

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17360422  
 研究課題名（和文） レーザフォーミングとデジタル技術利用によるぎょう鉄因子の解明  
 研究課題名（英文） Investigation of Major Factors in Bending by Heating with Laser Forming and Information technique  
 研究代表者  
 寺崎 俊夫（TERASAKI TOSHIO）  
 九州工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：60029329

## 研究成果の概要：

金属の板を加熱して無駄なく正確に目的の曲面に成形する技術を、①全工程の加工計画、②目的の収縮を正確に得るための加熱方法、③成形した形の検査と修正の計画の各項目について、問題となる因子を抽出し、解決に導いた。コンピュータ上で曲面に、幾何学でいうところの測地線を描くプログラムは、工程の①と③において有効に働いた。これは本工程が、数学的に正しい方法で構成されていることの証である。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	9,300,000	0	9,300,000
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
総計	12,600,000	690,000	13,290,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：船舶工学，海洋工学，材料工学，シミュレーション，アルゴリズム，面内ひずみ，測地線，

## 1. 研究開始当初の背景

## (1)社会的背景

日本の工業会では、高度な特殊技能者の高齢化と後継者不足の問題がある。金属製の板材にひずみを徐々に加えて変形させ曲面を形成する技術は、型に押し当てて変形させるプレス加工に比べると、変形の機構が理解しがたく、ノウハウの多い技術分野である。造船分野では、ぎょう鉄がこれに当たる。製作工程の自動化を視野に入れ、特殊技能のノウハウを解明し技術化することに対する社会

からの期待は大きいものがある。

## (2)技術的・学術的背景

ぎょう鉄の自動化は、すでに試みられている分野である。基本的には、目的の曲面を押しつぶして平板に戻す過程をコンピュータシミュレーションした数値計算に基づき、その逆の工程で曲面製作を行おうとするものである。押しつぶす方法によって、解は1つではない。この現状は、職人のノウハウをコンピュータシミュレーションの使用上のノウハウに置き換えたに過ぎない。

一方で、人間の思考過程を重視すると、曲面を成形するために必要なひずみ量は幾何学の助けを借りれば数学的に求めることができる。特殊技能のノウハウを、勘の伝承から技術の継承に置き換えるためには、論理的に人間が理解可能な背景を持つ学術的体系の上に築かれた技術の集合として、技術体系を構築し継承する必要があると考える。

## 2. 研究の目的

### (1)幾何学の技術化

非可展面に含まれる面内ひずみ量は、理論上幾何学的に定義が可能な数値であるが、船舶など工業製品の持つ曲面は複雑で、立体モデルは存在しても曲面を表す関数が明記されないことが多い。この現状に対し、数学(幾何学)的に正しい面内ひずみ量を数値解として求める技術を確認する必要がある。もしも、数学的に正しいひずみを知らないまま曲面成形の結果のみを得ようとするならば、これはまさに、職人のノウハウを別の形のノウハウに置き換えたに過ぎないからである。

### (2)ぎょう鉄因子の抽出と加工精度向上の技術

曲面を形成する際の板の変形には、面外変形と面内変形があり、これらの変形が如何に目的通りに正確に与えられるかが重要であり、これを左右する有力な因子を抽出し、定量的に取扱える様にする必要がある。

例えば、特定の収縮量を板の加熱によって得ようとするとき、加熱場所、加熱順序、初期の曲率、初期の寸法によって、入熱条件が同じでも得られる収縮が違えば、これらはぎょう鉄の因子であり、工学的に制御できる状態にしておかなくてはならない。

### (3)完成度の表現と修正

ぎょう鉄では、曲面は加工を加える毎に、目的の形状に近づく。製作途中の曲面と目的の形状との違いを表す方法は、幾通りも考えることができる。しかし、曲面の場合には、例えば、ある個所の曲率が目的の曲率に達していないことが分かることと、その原因とは直接は結び付かない。それは、曲面の形状は面外変形と面内変形の組み合わせの結果として表れているからである。

従って、製作中の曲面の面内変形量と面外変形量を独立して計測する手段が必要で、その結果をもとに、各々の不足分を修正する必要がある。この点が、職人ではない者にとって直観的には理解し難い点である。

