

レーザーフォーミングの個別要素技術の確立

九州工業大学 マテリアル工学科

教授 秋山 哲也

(平成 26 年度 一般研究開発助成 AF-2014207)

キーワード：縦収縮利用加熱，部分加熱，多重加熱

1. 研究の目的と背景

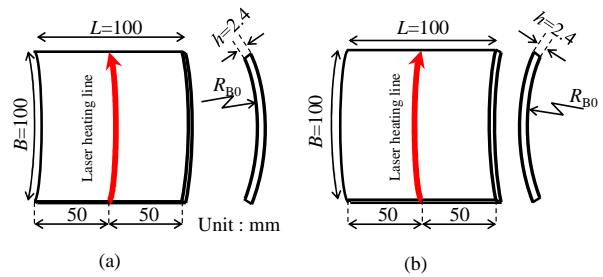
鋼板など金属板を部分的に加熱し、冷却後に発生する固有ひずみを利用して曲板を成形する方法は、造船におけるぎょう鉄や線状加熱技術として知られている。加熱手段をレーザー加熱に置き換えたレーザーフォーミングも曲面成形に利用されるが、ともに勘や経験に負うところが大きく、複雑曲面に対する最適な加工法案を導き出す手順を明確に示すには至っていない。

曲面成形に必要な曲率分布や面内ひずみ分布を幾何学的に求めることは比較的容易¹⁾であるが、具体的な加熱条件の選定には不明な部分すなわち勘や経験の要素が大きい。

その第1の理由は、公知の加熱条件と変形の関係は平板加熱など特定の単純な場合についての知見であり、例えば平板で得られた知見は曲板に対しては全く通用しない場合がある²⁾ことによる。そのため、加熱によって生じる変形結果は、時に予想外のものとなり複雑に思われる場合がある。加熱・冷却に起因する変形を取り扱う溶接の分野では、取り扱う板材が平板であることが多いため、溶接線に対して縦収縮、横収縮、角変形、縦曲がり、座屈などに分類されている。曲板でも類似の変形が生じるが、より複雑な分類と変形機構の解明が必要である。例えば平板では板の表面加熱と裏面加熱を区別する必要はないが、曲面では凸面側加熱と凹面側加熱として区別する必要があり、両者の角変形量は大きく異なる。そのため平板時とは異なるより厳密な変形機構を用いる必要がある。

第2の理由は、曲面成形に有効な基本的な加熱法案やその組み合わせを、目的に応じて容易に選択できる状態に未だ到達していないことによる。例えば角変形(折れ)を発生させる目的で1本の直線の線状加熱を行った場合、必ず縦収縮と横収縮も発生する。これらの収縮は、曲面成形過程において必要な面内ひずみとなるため、加熱の進行に伴い蓄積される収縮が面内ひずみとして作用した場合にもたらされる結果を事前に把握しておかなくてはならない。しかしこの点に関する知見が乏しい場合、目的としない方向の角変形が、面内ひずみにより発生した鞍形変形でもたらされる場合がある。

将来的なレーザーフォーミングのあるべき姿を考える時、目的曲面を作成する際に用いるべき加熱方法を要素技術として曲面形状に対応させておくことは、レーザーフォーミングの利便性の向上に繋がり、使いやすいレーザーフォーミング、加熱方法選択の自動化、ひいては完全自動化へと発



(a) Laser heating on concave surface.
(b) Laser heating on convex surface.

図1 角変形測定用試験片

展させることができると考える。

本研究では、平板で得られた変形と曲板で得られた変形の違いから、曲板の場合の変形機構における因子とその働きを明確にする。次に、それら因子を組み合わせることで、レーザーフォーミングの加工条件を要素技術として提案する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

実験には、加熱冷却後に硬化など材質変化の少ないオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (板厚 2.4mm) を用いた。所定の寸法に切り出し後、初期曲率半径など形状加工後、残留応力除去の為に 900°C 1 時間の焼鈍の後、試験片とした。

2.2 加熱条件

加熱には、出口出力 1500W の YAG レーザを用い、XY テーブル上の供試材を所定の加熱速度で加熱した。焦点外し距離は 48mm でこの時のレーザー光のガウス半径は 4.8mm である。

