折り紙工学とレーザ焼入れフォーミングによる 3 次元複雑形状板ばねの製造システム

同志社大学　機械システム工学科
教授　廣垣　俊樹
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022208-B2）

キーワード：レーザー，焼入れ，フォーミング，板ばね，折り紙工学，薄鋼板

1．研究の目的と背景

ばねは JIS B 0103 で「物体の弾性又は変形によって蓄積されたエネルギーを利用することを主目的とする機械要素」と定義されており，身の回りにある生活用品や事務機器，自動車をはじめとする工業用品に数多く使用されている．現在，ばねは自動車，機械，電機・電子の 3 業界分野で成長と発展を大きくけん引する基幹部品となっている．その中でも，電機・電子の分野の高付加価値製品の可動部に用いられている小型複雑形状の板ばねの日本の生産額は 1993 年以後も次第に増大の傾向にある．

したがって，高機能で付加価値の高い小型複雑形状のばねの新たな研究開発や試作の技術が求められるが，それらは金属ばね製造技能士の「勘コツ」暗黙知に支えられており，CAE に支援されたデジタルツインに基づく新しい技術が必要である．

図 1 に示すように，板ばねは曲げ加工によりその機能を付加され，一般的な可動部で用いる鋼材系ばね部品には繰り返し応力による「へたり」を防止するため、焼入れなどの熱処理が必要（止めばねを除く）となる．ここでレーザプロセスに着目すると，曲げ加工のレーザフォーミング[1)]と表面処理となるレーザ焼入れ[2)]を兼ね備えており，高度にビーム制御することで新たなデジタルツインに資する板ばね製造の技術が構築されるものと考えられる．

そこで本研究ではレーザ照射の組み合わせに基づき，板ばねのフォーミングと焼入れ処理を達成し，さらにその特徴を活用しての複雑形状の板ばねの創成に取り組む．

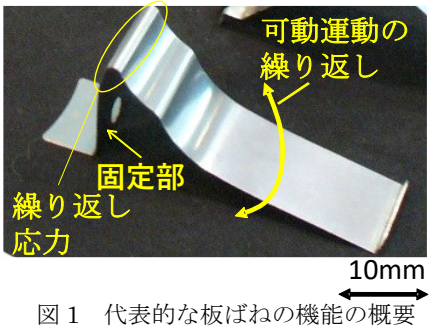


図 1　代表的な板ばねの機能の概要

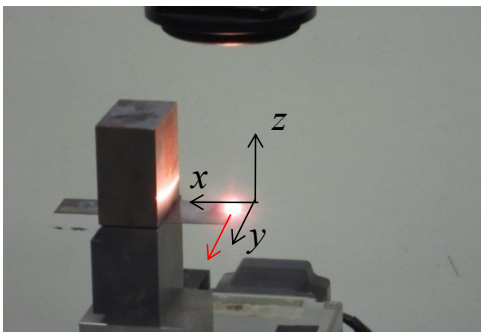
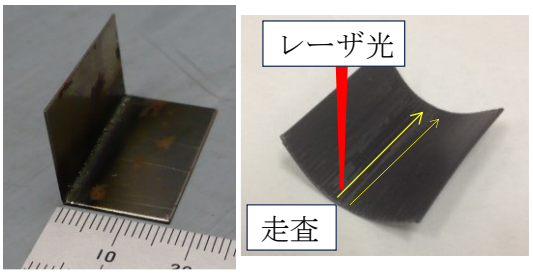


図 2　鋼板に対するレーザ照射制御の様子



(a)折り目曲げ　　(b)円弧曲げ
図 3　レーザフォーミングの例

2．基本コンセプトと実験方法

2・1　レーザ焼入れフォーミングと折り紙工学

鋼板の場合，図 2 に示すように直線でレーザ照射して表面の温度を A_1 変態点（723℃）以下に設定すると，温度勾配に基づく熱応力に起因して曲げ変形が生じる．繰り返し同一直線上に照射の操作を繰り返すと，図 3(a)に示すように直角に近い角度まで曲げることが可能である．また走査の繰り返しで走査線を隣接させながら重複させないと，例えば図 3(b)のように円弧状にも曲げが可能である．レーザフォーミングでは，どちらの変形も可能であるが，本研究では図 3(a)が折り紙の折り目に近いことに着目して，その折り目の組み合わせにより，複雑な板ばね形状の創成に取り組んだ．一方で，折り目付近には繰り返し可動時に高

