

---

令和5年度 修士学位論文

造船ぎょう鉄作業における  
作業支援システムの開発に関する研究

指導教員 池浦 良淳 教授

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
人間支援システム研究室  
森井 省吾

## 学位論文要旨及び論文目録

学位論文提出者	氏名	森井 省吾	専攻	機械工学	講座	量子・電子機械
研究領域名	ロボティクス・メカトロニクス					
学位論文題目	造船ぎょう鉄作業における作業支援システムの開発に関する研究					
論文審査委員	主査	池浦 良淳	副査	早川 聡一郎	副査	加藤 典彦
<b>学 位 論 文 要 旨</b>						
<p>ぎょう鉄とは造船において船体の作成に用いられる熱曲げ加工であり、鋼板に対してガスバーナ等での加熱による膨張と水での急冷による収縮を繰り返すことで、平板から三次元の形状を作成するというものである。ぎょう鉄の習熟難度は非常に高く、特に平板から船体の複雑な形状に至るまでの形状変化の過程を判断することが難しいとされている。このぎょう鉄の熟練者数が高齢化や継承者不足のため減少傾向にあり、造船業界において問題視されている。この問題に対し、精度評価のために用いられる木製の曲げ型の代わりにレーザースキャナを用いる手法や、目標とする形状の曲率から作業指示線を与える手法が提案されているが、前者については作業の効率化に留まっており、後者については作業線が与えられても形状変化の過程を判断するのは依然としてぎょう鉄熟練者の長年の経験や勘が必要となっている。本研究では作業者に求められる熟練度を下げることが目標に、鋼板の現在の形状と目標とする形状を基に作業員へ次の変形で作成する形状とその際の作業線を提示し、作業員は提示された形状になるように作業線を加熱することを繰り返して初期形状である平板から目標とする形状に近づけていくという作業支援システムの開発を行う。今回は簡単なシミュレータから教師データを作成し、目標とする形状に至るまでの形状変化の過程とそれに必要な加熱位置について機械学習を行い、精度確認することで本システムの有効性を示す。</p> <p>本システム実現のため、現在の鋼板の形状と目標とする形状を入力、次の変形で作成する形状とその際の加熱位置を出力とするニューラルネットワークを構築する。教師データの作成や機械学習後の精度検証のために、11×11個の点を正方形の格子状に並べて平板としてスタートし、加熱位置と曲げ角度を入力すると平板が変形していくのを繰り返す簡易的な三次元シミュレータを作成した。このシミュレータに加熱位置と曲げ角度を入力して変形前後の各点の座標を記録、変形を3回から10回繰り返し、ニューラルネットワークの入力を各変形前の座標と最終形状、出力を各加熱位置と各変形後の各点の座標とする教師データを作成した。しかしこの手法では変形後の各点の座標のデータが複雑であるため学習が上手くいかず、単純化のために教師データの出力を各加熱位置と各曲げ角度に変更して、これらを基に次の変形で作成する形状を作業員に提示する手法をとった。</p> <p>作成したニューラルネットワークと教師データを用いて機械学習を行った。学習後、ニューラルネットワークにシミュレータの現在の形状と目標とする形状の各点の座標を入力し、出力された加熱位置と曲げ角度をシミュレータに入力、変形後の形状と目標とする形状をニューラルネットワークに再度入力することで出力された加熱位置と曲げ角度をシミュレータに入力するという流れを繰り返すことで、平板から目標とする形状を作成できることを確認した。</p> <p>この結果から、鋼板の現在の形状と目標とする形状を基に作業員に次の変形で作成する形状とその際の作業線を提示する本システムの有効性を示した。今回作成したシミュレータは厳密にぎょう鉄作業を再現しているものではなく、厳密なシミュレータを作成することも非常に困難であるため、実際の熟練者によるぎょう鉄作業データを収集することや、変形前後の鋼板の形状を計測する装置を開発することが本システムを実現するための今後の課題である。</p>						
<b>論 文 目 録</b>						
<p>[1] Shogo MORII, Ryojun IKEURA, Soichiro HAYAKAWA, “Development of Operation Support System for Line Heating of Shipbuilding by Using Machine Learning”, SICE Annual Conference 2023, ThPOS1.20, at Mie University, 2023.9</p> <p>[2] 森井 省吾, 池浦 良淳, 早川 聡一郎, “造船ぎょう鉄作業における作業支援システムの開発”, 日本機械学会東海支部第73期総会・講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2024 (TEC2024), No.0046, 2024.3</p>						

# 目次

---

目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 本論文の構成.....	4
<b>第2章 三次元ぎょう鉄シミュレータ</b> .....	<b>6</b>
2.1 三次元シミュレータ仕様.....	6
2.2 シミュレータ内部処理.....	8
<b>第3章 教師データ作成及びニューラルネットワーク構築</b> .....	<b>10</b>
3.1 教師データ作成の流れ.....	10
3.2 教師データ学習前処理.....	13
3.3 ニューラルネットワーク構築.....	15
3.3.1 次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワーク.....	15
3.3.2 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワーク.....	17
<b>第4章 学習結果及び考察</b> .....	<b>19</b>
4.1 次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワークの学習.....	19
4.1.1 教師あり学習実行.....	19
4.1.2 学習精度確認.....	20
4.1.3 学習結果の考察.....	22
4.2 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワークの学習.....	23
4.2.1 教師あり学習実行.....	23
4.2.2 学習精度確認.....	24
4.2.3 学習結果の考察.....	30
<b>第5章 結論</b> .....	<b>31</b>
5.1 まとめ.....	31

---

目次

---

5.2 今後の課題.....	32
参考文献.....	33
謝辞.....	36

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

ぎょう鉄とは造船において船体の作成に用いられる熱曲げ加工である。ぎょう鉄の原理は Fig.1.1 の様に鋼板をガスバーナ等で加熱することで熱膨張が起こり、その部分に対し水を用いて急冷することで表面のみが収縮し、圧縮応力が発生して鋼板が曲がるというものである<sup>[1],[2]</sup>。これを活かして鋼板に対して線状加熱を行い、船体の複雑な形状に曲げていく。Fig.1.2<sup>[3]</sup>は実際のぎょう鉄作業風景であり、加工の精度は Fig.1.3<sup>[3]</sup>のような木製の曲げ型を当てて評価する。ぎょう鉄の習熟難度は非常に高く、その理由として入熱量に対して鋼板がどれだけ曲がるのかという感覚を掴むのが難しいことや、作業手順が現場任せで同じ形状を作成する作業であっても人によって作業手順が異なるためにマニュアル化が難しく、非熟練者は熟練者の作業を見様見真似で習得せざるを得ないこと等が挙げられるが、中でも平板の二次元形状からどのような形状を経て船体の複雑な三次元形状に至るのかを判断するのが特に難しいとされており、これらの理由から熟練者になるには 20 年以上の歳月を要するとも言われている<sup>[4],[5]</sup>。このぎょう鉄の熟練技能者数が高齢化や継承者不足のため減少傾向にあり<sup>[6]</sup>、造船業界において非常に問題視されている。

この問題に対して、満行らは精度評価のために用いられる木製の曲げ型の代わりにレーザースキャナを用いる手法<sup>[7]</sup>を提案しているが、作業の効率化に留まっている。また、松尾らは目標とする船体形状の曲率から加熱線を与える曲率線展開法<sup>[8]</sup>を提案し、これをぎょう鉄の人材育成に適用した手法<sup>[9]</sup>を提案しているが、加熱線が与えられても形状変化の過程を判断するのは依然としてぎょう鉄熟練者の長年の経験や勘が必要となっている。このように、ぎょう鉄作業者に求められる熟練度は非常に高く、短期間での習熟は困難を極める。そのため、ぎょう鉄作業を支援し求められる熟練度を下げるシステムの開発が求められる。

