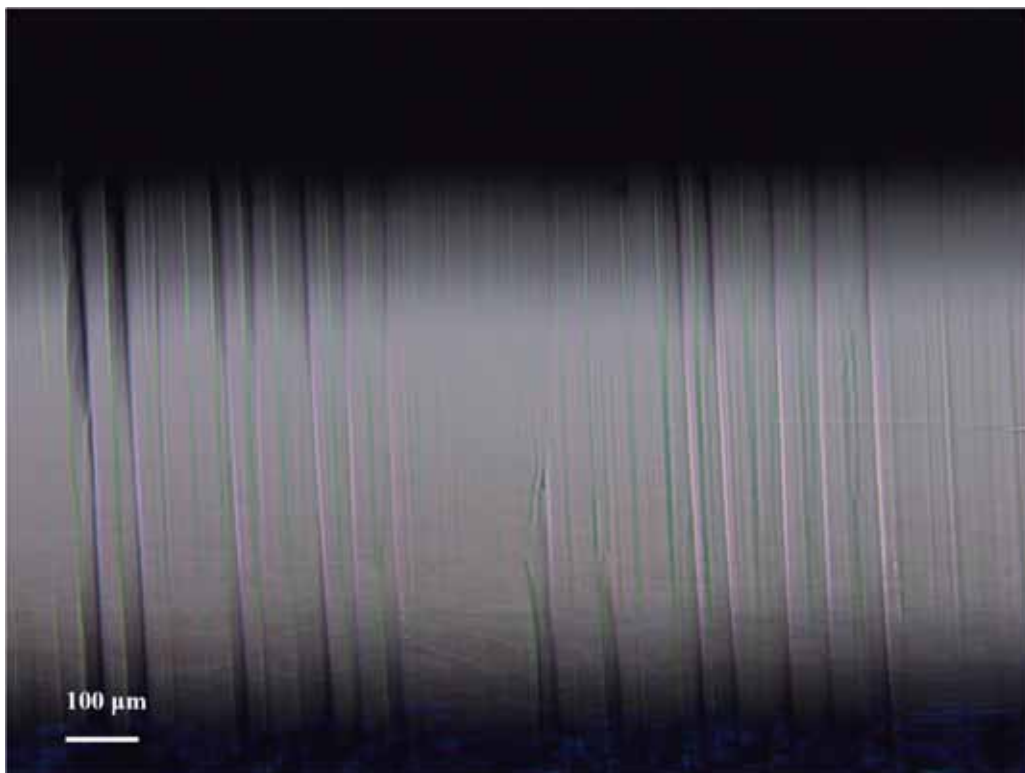


図 3.1.3 育成単結晶から得られた光学顕微鏡像



図 3.1.4 育成単結晶のファセット表面

YMnO₃フィードロッド（約 8.4 cm）およびシードロッド作製後、Ar:O₂=1:1 (2 atm)の雰囲気条件で FZ 法による単結晶育成を行った。育成した単結晶の長さは約 5.5 cm であった。育成した単結晶の全体写真を図 3-2-1 に示す。また、単結晶の表面を観察するために光学顕微鏡を用いて撮影を行った。単結晶育成初期の写真を図 3-2-2 に、単結晶終端部の写真を図 3-2-3 にそれぞれ示す。図 3-2-2 では、育成方向に垂直な方向に線状のコントラストが見られる。この線状コントラストは安定した単結晶育成の際に現れる成長痕であることから、単結晶育成初期において単結晶育成が安定していることが分かる。一方、図 3-2-3 では細かい斑点状のコントラストが見られるものの、育成方向に垂直な方向に成長痕が観察され、単結晶育成は終端部においても安定であることが見出される。比較のため、従来研究において O₂ (1 atm)の条件で育成した単結晶の全体写真を図 3-2-4 に示す。また、単結晶育成初期の写真を図 3-2-5 に、単結晶終端部の写真を図 3-2-6 にそれぞれ示す[5]。図 3-2-5 より育成初期では、育成方向に垂直な方向に線状のコントラストが見られる。一方、図 3-2-6 では、成長痕以外に特徴的なコントラストが見られるものの、単結晶育成は未だに安定であることが分かる。以上の結果から O₂ (1 atm)での単結晶育成と比較して Ar:O₂ = 1:1 (2 atm)の雰囲気条件では単結晶育成は同程度に安定であることが明らかとなった。



図 3-2-1 Ar:O₂=1:1 (2 atm)雰囲気で作成した単結晶の全体写真
(赤枠：育成初期、緑枠：終端部)

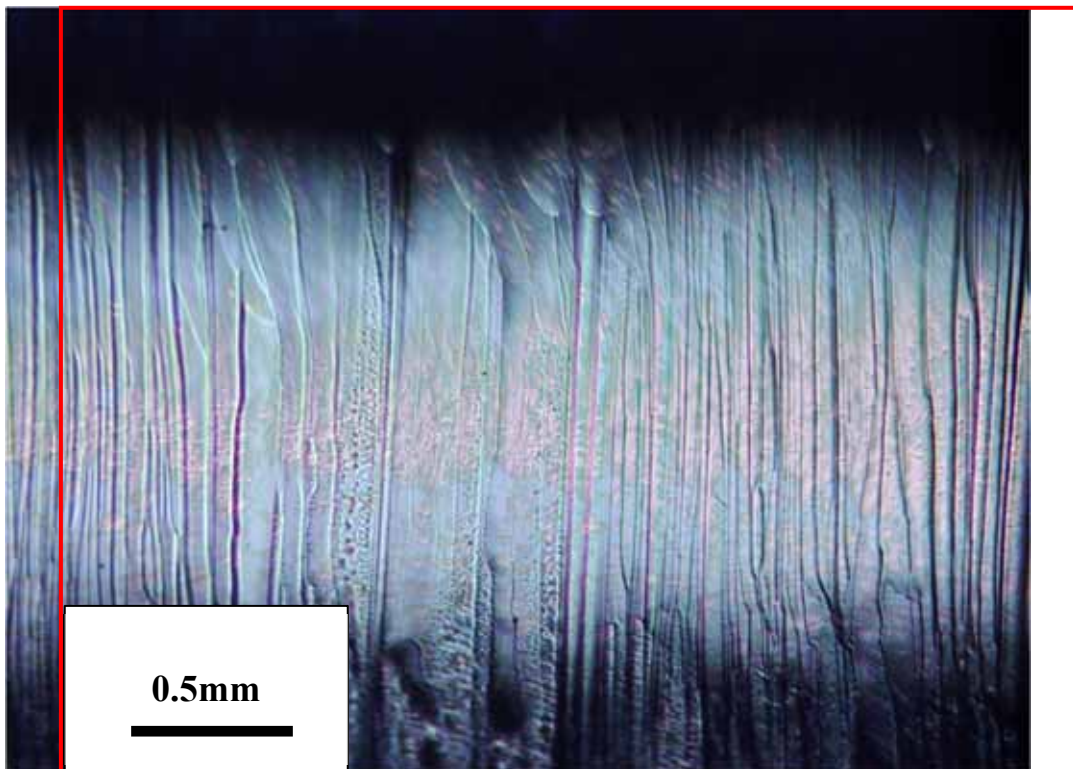


図 3-2-2 Ar:O₂=1:1 (2 atm)、単結晶育成初期の光学顕微鏡写真

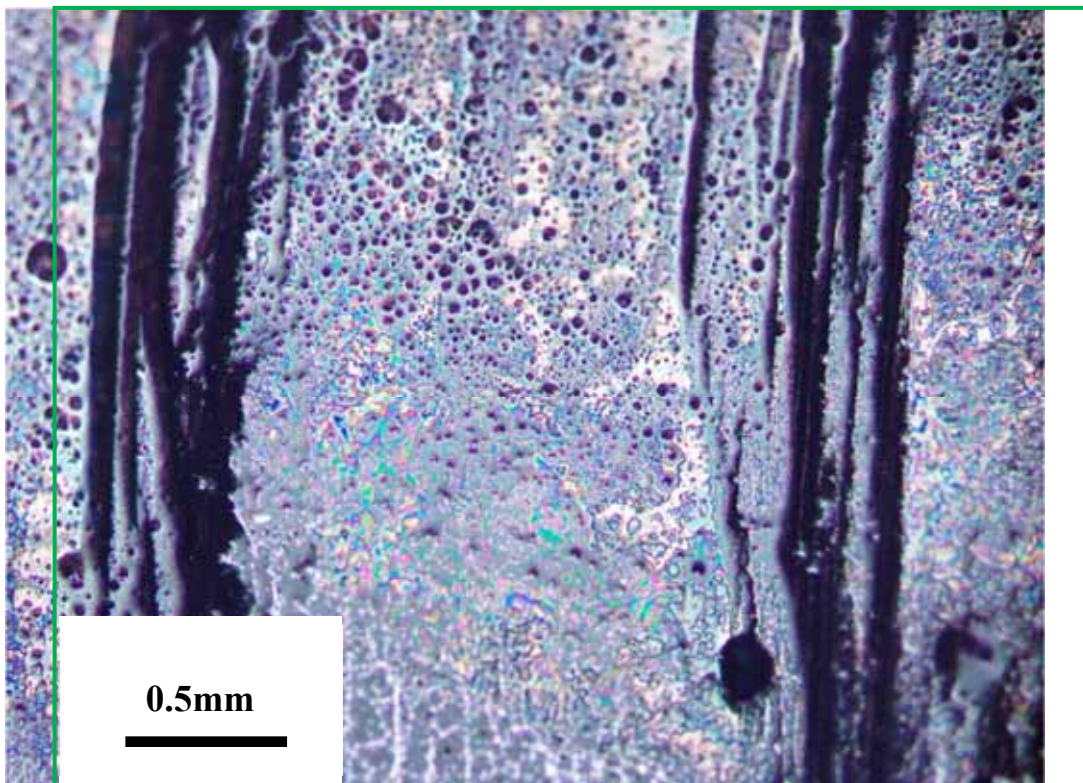


図 3-2-3 Ar:O₂=1:1 (2 atm)、単結晶終端部の光学顕微鏡写真

4. 2 ドメイン構造導入とサイズ最適化

FZ 法によって得られた単結晶を熱処理した試料について、ドメイン構造を明らかにするため、原子間力顕微鏡(AFM)法を用いた AFM 像の観察を行った。単結晶から得られた顕微鏡画像を図 3.3.1 および図 3.3.2 にそれぞれ示す。画像中には、特徴的な形状のドメインが確認される。図 1.2.2 に示した従来研究との比較により、この 6 つのコントラストは反位相・強誘電ドメイン構造のドメイン境界を表しており、これらの境界と線状コントラストは六方晶マンガン酸化物で観察されるクローバーリーフドメイン構造であると考えられる。したがって、本研究で使用した単結晶においてクローバーリーフドメイン存在することが明らかになった。

