

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	光を利用した形状記憶合金の加工と操作
Title(English)	Processing and actuation of shape memory alloy by light
著者(和文)	古谷俊輔
Author(English)	Shunsuke Furuya
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第7179号, 授与年月日:2008年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:戸倉 和
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第7179号, Conferred date:2008/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成19年度 学位論文

光を利用した形状記憶合金の加工と操作

Processing and Actuation of Shape Memory Alloy by Light

古谷 俊輔

東京工業大学大学院 理工学研究科 機械物理工学専攻

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 はじめに	2
1.2 形状記憶合金の現状	5
1.2.1 形状記憶合金の加工.....	5
1.2.2 形状記憶合金の操作.....	6
1.3 光を利用した形状記憶合金の新しい加工と操作の提案	8
1.3.1 光と形状記憶合金	8
1.3.2 光を用いた形状記憶合金の加工.....	8
1.3.3 光を用いた形状記憶合金の操作.....	8
1.4 本研究の目的	10
参考文献.....	11
第2章 形状記憶合金の相変態を利用した反射率可変ミラー	15
2.1 はじめに	16
2.1.1 本章の背景と目的	16
2.1.2 反射率分布可変ミラー	17
2.1.3 形状記憶合金の反射率変化.....	17
2.2 反射率変化増大の方法.....	20
2.3 実験方法	21
2.3.1 実験手順.....	21
2.3.2 試料	21
2.3.3 実験装置	21
2.4 研磨のオーステナイト変態温度への影響	23
2.5 形状記憶処理のタイミングによる違い.....	25
2.5.1 常温での表面観察および粗さ測定.....	25
2.5.2 加熱時の表面粗さの変化.....	25
2.5.3 加熱時の反射率の変化	26
2.6 研磨温度による違い	29
2.6.1 常温での表面観察および粗さ測定.....	29
2.6.2 加熱時の表面粗さの変化.....	29
2.6.3 加熱時の反射率の変化	29
2.7 まとめ	32
参考文献.....	33
第3章 レーザ照射による形状記憶合金表面へのエッチマスク直接描画.....	35
3.1 はじめに	36

3.2 実験方法	37
3.2.1 試料およびその前処理	37
3.2.2 エッチング方法および装置	37
3.2.3 レーザ照射装置	37
3.3 酸化膜の耐エッチング性能	39
3.4 形状記憶合金表面へのレーザー照射	41
3.4.1 レーザ照射条件と表面変化との関係	41
3.4.2 変色部の形状	41
3.5 レーザ照射時の温度分布	46
3.5.1 計算式及びパラメータの設定	46
3.5.2 照射点の温度	46
3.5.3 熱の影響範囲	47
3.6 レーザ照射を行った形状記憶合金のエッチング	51
3.6.1 エッチング形状	51
3.6.2 マスク不良	51
3.6.3 サイドエッチングの影響	52
3.6.4 レーザ照射条件	52
3.7 線形状の作製	57
3.7.1 レーザ走査時の熱分布	57
3.7.2 レーザ照射とエッチング	57
3.8 まとめ	59
参考文献	60
第4章 レーザ照射による形状記憶合金アクチュエータの駆動	61
4.1 はじめに	62
4.1.1 本章の背景と目的	62
4.1.2 3D 触覚ディスプレイ	63
4.1.3 面外変位アクチュエータ	63
4.2 レーザ照射による形状記憶合金箔の局所加熱	67
4.2.1 試料および実験装置	67
4.2.2 実験の結果と考察	67
4.3 3D 触覚ディスプレイ	71
4.3.1 実験装置	71
4.3.2 局所変形の確認	71
4.3.3 突起のサイズおよびアスペクト比とレーザー照射条件および形状記憶合金 パラメータとの関係	71
4.3.4 突起の最接近距離	73

4.3.5 変形に要する時間.....	73
4.3.6 3D 触覚ディスプレイのまとめ.....	74
4.4 面外変位アクチュエータ.....	84
4.4.1 幾何学モデルによるアクチュエータ動作の予測.....	84
4.4.2 アクチュエータの作製とレーザ照射実験.....	85
4.4.3 シミュレーション結果と実験結果との比較.....	90
4.4.4 面外変位アクチュエータまとめ.....	90
4.5 まとめ.....	93
参考文献.....	94
第5章 結論.....	95
5.1 形状記憶合金の相変態を利用した反射率可変ミラー.....	96
5.2 レーザ照射による形状記憶合金表面へのエッチマスク直接描画.....	96
5.3 レーザ照射による形状記憶合金アクチュエータの駆動.....	96
5.3.1 3D 触覚ディスプレイ.....	96
5.3.2 面外変位アクチュエータ.....	97
5.4 光と形状記憶合金.....	97