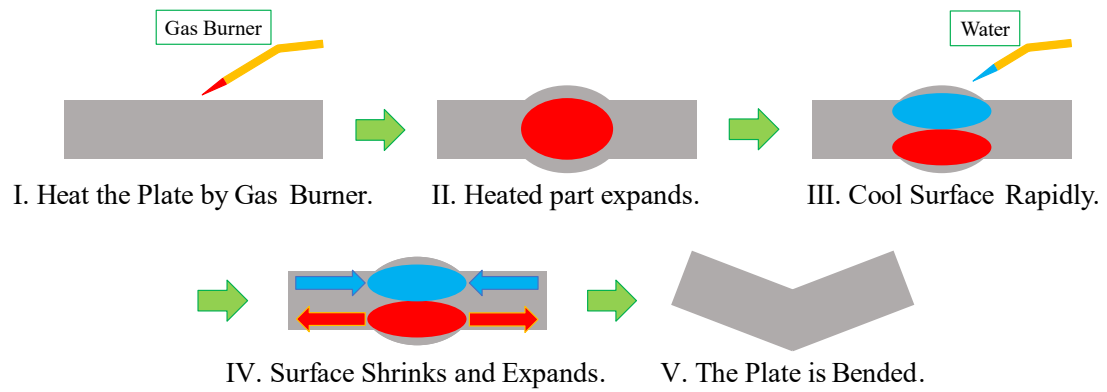


Fig.1.1 ぎょう鉄の原理

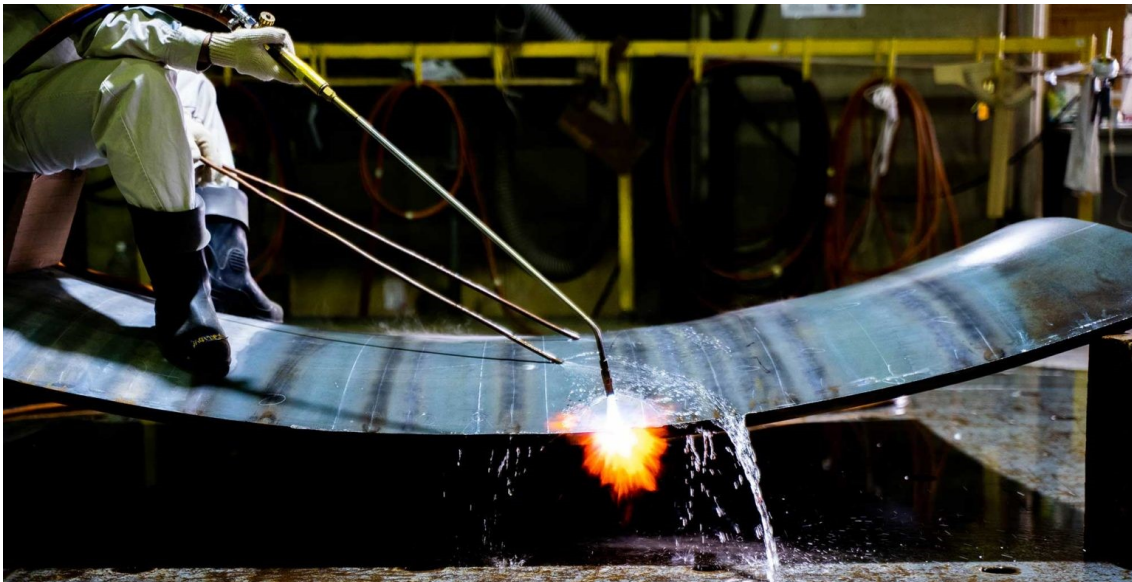


Fig.1.2 ぎょう鉄の作業風景<sup>[3]</sup>



Fig.1.3 精度評価に用いる木製の曲げ型<sup>[3]</sup>

## 1.2 研究目的

熟練技能を要する作業をモデルにした解析や研究は数多く行われている。馬渡らは書道において達人の運筆を解析することで運筆活動を数理空間における理論展開の形式で導出し、運筆活動に関する身体知の継承利用をロボット上で可能にする制御解析法<sup>[10]</sup>を提案している。また小山らは旋盤作業において仮想感覚を利用した熟練技能者の作業解析手法<sup>[11],[12]</sup>を提案している。

さらに、機械学習に関する研究が近年盛んに行われている。シミュレータを動作させて最適な行動を予測する強化学習については将棋や囲碁のモデルに代表<sup>[13]</sup>され、現在はプロに勝利するようなAIが開発されている。前川らはFEM(Finite Element Method)シミュレーションを用いた強化学習を行い線状加熱における加熱位置を提示するシステム<sup>[14]</sup>を提案している。しかし、強化学習には学習するモデルに忠実なシミュレータが必要不可欠であるが、ぎょう鉄において多数の変動因子を持つ入熱量と角変形の関係は非常に複雑で、実際のぎょう鉄を忠実に再現するシミュレータを作成することは困難を極める。他にも、機械学習にはニューラルネットワークの入力と出力に教師データを与え、入力と出力の関係を学習することで、入力に対する未知の出力を導く教師あり学習がある。Yangらは布の折り畳み動作をモデルに人間が遠隔でロボットに教示する手法<sup>[15]</sup>を提案している。また、大山らはモーションキャプチャを用いて人間の手先位置や角度の変位からデータを取得し教師あり学習を行う手法<sup>[16]</sup>を提案している。山根らはボウルの拭き作業を対象として、人間が力を加える側と環境からの反力を受ける側の2台のロボットを用いたバイテラル制御に基づく模倣学習を行い、様々な三次元曲面形状の拭き動作を可能にする手法<sup>[17]</sup>を提案している。これらの教師あり学習は状態と行動の組の時系列データとして表現された人間の操作データを用いて、現在の状態を入力、次のステップの行動を出力とする教師あり学習は模倣学習と呼ばれ、人間が操作して成功したデータを用いて学習を行うため、教師あり学習のなかでもサンプル効率が高い手法である。また、Qiらによって三次元点群に対する機械学習方法<sup>[18],[19]</sup>が確立された。武田らは被災前後の建築物の画像データを三次元点群データに変換し、震災等による建築物の倒壊判定手法<sup>[20]</sup>の提案をしている。江守らは道路を計測した三次元点群データから白線を自動抽出する手法<sup>[21]</sup>の提案をしている。

本研究では、ぎょう鉄作業者に求められる熟練度を下げることが目標に、鋼板の形状を三次元点群として扱い、ぎょう鉄熟練者による実際の作業データと形状変化の過程を



学習することで、非熟練者へ作業内容を提示し平板から目標とする形状を作成する作業支援システムの開発を行う。本システムの流れは Fig.1.4 に示すように、現在の鋼板の形状と目標とする形状を作業支援システムに入力すると、次の変形で作るべき形状とその際の加熱位置が出力される。作業者は出力された加熱位置に従ってフィードバックしながら鋼板を曲げていき、出力された形状を作ることができれば、これと目標とする形状を再度作業支援システムに入力して新たに出力された内容に従って鋼板を曲げるという流れを繰り返して目標とする形状を作成するというものである。この手法を用いることで、ぎょう鉄の中でも特に難しいとされる平板から目標形状までの形状変化過程の判断を作業者が行う必要がなくなり、求められる熟練度を下げることができる。

このシステム実現のため、鋼板の現在の形状と目標とする形状を入力、次の変形で作るべき形状とその際の加熱位置を出力とする Fig.1.5 に示すようなニューラルネットワークを構築し、ぎょう鉄熟練者による実際の作業データを用いて教師あり学習を行う。ぎょう鉄熟練者の作業内容とそれに対する形状変化の結果のみを用いて学習を行うため、前述の入熱量と角変形の関係が複雑であり熟練度を要するという問題を解決することができる。

今回は簡単なシミュレータから教師データを作成し、目標とする形状に至るまでの形状変化の過程とそれに必要な加熱位置について教師あり学習を行い、精度の確認をすることで本システムの有効性を示す。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず第2章では教師データの用意や学習後のニューラルネットワークの精度を確認するために作成した三次元シミュレータについて説明する。次に第3章ではシミュレータを用いた教師データの作成手順や、これを用いて学習を行うニューラルネットワークの構築について説明する。第4章では構築したニューラルネットワークで教師あり学習を行った結果とそれに対する考察について説明する。最後に第5章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。



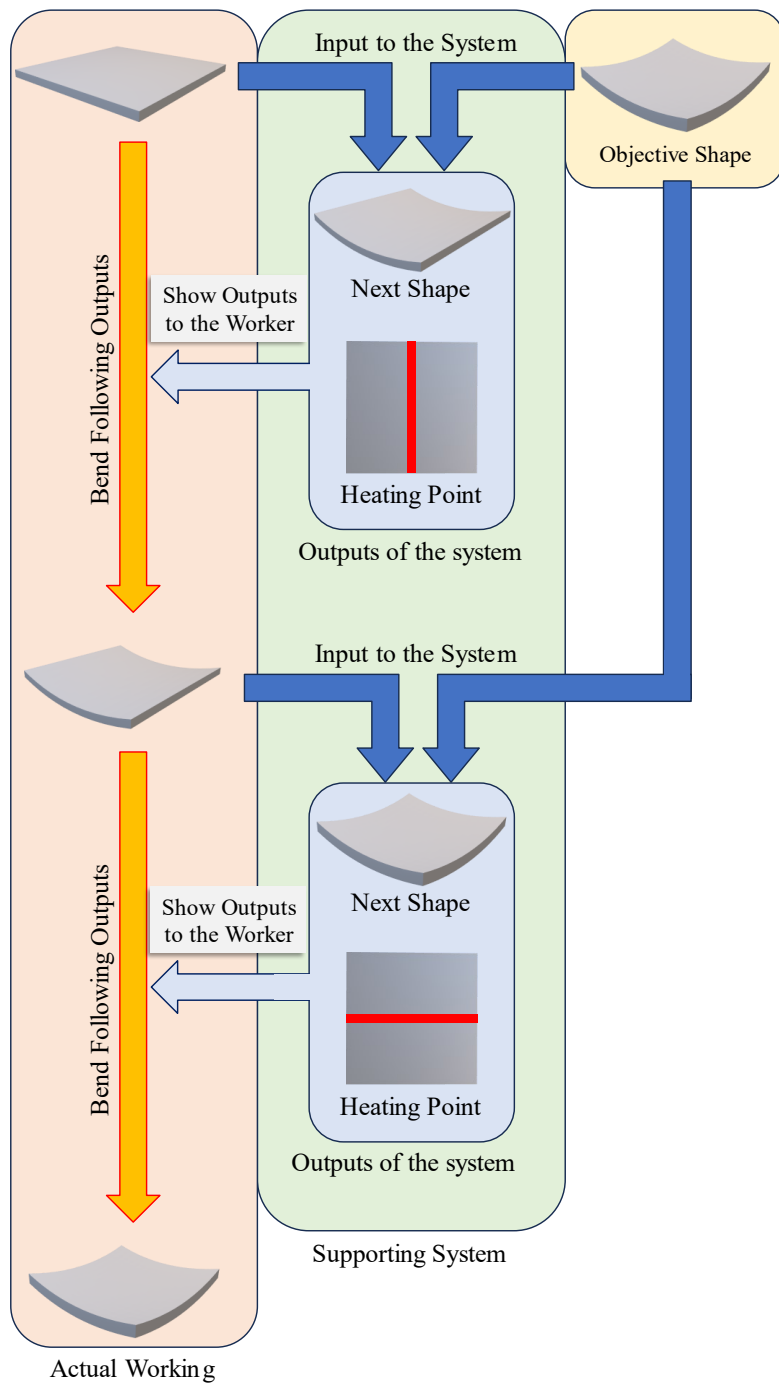


Fig.1.4 作業支援システム実用の流れ

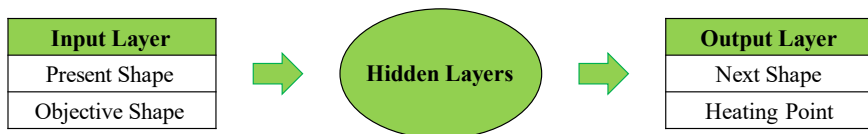


Fig.1.5 構築するニューラルネットワーク

# 第2章

## 三次元ぎょう鉄シミュレータ

本章では、教師データ作成や機械学習後の精度確認に用いるために作成した、三次元ぎょう鉄シミュレータについて説明する。2.1 節にてシミュレータの仕様について説明し、2.2 節にてシミュレータで行われている処理について説明する。