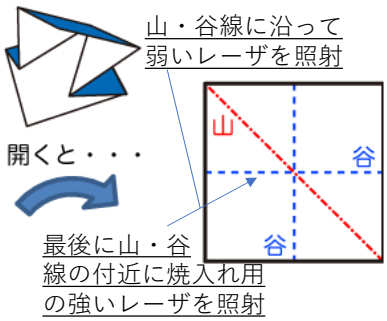


図 4　折り紙工学とレーザ焼入れフォーミングの融合

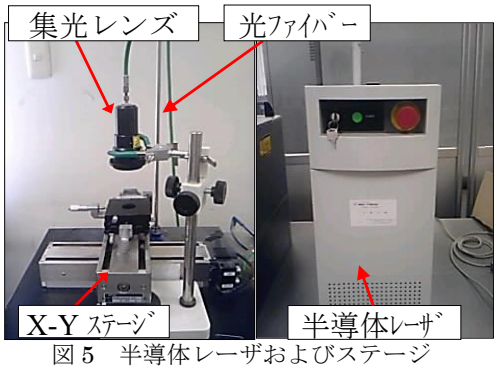


図 5　半導体レーザおよびステージ

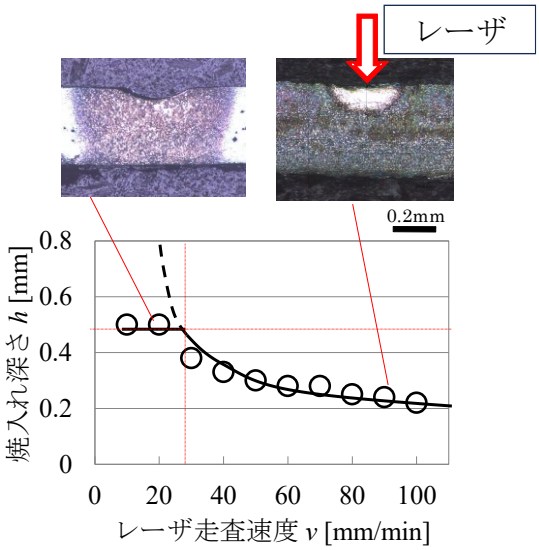


図 6　レーザ走査速度と焼入れ深さ

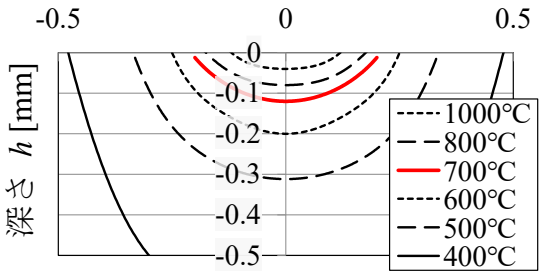


図 7　温度予想の結果（走査速度 100mm/min）

い応力が生じる．そこで最後に，適切な炭素量を有する板鋼を選定（本研究の場合は S50C）しておき，いわゆる使用時の板ばねの疲労による「へたり」を抑制するため，レーザ焼入れ用に表面が A1 変態点（723℃）以上に昇温するように設定したレーザ照射の走査を折り目付近に遂行する．以上が図 4 に示す，折り紙工学[3]とレーザ焼入れフォーミングを融合するための基本的なコンセプトになる．

2・2　実験方法と主な条件

図 5 に実験で用いた半導体レーザ装置を示す．浜松ホトニクス製 LD-HEATER L10060 で光ファイバー伝送して最小スポット径はφ0.4mm，最大出力 30W，波長 808nm である．対象とした鋼板は 30mm×30mm で厚さ 0.5mm である．カロリー法で板鋼表面のレーザ光の吸収率を調べると 60%程度と十分であり，表面には特に吸収剤などの塗布はしないで実験した．一般に YAG レーザ波長（1.06μm）付近で研削仕上げ程度の鋼材表面の吸収率は 30～40%である[4]が，それより吸収率が向上する短波長の 808nm なので妥当な結果と考える．したがって，製造現場での応用も考慮して表面への吸収剤の塗布はない条件で進めた．