3. 角変形に及ぼす初期曲率半径の影響

3.1 試験片形状

板長 $L=100\text{mm}$ 、板幅 $B=100\text{mm}$ の板材に図1に示す初期曲率半径を付与後、板中央部を一定速度で端から端まで加熱した。初期曲率半径は図1に示す $R_{B0}=100\text{mm}$ の他に 400mm 及び平板を用意した。

3.2 角変形の加熱速度依存性

図2に、加熱線中央垂直断面での試験片のプロファイル

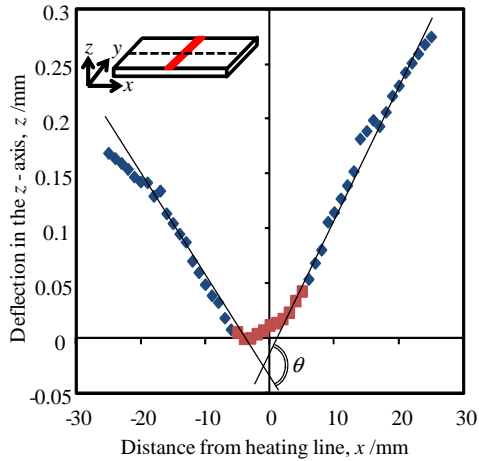


図2 角変形測定用プロファイルの一例

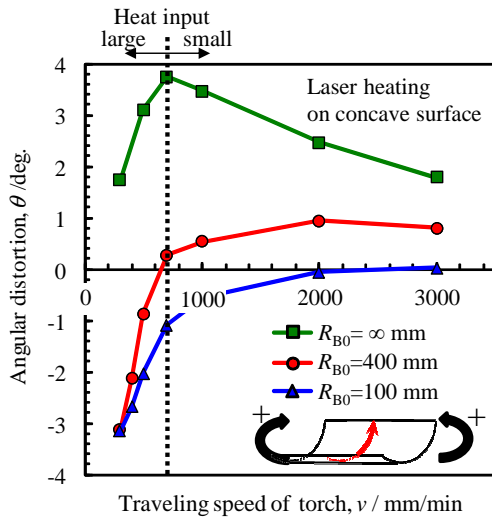


図3 角変形と加熱速度の関係（凹面加熱）

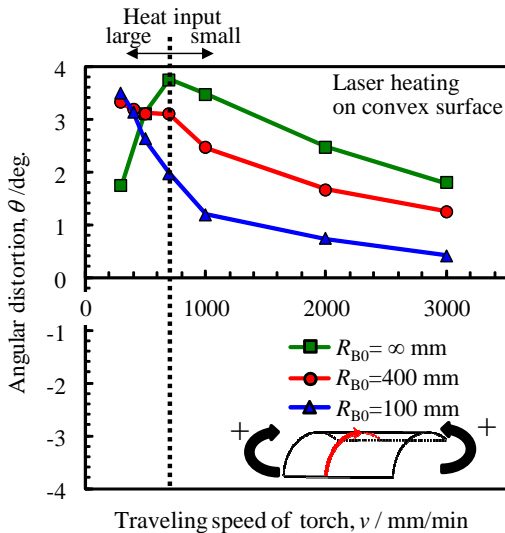


図4 角変形と加熱速度の関係（凸面加熱）

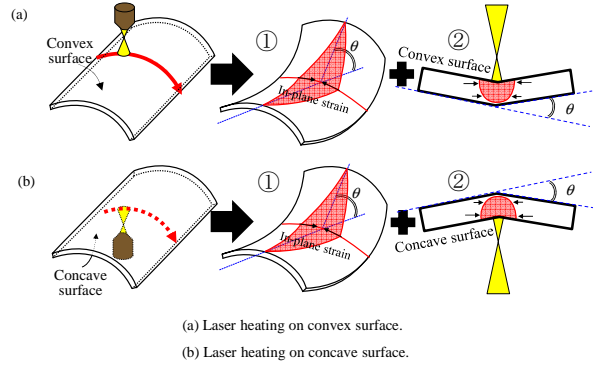


図5 縦収縮を伴う角変形の機構

を、光学式座標読み取り装置で計測した結果として示す。加熱位置から $\pm 5\text{mm}$ を除く 20mm の区間を直線近似し両直線の成す角から角変形量を求めた。加熱面側から見たときの谷変形をプラスとした。図3に各種加熱速度における凹面加熱の角変形を示す。■印の平板では、レーザトーチ移動速度が遅くなり入熱が増加すると角変形は増加し、さらに速度が遅くなり入熱が増すと角変形は減少している。この変化は従来から平板の場合にみられる現象と全く同じである。角変形は加熱面側と非加熱面側の収縮差によってもたらされるため、入熱が増すと加熱面側の収縮量の増加により角変形が増す。