### 2.1 三次元ぎょう鉄シミュレータ仕様

機械学習に用いる教師データ作成のため、ぎょう鉄をモデルとした三次元シミュレータを作成した。本シミュレータの仕様について説明する。まず、初期形状である平板の大きさを指定し、その大きさに応じて三次元空間における $xy$ 平面上に間隔が 1 となるよう格子状に点を置いてそれぞれを結ぶ。次に、加熱線の始点・終点と平板を曲げる角度をシミュレータに入力すると、それに応じて平板が変形する。続いて加熱線の始点・終点と曲げ角度を入力すると変形した形状から更に変形するというものである。また、曲がり方の指定が出来なかったため、本シミュレータでは加熱線の始点・終点の指定を平板の端点のみに限定している。実際のぎょう鉄は平板の端点を通らない加熱線の指定や一点での加熱が行われるが、ぎょう鉄作業支援システムを実用するにはぎょう鉄熟練者による実際の作業データを用いて教師あり学習を行う想定であり、その作業に対応した形状変化は自ずと得られるため、今回は考慮していない。

平板の大きさを  $4 \times 4$  で指定してシミュレータを操作したものを Fig.2.1 に示す。

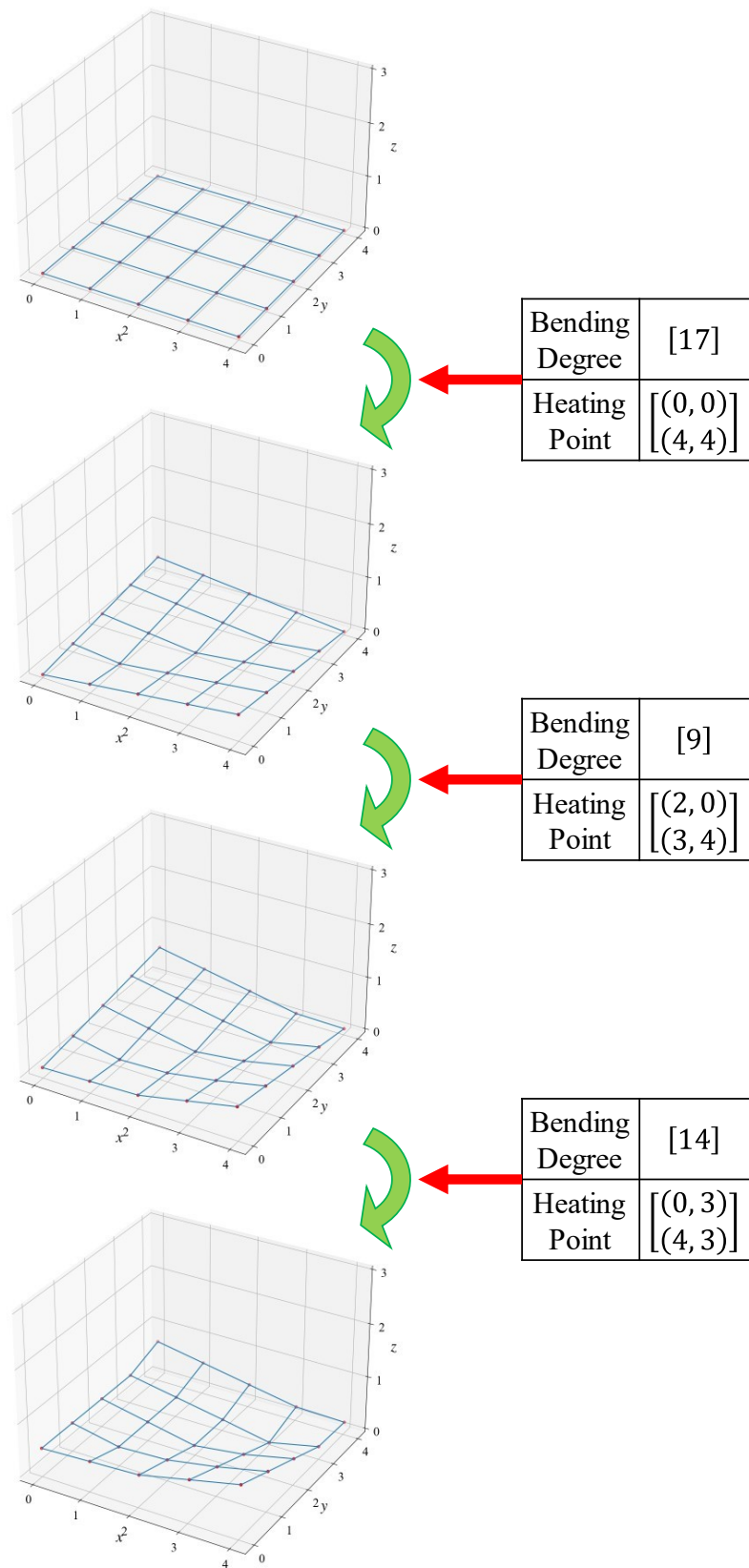


Fig.2.1 シミュレータ動作の流れ

## 2.2 シミュレータ内部処理

2.1 節で説明したシミュレータで行っている処理について説明する。本シミュレータは Python にてプログラミングを行った。平板の大きさを指定して配置される各点は  $x, y, z$  それぞれについて座標データを持っており、変形する際に各点の座標データが変化する。変形する際の処理については、式(2.1)に示すロドリゲスの回転公式を全ての点に対して適用している。

$$\vec{r}' = \begin{cases} (\cos \theta)\vec{r} + (1 - \cos \theta)(\vec{r} \cdot \vec{n})\vec{n} + (\sin \theta)(\vec{n} \times \vec{r}), & \vec{n} \times \vec{r} \geq 0 \\ (\cos \theta)\vec{r} + (1 - \cos(-\theta))(\vec{r} \cdot \vec{n})\vec{n} + (\sin(-\theta))(\vec{n} \times \vec{r}), & \vec{n} \times \vec{r} < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

各パラメータについては、加熱線を軸としてその単位ベクトルを  $\vec{n}$  としており、各点の位置ベクトルを  $\vec{r}$ 、曲げ角度は、加熱線の左右どちらに位置する点かで正負が入れ替わるため、 $\vec{n}$  と  $\vec{r}$  の外積が 0 以上の場合は  $\theta$ 、0 未満の場合は  $-\theta$  としている。

また、加熱線を軸としている仕様上、変形を繰り返していくと全体が  $z$  軸正の方向に移動してしまうため、変形毎に  $z$  座標の最小値を全点から引く処理をすること  $z$  座標の最小値が 0 となり、いずれかの点が  $xy$  平面に触れるようにしている。

Fig.2.1 で示したシミュレータ動作時の各点の座標データを小数第 3 位で四捨五入したものを Fig.2.2 に示す。機械学習を行う際に用いる教師データの作成には Fig.2.1 のような画像データではなく、各点の座標データを鋼板の形状として扱う。

(0.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)	(2.00, 0.00, 0.00)	(3.00, 0.00, 0.00)	(4.00, 0.00, 0.00)
(0.00, 1.00, 0.00)	(1.00, 1.00, 0.00)	(2.00, 1.00, 0.00)	(3.00, 1.00, 0.00)	(4.00, 1.00, 0.00)
(0.00, 2.00, 0.00)	(1.00, 2.00, 0.00)	(2.00, 2.00, 0.00)	(3.00, 2.00, 0.00)	(4.00, 2.00, 0.00)
(0.00, 3.00, 0.00)	(1.00, 3.00, 0.00)	(2.00, 3.00, 0.00)	(3.00, 3.00, 0.00)	(4.00, 3.00, 0.00)
(0.00, 4.00, 0.00)	(1.00, 4.00, 0.00)	(2.00, 4.00, 0.00)	(3.00, 4.00, 0.00)	(4.00, 4.00, 0.00)



Bending Degree

[17]

Heating Line

[(0, 0)]
[(4, 4)]

(0.00, 0.00, 0.00)	(0.99, 0.01, 0.10)	(1.99, 0.01, 0.21)	(2.98, 0.02, 0.31)	(3.98, 0.02, 0.42)
(0.01, 0.99, 0.10)	(1.00, 1.00, 0.00)	(1.99, 1.01, 0.10)	(2.99, 1.01, 0.21)	(3.98, 1.02, 0.31)
(0.01, 1.99, 0.21)	(1.01, 1.99, 0.10)	(2.00, 2.00, 0.00)	(2.99, 2.01, 0.10)	(3.99, 2.01, 0.21)
(0.02, 2.98, 0.31)	(1.01, 2.99, 0.21)	(2.01, 2.99, 0.10)	(3.00, 3.00, 0.00)	(3.99, 3.01, 0.10)
(0.02, 3.98, 0.42)	(1.02, 3.98, 0.31)	(2.01, 3.99, 0.21)	(3.01, 3.99, 0.10)	(4.00, 4.00, 0.00)



Bending Degree

[9]

Heating Line

[(2, 0)]
[(3, 4)]

(0.00, 0.01, 0.13)	(0.99, 0.01, 0.16)	(1.99, 0.01, 0.19)	(2.97, 0.02, 0.37)	(3.96, 0.03, 0.55)
(0.01, 1.00, 0.26)	(0.99, 1.01, 0.08)	(1.99, 1.01, 0.10)	(2.98, 1.01, 0.25)	(3.97, 1.02, 0.43)
(0.02, 1.99, 0.38)	(1.01, 2.00, 0.20)	(1.99, 2.00, 0.02)	(3.00, 2.01, 0.12)	(3.98, 2.02, 0.30)
(0.04, 2.98, 0.50)	(1.02, 2.99, 0.32)	(2.01, 3.00, 0.14)	(3.01, 3.00, 0.00)	(3.99, 3.01, 0.18)
(0.05, 3.98, 0.62)	(1.04, 3.98, 0.44)	(2.02, 3.99, 0.26)	(3.01, 3.99, 0.09)	(4.01, 4.00, 0.06)



Bending Degree

[14]

Heating Line

[(0, 3)]
[(4, 3)]

(0.02, 0.00, 0.49)	(1.02, 0.00, 0.52)	(2.02, 0.01, 0.55)	(3.00, 0.06, 0.73)	(3.99, 0.10, 0.91)
(0.03, 0.98, 0.50)	(1.01, 0.98, 0.32)	(2.01, 0.99, 0.35)	(3.00, 1.03, 0.49)	(3.99, 1.07, 0.66)
(0.03, 1.98, 0.50)	(1.02, 1.98, 0.32)	(2.00, 1.97, 0.14)	(3.01, 2.00, 0.24)	(3.99, 2.04, 0.42)
(0.04, 2.98, 0.50)	(1.02, 3.00, 0.32)	(2.01, 3.02, 0.14)	(3.01, 2.97, 0.00)	(3.99, 3.01, 0.18)
(0.06, 3.95, 0.74)	(1.05, 3.97, 0.56)	(2.03, 3.99, 0.38)	(3.02, 4.01, 0.20)	(4.01, 4.01, 0.18)