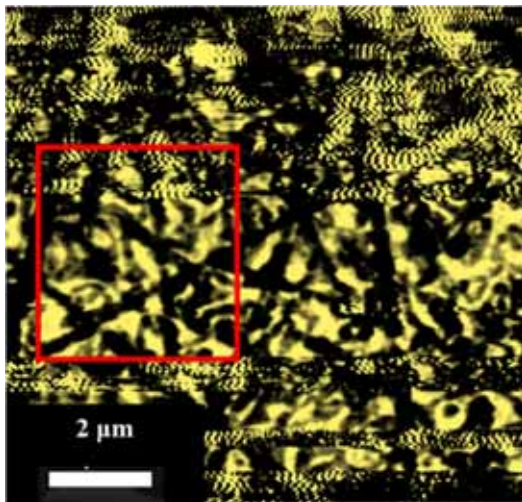


図 3.3.1 YMnO₃ 熱処理試料における AFM 像

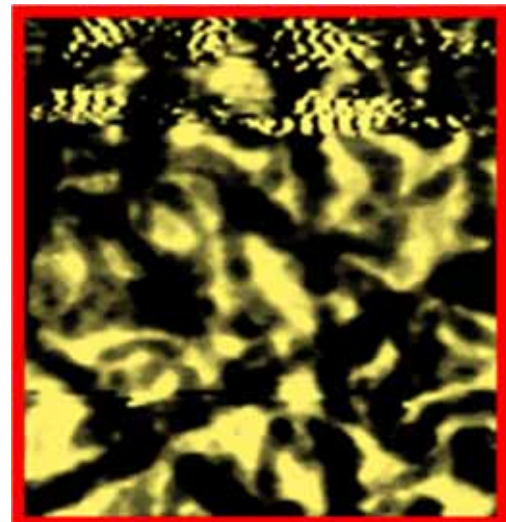


図 3.3.2 YMnO₃ 熱処理試料における AFM 像 (図 3.3.1 赤枠部分の拡大図)

4. 3 物理リザーバー作製とリザーバー計算性能評価

3.2.1 電気伝導特性測定結果

作製した2種類の単結晶試料における32個の端子について、そのうち1つを入力、残りの31個を出力として電気伝導特性測定を行った。31個の端子のうち、15個が入力端子と同じ面、16個が入力端子と反対の面となっている。2種類の単結晶試料の、2通りの測定方法における結果を、図3.2.1.1、図3.2.1.2、図3.2.1.3、および図3.2.1.4にそれぞれ示す。図に示すように、異なる15個または16個の端子から得られた電気伝導特性は、全て異なるグラフ形状を示すことが明らかとなった。また、 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸の測定結果について、同じ印加電圧に対して異なる電流値が得られ、ヒステリシスの傾向を示すことが見出された。さらに、 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸および $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸の全ての測定方法について、電流 I - 印加電圧 V の関係は明瞭な非線形性を示している。特に $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸での測定は、 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸での測定よりも非線形性が強いことが明らかとなった。 $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸・反対面での測定では、一部で半導体的挙動が観察される。したがって、本物質は、出力端子ごとに異なる電気伝導特性を示すことが明らかとなった。このことから、 YMnO_3 単結晶はエコーステート特性のひとつである、非線形性を満たしていることが明らかとなった。