目次

Fig. 2-1 Schema of light control devices	18
Fig. 2-2 Schema of reflectance distribution changeable mirror.....	18
Fig. 2-3 Schema of light reflectance change.....	19
Fig. 2-4 DSC result of shape memorized SMA.....	22
Fig. 2-5 Polishing instrument.....	22
Fig. 2-6 DSC result of untreated sample, shape memorized sample and shape memorized and polished sample	24
Fig. 2-7 Pictures of SMA samples	27
Fig. 2-8 Optical micrographs and laser scanning microscopy images of SMAs....	27
Fig. 2-9 Relations between wave length and reflective ratio (process comparison)	28
Fig. 2-10 Reflective ratio changes by phase transformation (process comparison)	28
Fig. 2-11 Pictures of polished SMAs	30
Fig. 2-12 Optical micrographs and laser scanning microscopy images of SMAs....	30
Fig. 2-13 Relations between wave length and reflective ratio (polished temperature comparison).....	31
Fig. 2-14 Reflective ratio changes by phase transformation (polished temperature comparison).....	31
Fig. 3-1 Experimental setup of electrochemical etching	38
Fig. 3-2 Pictures of heat treated surfaces.....	40
Fig. 3-3 Pictures of heat treated and etched surfaces	40
Fig. 3-4 Relation between annealed temperature and etched depth.....	40
Fig. 3-5 Optical micrographs of SMAs irradiated by laser beam	43
Fig. 3-6 Relation between laser power and diameters of discoloration.....	44
Fig. 3-7 Relation between laser irradiated time and diameters of discolorations	44
Fig. 3-8 AFM images of SMA surfaces irradiated by 500mW laser beam.....	45
Fig. 3-9 SEM image of SMA surface irradiated by 1000mW x 7.0s laser beam ...	45
Fig. 3-10 Relation between laser power and temperature of irradiated center....	48
Fig. 3-11 Internal temperature distribution generated by 400mW laser beam ...	49
Fig. 3-12 Temperature distributions on surface and light axis generated by 400mW laser beam.....	49
Fig. 3-13 Temperature distributions on surface and light axis generated by 1000mW laser beam.....	50

Fig. 3-14 SEM image of a pillar formed by etching after 400mW x 0.3s laser irradiation	53
Fig. 3-15 SEM image of a hill formed by etching after 300mW x 0.5s laser irradiation	53
Fig. 3-16 Relation between laser irradiated time and pillar diameter	54
Fig. 3-17 SEM image of a pillar with defects formed by etching after 900mW x 0.5s laser irradiation	55
Fig. 3-18 Cross sectional view of a pillar with defects.....	55
Fig. 3-19 Relation between laser irradiated time and pillar diameter versus discoloration diameter ratio.....	56
Fig. 3-20 Side views of pillars.....	56
Fig. 3-21 SEM image of a line formed by etching after 400mW laser beam scanning	58
Fig. 3-22 Cross sectional view of a line formed by etching.....	58
Fig. 4-1 Schema of multiple degrees of freedom moving	65
Fig. 4-2 Schema of usual tactile display	65
Fig. 4-3 Schema of proposed tactile display	65
Fig. 4-4 Schema of making protrusion(s).....	66
Fig. 4-5 Schema of usual SMA foil actuator	66
Fig. 4-6 Schema of proposed SMA foil actuator and its actuation.....	66
Fig. 4-7 Experimental setup of local heating	69
Fig. 4-8 Temperature distribution generated by laser heating.....	70
Fig. 4-9 Relation between laser irradiated conditions and displacement area diameter	70
Fig. 4-10 Experimental setup of local actuation	75
Fig. 4-11 Pictures of protrusion(s).....	75
Fig. 4-12 Relation between laser power and protrusion size	76
Fig. 4-13 Relation between tension and protrusion size	77
Fig. 4-14 Relation between width of SMA rectangle and protrusion size	78
Fig. 4-15 Relation between memorized diameter and protrusion size.....	79
Fig. 4-16 Minimum space between two protrusions	80
Fig. 4-17 Time response of a protrusion	81
Fig. 4-18 Time response of generating protrusion.....	82
Fig. 4-19 Time response of disappearing protrusion	83
Fig. 4-20 Geometric model of out-of-plane displacement actuator	86
Fig. 4-21 Calculated out-of-plane displacement actuator shape	86

Fig. 4 -22 Comparing of actuator edge moving area in simulation	87
Fig. 4 -23 Picture of out-of-plane displacement actuator	88
Fig. 4 -24 Experimental setup of out-of-plane displacement actuator	88
Fig. 4 -25 Pictures of operated actuator	89
Fig. 4 -26 Operated actuator edge diagram.....	89
Fig. 4 -27 Operated actuator edges by simulation and experiment	91
Fig. 4 -28 Comparing of actuator edge location	92

表目次

Table 2-1 SMA parameters.....	22
Table 2-2 Surface roughness changes by process change.....	27
Table 2-3 Surface roughness changes by polished temperature.....	30
Table 3-1 Relation between laser irradiated parameters and pattern of discoloration	43
Table 3-2 Parameters of laser and SMA	48
Table 3-3 Relation between laser irradiated parameters and pattern of etched shape.....	54
Table 4-1 SMA parameters	69
Table 4-2 Experimental conditions of local actuation.....	75
Table 4-3 Transformation time.....	81
Table 4-4 Modeling parameters.....	86
Table 4-5 Measured deformation area length	86
Table 4-6 Experimental conditions of out-of-plane displacement actuator.....	88

第1章 緒論

1.1 はじめに

1.2 形状記憶合金の現状

1.2.1 形状記憶合金の加工

1.2.2 形状記憶合金の操作

1.3 光を利用した形状記憶合金の新しい加工と操作の提案

1.3.1 光と形状記憶合金

1.3.2 光を用いた形状記憶合金の加工

1.3.3 光を用いた形状記憶合金の操作

1.4 本研究の目的

参考文献

1.1 はじめに

形状記憶合金(Shape Memory Alloy: SMA)はその名の通り、塑性変形後であっても、加熱することでもとの形状に復帰するというユニークな性質を持った金属である。この性質は形状記憶効果(Shape Memory Effect: SME)と呼ばれ、基礎から応用まで数多くの研究がなされ、おもちゃや衣料など身近な産業分野から医療、航空宇宙などの先端技術分野まで幅広く利用されている¹⁻⁶⁾。