Fig.2.2 各ポイント座標データ

# 第3章

## 教師データ作成及び ニューラルネットワーク構築

本章では教師データ作成の流れと、それをを用いて学習するニューラルネットワークについて説明する。まず3.1節で第2章にて説明した三次元シミュレータを用いた教師データ作成の流れを説明する。また3.2節では、作成した教師データの学習前処理について説明する。3.3節では作成した教師データで学習を行うニューラルネットワークの構築について説明する。

### 3.1 教師データ作成の流れ

第2章にて説明した三次元ぎょう鉄シミュレータを用いて、機械学習に用いる教師データを作成した。その流れについて説明する。教師データとして扱うのは現在の形状、加熱位置、曲げ角度、次の形状、最終形状の5つである。

今回は全て  $10 \times 10$  の大きさの平板から変形していくデータを作成した。最初に最終形状までの曲げ回数を3回から10回のランダムで指定する。そして平板を現在の形状とし、シミュレータに加熱線の始点・終点と角度をランダム入力して形状を変形させ、入力した始点・終点を加熱位置、角度を曲げ角度、変形後の形状を次の形状として教師データで扱いここまでを1組とする。ここで入力する角度の最大値は20とし、整数で入力している。更に、次の形状とした形状を現在の形状とし、再度シミュレータに加熱位置と曲げ角度を入力して形状を変形させる。この流れを最初に指定した回数繰り返して作られた形状を最終形状として、これを全ての組に与える。この最終形状は、本作業支援システム実用時の目標形状に相当する。ここまでの流れを1セットとし、これを100セット用意して教師データとした。また、加熱位置と曲げ角度をランダム入力にし

ている関係上, 同じ最終形状であっても順番を入れ替える等の複数の曲げ手順が存在してしまい, 1つのデータに対して複数の正解が存在するという教師あり学習にとって不都合が生じてしまう. そのため, 曲げ角度を前回の曲げ角度を超えないようにすることで, 曲げるべき角度が大きい場所から曲げることになり, 1つの最終形状に対して複数の曲げ手順が存在しないようにした.

例として曲げ回数が3回, 1回目の加熱線の始点と終点が $[0, 0]$ ,  $[10, 10]$ で曲げ角度が17, 2回目の加熱線の始点と終点が $[0, 10]$ ,  $[10, 0]$ で曲げ角度が12, 3回目の加熱線の始点と終点が $[5, 0]$ ,  $[5, 10]$ で曲げ角度が8でシミュレータを動作させた流れを Fig.3.1 に示し, この際の各データの教師データへの割り当てを Table 3.1 に示す.



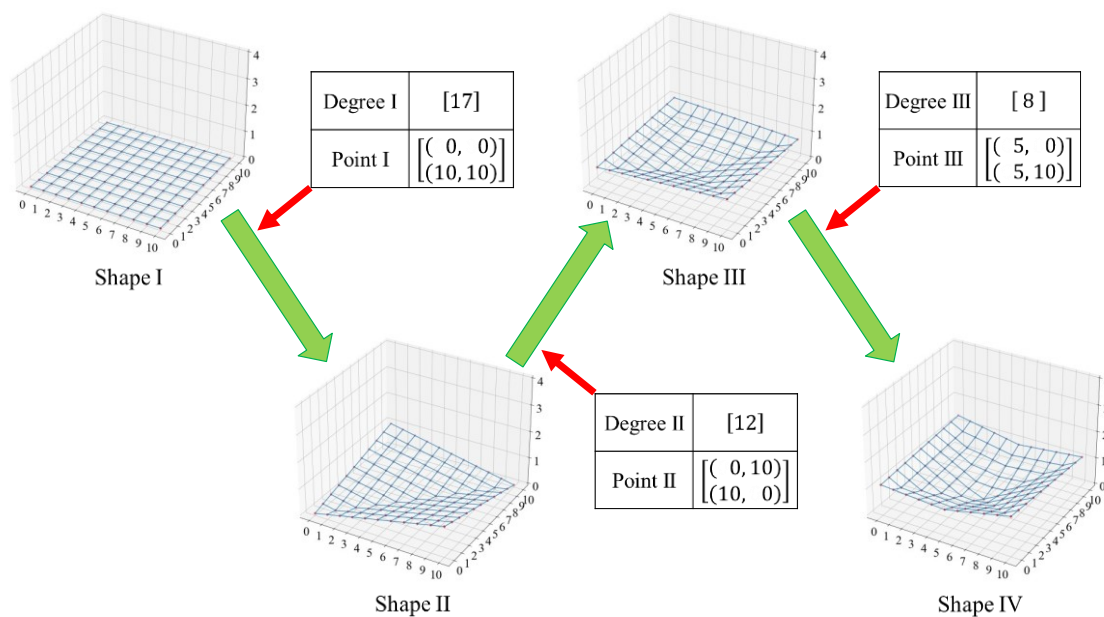


Fig.3.1 教師データ作成の流れ

Table 3.1 各データの教師データへの割り当て

	Present Shape	Bending Degree	Heating Point	Next Shape	Objective Shape
Teaching Data I	Shape I	Degree I	Point I	Shape II	Shape IV
Teaching Data II	Shape II	Degree II	Point II	Shape III	Shape IV
Teaching Data III	Shape III	Degree III	Point III	Shape IV	Shape IV

### 3.2 教師データ学習前処理

教師あり学習を行う際は、事前に教師データの正規化や次元化などの処理を行い、内容や構造を学習しやすいデータに整える必要がある。作成した教師データに対して行った学習前処理について説明する。

現在の形状、次の形状、最終形状についてはそれぞれ同様の処理を行っており、第2章 Fig.2.2 で示したような  $11 \times 11 \times 3$  の各点の座標データを用いる。

$$S = [(X, Y, Z)] = \begin{bmatrix} (x_{0,0}, y_{0,0}, z_{0,0}) & \cdots & (x_{0,10}, y_{0,10}, z_{0,10}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{10,0}, y_{10,0}, z_{10,0}) & \cdots & (x_{10,10}, y_{10,10}, z_{10,10}) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

まずは各点の座標データから初期形状である平板の座標値を引くことで、各座標データの初期形状からの変位を出す。

$$\begin{aligned} S' &= [(X', Y', Z')] \\ &= [(X, Y, Z)] - [(X_p, Y_p, Z_p)] \\ &= \begin{bmatrix} (x_{0,0}, y_{0,0}, z_{0,0}) & \cdots & (x_{0,10}, y_{0,10}, z_{0,10}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{10,0}, y_{10,0}, z_{10,0}) & \cdots & (x_{10,10}, y_{10,10}, z_{10,10}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (0, 0, 0) & \cdots & (10, 0, 0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (0, 10, 0) & \cdots & (10, 10, 0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

次に、座標データを3分割して  $11 \times 11$  の  $x, y, z$  座標データを作成し、特徴量を抽出しやすくするためそれぞれを正規化する。ここでの  $x'_{\max}$ ,  $x'_{\min}$  は、それぞれ全教師データにおける各点の初期形状からの  $x$  座標変位の最大値、最小値である。

$$X_{\text{norm}} = \frac{X' - x'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}} = \begin{bmatrix} \frac{x'_{0,0} - x'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}} & \cdots & \frac{x'_{0,10} - x'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x'_{10,0} - x'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}} & \cdots & \frac{x'_{10,10} - x'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$Y_{\text{norm}} = \frac{Y' - y'_{\min}}{y'_{\max} - y'_{\min}} = \begin{bmatrix} \frac{y'_{0,0} - y'_{\min}}{y'_{\max} - y'_{\min}} & \cdots & \frac{y'_{0,10} - y'_{\min}}{y'_{\max} - y'_{\min}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{y'_{10,0} - y'_{\min}}{y'_{\max} - y'_{\min}} & \cdots & \frac{y'_{10,10} - y'_{\min}}{y'_{\max} - y'_{\min}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$Z_{\text{norm}} = \frac{Z' - z'_{\min}}{z'_{\max} - z'_{\min}} = \begin{bmatrix} \frac{z'_{0,0} - z'_{\min}}{z'_{\max} - z'_{\min}} & \cdots & \frac{z'_{0,10} - z'_{\min}}{z'_{\max} - z'_{\min}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{z'_{10,0} - z'_{\min}}{z'_{\max} - z'_{\min}} & \cdots & \frac{z'_{10,10} - z'_{\min}}{z'_{\max} - z'_{\min}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

最後に正規化した座標データを結合して1つのデータにまとめる。

$$S_{\text{norm}} = [(X_{\text{norm}}, Y_{\text{norm}}, Z_{\text{norm}})] \tag{3.6}$$

これらの処理を行った後, [11 × 11 × 3]のデータ形状から[363]のデータ形状へ一次元化して教師データとする。

教師データとしての加熱位置は, 各点が加熱線の始点・終点であるか否かの二値分類を行うため, Table 3.1 の様に 11 × 11 の空行列における入力した加熱線の始点と終点に対応する要素を 1 に変換したものを扱う。このデータは 0 と 1 の要素しか含まないため正規化は不要であり, [11 × 11]のデータ形状から[121]のデータ形状への一次元化処理のみを行い教師データをする。

曲げ角度は最初から一次元データであるため, 正規化処理のみ行う。

$$\theta_{\text{norm}} = \frac{\theta - \theta_{\text{min}}}{\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}} \tag{3.7}$$

各教師データの前処理前後のデータ形状を Table 3.2 に示す。

Table 3.1 加熱位置データ変換例

Heating Point Input into the Simulator	Heating Point as Teaching Data
$\begin{bmatrix} (2, 0) \\ (5, 10) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Table 3.2 前処理前後の各データ形状

	Before Preprocessing	After Preprocessing
<b>Present Shape</b>	[11, 11, 3]	[363]
<b>Bending Degree</b>	[1]	[1]
<b>Heating Point</b>	[11, 11]	[121]
<b>Next Shape</b>	[11, 11, 3]	[363]
<b>Objective Shape</b>	[11, 11, 3]	[363]