## 3. 研究の方法

### (1) 任意曲面で幾何学上のひずみを求めるア

### ルゴリズムの開発

目的曲面が決まったとき、曲面形状の実測値を関数化し、コンピュータ内でその曲面に測地線を引き、面内ひずみを求める。

板材の実収縮量は、加熱前後の板上の標点間距離の変化から測定できるが、測地線から求めたひずみの方が曲面成形の到達度を的確に表していることを示す。

### (2)目的曲率と初期曲率の関係

曲面は、主曲率の特性を基に楕形と鞍型に分類できる。また、曲面内で主曲率が一定値の単純な楕形や鞍形を作る場合には、加熱加工前の初期形状に部分円筒形が選ばれることが多い。目的の曲面を得るために必要な理想的な面内ひずみ量は、幾何学的に求めることができるが、初期の形をどのようにしておけば良いかは力学の助けが必要である。そこで、初期形状を決定するための力学因子を抽出する。

### (3)収縮量測定とぎょう鉄因子の関係の調査

#### ①基本的な試験片の形

本研究に用いた試験片の基本的な形状を図1に示す。厚さ2.4mmのSUS304鋼で、部分円筒形の初期形状を持っている。加熱は、図中Line 1からLine 6までの6カ所を番号順に、板幅方向に、内側から外側に向かって線状に加熱した。これは、楕形用の加熱である。加熱は48mmディフォーカスしたYAGレーザー(1500W)で行い、試験片半幅50mmのうち35mmを加熱した。板端部で大きい入熱となるように、加熱線を7mm間隔に5等分し、レーザータッチ移動速度を調整した。板長はL=300mmの試験片も準備し、板長の影響を調べる際に用いた。

#### ②収縮量の測定

収縮は、板長(x)方向と板幅(y)方向の2種類を測定した。図1中のならんだ○は、収縮の測定用に設けた耐熱塗料の位置を示す。(1)から(4)までの4列あり、たとえば(1)列と(2)列の標点間距離(32.5mm)の加熱前後の変化からは、加熱線Line 5とLine 6による収縮量の測定が行える。裏面にも標点が設けてあり、表裏平均を収縮量とした。また、7mm間隔で1列に並んだ標点間距離の加熱前後の変化から、y方向の板の変位を測定した。距離の測定には、非接触三次元光学画像測定機を用い、2回の測定が1/100mm以下の精度で再現した値を採用した。本装置は、標点の顕微鏡像の重心を、テーブルの移動量と画像処理後の標点重心の画像位置から、1/1000mmの精度で測定できる。

なお標点間は曲面上に存在するが、板幅方向の標点間距離7mmと半径100mmの場合、円弧と弦の長さの差は約0.002mm、板長方

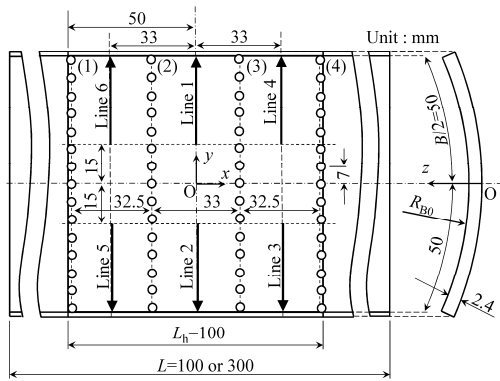


図 1 椀形試験片

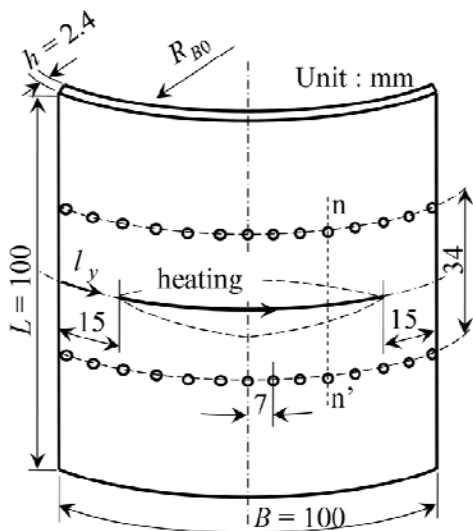


図 2 鞍型試験片

向では標点距離 33mm で半径が約 1000mm であり誤差は約 0.002mm となり、0.01mm の精度の収縮量の実験値に与える影響はほとんどない。図 2 に、鞍型の場合の基本的な形状を示す。

### ③ 曲面形状の測定

加熱後の曲面表面の 3 次元形状は、板幅方向 ( $y$  方向) に 4.9mm 間隔で、板長方向 ( $x$  方向) に 4.7mm 間隔で座標を移動し、曲面までの  $z$  座標を測定し曲面形状を計測した。この測定には、測定器のオートフォーカス機能を用い、試料表面を映し出した画像に焦点が合う位置の  $z$  座標を自動的に探すことができる機能を利用した。