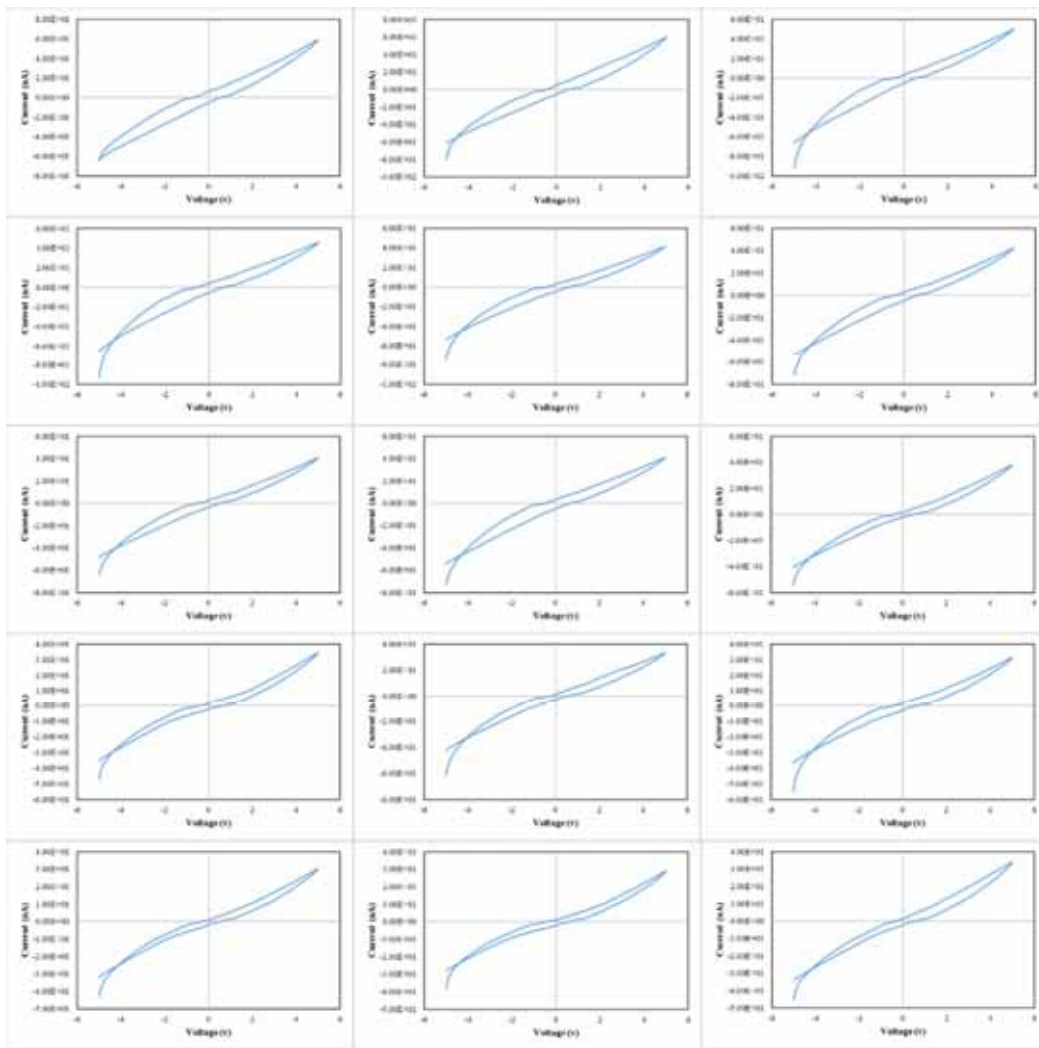


図 3.2.1.1 YMnO₃ //c 軸 同じ面における電気伝導特性

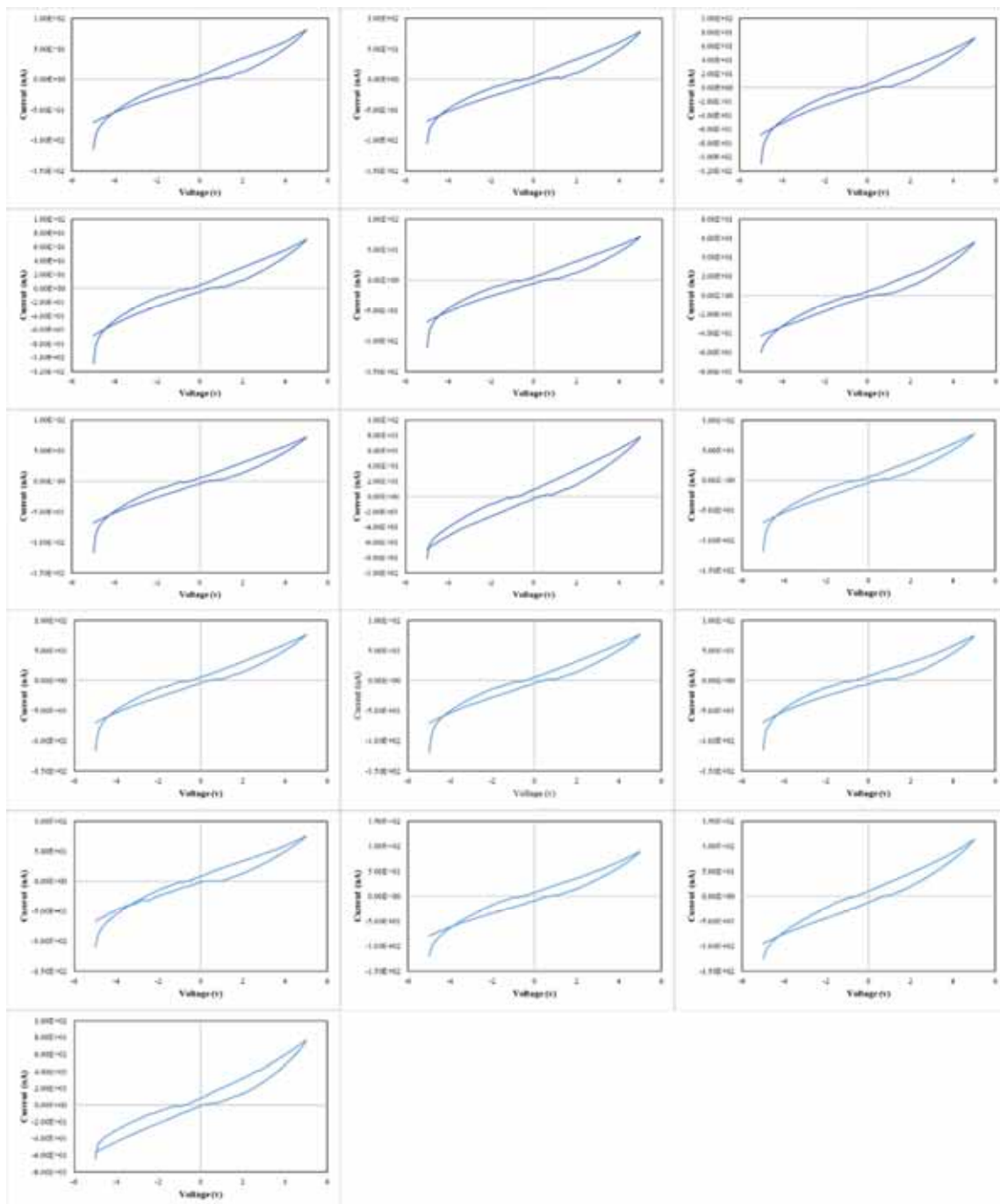


図 3.2.1.2 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸 反対面における電気伝導特性

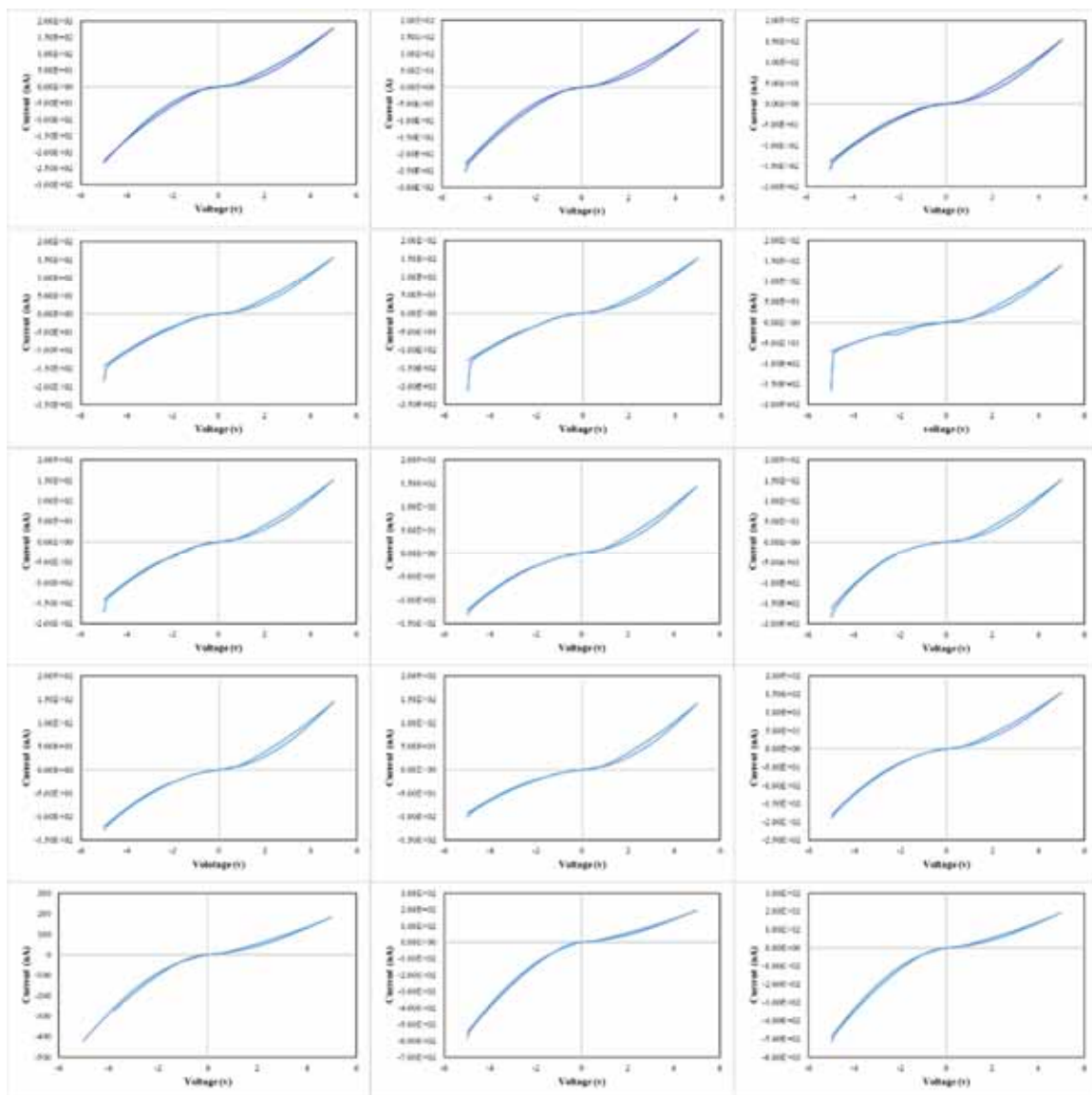


図 3.2.1.3 YMnO_3 $\perp c$ 軸 同一面における電気伝導特性

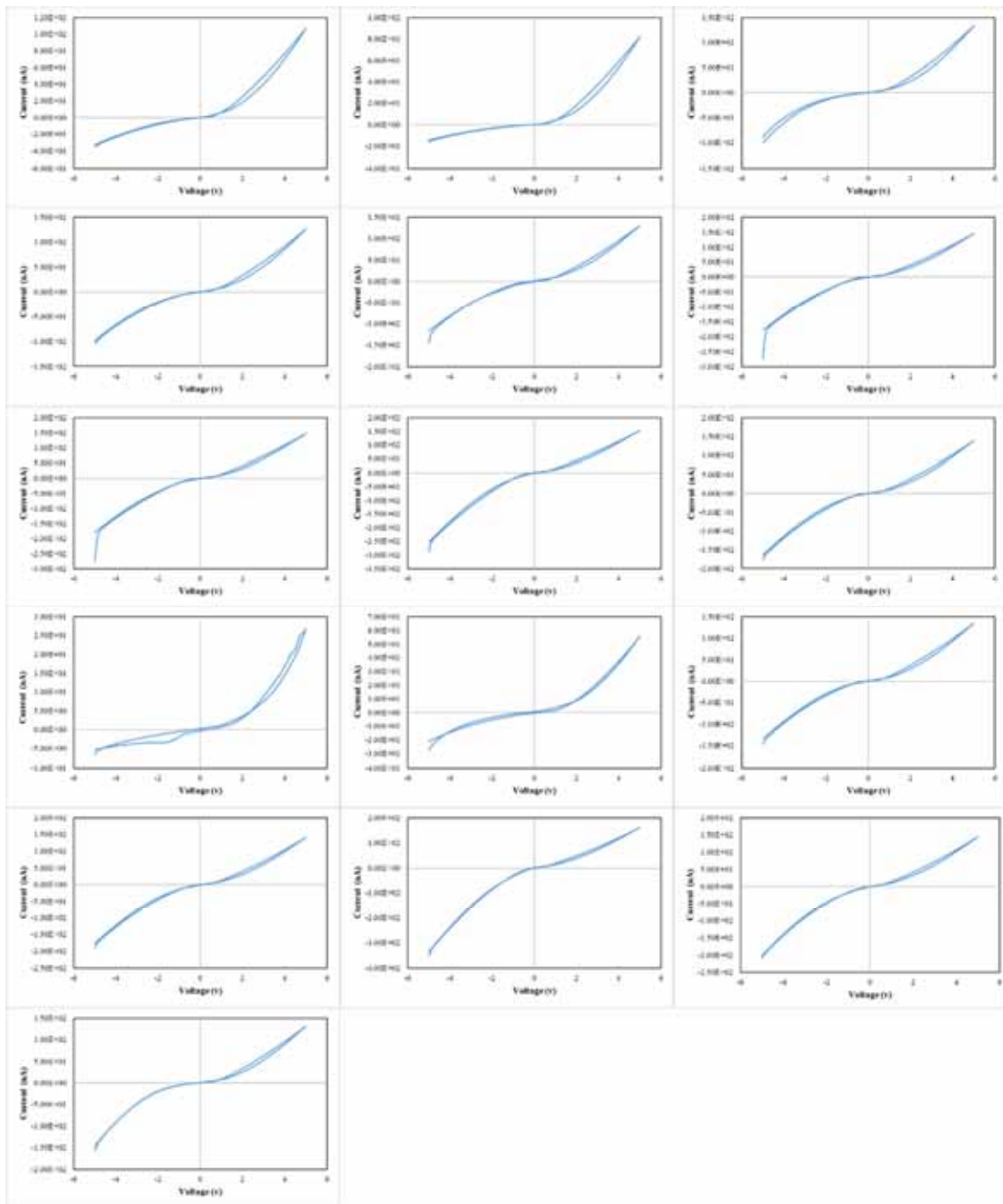


図 3.2.1.4 YMnO_3 $\perp c$ 軸 反対面における電気伝導特性

3.2.2 入力電圧に対する出力電圧測定(電圧測定)結果

電気伝導測定と同一の試料を用いて、32 個の端子のうち 1 個を入力電圧 V_{in} 、残りを出力電圧 V_{out} として、入力電圧に対する出力電圧の測定を行った。3.2.1 の電気伝導測定と同様に、31 個の端子のうち、15 個が入力端子と同じ面、16 個が入力端子と反対の面となっている。