### 3.3 ニューラルネットワーク構築

作成した教師データを用いて学習するニューラルネットワークを構築した。まずは入力を現在の形状と最終形状、出力を次の形状と加熱位置とするニューラルネットワークを構築したが学習が上手くいかなかったため、次に入力は共通で出力を曲げ角度と加熱位置とするニューラルネットワークを構築した。これらの構築した2つのニューラルネットワークについて説明する。

なお、ニューラルネットワークの理論や構築手順は齋藤康毅著「ゼロから作る Deep learning—Python で学ぶディープラーニングの理論と実装」<sup>[22]</sup>を参考にし、ニューラルネットワークのライブラリには Google が開発した Tensorflow 上で動作するオープンソースライブラリである Keras<sup>[23]</sup>を用いた。

#### 3.3.1 次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワーク

現在の形状と最終形状を入力、次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワークを構築した。まず入力層で2つの入力を結合し、4つの中間層を経て、最後の中間層から2つ出力層へ渡している。全ての中間層は全結合層であり、各ニューロンから次のニューロンに値をどのように出力するかを決める活性化関数には式(3.8)に示す ReLU(Rectified Linear Unit)関数を用いている。

$$h(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

また、次の形状に対応する出力層の活性化関数は回帰分析に扱われる式(3.9)に示す恒等関数、加熱位置に対応する出力層の活性化関数は二値分類に扱われる式(3.10)に示すシグモイド関数を用いている。

$$h(x) = x \quad (3.9)$$

$$h(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3.10)$$

ここで構築したニューラルネットワークにおける設定した各層のニューロン数を Fig.3.2 に示す。

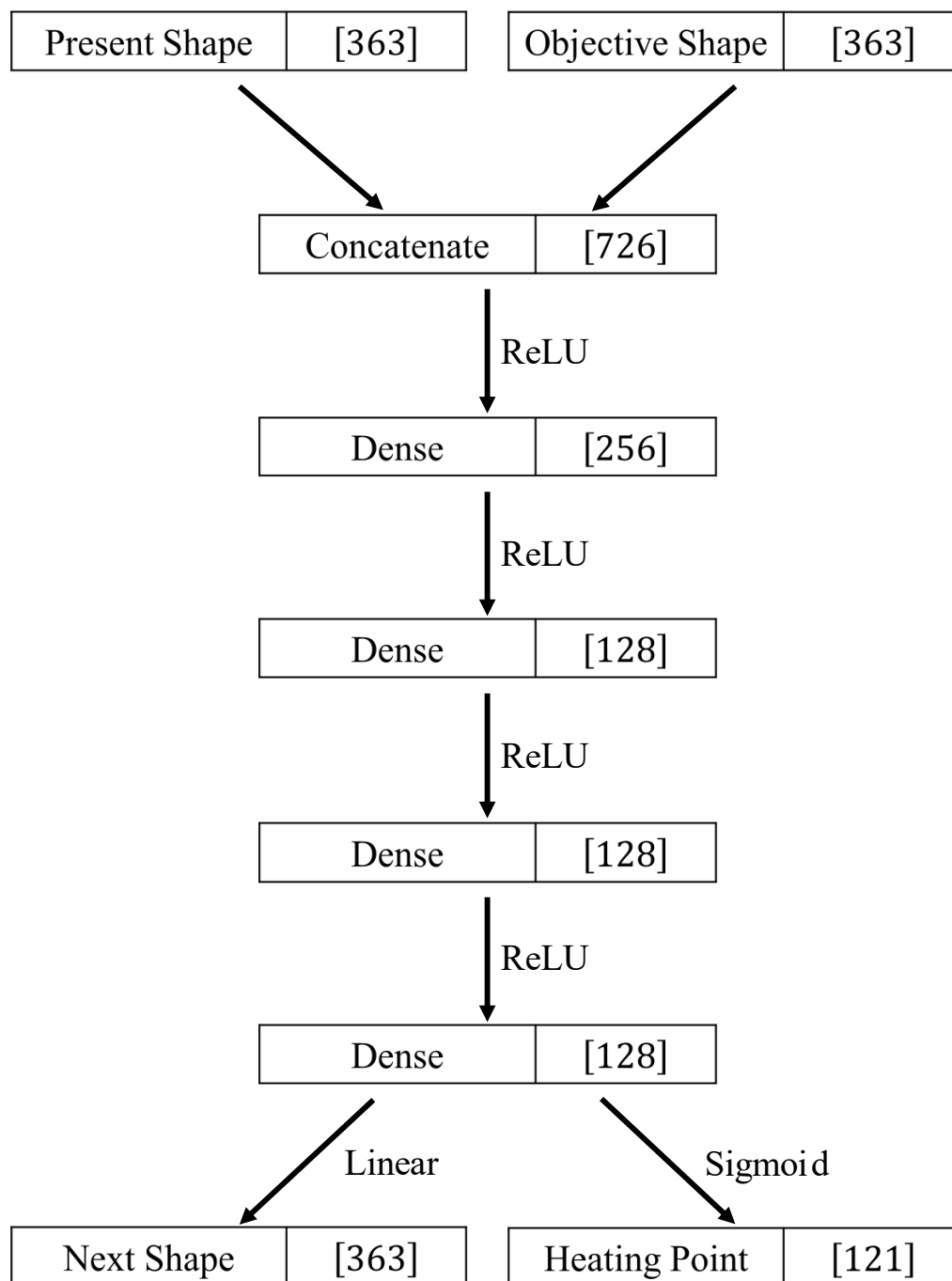


Fig.3.2 次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワーク

### 3.3.2 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワーク

現在の形状と最終形状を入力, 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワークを構築した. 3.3.2項で説明したニューラルネットワークを同様に, まず入力層で2つの入力を結合し, 4つの中間層を経て, 最後の中間層から2つ出力層へ渡している. 曲げ角度は次の形状に比べてデータ形状が小さいため, 中間層のニューロン数を減らして構築した. 中間層の活性化関数についても同様に式(3.8)の ReLU 関数を用い, 曲げ角度に対応する出力層の活性化関数については次の形状の場合と同じく回帰分析に扱われる式(3.9)に示す恒等関数, 加熱位置に対応する出力層の活性化関数は式(3.10)のシグモイド関数を用いている.

ここで構築したニューラルネットワークにおける設定した各層のニューロン数を Fig.3.3 に示す.

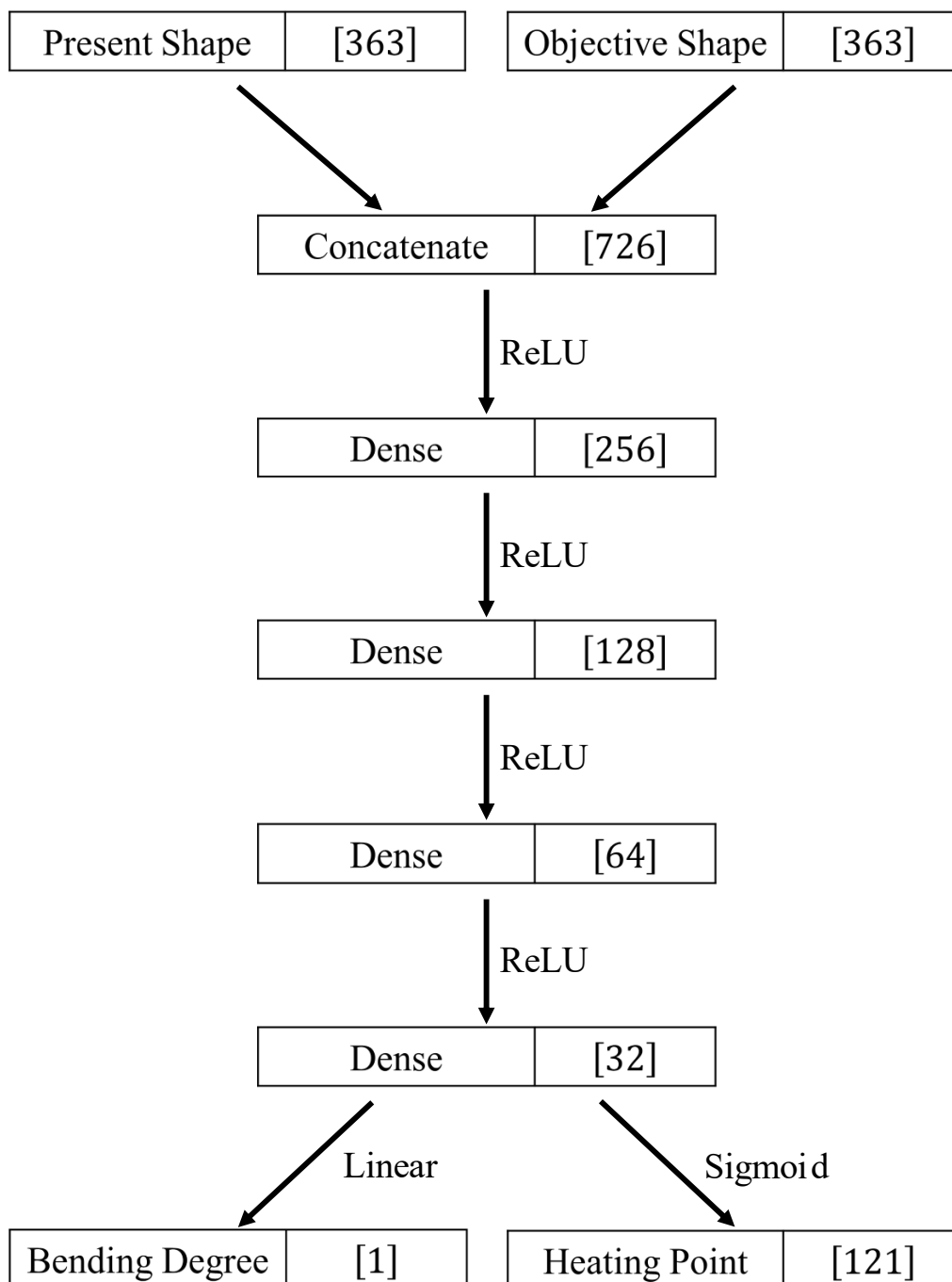


Fig.3.3 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワーク



# 第4章

## 学習結果及び考察

本章では第3章にて説明した教師データと2つのニューラルネットワークを用いて教師あり学習を行い、それぞれの結果及び考察を説明する。

### 4.1 次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワークの学習

#### 4.1.1 教師あり学習実行

第3章3.3.1項で説明したニューラルネットワークを用いて教師あり学習を行った。学習回数を5000回、バッチサイズを64に設定し、学習毎のパラメータ更新時に用いる最適化関数にはAdam<sup>[24]</sup>を用いた。次の形状の損失関数には平均二乗誤差、加熱位置の損失関数には交差エントロピーを用いた。この学習で得られた損失関数のグラフをFig.4.1に示す。