### ④ 鞍型成形における収縮量に及ぼす初期曲率の影響

椀形成形については、初期曲率のみを変更した場合、収縮量はほとんど変化しないことが報告されているが、鞍型については、影響を受けるという予備実験の結果を踏まえて、系統的な実験とその解釈および原因を明確

にし、定量化する。

### ⑤ 椀形成形における収縮量に及ぼす板長の影響

現場の経験則として、長い板は加工し易いといわれている。予備実験でも、短い板は長い板に比べ、変形量が小さいことが示されている。この現象の原因を、変形後の形状、2 方向に測定した収縮量、測地線を用いた面内ひずみ量の比較から明らかにし、短い板の場合でも正しく変形量が評価できる方法を導く。

## 4. 研究成果

### (1) 幾何学的面内ひずみ測定方法の確立

曲面形状を 3 次元座標系で測定し、この座標点の集合に、アイソパラメトリック 1 次要素を適用し、曲面を数式化した。

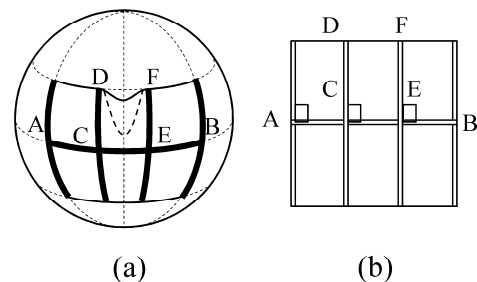


図 3 測地線の特徴

図 3 に、面内ひずみを求める概念図を示す。図 3(a) は、図 3(b) に示す弾性体の薄板を球の赤道を中心に貼り合わせた様子を示す。図 3(b) に示す太い実線部 AB を最初に赤道に貼り合わせる。このとき、弾性板は球に弧 AB で接している。弾性薄板上の AB 間の道のりは変化しない。次に、弾性板の CD および EF を球に貼り合わせたとすると、球面上の DF 間の道のりと弾性板上の DF 間の距離が異なるため、図 (a) に示すようにタルミが生じることになる。貼り合わせた経路である CD および EF 間の長さは変化しないものとする。このタルミを無くせば、きれいな球面を作ることができる。従って、図 (b) のような弾性板を曲面に貼り合わせたとき生じるタルミを測定すれば、曲面と曲面中に含まれる面内ひずみを知ることができる。図 (a) が目的形状である場合には、計算された面内ひずみは加工に必要な面内ひずみ量となる。図 (a) が加工途中の形状であるならば途中までで導入されたひずみ量となる。図 (b) は、タルミを解消すべき場所が 6 か所あり、これは図 1 に示した試験片によく似ている。

平面に描いた直線が曲面の接線となるよ

うに移動させたときの接点の軌跡は、幾何学でいう測地線である。従って、図(b)のような直線を曲面上に測地線として描けば、線間の距離の変化から、面内ひずみを知ることができる。

図4に、測地線の描き方を示す。幾何学では、測地線の加速度ベクトルは曲面に垂直であるとされる。従って、この性質を満たしながら、平面の接点を移動させる作業をコンピュータ内で行う。図4(a)において、ABは、点A、Bで曲面と交わる微小な線分とする。点Cは、Bを通る垂線BCと曲面との交点である。このとき、三角形ABCは、この三角形の内側に接点を持つ接面を代表していると考えられる。次に、線分BCと同じ長さを持つ線分BDが曲面と端点で交わる点をDとする。このとき、三角形ABDは、この三角形の内側に接点を持つ接面を代表していると考えられる。線分CBとBDを接線とみなすとき、この接線の加速度ベクトルは

$$\vec{BD} - \vec{CB}$$

で、このベクトルは三角形ACDに垂直であるから、接線CBDを含む接面に加速度ベクトルが垂直となり、離散的な測地線が得られたことになる。線分BDに垂直で線分ABと同じ長さの線分DEと曲面の交点をEとし、線分EDに垂直で線分BDと同じ長さの線分DFと曲面の交点Fを求め、同様の操作を順次繰り返すと、測地線が離散的に得られると考える。