金属材料の SME は 1951 年にアメリカ、Columbia University の Read らによって Au-Cd 合金において最初に見出され⁷⁻¹⁰⁾、1958 年のブラッセル万博において、その効果を利用してある種の機能的機器を作製することができることが示された。1960 年には同合金を使用した温度スイッチがアメリカにおいて提案された。Read らは同時期に In-Tl 合金においても SME があることを見出していた¹¹⁾が、いずれの合金も高価で人体に有害であり、一般的でない元素を含んでいたため、学術的な興味は持たれたものの、実用化に向けた取り組みはほとんど行われなかった。また、SME という言葉もこの時期にはまだ存在していなかった。

その後、1963 年に U.S. Naval Ordnance Laboratory (アメリカ海軍研究所)にて艦船用構造材料の開発中に Ti-Ni 合金において SME が発見され、1965 年に同研究所の Buehler らによって学術雑誌に初めて公表される¹²⁾。Ti-Ni 合金は前出の合金と異なり、いずれの合金元素もそれほど特殊な元素ではなく、入手しやすい価格であったため、この時期から SME に関する研究が増加し、実用化へ向けた研究も始まった。SME という言葉が使用されるようになったのもこの時期である。

当初、この性質は Ti-Ni 合金だけの固有の性質であると考えられたが、1970 年に大阪大学の清水らが Cu-Al-Ni 合金においても SME が発現することを見出し、これは熱弾性型マルテンサイト変態をする合金に共通の性質であることを明らかにした。その後、Cu-Zn (黄銅)、Cu-Zn-Al、Fe₃Pt、Ni-Al、Ag-Cd、Cu-Sn (青銅) など様々な熱弾性型マルテンサイト変態をする合金が見出された¹³⁾。

熱弾性型マルテンサイト変態とは鋼や合金などを高温状態から冷却した際に起こるマルテンサイト相をつくる変態(マルテンサイト変態)の一種である。マルテンサイト変態は固体内で起こる無拡散型の相変態であり、原子が固相から液相や気相に状態変化するときのようにランダムに運動するのではなく、互いに連携を保ちながら集団で構造を変える変態である。このとき、母相とマルテンサイト相との界面で結晶格子の不整合が生じることになる。鋼や一般の合金では多数の転移が導入されることでこの不整合を解消するのに対し、SMA では双晶の導入で解消する。双晶とは、三次元的に等価な原子のせん断的運動の組で互いに鏡像関係にあるもので、バリエントとも呼ばれる。マルテンサイト変態が起きた金属に負荷を与えると、鋼や一般の金属では転移が動くことで変形するため原子の位置関係がずれてしまい元に戻ることはできないが、SMA では双晶の再配列によって原子の位置関係が保たれたまま変形するので、再び加熱によって母相に相変態させることで元

の形状に復帰することができる。この性質が SME であり、Ti-Ni 合金や Cu 系合金などほとんどの SMA はこの原理に基づいて SME を発現している^{6) 14) 15)}。しかし、大きな負荷によりバリエーションの再配列では対応できない変形が与えられた場合は一般の金属と同様に欠陥の導入による格子の不整合の解消が起こるので、加熱しても形状復帰できない永久ひずみが発生することになる。なお、合金系により差はあるものの、形状記憶合金が回復可能なひずみは 1-10% 程度である¹⁴⁾。

また、合金元素の構成比率を調整し母相への相変態温度を常温以下に抑えた SMA は、変形を与えた際に加熱を行うことなく瞬時に元の形状へ復帰し、あたかも弾性変形領域が拡大したかのような挙動を示すことから超弾性合金(Super Elastic Alloy: SEA)と呼ばれ SMA とは区別されることが多いが、その違いは相変態温度のみである。

SMA が SME を発揮するためには、400℃以上に加熱し、形状の復帰先を合金に記憶させる必要がある。この処理は形状記憶処理と呼ばれ、治具などを用いて SMA を記憶させたい形状に保持しながら行われる。バルクの形状記憶合金が圧延などの塑性加工によって作製されており、結晶中に多くの欠陥が導入された状態であるため、塑性変形を与えると原子同士の相互位置関係を保ったまま変形することができず、永久ひずみとなってしまう。このような理由から、形状記憶処理は SMA を使用する上で必要不可欠な工程である。