さらに入熱が増すと非加熱面側の温度上昇が増し、両面の収縮量の差が小さくなっていくため、角変形は減少する。他方、初期曲率 100 および 400mm では異なる変化傾向を示している。低速度側では、加熱面と逆側に変形しており、平板での常識が曲板では通用しないことが分かる。

図4に凸面加熱の場合の角変形を示す。ここでも平板と曲板が示す角変形量の変化傾向は異なる。曲板の低速度での角変形量の絶対値は図3の凹面加熱の場合とほぼ同じである。これは、加熱面が凹面か凸面にかかわらず馬の背の形（鞍形）に変形していることを示している。

これらの実験結果から、曲板における角変形は平板での角変形の機構に加え、加熱部の縦収縮による面内ひずみの発生がもたらす鞍形変形機構を合わせ持つ変形機構であると推察され、以下のように実験結果を整理した。図5にその変形機構の模式図を示す。従来の平板における角変形機構すなわち板の加熱非加熱面の固有ひずみ差に起因する角変形（図5中の②）に加えて、縦収縮がもたらす板中央部の収縮面内ひずみによる鞍形変形に伴う角度変化（図5中の①）を加えた機構とした。機構②は角変形の方法が加熱面に依存するのに対し、機構①は板厚中央位置での面内ひずみに依存するため、加熱面に依存しない。この仮定に基づくと、凸面加熱の角変形（図5中の(a)）と凹面加熱の角変形（図5中の(b)）を加えると、機構②による角変形が差し引きされ、機構①の角変形のみが残ることになる。一方で両者の差を取ると機構②の角変形が残ると考えられる。図6に加熱速度と機構①による角変形量の関係を示す。低速になるほど変形が大きくなるのは、低速にな