測定結果について、横軸を入力電圧、縦軸を出力電圧としたリサージュ図形として図 3.2.2.1、図 3.2.2.2、図 3.2.2.3、および図 3.2.2.4 に示す。図より、 $YMnO_3 // c$ 軸と $YMnO_3 \perp c$ 軸の全ての測定方法で、リサージュ図形は楕円形を有している。したがって、入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} に位相差がみられることがわかる。楕円の形状は 4 種類の測定条件によってそれぞれ類似しているものの、測定値は 15 個および 16 個の端子によってそれぞれ異なる値を示すことが明らかとなった。一方で、 $YMnO_3 // c$ 軸試料での測定から得られたリサージュ曲線は、より楕円の長軸と短軸の長さの差が小さいことがわかる。したがって、 $YMnO_3 // c$ 軸ではより大きな位相差を持つことが示唆された。また、リサージュ図形における位相差は式(3.2.2.1)で求めることができる。この式を用いて位相差を計算した。図 3.2.2.5 に 4 種類の測定方法における位相差の平均値を示す。図 3.2.2.5 より、 $YMnO_3 // c$ 軸の方が $YMnO_3 \perp c$ 軸よりも大きな位相差を持つことが見出された。以上の結果より、 $YMnO_3$ 単結晶はエコー状態特性のひとつである位相差を満たすことが明らかとなった。