前述のように、この 50 年余りの間に様々な SME を示す合金が発見されたが、現在では合金（および）構成元素の価格、形状回復力および形状回復量が大きいことや形状回復を起こす温度が常温付近であることなどから Ti-Ni 合金が主に使用されている。その他では Cu 系合金と、ごく一部で Fe 系合金が使用されており、研究が行われている割合もほぼ同じである。各合金の特徴を簡単に紹介すると、Ti-Ni 合金は疲労強度や耐食性に優れ、Cu 系合金は安価で加工性に優れ、Fe 系合金は低廉で変態温度が高い¹⁴⁾。その中で、Ti-Ni 合金は最も早くから実用化が検討され、その発見後まもなく、人工衛星のアンテナへの利用が提案されたが、実際には 1970 年代の初頭の航空機 (F-14 戦闘機) の油圧配管継ぎ手への利用が初の実用化例である^{13) 16) 17)}。本格的に製品に使用されるようになったのは 1980 年代初頭に Ti-Ni 合金の基本特許「NICKEL-BASE ALLOYS」(US,Pat.3,174,851)及び応用基本特許「熱エネルギーを機械エネルギーへ変換する装置」(実公昭 49-309)が相次いで期限切れになって以降である¹⁵⁾。当時は、熱に反応して動作する性質からエアコンや炊飯器などの家電製品においてセンサとアクチュエータ両方の機能を持つスマートマテリアルとして利用されたほか、アクチュエータとして産業機械や自動車など、比較的サイズの大きなもので使用されていた。その後には、Ti 系合金の生体適合性の良さと高付加価値であることから医療分野での利用が拡大し、血管内手術用ステント、カテーテル、ボンプレートおよびその固定具など様々に使用されるようになった。さらに、工業分野においても、近年の MEMS(MicroElectroMechanical Systems)デバイスの発展も手伝い、マイクロポンプ¹⁸⁾やカンチレバー¹⁾、精密ステージ¹⁹⁾など報告例が増加している。このように、近年では医療分野と精密機械分野が SMA の主な利用分野である^{14) 20)}。

以上のように、多くの SMA を使用したデバイスの報告例があり、「形状記憶合金」という単語も広く一般に普及しているにも関わらず、製品として普及しているものはほとんど存在しない。これは、SMA の機能が実用レベルに達していないケース、SMA 以外のモータやバイメタルなどのアクチュエータの高機能化によって SMA 以外の選択肢が選ばれるケースが考えられる。しかし、SMA は体積あたりの発生力が他のマイクロアクチュエータに比べて大きいことや、構造自体をアクチュエータにできることなど、有用な特徴を備えており、今後のマイクロアクチュエータの発展に欠かせない材料であると考えられている。

本研究はこのような現状を鑑みて、従来にはないプロセスを取り入れることによって SMA を高機能化することで、その欠点を改善し、さらに新たな利用方法を提案するものである。なお、本研究では各種 SMA の中で、最も実用的であり、使用されている例の多い Ti-Ni 合金のみを対象とし、以下特に断りのない限り SMA は Ti-Ni 合金を指すものとする。

1.2 形状記憶合金の現状

1.2.1 形状記憶合金の加工

SMA は一般の鉄鋼材料とほぼ同じプロセスによって製造されており、使用に当たってはバルク材を加工する必要がある。しかし、SMA は非常に延性が強く、応力-ひずみ曲線が特殊な形状をしており、加熱することで変形するなどといった様々な加工を阻害する要因となる性質を持っており、精密な形状を加工することは困難である²¹⁻²³。さらに、機械加工においては、刃物への融着や深い加工変質層の発生などが指摘されており²⁴、この加工性の悪さゆえに SMA の加工に関する報告は数多くなされている。

加工へのアプローチとして、材料の加工性を改善することが最初に検討された。例えば、Fe を SMA に添加することで、加工性が向上し、変態温度も下降する²⁵。しかし、形状記憶特性の劣化を伴ってしまうという大きな欠点も抱えている²⁵。その他にも、加工前に予備熱処理を行うことで、形状記憶特性を低下させずに加工性を改善させる方法²⁶なども提案されているが、この手法は機械加工のみにしか適用できない上、加工時の形状記憶特性の劣化を防ぐことができるのみであり、加工自体の精度を上げるものではないので、これだけでは微細加工を達成することは難しい。このように、加工性の改善による方法では微細加工の達成は難しく、近年では材料からのアプローチに代わり新しい加工法を用いることで微細加工を行うアプローチが主になされている。現在までに報告されている手法は放電加工²⁷⁾²⁸⁾、レーザー加工²⁸⁻³¹⁾、エッチング³²⁻³⁷⁾である。

放電加工は電極と被加工物との間での短周期のアーク放電により加工する手法であり、導電性のある物質であれば、材料の硬さによらずに加工を行うことができる。この方法は加工による抵抗が非常に小さいといった特徴を持つことから、高精度加工が可能であり、金型の表面加工や各種精密加工に用いられている。しかし、放電加工はアーク放電により材料表面を溶融して加工を行うため加工面近傍に変質などをともなう熱影響層の発生を避けることができない。熱影響層の存在は、SMA の機能がその結晶構造によって発現していることを考えると、機能の低下を引き起こすことになる。

レーザー加工にはアブレーション³⁸⁾による除去加工と熱効果による表面改質³⁹⁾⁴⁰⁾の2種類が報告されているが、表面改質は微細形状を作製するものではないため、ここでは前者のみについて触れ、後者については後述する。アブレーション効果³⁸⁾により材料を除去する手法は、加工点にエネルギーが入射される時間が短くなり放電加工に比べ熱影響を抑えることができる。SMA のレーザー加工には、パルス幅がナノ秒の Nd:YAG レーザ(波長 1064nm)が用いられることがほとんどであったが、近年ではレーザー技術の進歩により、さらにパルス幅の短いフェムト秒レーザーが使用される例が多い。この方法では、熱影響層を放電加工に比べて薄くできるものの、発生を完全に抑えることはできないことや、加工点に集光する必要があり、光学的に高アスペクト比の加工が困難であるといった欠点がある。