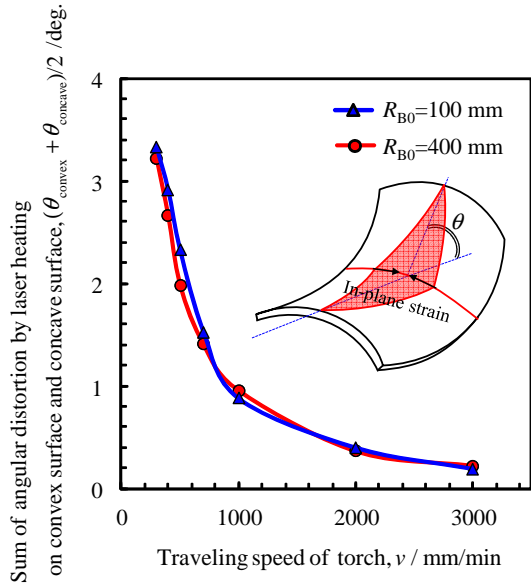


図6 機構①による角変形

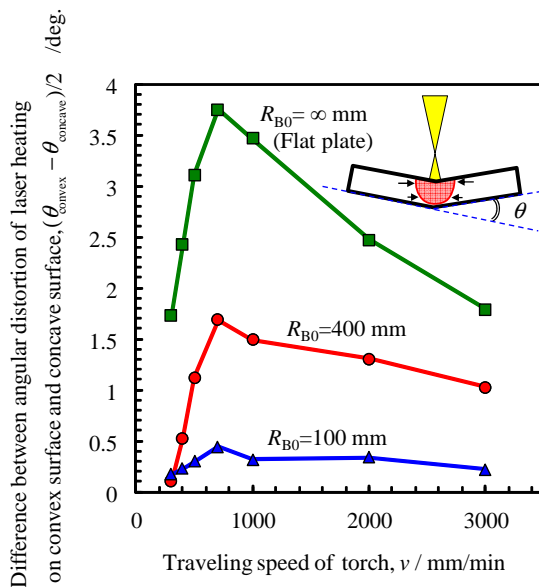


図7 機構②による角変形

るほど入熱が大きくなり面内ひずみが増加するためと考えられる。さらに初期曲率の影響が表れていない。これは、板の鞍形変形による角度変化が板の曲げひずみの変化量に直接関係している事より、両者に与えられた面内ひずみ量が等しかったことを示唆していると考えられる。図7に加熱速度と機構②による角変形量の関係を示す。機構②は面内ひずみの発生を伴わない変形であるから、変形に伴い食い違いを生じる。この食い違いを解消するために曲げ応力が発生し、結果的にこの変形は断面係数の影響を受ける。そのため試験片の初期曲率の影響が表れている。各初期曲率半径を持つ部分円筒の断面係数の比を計算したところ、 $R_{B0}=400\text{mm}$ と 100mm の間で約 4.3 倍、平板と $R_{B0}=400\text{mm}$ の間で約 1.5 倍であった。実験値が 4.1 倍と 2.2 倍と読み

取れるので、おおむね妥当な考察だと言える。

4. 曲面成形に及ぼす縦収縮の影響とその利用

4.1 試験片形状

隣接した加熱線で生じる縦収縮の干渉が曲面成形に及ぼす影響を調べるために、図8に示す試験片の長手方向に7mm 間隔に14本の線状加熱を行った。加熱順序に、図9に示すように中央から端部へ線状加熱を繰り返す方法と端部から中央部へ繰り返す方法の2種類を採用した。線状加熱部が角変形のみを生じるならば、(a)も(b)も部分円筒形となるはずである。

4.2 加熱順序と変形過程の例

図10に、変形の途中過程を示す。(a)は内から外への加熱、(b)は外から内への加熱である。(a)では、一旦上に凸になった後最終加熱⑭では下に凸となっている。これは途中で鞍形形状を経由して最終的に楕円形になっていることを示している。(b)では、楕円形を経由して鞍形になって

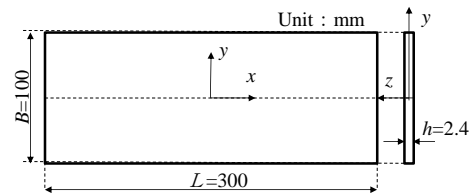


図8 縦収縮検討用試験片形状

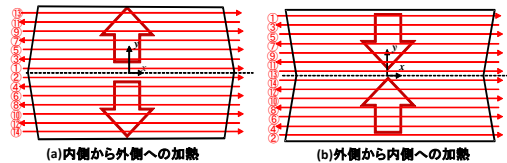
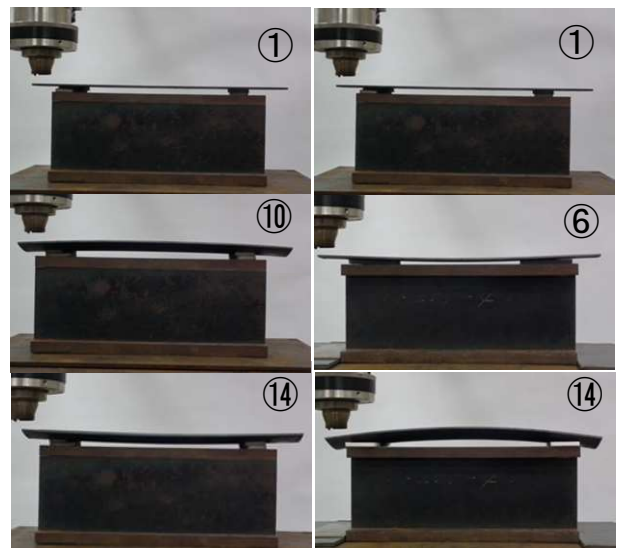