$$\theta = \frac{180}{\pi} \sin^{-1}(a/b) \quad (3.2.2.1)$$

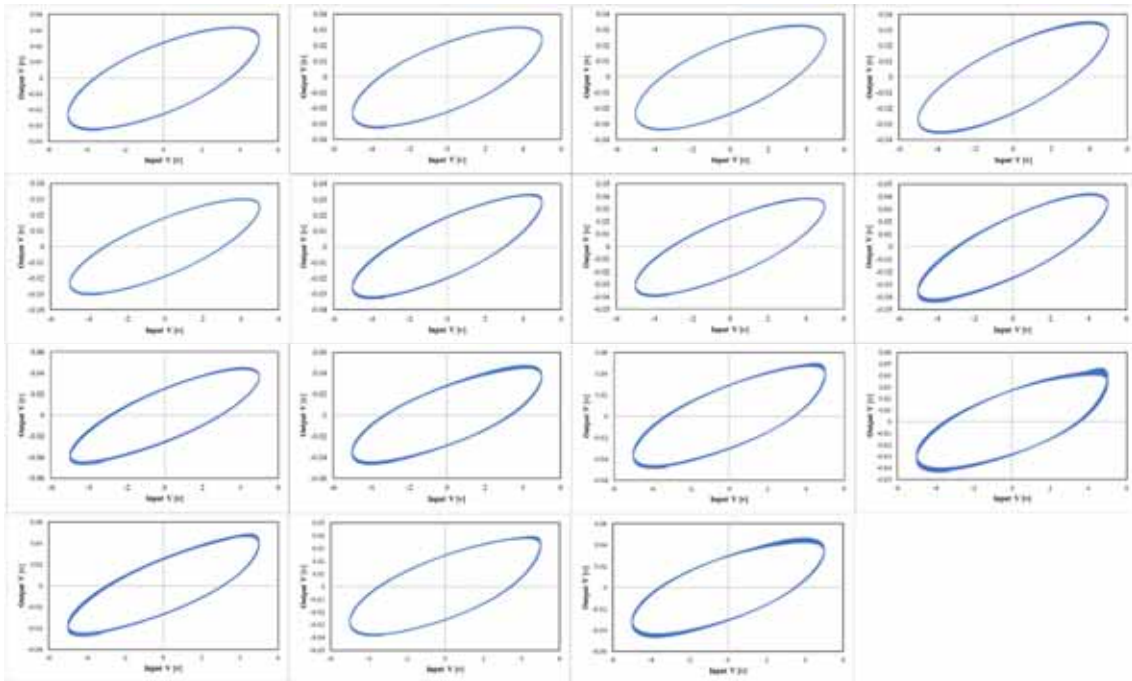


図 3.2.2.1 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸 同じ面におけるリサージュ図形

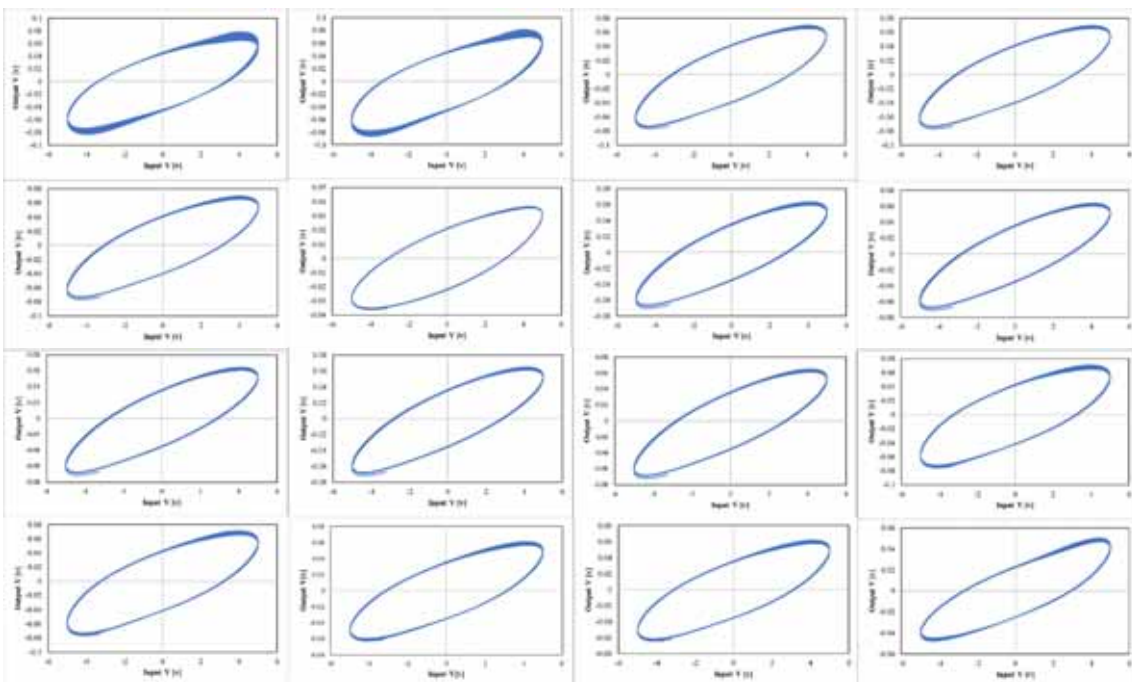


図 3.2.2.2 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸 反対面におけるリサージュ図形

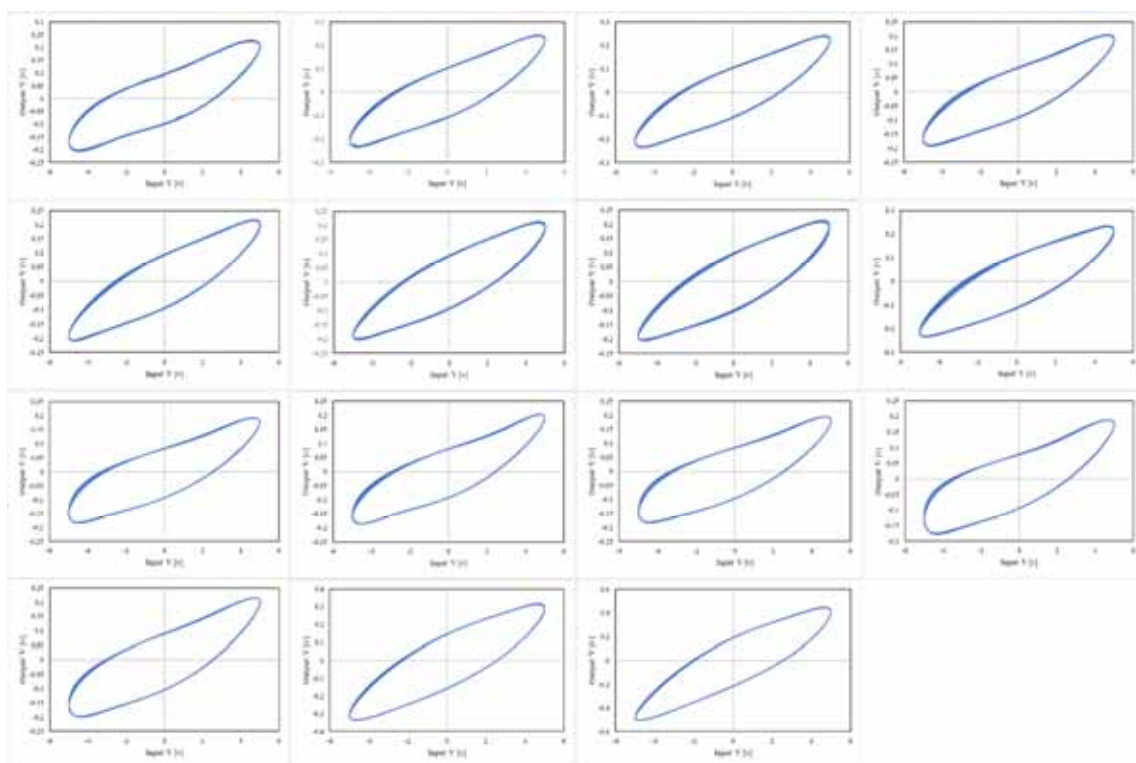


図 3.2.2.3 YMnO_3 $\perp c$ 軸 同じ面におけるリサーチ図形

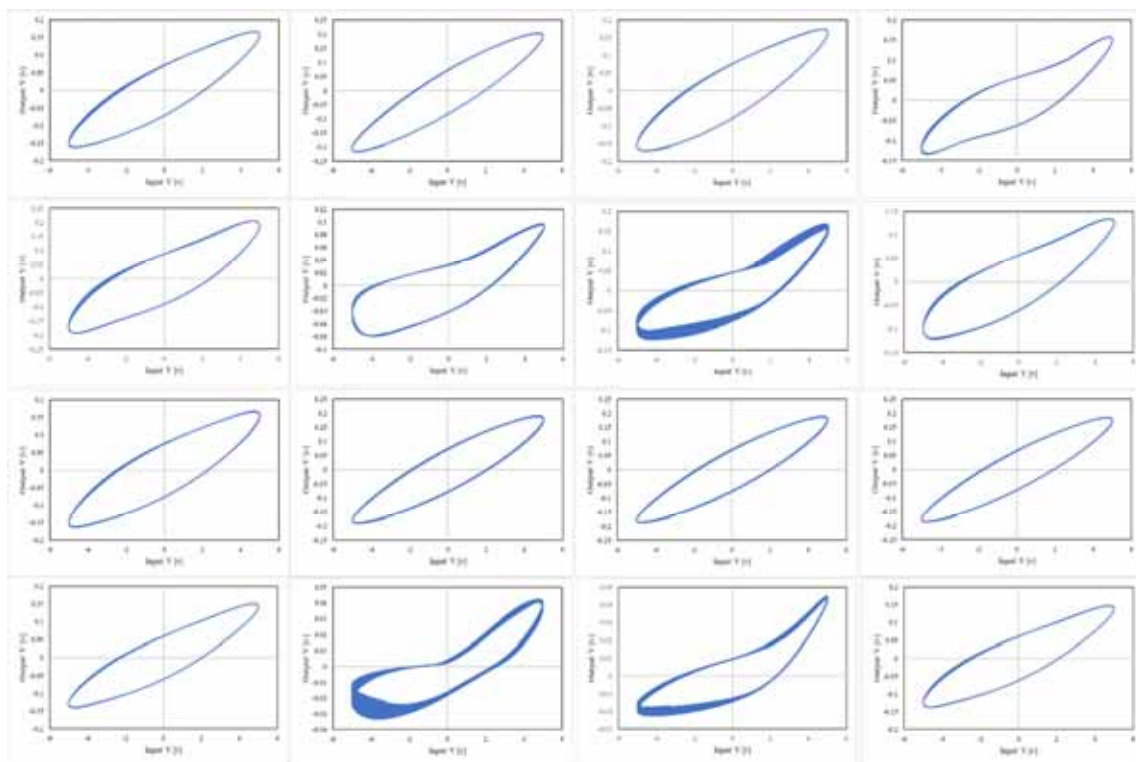


図 3.2.2.4 YMnO_3 $\perp c$ 軸 反対面におけるリサーチ図形

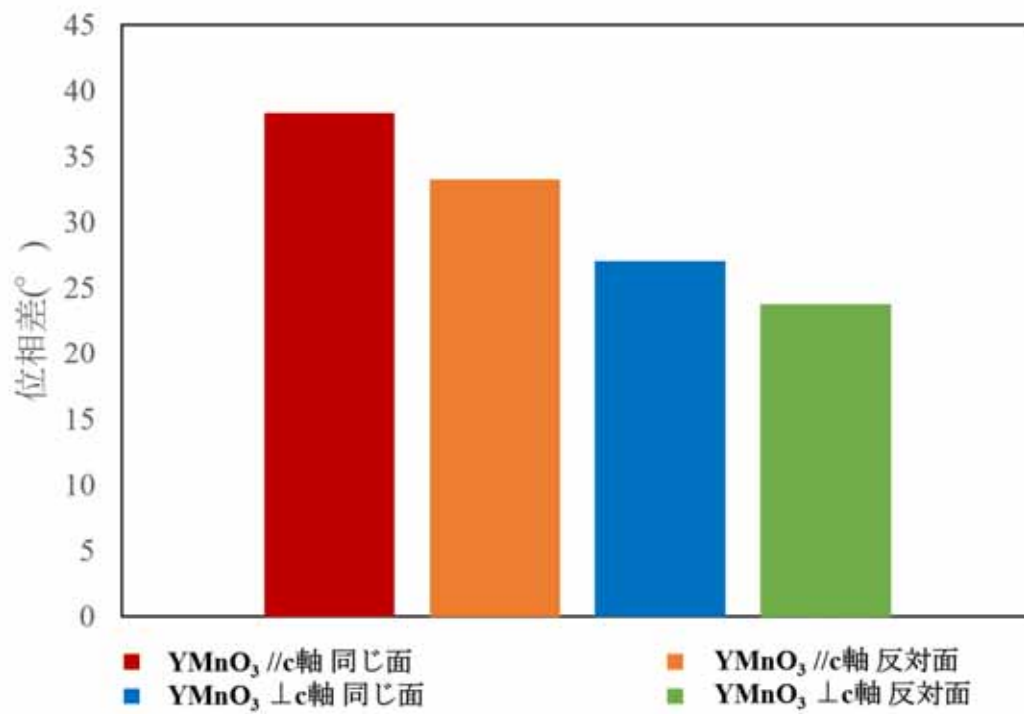


図 3.2.2.5 4 種類の測定方法における位相差の平均値

得られた電圧測定結果について、フーリエ変換を行った。図 3.2.2.6、図 3.2.2.7、図 3.2.2.8、および図 3.2.2.9 に、4 つの測定方法において得られたフーリエ変換結果を示す。図に示すように、4 つの測定方法から得られた出力電圧は、異なる複数の周波数でパワースペクトルのピークがみられる。したがって、本研究の電圧測定結果は、それぞれ複数の周波数から構成されていることが明らかとなった。また、 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸ではより多くの種類の周波数にピークが分散されていることがわかる。したがって、全ての測定方法について高次元性があることが明らかとなった。特に、 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸の単結晶は、より高次元性をもつことがわかる。これらの結果より、本物質はエコーステート特性の一つである高次元性も満たしていることが明らかとなった。したがって、六方晶 YMnO_3 は RC 材料として理想的な材料であることが示唆される。