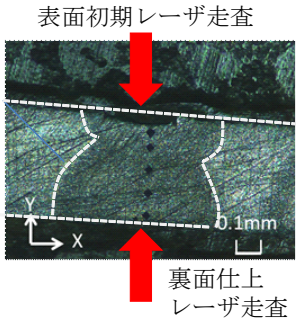


図 8　薄鋼板の全厚のレーザ焼入れ方法

3．実験結果および考察

3・1　ばね板鋼のレーザ焼入れ深さ

図 6 にレーザ焼入れ走査速度と鋼板の焼入れ深さ（ナイタル液で腐食して変色した範囲）の関係を示す．レーザ出力 30W，スポット径 0.4mm である．焼入れを想定するとレーザ出力が 30W は非常に低いが，薄板では厚さ方向（板厚 0.5mm）の熱容量が少なく，走査速度を適切に設定すれば焼入れが可能であることがわかる．

図 7 に表面にレーザの移動熱源（ワークの初期温度は 20℃でそこからの温度上昇を計算）とし，裏面にイメージ法で深さ方向の温度を折り返して加算することで板厚方向の熱容量を考慮した温度予想の結果（走査速度 100mm/min）を示す．A_1 変態点（723℃）以上の深さの予想と図 6 の結果はかなり一致しており，薄板では小出力のレーザでも十分に焼入れが可能であることがわかる．さらに図 6 より，走査速度を非常に低速（例えば図 6 の 20mm/min 以下）にすれば，表面から裏面まで全厚に焼入れが可能であることもわかる．

ただし図 6 中に示す変色部を詳細に観察すると，全厚焼入れの場合にはナイタル腐食で焼入れ部が黒色化している．この結果は腐食性が高い組織（ソルバイト等）であることを示しており，そのマイクロビッカース硬さを調べた結果は 400HV 程度で，十分な硬さが得られていないことがわかった．一方，走査速度が速い（例えば 30mm/min 以上）場合の焼入れ部は白色化しており，腐食性が低いマルテンサイト組織で硬さも 700HV 以上あることもわかった．

そこで薄板の全厚焼入れ方法として，表面から初期のレーザ焼入れを遂行して，その後にワークを裏返して裏面から仕上げのレーザ焼入れ走査を遂行する手法とした．結果を図 8 に示す．走査速度は 40mm/min である．図より，

全厚の焼入れが可能となり，また初期の焼入れ部が仕上げの入熱により焼戻される懸念もあったが，厚さ方向の硬さ分布も一定であることが確認できた．したがって，レーザフォーミングで形状を創成した後，最後に裏表照射のレーザ焼入れを用いることで，レーザ焼入れフォーミングが可能であることが判明した．

3･2　ばね板鋼のレーザフォーミングによる折り目角度

本研究では折り紙工学に対する応用を検討するため，図3(a)に示す同一線に対する繰り返しレーザ走査での折り目の角度が重要になる．そこで図 9 に示すように，レーザ走査方向（図 9 中の y 方向）に対して直交する x 軸への変形角を調べた．レーザ走査速度，レーザスポット径，レーザ出力の影響について様々調べた結果，レーザ出力の影響が最も大きいことがわかり，能率を最大にするために出力は最大 30W にした．さらにスポット径を小さくするとワークの極表面の温度が上昇して，一部に溶融が生じて表面の品質が悪化することも判明したので，溶融を確実に防止するため，図 7 に示す温度予想の手法も併用しながらスポット径を 1.4mm に設定した．走査速度 100mm/min で，走査回数と変形角度の関係を調べた結果を図 10 に示す．変形角を 50° 以上にするような場合には非線形性を示しているが，それ以下の場合は走査回数に対して線形的な変形であることがわかる．したがって走査回数で折り目の変形角を精度よく制御できることが判明した．