一方、点CBDFは、ここで定義した接面の

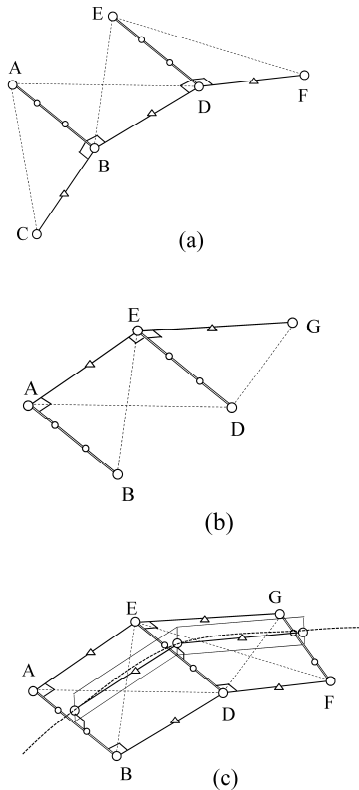


図4 測地線の描き方

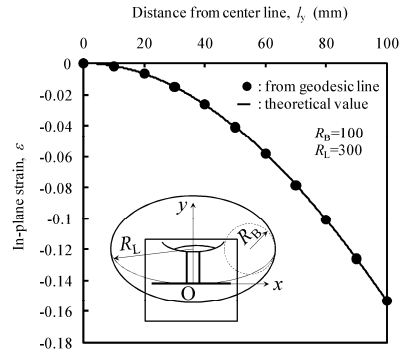


図5 面内ひずみの計算精度

端の点になっている。図4(b)には、線分ABのA点を起点にした場合の測地線を示す。この場合も測地線は、接面の端の点を通っている。

図4(a)、(b)より、1つの線分ABを起点にして、2つの測地線の候補が上がるのがわかる。また、これらは、線分ABの長さが零に収束するとき、一致する。

本研究では、測地線AEGとBDFの中間に位置し、かつ、線分ABの長さが零に収束するとき、測地線AEGとBDFに一致する測地線を、図4(c)のようにして求めた。図中ABは曲面上の点で、点Dは図4(a)と同じ方法で求める。E点は図4(b)に示す方法で、点Aを起点に求める。線分ABに中点で垂直に交わる平面と曲面の交線を考える。この交線を直線に近似したものが、求める測地線となる。本研究では、線分AEやBDと同じ長さをもつ線分で交線をつないだ。

本方法で求めた面内ひずみは、トーラス形状に関しては、理論値と同じ値が得られることを、 $R_b=300$ 、 $R_b=100$ の楕円で確認した図を図5に示す。主曲率が $R_b$ と $R_L$ のトーラス上の楕形(ドーナツ形状の最大径を中心とした凸部)の場合、ひずみ $\epsilon$ は式(1)で示される。

$$\epsilon = -\frac{R_B}{R_L} \left( 1 - \cos\left(\frac{l_y}{R_B}\right) \right) \dots \dots \dots (1)$$

(2) 目的曲率と初期曲率の関係

板材に適当な初期曲率と適当な面内ひずみを与えると楕型や鞍型を形成することができるが、たとえば板厚が大きくなると、幾何学で与えられるひずみを加えても、目的の曲面が得られなくなる。これは、曲面形成に伴い曲がるために発生する曲げモーメントを維持するためには、面内方向に応力が必要で、それに応じた弾性ひずみが加工で与えた面内ひずみを打ち消す方向に発生する。これらを考慮してモデル化し、図示したものを図6に示す。縦軸が1のとき、目的通りの曲面ができたことを表す図である。横軸の板厚が増すと、目的の形状からずれていることが分