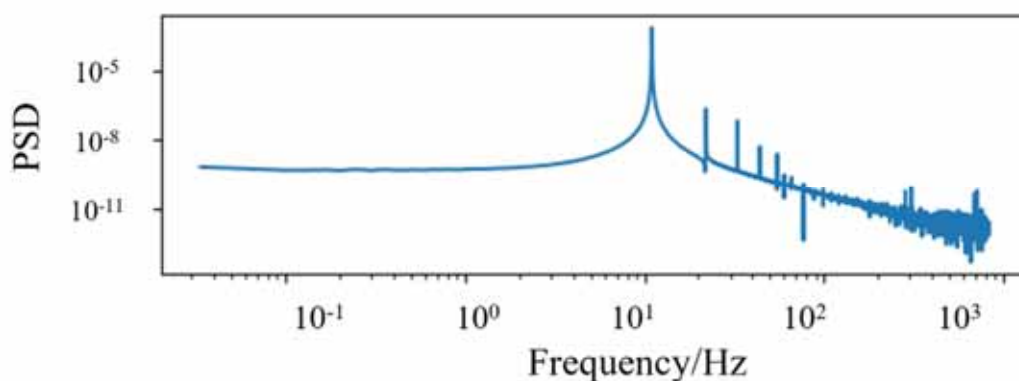


図 3.2.2.6 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸 同じ面におけるフーリエ変換結果

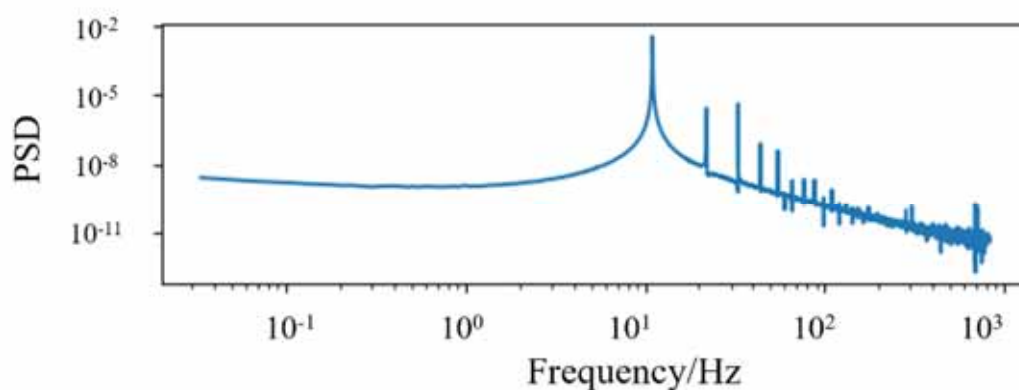


図 3.2.2.7 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸 反対面におけるフーリエ変換結果

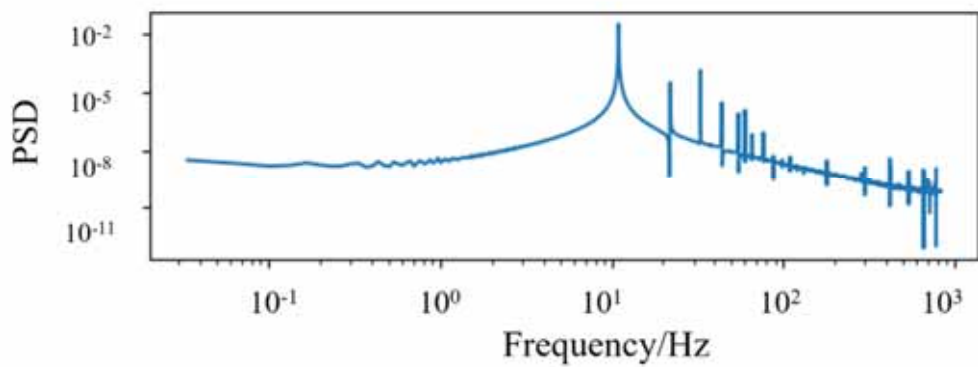


図 3.2.2.8 YMnO₃ ⊥c 軸 同じ面におけるフーリエ変換結果

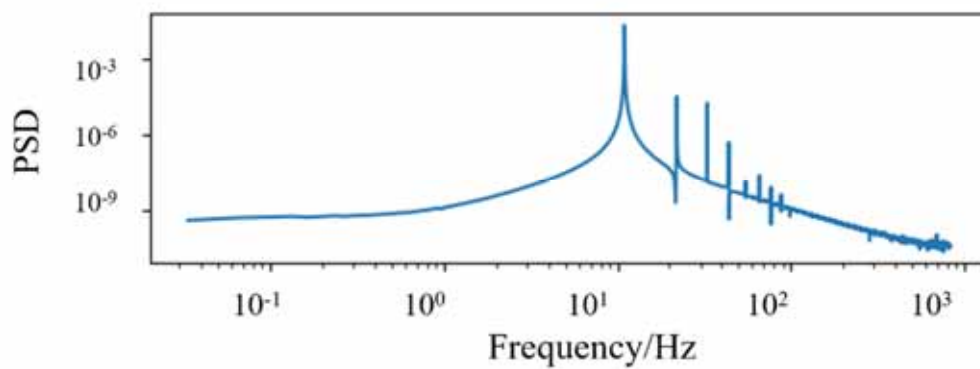


図 3.2.2.9 YMnO₃ ⊥c 軸 反対面におけるフーリエ変換結果

3.2.3 リザーバー波形生成タスク結果

3.2.2 の電圧測定結果を用いて、リザーバー波形生成タスクを実行した。Square/Sawtooth/Cos/Sin3W/Triangle/Sin2W の 6 種類の波形について、訓練波形から予測波形を作製し、ターゲット波形との正解率について調査した。4 種類の測定方法で 6 種類の波形における訓練波形・予測波形・ターゲット波形をそれぞれ図 3.2.3.1 図 3.2.3.2 図 3.2.3.3 および図 3.2.3.4 に示す。図では上から Square/Sawtooth/Cos/Sin3W/Triangle/Sin2W の 6 種類の波形を示している。図に示すように、4 種類の測定方法について、6 種類の波形それぞれでよいフィッティングを示していることがわかる。一方で、 $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸は、 $\text{YMnO}_3 // c$ 軸と比べ、予測波とターゲット波がよりよいフィッティングを示していることが明らかとなった。また、全ての測定方法における \cos 波では、予測波がターゲット波に対して非常によいフィッティングを示していることがわかる。これらの正解率をまとめたグラフを図 3.2.3.5 に示す。図より、すべての波形において高い正解率を示していることがわかる。さらに、 $\text{YMnO}_3 \perp c$ 軸・反対面で測定を行った試料について、他より高い正解率を示した。その一方で、 \cos 波では全ての測定方法について 99%を超える正解率が得られた。したがって、六方晶 YMnO_3 は RC 材料として有望であると考えられる。

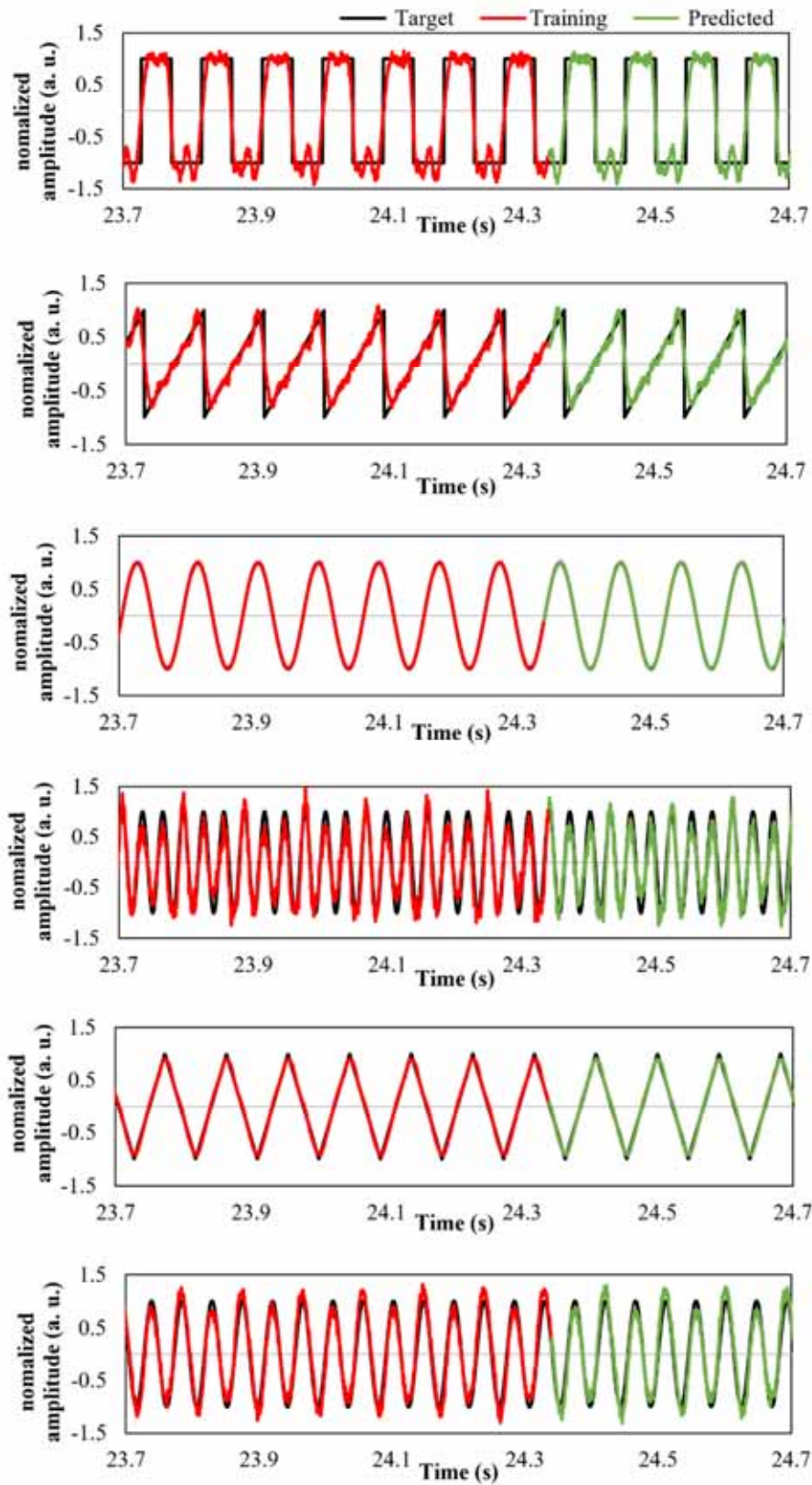


図 3.2.3.1 YMnO_3 //c 軸 同一面におけるリザーブ波形生成タスク
上から square/sawtooth/cos/sin3W/triangle/sin2W