エッチング加工は薬液を用いて材料を腐食除去する手法であり、シリコン表面の微細除去加工に多く用いられている。あらかじめフォトリソグラフィを用いてマスクングを施す

ことで、選択的に除去が行われ、微細形状の加工が可能である。この方法は材料除去の原理が腐食であることから、放電加工やレーザ加工と異なり、熱影響層の発生がなく、SMA の機能低下が発生しない。一般的にエッチング加工が行われる対象は、結晶面ごとのエッチングレートの差を利用して異方性エッチングにより高アスペクト比加工が可能となることから、シリコンなどの結晶材料である。シリコンは $\text{KOH}^{41)}$ や $\text{TMAH}^{42)}$ などのアルカリ溶液を用いることで、異方性エッチングを行うことができる。例えば、(100)のエッチングレートは(111)に対して 100 倍以上大きいため、(100)に適切なマスクングを施してエッチングすることで高アスペクト比の加工が可能である⁴³⁾。SMA は耐腐食性の高い金属であることから、エッチング加工は困難とされていたが、1990 年に WALKER ら⁴⁴⁾ が $\text{HF}+\text{HNO}_3$ 系のエッチャントでフォトエッチングによる加工を行った。しかし、SMA は金属材料であり化学的加工では異方性エッチングを行うことはできず、フォトレジストマスクの耐性の問題も重なり、厚さ $10\mu\text{m}$ の薄膜を加工するに留まった。その後、1998 年に牧野ら³⁶⁾ がフォトレジストマスクの選択性が高く、サイドエッチングを抑制することで高アスペクト比の加工ができる電解エッチングを 5vol% の H_2SO_4 /メタノール溶液において行い、厚さ $150\mu\text{m}$ の板を加工している。この H_2SO_4 /メタノール溶液が唯一の電解エッチング用電解液であったが、2003 年に峯田ら³⁷⁾ が溶液の取り扱いが容易でありエッチング速度の調整が簡便である LiCl /エタノール溶液による電解エッチングを提唱し、検討が続けられている。

その他にも、スパッタリングにより薄膜をボトムアップ的に作製する手法も報告されている^{18) 44-46)} が、膜を厚くすることは困難であり、マイクロポンプなど限られた用途でしか使用できない。

このように様々な加工法が提案されているが、いずれも研究段階であり今後の発展が期待される。

1.2.2 形状記憶合金の操作

前節に示したとおり SMA は相変態温度以上に加熱することで変形するが、変形後に冷却し、もとの相に戻る際に発生する応力は微小であり、形状が復帰することはできない。このことから、SMA を繰り返し動作するアクチュエータとして成り立たせるためには、加熱と冷却のサイクルを与えることのできる仕組みと、形状を復帰させるためのバイアス力を与える機構が必要となる。

バイアス力を与える機構は、バネや荷重を用いる機械的方法が最も多く使用されているが、筋肉の様に 1 対の拮抗する SMA の組を用いる方法⁴⁷⁾ (実際、SMA は筋肉の収縮に近い動作をすることから人口筋肉と呼ばれることもある)、マイクロポンプなどで多く用いられる周囲の圧力差を利用する方法¹⁸⁾ などがある。このように、バイアス力は物理的な力を加える機構であるので、その手法は数多く存在し、設計の自由度も高く、アクチュエータに組み込むことは困難でない。

これに対し、熱サイクルを与える機構は熱エネルギーという比較的扱いが難しいエネル

ギーを扱うため、アクチュエータへの組み込みは、バイアス力を与える機構に比べ、困難である。今までに報告されている例としては、まず、加熱方法として、高い電気抵抗率 ($80\sim 90\times 10^{-8}\Omega\cdot m$)^{14) 48)}を利用した通電によるジュール発熱を利用する方法や周囲雰囲気からの熱伝達を利用する方法などがある。前者はマニピュレータ^{49) 50)}やポンプ¹⁸⁾など能動的に制御を行う場合に用いられ、後者は血管などの手術用ステントやボーンプレートなど体内で体温により動作するものや、空調の温度調節スイッチとしてセンサとしての役割も同時に果たすもの⁵¹⁾など、受動的に制御を行う場合に用いられる。その制御手法としては、パルス幅変調(Pulse Width Modulation: PWM)法を用いた位置制御と力制御が確立され^{52) 53)}、その他にもPID制御^{54) 55)}やファジィ制御⁴⁷⁾など多くの制御手法が提案されている。さらに、サブレーヤモデル⁵⁶⁾や有限要素法^{57) 58)}などを用いてSMAの熱解析も行われている。このように、制御法を工夫することで制御性を向上させる試みは数多く行われているものの、SMAアクチュエータ自体の熱特性の改善や、加熱方法の工夫で制御性の向上を目指す試みはほとんどなく、中里ら^{48) 59)}の報告があるのみである。次に、冷却方法としては、周囲雰囲気への放熱がほぼ全てである。冷却水や送風によって強制冷却する方法も提案されているが、SMAアクチュエータ自体が小型化され面積/体積比が増加することで放熱特性が自然と改善されることや、マイクロアクチュエータにおいて冷却機構を追加することで機構を煩雑化することは望まれない。

1.3 光を利用した形状記憶合金の新しい加工と操作の提案

以上を踏まえ、本節では、今まで SMA と関連付けられて議論されることの少なかった光を取り入れることで、SMA の適用範囲を広げる新しい使用法を検討すると同時に、光を利用して SMA の課題である操作性と加工性の悪さを改善する手法を提案する。