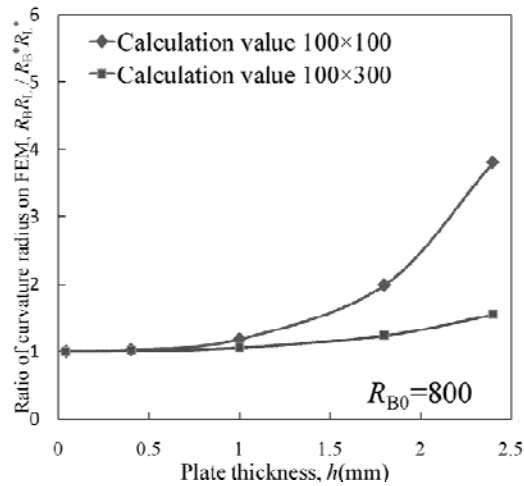


図 6 モデル計算により求めた板熱効果

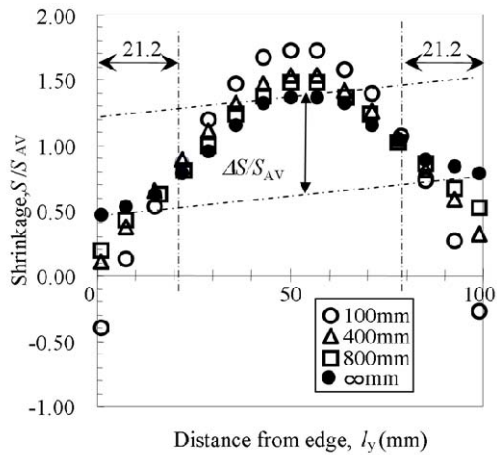


図 7 面内ひずみ分布に及ぼす初期曲率の影響

かる。この効果を考慮して、初期曲率と面内ひずみを求める式を導出した。

### (3) 収縮量測定ときょう鉄因子の関係

#### ① 鞍型成形における収縮量に及ぼす初期曲率の影響

初期曲率半径に 100mm、400mm、800mm、平板を用い、図 2 に示す箇所に加熱を行い、収縮量の分布を調べた結果を図 7 に示す。分布形状を平均値と最大最少差に特徴付け、加熱中の拘束を部分円筒の曲げ応力で代表し整理したところ、ひずみ分布の特徴を説明することができた。1 例として図 8 に、平均値を整理した結果を示す。詳細は発表論文（溶接学会論文集、27 巻、61-66、2009、査読有）に譲るが、よく整理できている。

#### ② 椀形成形における収縮量に及ぼす板長の影響

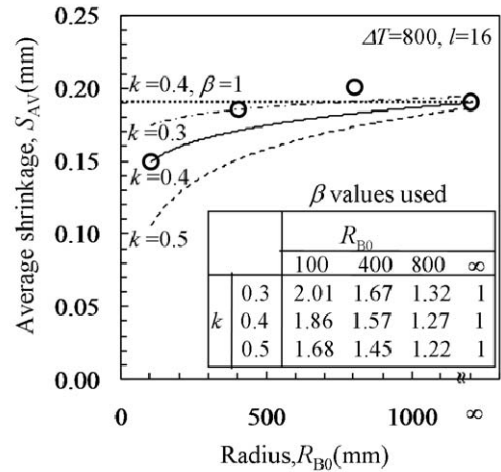


図 8 ひずみ平均値の予測

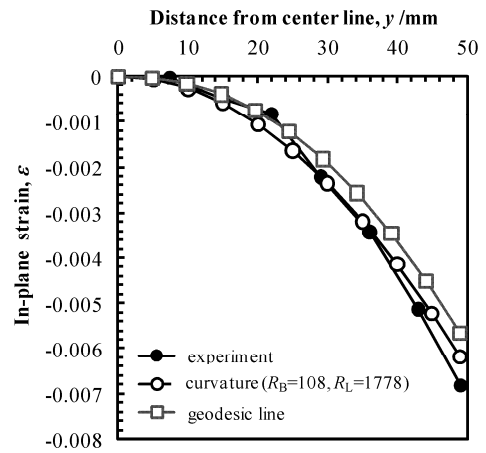


図 9 板長が長い場合のひずみ分布の比較

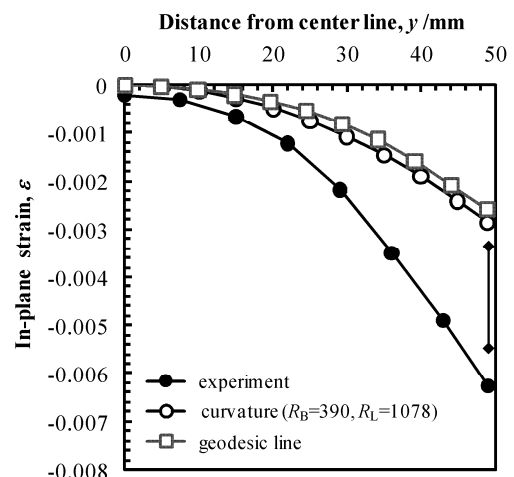


図 10 板長が短い場合のひずみ分布の比較

図 6 より、板長が 300mm と長い方が、板厚が増した時の理想の形状（縦軸の値が 1）からのずれ方が小さいことが分かる。図 9 に、板長が長い場合の標点間から実測した板の面内ひずみを●で、変形状から測地線の幅の変化より求めた面内ひずみを□で、実測形状をトラスに近似した時の解析解を○で示す。いずれも良く似た分布を示しており、与えた収縮が変形に利用されていることが分かる。短い試験片の場合の図 10 では、板の収縮から求めたひずみのみが大きく、板が示す収縮に見合うほどの変形が現われていないことが分かる。この効果は、図 6 にも現われており、本モデルには、この効果が組み込まれていることが分かる。