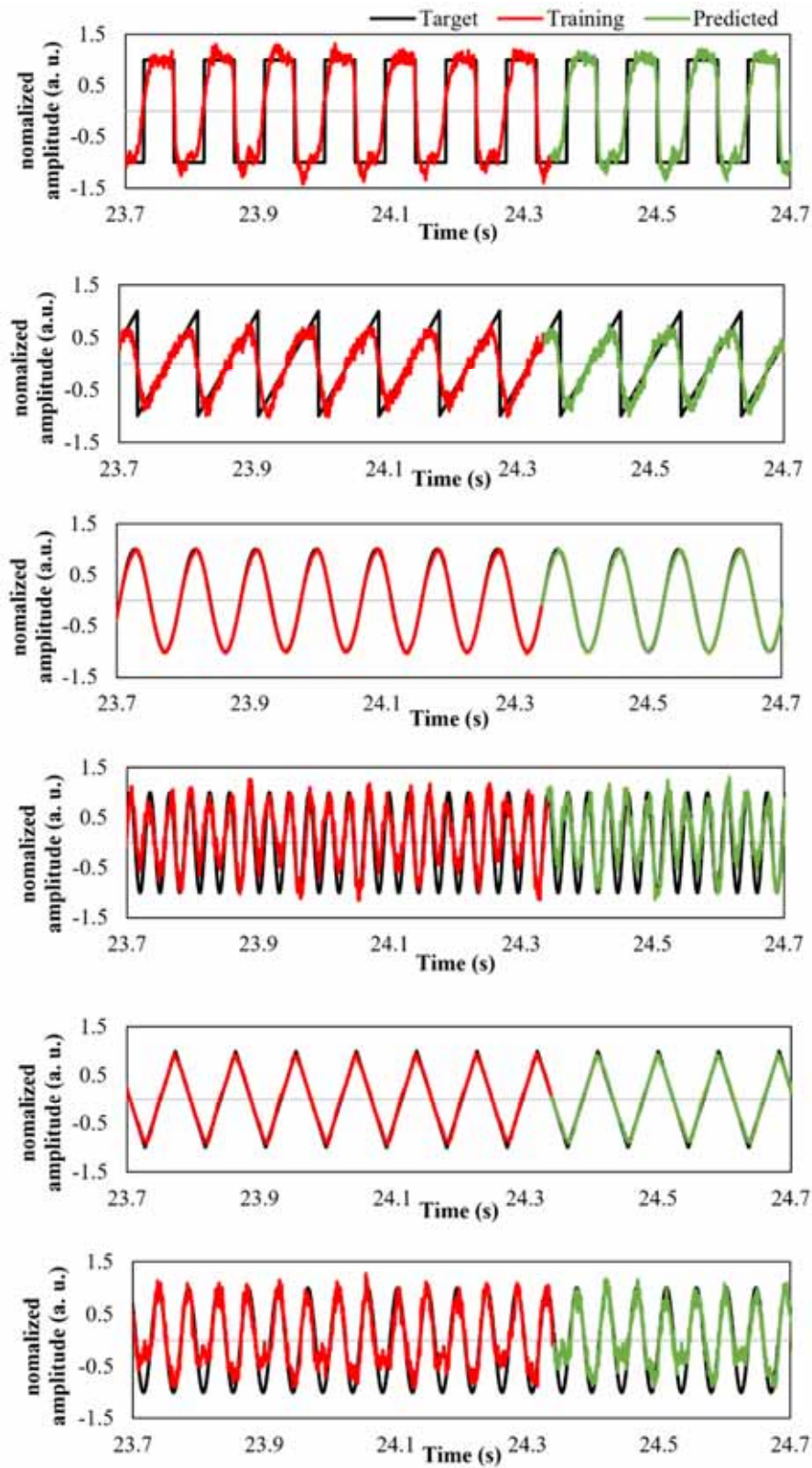


図 3.2.3.2 YMnO_3 //c 軸 反対面におけるリザーブ波形生成タスク
上から square/sawtooth/cos/sin3W/triangle/sin2W

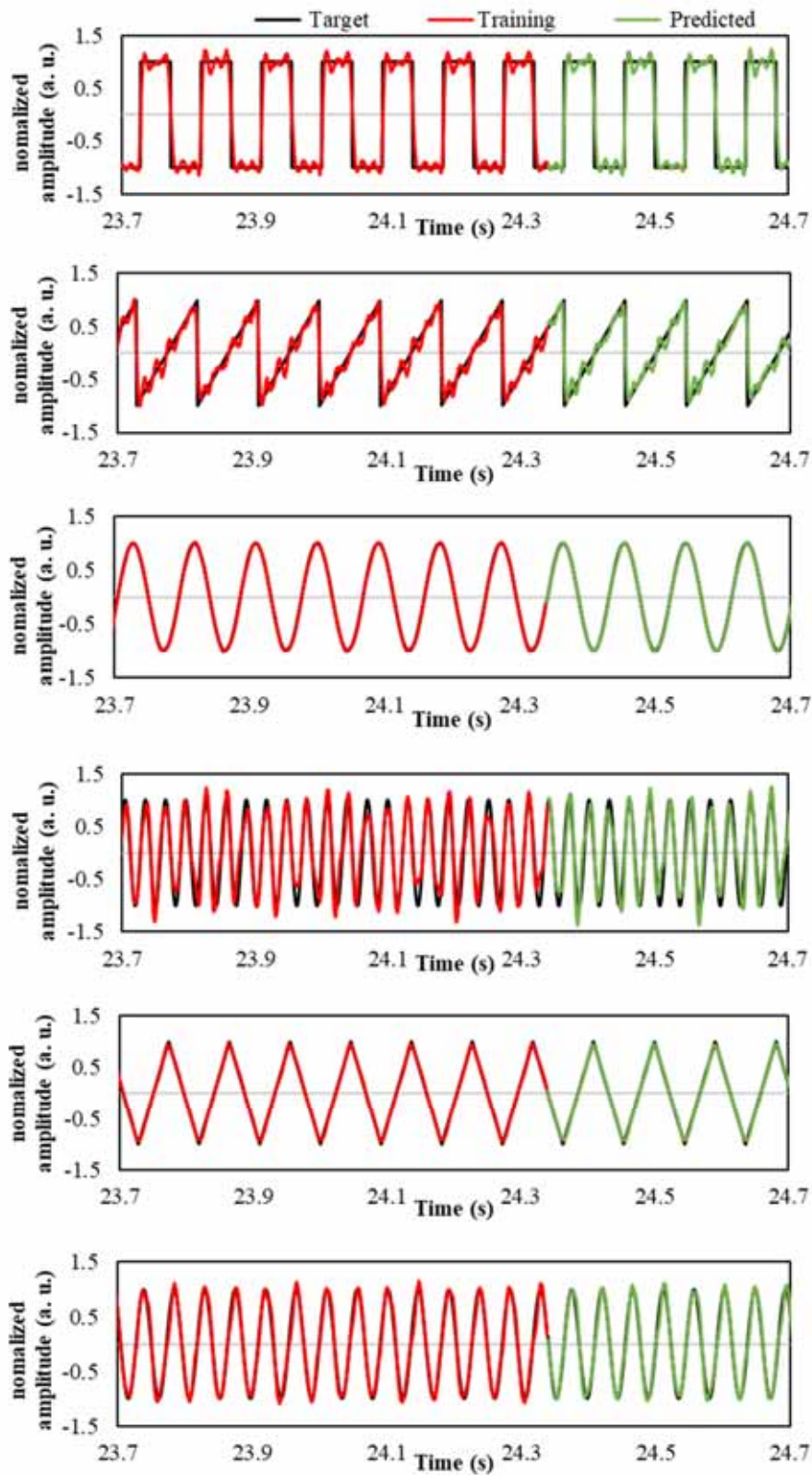


図 3.2.3.3 YMnO₃ ⊥c 軸 同一面におけるリザーバー波形生成タスク
上から square/sawtooth/cos/sin3W/triangle/sin2W

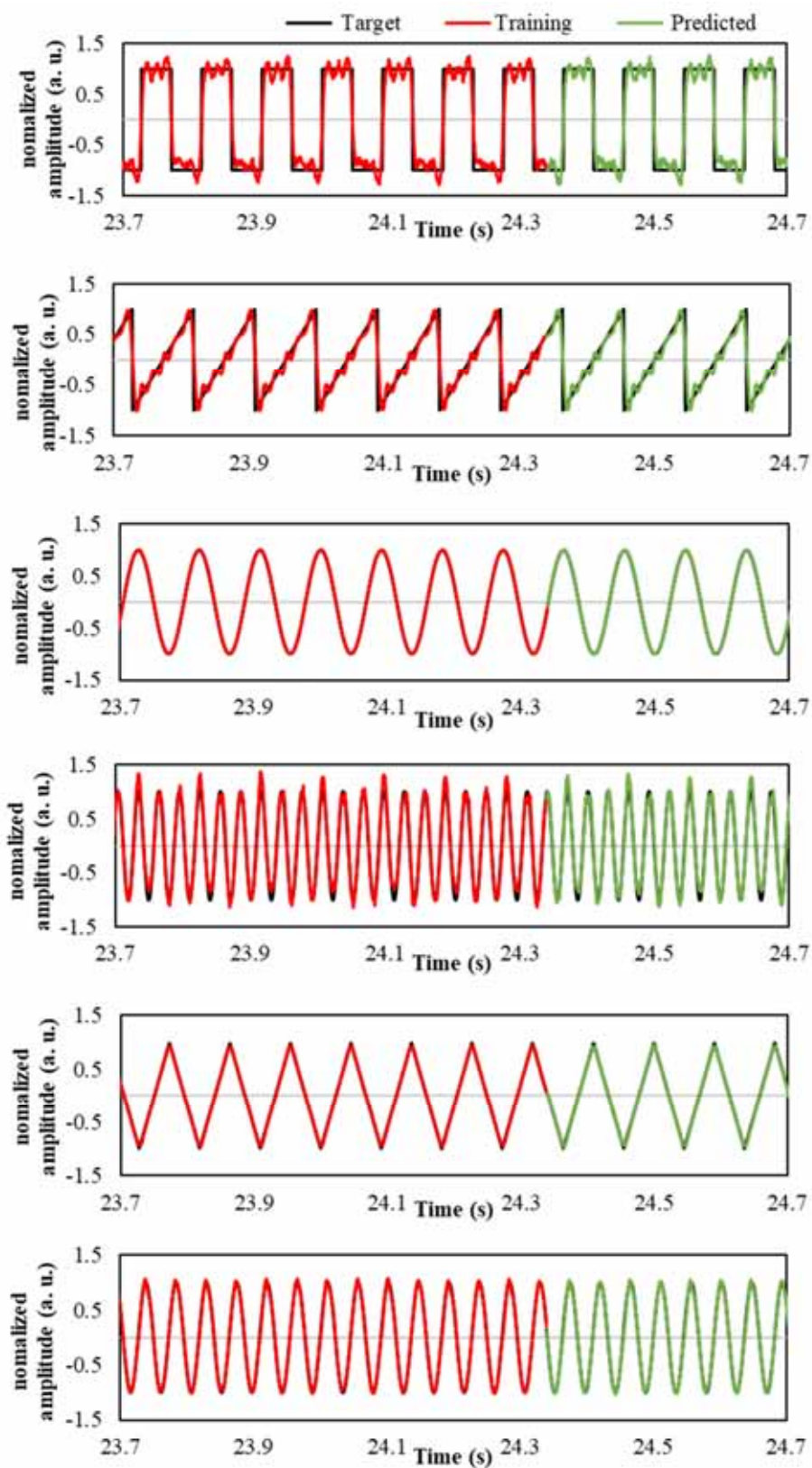


図 3.2.3.4 YMnO_3 $\perp c$ 軸 反対面におけるリザーバー波形生成タスク
上から square/sawtooth/cos/sin3W/triangle/sin2W