図9 加熱順序



(a) 内側から外側へ (b) 外側から内側へ

図10 変形過程

いる。この変化は、定性的には次のように説明できる。隣接して線状加熱を行ったとき、後から行った線状加熱の方が形成される収縮の固有ひずみは大きくなる³⁾。そのため、加熱方法(a)の場合には板端の収縮が大きく、この面内ひずみの分布は楕形を形成することが知られている。(b)では板中央部が収縮となるため鞍形となる。また、(a)では初めに内側(中央部)を加熱するため、まず中央部が収縮した形状すなわち鞍形を経由して楕形に至る。(b)では逆の経過をたどる。

4・3 楕形、鞍形、部分円筒の作り分け

本研究では、縦収縮を利用してより効率的に楕形、鞍形形成を行うために、図11および図12に示すように、交互加熱と非交互加熱での成形結果を比較した。図11の楕形用加熱では、中央から交互に板端へ加熱線を増やす方法を交互加熱、中央から板端へ片側の加熱を先に済ませ残りの半面を中央から板端へ後から行う方法を非交互加熱と呼んでいる。図12の鞍形加熱についても同様の定義を用いている。

変形後形状を図13および図14に示す。楕形変形(図13)では非交互加熱、鞍形変形(図14)では交互加熱の変形が大きく得られていることが分かる。有限要素法(FEM)で計算した、板長中央断面での軸方向(x方向)の見かけのひずみ分布を図15、図16に示す。図15は内から外加熱(楕形変形)の場合で、○が交互加熱、△が非交互加熱である。変形の大きい非交互加熱の方がひずみ差が大きくなっていることが分かる。また、このひずみ差は、得られた楕形の形状から幾何学的に求められる値にほぼ一致していた。図16は外から内加熱(鞍形変形)の場合で、○が交互加熱、△が非交互加熱である。変形の大きい交互加熱の方がひずみ差が大きくなっていることが分かる。また、このひずみ差は、得られた鞍形の形状から幾何

学的に求められる値にほぼ一致していた。

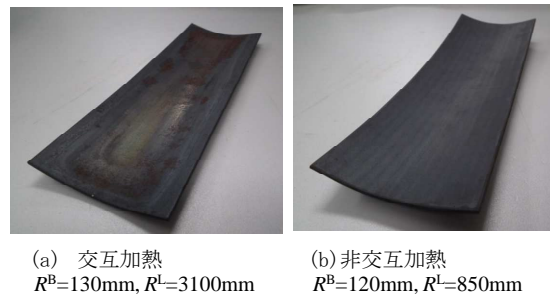


図13 楕形加熱

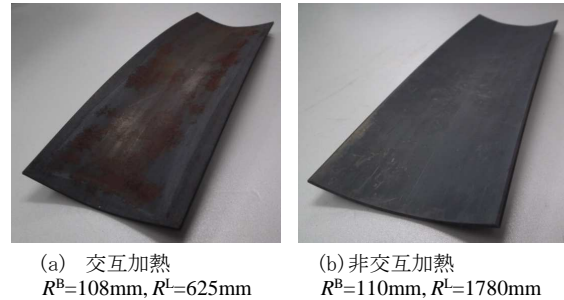


図14 鞍形加熱

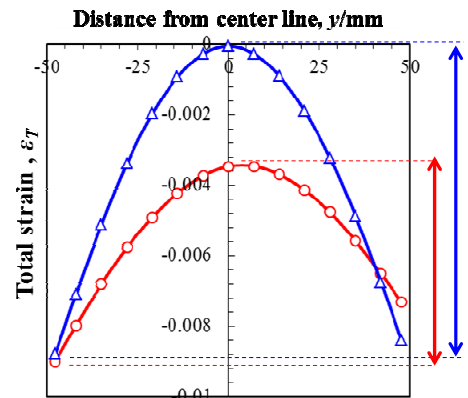


図15 楕形の見かけのひずみ分布 (FEM)