### (3)完成度の表現と修正

図 9 と図 10 の比較からわかるように、測地線から算出した面内ひずみは、曲面形状のもつ面内ひずみの理論値に等しく、面内ひずみ量のみで達成度を表すことができる指標となることが分かる。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 12 件）

- ①秋山哲也、寺崎俊夫、北村貴典、レーザーフォーミングされた薄板椀形実曲面の面内ひずみの推定、溶接学会論文集、27 巻、139-144、2009、査読有
- ②秋山哲也、角保光義、寺崎俊夫、北村貴典、レーザー加熱を用いた薄板鞍形成形時の収縮量に及ぼす初期曲率半径の影響、溶接学会論文集、27 巻、61-66、2009、査読有
- ③角保光義、秋山哲也、寺崎俊夫、鞍形レーザーフォーミングにおける収縮量に及ぼす初期曲率半径の影響、溶接学会九州支部講演論文集、5 巻、1-4、2008、査読無
- ④後藤将徳、秋山哲也、寺崎俊夫、椀形レーザーフォーミングにおける初期曲率の選定について、溶接学会九州支部講演論文集、5 巻、5-6、2008、査読無
- ⑤瀧上雅史、秋山哲也、寺崎俊夫、レーザーフォーミングによる鞍型成型時の収縮量に関する基礎的研究、溶接学会九州支部講演論文集、4 巻、27-30、2007、査読無
- ⑥吉岡宏幸、秋山哲也、寺崎俊夫、椀形レーザーフォーミングにおける変形に及ぼす板長の影響、溶接学会九州支部講演論文集、4 巻、31-34、2007
- ⑦住吉晃、西田尚典、寺崎俊夫、三角焼きで生じる絞り量に及ぼす線状加熱加工因子の FEM 解析による検討、溶接学会九州支部講演論文集、3 巻、31-36、2006、査読無
- ⑧住吉晃、寺崎俊夫、西田尚典、北村貴典、

FEM 解析による三角焼きで生じる絞り量に及ぼす線状加熱加工因子の検討、溶接学会国大会講演概要集、79 巻、390-391、2006、査読無

⑨藤井美保、秋山哲也、寺崎俊夫、面内ひずみを用いたねじれ曲面成形方法の検討、溶接学会国大会講演概要集、79 巻、394-395、2006、査読無

⑩寺崎俊夫、三角焼きにより生じる絞り量に及ぼす線状加熱加工因子の影響、日本船舶海洋工学会 材料・溶接研究会、5 巻、1-12、2006、査読無し

⑪秋山哲也、寺崎俊夫、松岡智裕、面内ひずみを用いた曲面成形における初期曲率、溶接学会九州支部講演論文集、2 巻、108-113、2005、査読無

〔学会発表〕（計 5 件）

①Tetsuya Akiyama, Estimation of In-Plane Strain for Laser Forming, 8th International Symposium of the Japan Welding Society, 2008, 11, 16, Kyoto

②後藤将徳、椀形レーザーフォーミングにおける初期曲率の選定について、溶接学会秋季全国大会、2008, 9, 11、北九州国際会議場（北九州市）

③角保光義、鞍形レーザーフォーミングにおける収縮量に及ぼす初期曲率半径の影響、溶接学会秋季全国大会、2008, 9, 11、北九州国際会議場（北九州市）

④瀧上雅史、レーザーフォーミングによる鞍型成型時の収縮量に関する基礎的研究、溶接学会秋季全国大会、2007, 9, 21、信州大学（長野）

⑤吉岡宏幸、椀形レーザーフォーミングにおける変形に及ぼす板長の影響、溶接学会秋季全国大会、2007, 9, 21、信州大学（長野）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺崎 俊夫 (TERASAKI TOSHIO)  
九州工業大学・工学部・教授  
研究者番号：60029329

### (2) 研究分担者

秋山 哲也 (AKIYAMA TETSUYA)  
九州工業大学・工学部・准教授  
研究者番号：90136537  
北村 貴典 (KITAMURA TAKANORI)  
研究者番号：70274553

### (3) 連携研究者

なし