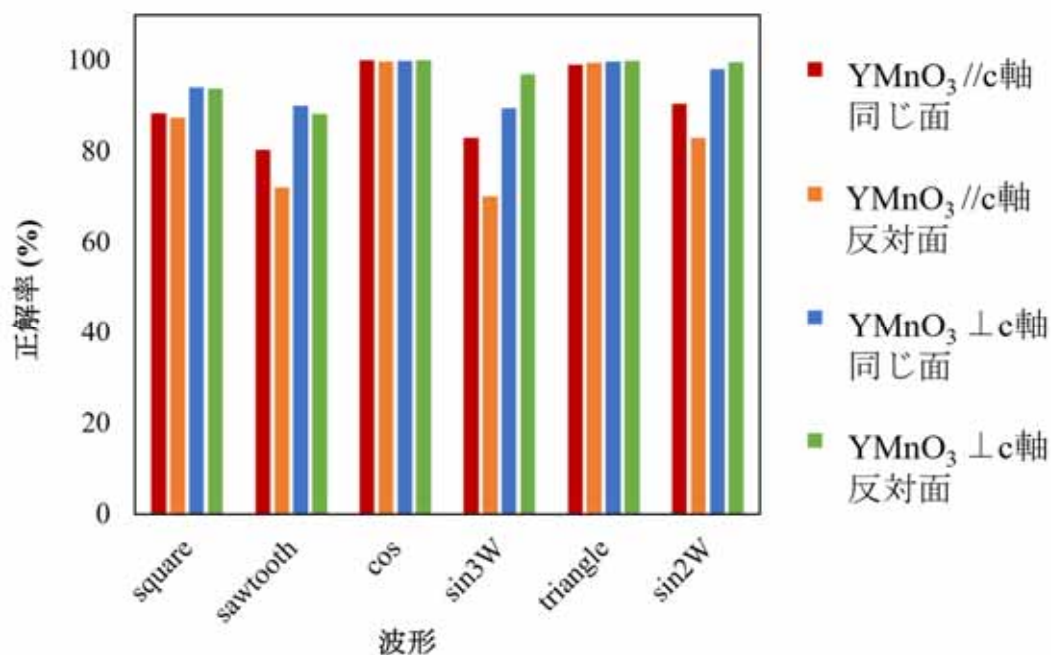


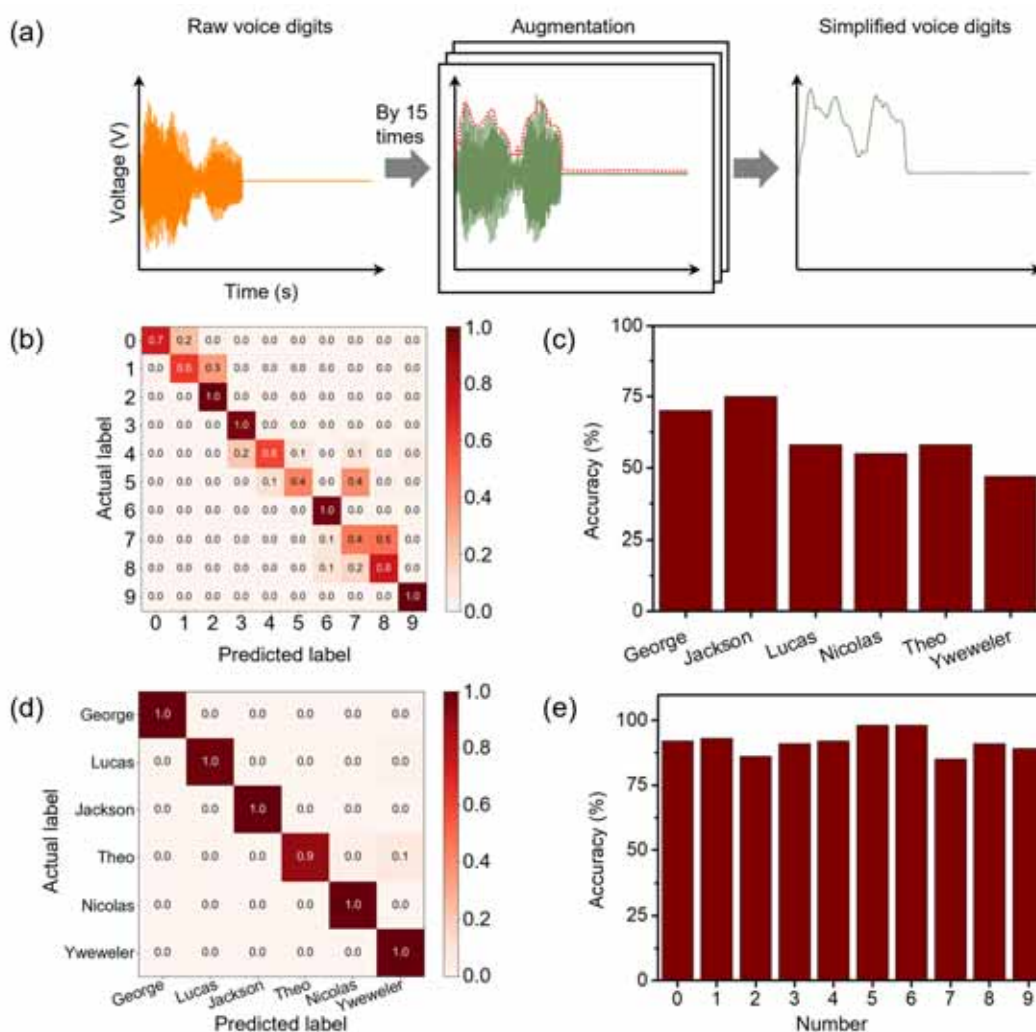
図 3.2.3.5 図 3.2.3.1-3.2.3.4 のリザーバー波形生成タスクから得られた正解率

3. 音声認識

音声認識タスクは、音声信号の高次元性により大きな課題を抱えている。従来、この分野では機械学習および深層学習手法が主流であった 24,25 が、これらは消費電力が大きいことで知られている。一部の PRC (RC) システムは高い精度を達成しているものの、多くのデバイスや複雑な前処理ステップを必要とすることが多く 26,27、その効率性を制限している。最近、スルホン化ポリアニリン (PANI) のランダムネットワークが、音声認識用の材料内リザーバーとして電力効率の向上を示した 28。しかし、安定かつ高性能な RC システムへの需要は依然として高い。

図 4 は、音声認識タスクにおける YMnO₃ デバイスの応用例を示す。Mel 周波数ケプストラム係数 (MFCC) 29 やコクレアグラム 28 といった従来の手法とは異なり、本研究では生の音声データに対して簡略化された前処理手法を採用した。図 4(a)および S10 に示すように、データベースの規模を拡大するため、生データを 15 倍に拡張した。次に、拡張されたデータを正の側に整流し、2000 ポイントから 100 ポイントへダウンサンプリングした。最後に、拡張データのエン

ベロープを導出し、音声数字の簡略化された表現を作成した。これを正規化して入力として使用した。この合理化された前処理手法は、ハードウェアでの実装が可能であり、ソフトウェアベースの手法と比較してエネルギー効率を大幅に向上させる可能性がある。NARMA2 タスクにおける優れた性能から、RC システムとして YMOI 構成 (YMOI,s および YMOI,o) が採用された。この構成は、異なる数字および話者に対して優れた認識精度を示し (図 4(b-e))、数字では最大 75%、話者では 98%の精度を達成した。これらの結果は、高い性能とエネルギー効率の両方を兼ね備えた YMOI ベースの PRC が、音声認識における実用的な応用において大きな可能性を秘めていることを示している。



5. 成果報告

【論文】

• M. Xu, K. Furuta, A. Karacali, Y. Umezaki, A. S. K. Zaman, Y. Usami, H. Tanaka, and Y. Horibe*, "Intrinsic Disordered Network in Multiferroic YMnO₃ Single Crystals for In-Materio Physical Reservoir Computing Through Tunable Domain-Wall Structure", *Small* 2025, e06397 1-12 (2025).

*Corresponding author

【学会発表】

< 発表 >

- "In-Materio Reservoir Computing in a Multiferroic YMnO₃ Single Crystal: A Hardware Preprocessing Approach for Energy-Efficient Spoken-Digit Recognition"
Muzhen Xu, Ahmet Karacali, Yoichi Horibe, Hirofumi Tanaka
The 7th International Symposium on Neuromorphic AI hardware: Jointly Organized with IEEE EDS Japan and Malaysia Chapters
(2025年10月04日 - 2025年10月05日)
- "Voice Recognition with High Accuracy Using K-Nearest Neighbors-Assisted In-materio Physical Reservoir Computing"
Muzhen Xu, Ahmet Karacali, Yuki Umezaki, Yoichi Horibe, Hirofumi Tanaka
International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC) 2025
(2025年11月17日 - 2025年11月20日)
- "Utilizing YMnO₃ Multiferroic Single Crystals for In-Materio Physical Reservoir Computing through Inherently Tunable Domain/Wall Structures"
Muzhen Xu, Kyoka Furuta, Ahmet Karacali, Yuki Umezaki, Yuki Usami, Hirofumi Tanaka, and Yoichi Horibe
Workshop on Neuromorphic Material Computation
(2025年12月22日)
- "In-materio Physical Reservoir Computing using an YMnO₃ Single Crystal for Power-efficient Voice Recognition"
Muzhen Xu, Ahmet Karacali, Yuki Umezaki, Yoichi Horibe, Hirofumi Tanaka
The 24th International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD 2026)
(2026年01月12日 - 2026年01月15日)