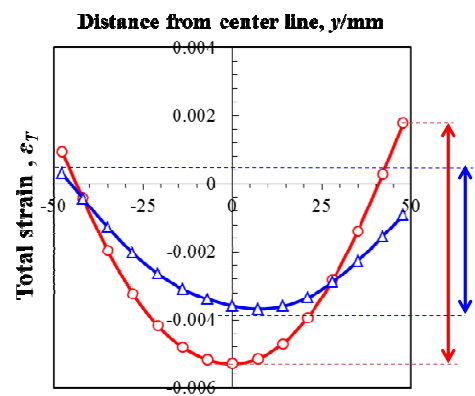


図16 鞍形の見かけのひずみ分布 (FEM)

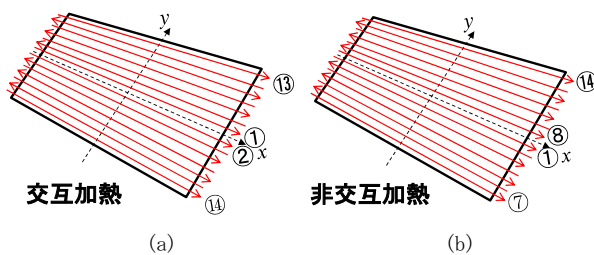


図11 楕形成形

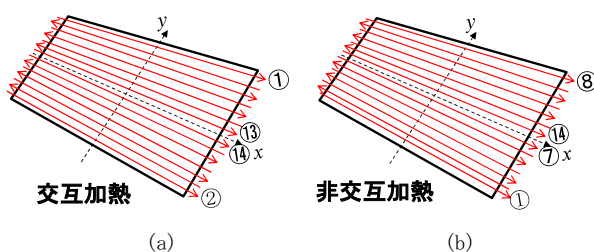


図12 鞍形成形

5. 線状加熱の部分加熱化

5.1 ねじり曲面成形

ねじり曲面の成形では、ねじり曲面の幾何学的特徴すなわち 2 つの主曲率の絶対値が等しく符号が逆という性質から、表裏面に対し直交した線加熱が繰り返される。一方でねじれ曲面は鞍形の特長形状であるため、中央部に収縮の面内ひずみが必要である。必要な収縮の面内ひずみが導入できなかった場合にはいびつなねじり曲面になってしまう。面内ひずみの導入には 4 章で述べた縦収縮が