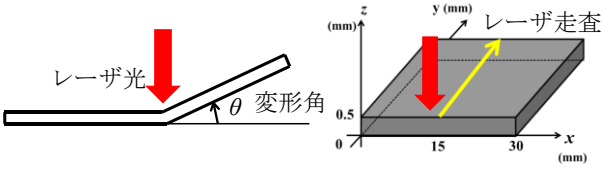


図 9　レーザ走査による変形角の定義

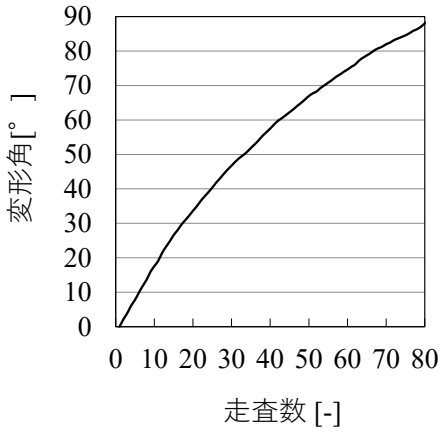


図 10　レーザ走査回数と変形角の関係

3・3　折り紙工学に基づくケーススタディ

板皿ばねに近い機能で，折り紙で折形状を検討した結果を図 11 に示す．30mm×30mm の紙に対して折り目を加え，頂点部を鉛直方向に上下動して機能を確認している例である．折り紙の伸縮で板皿ばねとしての機能が確認できたので，折り紙としての山折りと谷折りの走査パスの設計を遂行した結果を図 12 に示す．前節までの結果に基づき，レーザフォーミングによる折り目で山折りは裏面から，谷折りは表面からのレーザ照射を遂行する．図 5 の X-Y ステージ上に治具またはコンパクトロボットを搭載して，レーザ光に対して法線方向にワークの裏表の姿勢を維持するようにした．必要な走査回数は図 10 で求め，走査の順は図 12 中の①～⑯に示す．フォーミングのレーザ走査条件は 3.2 節と同様，さらにレーザ焼入れの走査条件は 3.1 節と同様とした．変形角（折り目の角度）は 30° を基本としたので，フォーミングの走査は各折り目線に対して 14 回とした．

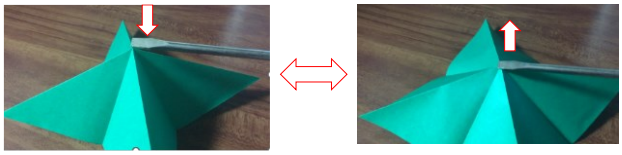


図 11　複雑形状を想定した折り紙による板ばね運動

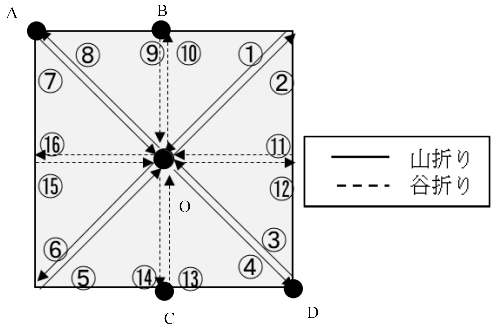
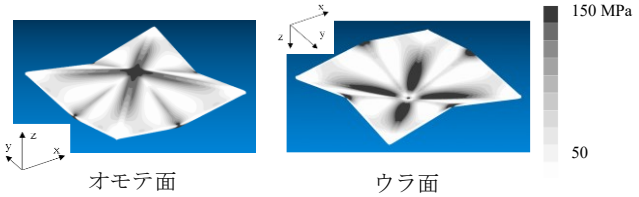


図 12　折り紙の山折りと谷折りに対するレーザ走査パス



オモテ面　　ウラ面
4点拘束　ミーゼス応力（荷重50 N，変位0.12 mm）

図 13　鉛直方向への微小変形時の応力分布

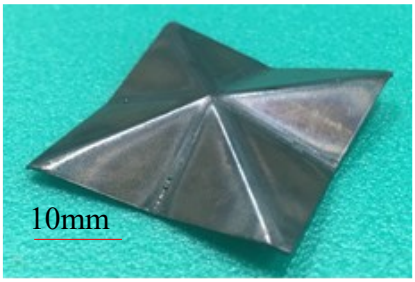


図 14　折り紙工学に基づく複雑形状皿ばねの試作例

図 13 は設計した折り紙工学に基づく複雑皿ばね形状に対して，有限要素法で鉛直方向に 0.12mm 変形（頂点への荷重 50N）した場合のミーゼス応力の分布（最大応力