1.3.1 光と形状記憶合金

前節で示したとおり、SMA はあくまで機械材料として考えられてきた歴史があり、光との関係はレーザ加工の他は、ファイバからの漏れ光を利用したアクチュエータの駆動⁶⁰⁾、レーザによる局所的な形状記憶^{61) 62)}などが散発的に行われているに留まり、系統的な研究は行われていない。また、これらは光を利用してはいるものの機械材料としての SMA の域を脱していない。これに対し、ミラー^{63) 64)}、赤外線ディテクター⁶⁵⁾という2つの例で光学材料としての SMA の利用が提案されている。光学材料としての SMA は研究が始まって日の浅い分野であり、いまだ明らかにされていない部分も多いが、駆動部を用いずに形状変形が可能なミラーなど他の材料では実現できない光学素子を作製できる可能性がある。光通信を筆頭に光技術の発展の只中にある現状において、光学素子としての SMA の開発はその技術発展を促進するものになると考えられる。

1.3.2 光を用いた形状記憶合金の加工

光を利用した SMA の加工は前節で示したように、除去加工と表面改質がある。除去加工の説明は前節に譲り、ここでは表面改質について簡単に説明する。SMA は生体適合性がよいことから、医用部材として使用されることも多いが、長期間体内に留まると、合金中に含まれる Ni がイオン化して溶出する問題がある。これに対し、加熱によって表面に酸化膜を作ることで溶出を抑えることができる^{66) 67)}。また、同等の効果を持つ酸化膜をレーザ加熱によって作成する手法が Wong ら^{39) 40)}によって提案されている。

除去加工、表面改質いずれの手法も SMA に限らず利用される機会の多いレーザ加工手法である。レーザ加工はシリコンなどの硬脆材料から鋼材などの金属まで幅広く用いられており、その利用例は除去加工、表面改質に留まらない。例えば、レーザ接合、レーザエッチング、レーザリソグラフィなどがある⁶⁸⁾。SMA においてもこれら手法を適用することにより今まで不可能であって加工を実現できると考えられる。

1.3.3 光を用いた形状記憶合金の操作

SMA の駆動には熱が必要であることは前節で述べたが、光も物質に吸収されるとそのエネルギーは熱エネルギーに変換されるので、光照射による加熱で SMA を駆動することができると考えられる。MEMS に代表されるように、機械の小型化・集積化が進む中で電磁波の発生源が増加し、その設置距離も近づくため、電磁気的な干渉が問題となるが、その影響のない光駆動アクチュエータは電磁波問題を解決する有効な手段である。また、これらデバイスは真空中で作製・使用されることも増えているが、光による駆動は、光がチャンバのガラス窓を透過する性質を利用して、電源などのエネルギー供給源をチャンバ外に設置可能かつ、チャンバ内外を接続する配線が不要になり、チャンバに手を加えずと

も使用することができる点も大きな利点である。SMA の光駆動は小林ら⁶⁰⁾の報告などわずかに実施例があるのみであるが、電磁波の問題の解決やチャンバ内での使用への要求は高まっており、今後の研究が必要であると考えられる。

1.4 本研究の目的

以上のように、光を SMA に取り入れることは様々な有用性があると考えられる。そこで、本研究では、第 2 章において、光学素子としての SMA として、相変態時に起こる反射率変化を利用した反射率可変ミラーについて、第 3 章において、光を用いた SMA の微細加工法として、レーザ照射によってマスクを直接描画し、エッチングにより微細加工を行う手法について、第 4 章において、光を利用した SMA の操作として、レーザ照射により SMA を局所加熱し、駆動と制御を行う手法についてそれぞれ述べ、第 5 章において全体の総括を行う。

参考文献

- 1) P. Krulevitch, A. P. Lee, P. B. Ramsey, J. C. Trevino, J. Hamilton, M. A. Northrup: Thin film shape memory alloy microactuators, *J. Microelectromech. Syst.*, **5**,4 (1996) 270-282.
- 2) Y. Fu, H. Du, W. Huang, S. Zhang, M. Hu: TiNi-based thin films in MEMS applications: a review, *Sensors and Actuators A: Physical*, **112**,2-3 (2004) 395-408.
- 3) N. B. Morgan: Medical shape memory alloy applications - the market and its products, *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, **378**,1-2 (2004) 16-23.
- 4) M. Sreekumar, T. Nagarajan, M. Singaperumal, M. Zoppi, R. Molino: Critical review of current trends in shape memory alloy actuators for intelligent robots, *Industrial Robot-an International Journal*, **34**,4 (2007) 285-294.
- 5) 船久保熙康, 形状記憶合金, 産業図書, (1984).
- 6) 細田秀樹, 宮崎修一: 形状記憶材料の技術動向, *日本機械学会誌*, **107**,7 (2004) 509-515.
- 7) L. C. Chang, T. A. Read: Plastic Deformation and Diffusionless Phase Changes In Metals - The Gold-Cadmium Beta Phase, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **191**(1951) 47-52.
- 8) L. C. Chang: Atomic displacements and crystallographic mechanisms in diffusionless transformation of gold-cadmium single crystals containing 47.5 atomic per cent cadmium, *Acta Crystallographica*, **4**(1951) 320-324.
- 9) L.-C. Chang: On Diffusionless Transformation in Au-Cd Single Crystals Containing 47.5 Atomic Percent Cadmium: Characteristics of Single-Interface Transformation, *Journal of Applied Physics*, **23**,7 (1952) 725-728.
- 10) L. C. Chang, T. A. Read, M. S. Wechsler: Reversible single-crystal rocking-curve broadening, *Acta Crystallographica*, **6**(1953) 567.
- 11) M. W. Burkart, T. A. Read: Diffusionless Phase Change in the Indium-Thallium System, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, **227**(1953) 1516-1524.
- 12) F. E. Wang, W. J. Buehler, S. J. Pickart: Crystal Structure and a Unique "Martensitic" Transition of TiNi, *Journal of Applied Physics*, **36**,10 (1965) 3232-3239.
- 13) 大塚和弘: 形状記憶合金, *化学と工業*, **35**,3 (1982) 165-167.
- 14) 田中喜久昭, 戸伏寿昭, 宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂, (1993).
- 15) 西田稔: 形状記憶効果/超弾性とは?, *金属*, **74**,2 (2004) 116-120.
- 16) 山内清: 形状記憶合金の最近の応用開発研究, *日本金属学会会報*, **32**,7 (1993) 495-499.
- 17) 清水謙一, 大塚和弘, C. M. Wayman: 形状記憶合金開発の現状と今後の課題, *工業材料*, **31**,1 (1983) 18-26.
- 18) E. Makino, T. Mitsuya, T. Shibata: Fabrication of TiNi shape memory micropump, *Sens. Actuator A-Phys.*, **88**,3 (2001) 256-262.