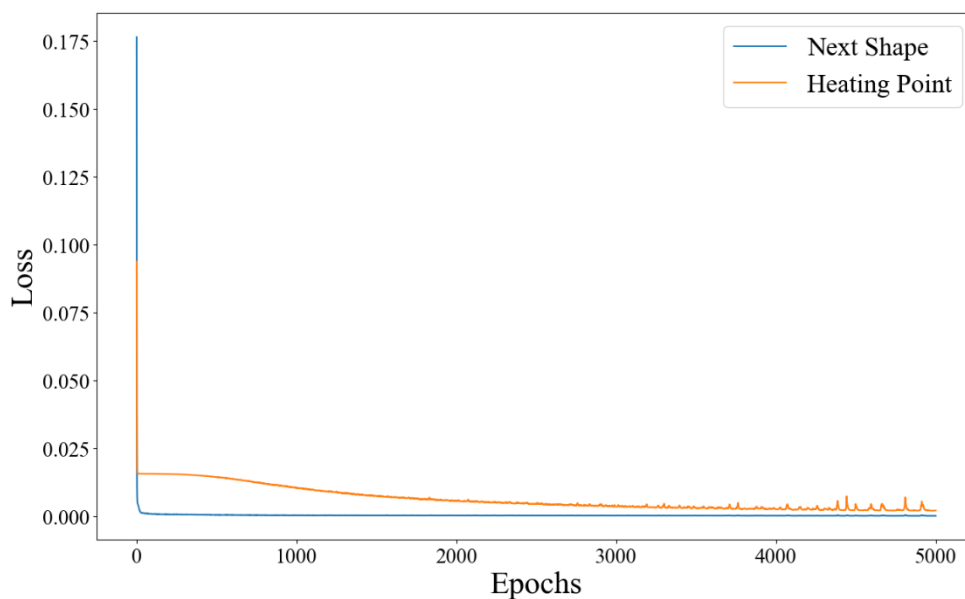


Fig.4.1 次の形状と加熱位置を出力するニューラルネットワークの損失関数

### 4.1.2 学習精度確認

学習を行ったニューラルネットワークの精度確認について説明する. シミュレータを動作させて任意の形状を作成し, その座標データを初期形状である平板と共に第3章の式(3.1)から式(3.6)の前処理を行った後, この2つをニューラルネットワークに入力する. 出力された次の形状を三次元化した後, 式(4.1)から式(4.5)に示す前処理とは逆の処理を行う.

$$S_{\text{out}} = [(X_{\text{out}}, Y_{\text{out}}, Z_{\text{out}})] \quad (4.1)$$

$$X'_{\text{out}} = X_{\text{out}}(x'_{\text{max}} - x'_{\text{min}}) + x'_{\text{min}} \quad (4.2)$$

$$Y'_{\text{out}} = Y_{\text{out}}(y'_{\text{max}} - y'_{\text{min}}) + y'_{\text{min}} \quad (4.3)$$

$$Z'_{\text{out}} = Z_{\text{out}}(z'_{\text{max}} - z'_{\text{min}}) + z'_{\text{min}} \quad (4.4)$$

$$S'_{\text{out}} = [(X'_{\text{out}}, Y'_{\text{out}}, Z'_{\text{out}})] + [(X_{\text{p}}, Y_{\text{p}}, Z_{\text{p}})] \quad (4.5)$$

加熱位置は1に近い2点を選び, それに対応する加熱線の始点と終点をシミュレータに入力して, 処理を行った座標データになるようシミュレータの形状を変形する. 変形した形状の座標データに対して式(3.1)から式(3.6)の処理を行い, 再度ニューラルネットワークに入力するという流れを繰り返して, 作成した任意の形状を作成できるかを確認する.

シミュレータにて3回変形して作成した形状を目標形状とした精度確認を行った. 目標形状を作成する際にシミュレータに入力した曲げ角度と加熱位置を Table 4.1 に示し, 作成した目標形状を Fig.4.2 に示す. この形状と初期形状である平板の座標データを入力として精度確認を行ったニューラルネットワークの入力と出力を Table 4.2 に示す. ここで入力の上段が現在の形状で下段が目標形状, 出力の上段が次の形状で下段が加熱位置となっており, 加熱位置については出力された値を小数第3位で四捨五入しており, 加熱線の始点・終点として選ぶ2点を赤字で示している. この時点で一度の変形では出力された形状を作成することが不可能であったため, ここで精度確認を終了した.

Table 4.1 目標形状作成時に入力した曲げ角度と加熱位置

Times	Bending Degree	Heating Point
1	15	$\begin{bmatrix} (9, 0) \\ (0, 4) \end{bmatrix}$
2	10	$\begin{bmatrix} (7, 0) \\ (8, 10) \end{bmatrix}$
3	8	$\begin{bmatrix} (10, 5) \\ (0, 5) \end{bmatrix}$

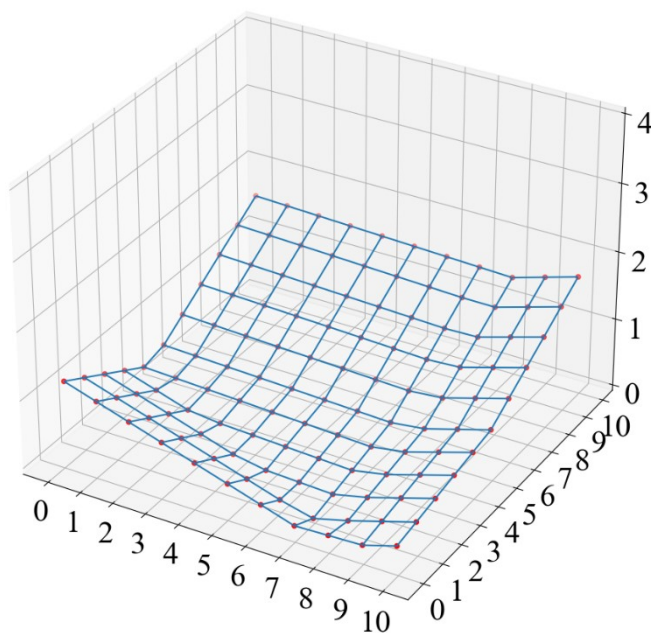
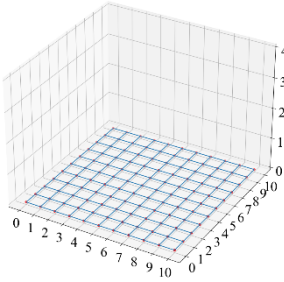
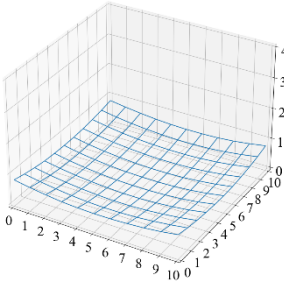
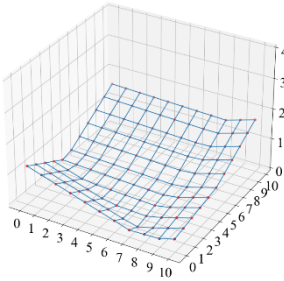


Fig.4.2 精度確認に用いる目標形状

Table 4.2 学習精度確認時の入力と出力

Input	Output																																																																																																																									
																																																																																																																										
	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.03</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.17</td><td>0.02</td><td>0.04</td><td>0.87</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.83</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.05</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.02</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> </table>	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.17	0.02	0.04	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.17	0.02	0.04	0.87	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																

### 4.1.3 学習結果の考察

得られた損失関数では学習が収束しているように見られるが、次の形状についての学習ができていない。また、加熱位置については比較的上手く学習できているが、本来 1.00 に可能な限り近づいているべき値が 0.8 程度であり、こちらも十分に学習が出来ているとは言い難い。また、ニューラルネットワークのパラメータを調整して複数回学習を行ったが、いずれも同様の結果となっている。

次の形状について学習できなかった原因として、データ形状が複雑であることが考えられるが、121 個程度の点群を正しく学習できないようでは、ぎょう鉄への実用は困難である。

## 4.2 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワークの学習

### 4.2.1 教師あり学習実行

第3章 3.3.2 項で説明したニューラルネットワークを用いて教師あり学習を行った。学習回数を 5000 回、バッチサイズを 64 に設定し、最適化関数には Adam を用いた。曲げ角度の損失関数には平均二乗誤差、加熱位置の損失関数には交差エントロピーを用いた。この学習で得られた損失関数のグラフを Fig.4.3 に示す。