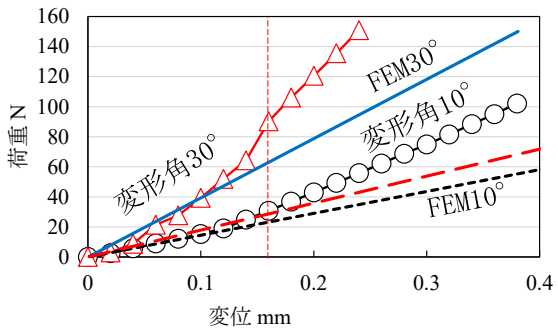


図 15　鉛直方向の荷重時のばねの変位と荷重の関係

は 150MPa 程度）である．頂点の山折り線や外周部の谷折り線の付近に大きな応力が生じることがわかる．ばねとしての機能を維持するためには，この箇所の繰り返し疲労（へたり）の抑制が必要であり，そこで応力の高い箇所にレーザ焼入れを遂行した．これらを結果に基づく，折り紙工学に基づく複雑形状皿ばねの試作例を図 14 に示す．また S50C の焼入れ鋼の降伏応力は 550MPa 程度であるので，線形計算で試算すると 0.12×（550/150）＝0.44mm 程度までの鉛直方向のばね変位が可能な機能を有するものと考えられる．

そこで試作した複雑形状皿ばねの頂点に鉛直荷重を加えた場合の変位を調べた．また変形角 10° の複雑形状皿ばねも試作して調べた．結果を図 15 に示す．また図中には有限要素法による変位の結果も合わせて示す．変形角 10° の場合には，有限要素法の支点の拘束数を変化させた場合も示すが，大差はなかった．図より，荷重による変位が 0.15mm 程度までは実験による実測と有限要素法の結果が良く一致することがわかる．それ以上の荷重では誤差が生じているが，有限要素法が線形計算であるのに対して実際は大変形問題となることによる影響，さらに平面に対する支点は 3 点であるのが基本になるが，試作品には対称性に誤差があるために変形が大きくなると 4 点支持が生じ，ばね剛性が上昇する影響も考えられる．しかしながら大きな変形でなければ，CAE（有限要素法）により折り紙工学で設計された複雑皿ばねの機能性を十分に予想できることがわかった．

４．まとめ

焼入れのための炭素量含む薄鋼板に対して，照射表面が A_3（723℃）変態温度以下になるようなレーザ光を直線で繰り返し照射して折り目を創成し，その折り目の組み合わせを折り紙工学で板ばねとしての機能性ある複雑形状として設計し，さらに工程の最後で折目に照射表面が A_3 変態温度以上になるようなレーザ光を照射して焼入れを遂行する手法を提案した．レーザ照射条件の基礎を考察した後，ケーススタディで複雑皿ばねを試作して，その性能を評価した結果，十分に機能することが確認でき，提案手法の可能性を示すことができた．

謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団の研究開発助成のもとで行われたもので，ここに感謝の意を表します．

参考文献

1)　難波義治・片山卓也，レーザ・フォーミングの三次元熱弾塑性解析，精密工学会誌，65-9(1999)1330-1334.
2)　丸尾大・宮本勇・石出孝・荒田吉明，レーザ焼入れの研究（炭素鋼の硬化条件の解析）溶接学会誌，50-2(1981)208-214.
3)　野島武敏・杉山文子・斉藤一哉，折紙による機能構造と 3 次元構造のモデル化，成形加工，19-6，(2007)328-333.
4)　喜田義宏・藤川泰・廣垣俊樹・中川平三郎・垣野義昭・山路伊和夫，小出カレーザによる機上焼入れに関する研究，精密工学会誌，65-3，(1999)391-395.