- 19) E. Ho, R. Gorbet: A low cost macro-micro positioning system with SMA-actuated micro stage, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, **31**,1 (2007) 75-95.
- 20) 堀川宏: Ni-Ti 形状記憶・超弾性合金の応用と新しい開発, 金属, **74**,2 (2004) 150-155.
- 21) K. Weinert, V. Petzoldt, D. Kotter, M. Buschka: Drilling of NiTi shape memory alloys, Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, **35**,5 (2004) 338-341.
- 22) H. C. Lin, K. M. Lin, Y. C. Chen: A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys, Journal of Materials Processing Technology, **105**,3 (2000) 327-332.
- 23) K. Weinert, V. Petzoldt: Machining of NiTi based shape memory alloys, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, **378**,1-2 (2004) 180-184.
- 24) S. K. Wu, H. C. Lin, C. C. Chen: A study on the machinability of a Ti49.6Ni50.4 shape memory alloy, Mater. Lett., **40**,1 (1999) 27-32.
- 25) 山内清: 課題と展望(<小特集>先端機能部材として活躍する形状記憶合金), 日本機械学会誌, **107**,1028 (2004) 545-547.
- 26) 佐藤金司, 宗昭雄, 小林信一, 福島健治: Ti-Ni 系形状記憶合金の熱処理と加工性の向上, 塑性と加工, **33**,380 (1988) 1027-1032.
- 27) W. Theisen, A. Schuermann: Electro discharge machining of nickel-titanium shape memory alloys, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, **378**,1-2 (2004) 200-204.
- 28) H. Huang, H. Y. Zheng, Y. Liu: Experimental investigations of the machinability of Ni50.6Ti49.4 alloy, Smart Materials & Structures, **14**,5 (2005) S297-S301.
- 29) A. T. Tung, B. H. Park, G. Niemyer, D. H. Liang: Laser-machined shape memory, alloy actuators for active catheters, Ieee-Asme Transactions on Mechatronics, **12**,4 (2007) 439-446.
- 30) C. D. Li, S. Nikumb, F. Wong: An optimal process of femtosecond laser cutting of NiTi shape memory alloy for fabrication of miniature devices, Opt. Lasers Eng., **44**,10 (2006) 1078-1087.
- 31) H. Huang, H. Y. Zheng, G. C. Lim: Femtosecond laser machining characteristics of Nitinol, Appl. Surf. Sci., **228**,1-4 (2004) 201-206.
- 32) J. Z. Chen, S. K. Wu: Chemical machined thin foils of TiNi shape memory alloy, Materials Chemistry and Physics, **58**,2 (1999) 162-165.
- 33) T. Mineta, T. Mitsui, Y. Watanabe, S. Kobayashi, Y. Haga, M. Esashi: Batch fabricated flat meandering shape memory alloy actuator for active catheter, Sens. Actuator A-Phys., **88**,2 (2001) 112-120.
- 34) T. Mineta: Electrochemical etching of a shape memory alloy using new electrolyte solutions, J. Micromech. Microeng., **14**,1 (2004) 76-80.
- 35) X.-Z. Ma, L. Zhang, G.-H. Cao, Y. Lin, J. Tang: Electrochemical micromachining of nitinol by confined-etchant-layer technique, Electrochimica Acta, **52**,12 (2007) 4191-4196.