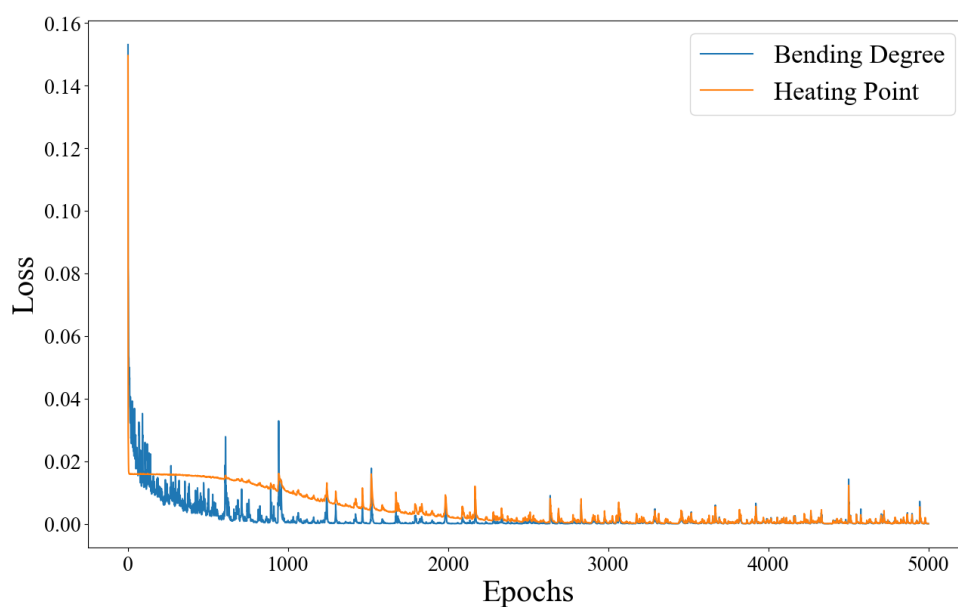


Fig.4.3 曲げ角度と加熱位置を出力するニューラルネットワークの損失関数

### 4.2.2 学習精度確認

学習を行ったニューラルネットワークの精度確認について説明する。4.1節と同様に、シミュレータを動作させて任意の形状を作成し、その座標データを初期形状である平板と共に第3章の式(3.1)から式(3.6)の前処理を行った後、この2つをニューラルネットワークに入力する。出力された曲げ角度に対して式(4.6)に示す前処理とは逆の処理を行った後、小数第一位で四捨五入して整数値にする。

$$\theta'_{\text{out}} = \theta_{\text{out}}(\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}) + \theta_{\text{min}} \quad (4.6)$$

加熱位置については1に近い2点を選び、それらに対応する点を加熱線の始点・終点とする。これらの処理を行った曲げ角度と加熱位置をシミュレータに入力して形状を変形させ現在の形状を更新する。更新された現在の形状と目標形状を式(3.1)から式(3.6)の処理をした後、再度ニューラルネットワークに入力して曲げ角度と加熱位置を出力させる。これを繰り返して最初に作成した任意の形状を作成できるかを確認する。

シミュレータにて8回変形して作成した形状を目標形状として精度確認を行った。目標形状を作成する際にシミュレータに入力した曲げ角度と加熱位置をTable 4.3に示し、目標形状をFig.4.4に示す。この形状と初期形状である平板の座標データを最初の入力として、精度確認を8回行ったニューラルネットワークの入力と出力をTable 4.4からTable 4.11に示す。これらはそれぞれ入力の上段が現在の形状で下段が目標形状、出力の上段が曲げ角度で下段が加熱位置であり、曲げ角度と加熱位置は小数第3位で四捨五入している。また、加熱位置については加熱線の始点・終点として選んだ2点を赤字で示している。

Table 4.3 目標形状作成時に入力した曲げ角度と加熱位置

	Bending Degree	Heating Point
1	20	$\begin{bmatrix} (0, 8) \\ (3, 0) \end{bmatrix}$
2	18	$\begin{bmatrix} (0, 1) \\ (10, 3) \end{bmatrix}$
3	16	$\begin{bmatrix} (10, 4) \\ (7, 10) \end{bmatrix}$
4	12	$\begin{bmatrix} (0, 8) \\ (8, 10) \end{bmatrix}$
5	11	$\begin{bmatrix} (9, 0) \\ (7, 10) \end{bmatrix}$
6	8	$\begin{bmatrix} (4, 0) \\ (2, 10) \end{bmatrix}$
7	6	$\begin{bmatrix} (10, 7) \\ (9, 10) \end{bmatrix}$
8	4	$\begin{bmatrix} (10, 1) \\ (0, 9) \end{bmatrix}$

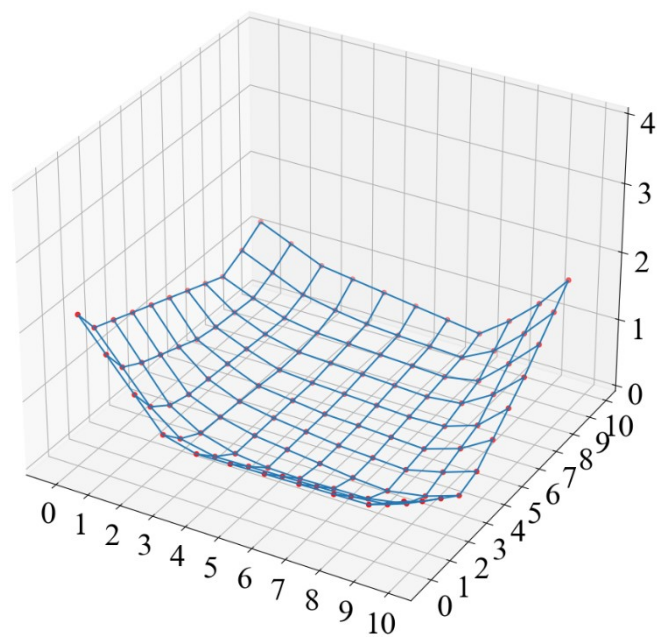


Fig.4.4 精度確認に用いる目標形状



Table 4.4 学習精度確認 1 回目の入力と出力

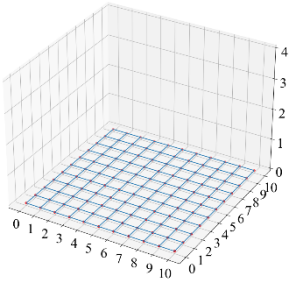
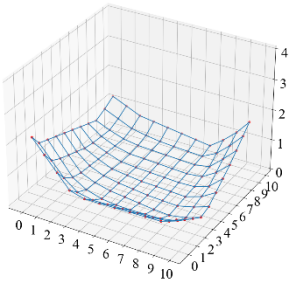
Input	Output
	19.95
	$\begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.01 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.99 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$

Table 4.5 学習精度確認 2 回目の入力と出力

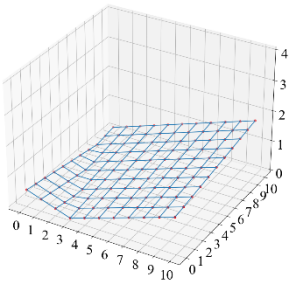
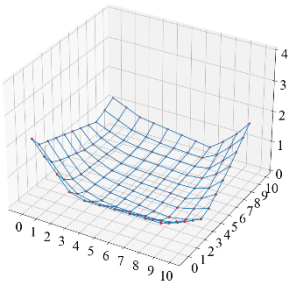
Input	Output
	17.91
	$\begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 \\ 1.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.99 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$

Table 4.6 学習精度確認 3 回目の入力と出力

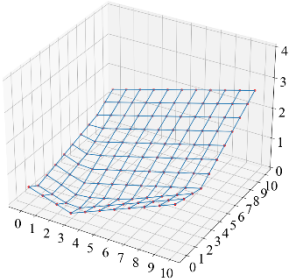
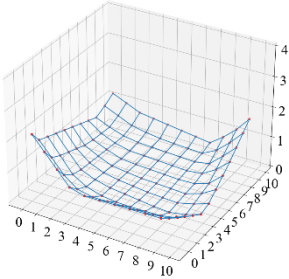
Input	Output																																																																																																																									
	15.96																																																																																																																									
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>1.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> </table>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																																																
0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																

Table 4.7 学習精度確認 4 回目の入力と出力

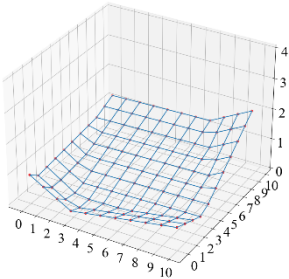
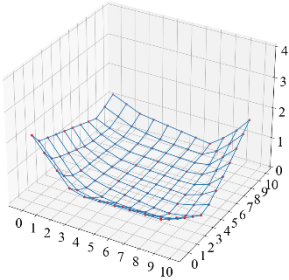
Input	Output																																																																																																																																				
	11.92																																																																																																																																				
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.99</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>1.00</td><td>0.01</td><td>0.00</td></tr> </table>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.01	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																											
0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.01	0.00																																																																																																																											

Table 4.8 学習精度確認 5 回目の入力と出力

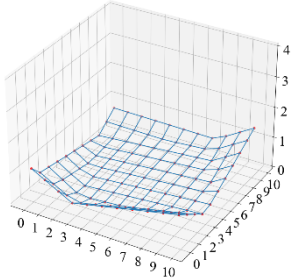
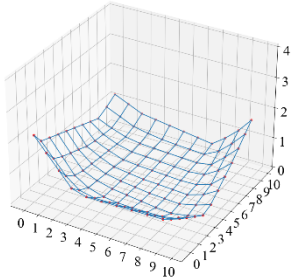
Input	Output
	11.03
	$\begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$

Table 4.9 学習精度確認 6 回目の入力と出力

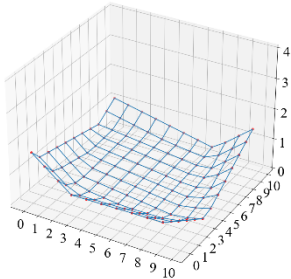
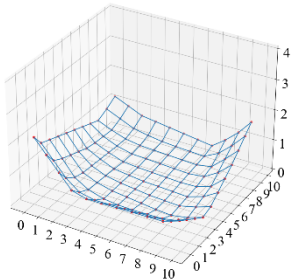
Input	Output
	7.90
	$\begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$

Table 4.10 学習精度確認 7 回目の入力と出力

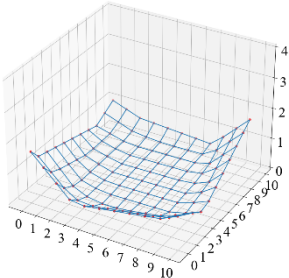
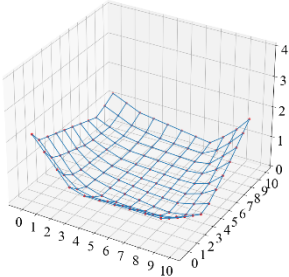
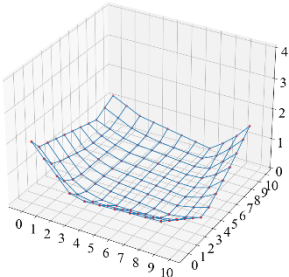
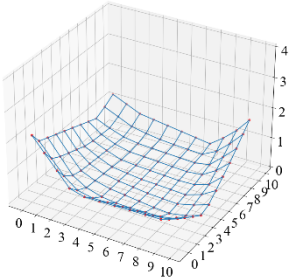
Input	Output																																																																																																																									
	5.93																																																																																																																									
	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.03</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.98</td><td>0.00</td></tr> </table>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00																																																																																																																