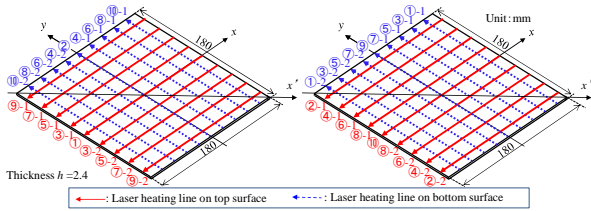


図 17 ねじり変形試験片寸法と加熱位置

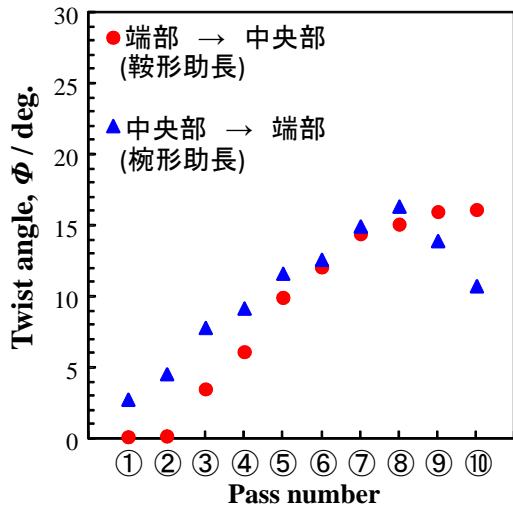


図 18 加熱の進行に伴うねじれ角の変化

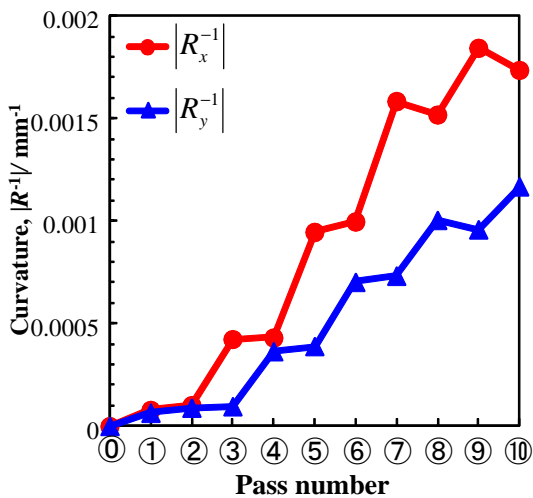


図 19 主曲率の推移

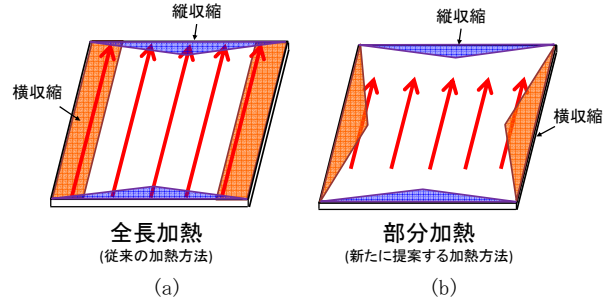


図 20 面内ひずみの付与方法

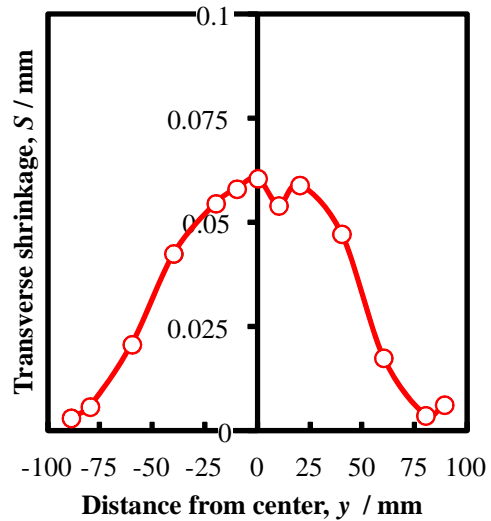


図 21 部分加熱の横収縮分布

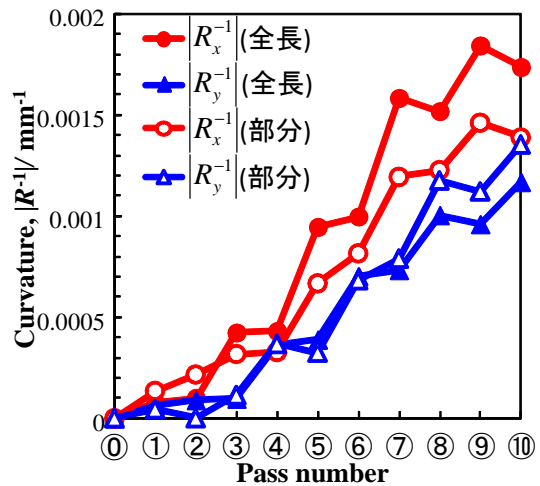


図 22 主曲率の推移の比較

利用できる。ここでは、さらに面内ひずみが必要な場合に、角変形を得るための線加熱を部分的に行うことが有効かどうかを検討するために、以下に示す試験片を用いた。

寸法および加熱位置を図 17 に示す。1 辺 180mm の正方形で、表と裏で直交する加熱線とした。

この場合、表面と裏面に並行した角変形が生じ、ねじれ曲面が得られると予想される。加熱の進行に伴うねじれ

角の変化を図18に示す。図より、加熱の進行とともにねじれ角は増加するが、単調に増加するわけではなく、端部から中央部（外から内）に加熱した場合には増加が鈍化している。中央部から端部ではねじれ角が低下している。これは、図9で説明したように、外から内への加熱は板中心部に収縮を生じ、これはねじり曲面の属する鞍形変形に必要な面内ひずみである。一方で内から外への加熱は鞍形とは逆のひずみ分布を生じるため、ねじり曲面の成形が阻害されると考えられる。外から内加熱の場合でもねじれ角が飽和しているのは十分な面内ひずみの供給ができていないためと考えられる。図19に、主曲率の推移を示す。理想的なねじり曲面は主曲率の絶対値は等しくなるべきであるが、加工が進むにつれて差が増大している。これは1回あたりの加熱において常に面内ひずみが不足していることを示唆している。