Table 4.11 学習精度確認 8 回目の入力と出力

Input	Output																																																																																																																									
	4.04																																																																																																																									
	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.90</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.03</td><td>0.00</td></tr> </table>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00																																																																																																																

### 4.2.3 学習結果の考察

Fig.4.3 の損失関数のグラフから、多少の過学習は起こっているようではあるが、学習精度確認結果から曲げ角度、加熱位置共に正しい値を出力しており、最初に設定した目標形状を作ることができた。また、加熱位置については4.1節のニューラルネットワークよりも高精度で学習できている。しかし、今回は教師データ作成の時点で曲げ角度は整数値のみとしていたために出力された角度を小数第一位で四捨五入してシミュレータに入力しているが、出力された値と正解データの誤差は最大で0.1程度あり、ニューラルネットワークの各種パラメータ調整や教師データを増やすことなど、未だ改善の余地はある。

また、このニューラルネットワークを作業支援システムに適用する場合、このままでは次に作る形状とその際の加熱位置を出力するニューラルネットワークに比べ、作業者に提示する情報量は少なくなるが、曲げる角度とその軸となる加熱位置が分かれば、ある程度の形状を計算して作業者に提示することは可能であるため、4.1節のニューラルネットワークの代用としての効果は期待できる。

---

# 第5章

## 結論

---

### 5.1 まとめ

本研究では、実際のぎょう鉄の作業データを用いて機械学習を行うことで、非熟練者にとって特に難しいとされる「どのような形状を経て目的の形状へ至るのか、またそのためにはどこを加熱すればよいのか」を、現在の鋼板の形状と目標の形状から作業者に提示し、必要とされる熟練度を下げる作業支援システムの開発を目標とし、この手法の有効性を示すため、シミュレータを用いて平板の変形過程とその際の作業内容で構成された教師データを作成し、これを用いて機械学習を行い平板から目標の形状を作成できることの確認を行った。

まず曲げる位置と角度を入力するとそれに応じて平板から変形していく簡単な三次元シミュレータを作成し、これを用いて形状変化の過程やその際の曲げる位置と角度で構成された教師データを作成した。次に現在の形状と目標の形状を入力、次の変形で作るべき形状とその際の曲げる位置を出力とするニューラルネットワークを構築し、作成した教師データを用いて機械学習を行った。しかし、この手法では出力の1つである次の変形で作るべき形状のデータが複雑であるためか学習が進まなかった。そこで出力を曲げる角度と位置に置き換え、これらを用いて次に作るべき形状を表すこととし、この手法で平板から正確に目標の形状を作成できることを確認した。

## 5.2 今後の課題

本研究では簡易的なシミュレータから教師データを作成し学習を行うことで本システムの有効性を示したが、このシミュレータは厳密にぎょう鉄作業を再現しているものではなく、厳密なぎょう鉄のシミュレータを作成することも非常に困難であるため、教師データ作成に必要な実際の熟練作業者によるぎょう鉄作業データを収集することや、変形前後の鋼板の形状を計測する装置を開発することが本システムを実現するための今後の課題である。また、収集したデータから適切に学習を行えるニューラルネットワークの構築することが必要である。

また、今回作成した教師データを全て同一の正方形平板から変形させたものであり、別の初期形状については考慮できていない。実際のぎょう鉄は大きさや形に加え、厚さまでも異なる様々な形状の平板を加工するため、それらに対応できるよう、より多くの教師データを用意する必要や、それらの処理手法を考える必要がある。



---

## 参考文献

---

- [1] 田中良平, “鋼の熱処理と変態”, 精密機械, Vol.46, No.10, pp.1192-1197 (1980)
- [2] 株式会社高橋工業, “鋳鉄技術”,  
[ <http://takahashikogyo.com/zousen/pdf/technique03.pdf> ] (閲覧日 2024.1.31)
- [3] 矢野工業株式会社, “造船・鋼材曲加工”,  
[ <https://www.yano-kk.jp/technology/bending/> ] (閲覧日 2024.1.31)
- [4] 田中義照, 松岡一祥, “ぎょう鉄とその周辺—ぎょう鉄技能教育と新しいシステムの開発—”, 日本造船学会誌, Vol.883, pp.113-117 (2005)
- [5] 松尾宏平, 松岡一祥, “匠の技「ぎょう鉄」の問題を解決する研究”, 人工知能学会第二種研究会資料, Vol.2010, No.KST-10 (2010)
- [6] 田中義照, 安藤孝弘, 松尾宏平, 林慎也, 小林佑規, 松岡一祥, “曲げの職人芸を科学する—ぎょう鉄技能の伝承—”, 海上技術安全研究所講演会講演集, Vol.5, pp.31-44 (2006)
- [7] 満行泰河, 稗方和夫, 笠原達也, “レーザースキャナを用いた船体曲がり外板加工支援システムの開発”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, No.30, pp.713-720 (2020)
- [8] 松尾宏平, 松岡一祥, “船舶の曲り外板製造を支援する新しい外板展開システムの開発”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.76, No.771, pp.2797-2802 (2010)
- [9] 松尾宏平, “曲率線展開法による現図及び曲げ加工の人材育成に関する取り組み”, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN(咸臨), Vol.78, pp.28-29 (2018)
- [10] 馬渡正道, 土屋健介, “高度熟練技能の数理解析モデルおよび書道の運筆活動への適用”, 生産研究, Vol.67, No.6, pp.705-712 (2015)
- [11] 小山剛志, 橋本宣慶, 奥村進, “仮想感覚を利用した旋盤作業における熟練技能の解析—視覚を対象にした評価システムの構築—”, 2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.159-160 (2019)
- [12] 小山剛志, 橋本宣慶, 奥村進, “仮想感覚を利用した旋盤作業における熟練技能の解析—仮想視覚の呈示遅れがハンドル操作に及ぼす影響—”, 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.359-360 (2020)

- [13] David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwiser, Ioannis Antonoglou, Matthew Lai, Arthur Guez, Marc Lanctot, Laurent Sifre, Dhharshan Kumaran, Timothy Lillicrap, Karen Simonyan, Demis Hassabis, “A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go, through self-play”, *Science*, Vol.362, No.6419, pp.1140-1144 (2018)
- [14] 前川真奈海, 生島一樹, 野津亮, 丹後義彦, 木治昇, 柴原正和, “AI を用いた線状加熱  
方案作成システムの構築”, 溶接構造シンポジウム 2019 講演論文集, pp.37-44 (2019)
- [15] 大山知理, 鈴木彼方, 陽品駒, 尾形哲也, “深層学習によるロボット知能化のための  
モーションキャプチャ教示システム”, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol.79,  
No.2, pp.147-149 (2017)
- [16] Pin-Chu Yang, Kazuma Sasaki, Kanata Suzuki, Kei Kase, Shigeki Sugano, Tetsuya  
Ogata, “Repeatable Folding Task by Humanoid Robot Worker Using Deep Learning”,  
*IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.2, No.2, pp.397-403 (2017)
- [17] 山根広暉, 七種勇樹, 境野翔, 辻俊明, “バイテラル制御に基づく模倣学習による 3  
次元曲面拭き動作の学習”, *日本ロボット学会誌*, Vol.41, No.4, pp.395-398 (2023)
- [18] Charles R. Qi, Hao Su, Kaichun Mo, Leonidas J. Guibas, “PointNet : Deep Learning  
on Point Sets for 3D Classification and Segmentation”, *Proceedings of the IEEE  
Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.652-660  
(2017)
- [19] Charles R. Qi, Li Yi, Hao Su, Leonidas J. Guibas, “PointNet++ : Deep Hierarchical  
Feature Learning on Point Sets in a Metric Space”, *Advances in Neural Information  
Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, Vol.30 (2017)
- [20] 武田隆雅, 小林洸陽, 宍戸英彦, 亀田能成, 北原格, “3次元点群に対する機械学習を  
用いた形状変形判定法”, *情報処理学会研究報告*, Vol.2020-CVIM-221, No.34, pp.1-7  
(2020)
- [21] 江守央, 齋藤幹貴, 佐田達典, 岡島正哲, “道路区画線を対象とした機械学習による 3  
次元点群データの自動抽出に関する研究”, *土木学会論文集*, Vol.75, No.2, pp.114-  
122 (2019)
- [22] 齋藤康毅, “ゼロから作る Deep Learning—Python で学ぶディープラーニングの理論  
と実装”, *オライリージャパン* (2016)

- [23] Keras, “Keras : Deep Learning for humans”, [<https://keras.io/>] (閲覧日 2024.1.31)
- [24] Diederik P. Kingma, Jimmy Lei Ba, “Adam : A Method for Stochastic Optimization”, arXiv:1412.6980 [cs.LG] (2014)

---

# 謝辞

---

本研究を進めるにあたり、所属研究室である人間支援システム研究室 池浦良淳教授には、学部四年から修士二年までの三年間という長い間、日頃から多大なる御指導、御鞭撻を親身になって行っていただき、心より深く感謝しております。厚く御礼申し上げます。

また、人間支援システム研究室 早川聡一郎准教授には研究に関する有益な御助言を多数頂き、深く感謝し厚く御礼申し上げます。

そして、大変お忙しい中本論文を査読して頂くとともに、多数の御教示、御助言を賜りました、本学知能ロボティクス研究室 加藤典彦准教授に厚く御礼申し上げます。

そして、苦楽を共にし、互いに切磋琢磨して研究室生活を忘れがたい充実したものにいただいた同輩諸氏には心より感謝の意を表します。

また、研究室での生活尾を豊かにしていただいた修士一年生と学部四年生の皆様に感謝し、今後のご活躍を期待しております。

最後に、学部・修士で計6年もの間、より勉強をしたいという私の我儘に対して快く賛同して頂き、また惜しみのない援助をしてくれた父、母のおかげで充実した素晴らしい学生生活を送ることができました。感謝の意を述べることで謝辞の最後とさせていただきます。