5・2 部分加熱法

1回の加熱あたりの面内ひずみの増加を試みる方法として、図20(b)に示す部分加熱法の有効性を検討した。(a)は従来の加熱法で、中央部を最後に加熱することで、縦収縮を面内ひずみとして利用している。(b)はそれに加えて線状加熱を部分加熱に変更している。こうすることで、横収縮が中央部に集中し、新たな面内ひずみの発生が期待できる。図21に、板長の60%を加熱した場合の横収縮分布の実測値を示す。標点の移動距離から求めた。中央部が収縮していることが分かる。部分加熱を用いた場合の主曲率の推移を全長加熱した場合の推移と比較して図22に示す。白抜きの印が部分加熱である。両主曲率は近い値で推移している。加熱工程が進むに従って差が増加する傾向は現れておらず、部分加熱の効果が認められる。

6. まとめ

曲面成形に必要な曲率と面内ひずみという幾何学からの要求に対し、実際のレーザフォーミングはどのように対応できるのかという観点から、いくつかの実際の変形事例の特徴からその変形機構を明らかにし、独立した要素技術として位置づけることを試みてきた。その結果、従来から用いられている①線状加熱（主として角変形）、②三角焼き^{4),5)}（周辺に収縮を与える碗形成形）、③ダイヤモンド焼き^{6),7)}（板中央部に収縮を与える鞍形成形）、④複数の線状加熱（連続した角変形の分布）以外に、今回の研究により、縦収縮が変形に対して大きな役割を持っていることが分かり、その積極的な利用に意味のあることが分かってきた。

3章では、曲面での角変形挙動は縦収縮の影響で平板における角変形とは全く異なる挙動を示すこと、4章では、縦収縮の加熱履歴依存性を利用する方法とその利用例を紹介した。5章では、線状加熱を部分的に中断することで

横収縮に新たな分布を生じさせ、面内ひずみとして利用できることを示し、利用例を紹介した。

縦収縮の挙動を明らかにできたことは、従来経験的に議論されてきた曲面成形における加熱履歴の影響の解明や加工の限界の克服に大きく貢献することが期待される。

また、本研究で提案した要素技術はそのままレーザフォーミングに利用できる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団による一般研究開発助成（AF-2014207）の助成を受けて実施したものです。

ここに記して、厚く感謝いたします。また、本研究の実験の一部を遂行した、北村貴典准教授をはじめ研究室学生諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Akiyama, T. Terasaki, T. Kitamura: Estimation of In-Plane Strain in Laser Formed Bowl Plate, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 27(2009), pp. 139-144 (in Japanese)
- 2) T. Akiyama, T. Kitamura, M. Kido: Effect of Heat Input and Initial Curvature Radius on Deformation of Thin Plate Heated on Concave or Convex Surface by Laser Beam, J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 79, No. 10(2015), pp. 523-527 (in Japanese)
- 3) T. Akiyama, T. Kitamura, H. Kakiuchi, R. Hada, N. Gotoh : Effect of Heating Order on Twisted Curved Surface Forming by Orthogonal Line Heating on Top and Bottom Surface Alternately, J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 79, No. 12(2015), pp. 639-643 (in Japanese)
- 4) T. Akiyama, T. Shinohara, T. Terasaki: Simple Model to Estimate Final Form of Thin Plate under Bowl Laser Forming, J. Japan Inst. Metals, Vol. 74, No. 10(2010), pp. 668-676 (in Japanese)
- 5) T. Akiyama, T. Shinohara, H. Makino, T. Terasaki: Effect of Plate Length and Initial Curvature on Shrinkage in Laser Formed Bowl Plate, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 28(2010), pp. 22-27 (in Japanese)
- 6) T. Akiyama, Y. Kakuho, T. Terasaki, T. Kitamura: Effect of Initial Curvature on Shrinkage in Laser Heating on Saddle Curved Thin Plate, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 27(2009), pp. 61-66 (in Japanese)
- 7) T. Akiyama, H. Abe: Effect of Heating Direction on Saddle Laser Forming Based on Geodesic In-plane Strain Method, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 29(2011), pp. 210-217 (in Japanese)