- 36) 牧野英治, 柴田隆行, D. M. Allen: マイクロアクチュエータ形成のための形状記憶合金圧延シート材の電解フォトエッチング, 表面技術, **49**,8 (1998) 887-893.
- 37) 峯田貴: NiTi 形状記憶合金の電解エッチングのための新しい電解液, 表面技術, **54**,2 (2003) 145-149.
- 38) 電気学会レーザアブレーションとその産業応用調査専門委員会編, レーザアブレーションとその応用, コロナ社, (1999).
- 39) M. H. Wong, F. T. Cheng, H. C. Man: Laser oxidation of NiTi for improving corrosion resistance in Hanks' solution, Mater. Lett., **61**,16 (2007) 3391-3394.
- 40) M. H. Wong, F. T. Cheng, G. K. H. Pang, H. C. Man: Characterization of oxide film formed on NiTi by laser oxidation, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, **448**,1-2 (2007) 97-103.
- 41) O. Powell, H. B. Harrison: Anisotropic etching of {100} and {110} planes in (100) silicon, J. Micromech. Microeng., **11**,3 (2001) 217-220.
- 42) E. Steinsland, T. Finstad, A. Hanneborg: Etch rates of (100), (111) and (110) single-crystal silicon in TMAH measured in situ by laser reflectance interferometry, Sens. Actuator A-Phys., **86**,1-2 (2000) 73-80.
- 43) 細野高史: レーザ照射によるシリコンの除去・変形・接合, 学位論文, (2006).
- 44) J. A. Walker, K. J. Gabriel, M. Mehregany: THIN-FILM PROCESSING OF TINI SHAPE MEMORY ALLOY, Sens. Actuator A-Phys., **21**,1-3 (1986) 243-246.
- 45) H. J. Zhang, C. J. Qiu: Characterization and MEMS application of low temperature TiNi(Cu) shape memory thin films, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, **438**(2006) 1106-1109.
- 46) K. Kuribayashi, S. Shimizu, M. Yoshitake, S. Ogawa: Fabrication and transformation characteristics of reversible shape memory alloy thin film actuators, International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **32**,2 (1998) 110-115.
- 47) 中里裕一, 加藤隆, 増田泰二: ファジィ推論を利用した SMA アクチュエータの位置制御, 日本機械学会論文集 (C編), **59**,9 (1993) 2733-2738.
- 48) 中里裕一, 菊池直人, 渡辺剛寿, 有賀幸則: シート形状記憶合金のマイクロアクチュエータへの応用に関する研究(第 1 報 シート形状記憶合金の加熱方法の検討), マイクロメカトロニクス, **45**,3 (2002) 22-30.
- 49) S. Takeuchi, I. Shimoyama: A three-dimensional shape memory alloy microelectrode with clipping structure for insect neural recording, J. Microelectromech. Syst., **9**,1 (2000) 24-31.
- 50) J. J. Gill, D. T. Chang, L. A. Momoda, G. P. Carman: Manufacturing issues of thin film NiTi microwrapper, Sens. Actuator A-Phys., **93**,2 (2001) 148-156.
- 51) 大方一三: 形状記憶合金の医療への応用, 日本機械学会誌, **107**,1028 (2004) 532-535.
- 52) 栗林勝利: 温度センサを用いた SMA アクチュエータの応答速度の改善法, 日本ロボット

- 学会誌, 7,1 (1985) 39-46.
- 53) K. Kuribayashi: A NEW ACTUATOR OF A JOINT MECHANISM USING TINI ALLOY WIRE, *International Journal of Robotics Research*, **4,4** (1986) 47-58.
 - 54) R. B. Gorbet, D. W. L. Wang: A dissipativity approach to stability of a shape memory alloy position control system, *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, **6,4** (1998) 554-562.
 - 55) S. Majima, K. Kodama, T. Hasegawa: Modeling of shape memory alloy actuator and tracking control system with the model, *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, **9,1** (2001) 54-59.
 - 56) 青木寛英, 木下勝之, 松本英治, 柴田俊忍: サブレイヤーモデルによる TiNi 系形状記憶合金フィルムの熱・力学特性の解析, *日本機学会論文集 (A編)*, **66,3** (2000) 509-515.
 - 57) 都井裕, 李宗儀, 田谷稔: サブレイヤーモデルによる TiNi 系形状記憶合金フィルムの熱・力学的挙動の解析, *日本機学会論文集 (A編)*, **68,12** (2002) 1688-1694.
 - 58) F. Trochu, Y. Y. Qian: Nonlinear finite element simulation of superelastic shape memory alloy parts, *Computers & Structures*, **62,5** (1997) 799-810.
 - 59) 渡辺剛寿, 有賀幸則, 中里裕一: シート状の形状記憶合金を用いたマイクロメカニズム用アクチュエータの開発 —加熱方法の検討—, *精密工学会春季大会学術講演会*,1 (1998) 549.
 - 60) 小林祐樹, 中村仁彦: レーザとファイバを用いた SMA の光駆動, *日本機学会学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集*, (2000).
 - 61) Y. Bellouard, T. Lehnert, J. E. Bidaux, T. Sidler, R. Clavel, R. Gotthardt: Local annealing of complex mechanical devices: a new approach for developing monolithic micro-devices, *Materials Science and Engineering A*, **273-275**(1999) 795-798.
 - 62) X. Wang, Y. Bellouard, J. J. Vlassak: Laser annealing of amorphous NiTi shape memory alloy thin films to locally induce shape memory properties, *Acta Mater.*, **53,18** (2005) 4955-4961.
 - 63) B. Sutapun, M. Tabib-Azar, M. A. Huff: Applications of shape memory alloys in optics, *Applied Optics*, **37,28** (1998) 6811-6815.
 - 64) W. M. Huang, W. H. Zhang, X. Y. Gao, Micro mirror based on surface relief phenomenon in shape memory alloys, *The International Society for Optical Engineering*, Shanghai, China, 2002. 155-161.
 - 65) H. P. Ho, C. Y. Chung, K. C. Ng, K. L. Cheng, S. Y. Wu, "Application of shape memory alloy as detector material for far-infrared imaging transducers," in *Electron Devices Meeting, 2002. Proceedings. 2002 IEEE Hong Kong*, (2002). 59-61.
 - 66) D. J. Wever, A. G. Veldhuizen, J. de Vries, H. J. Busscher, D. R. A. Uges, J. R. van Horn: Electrochemical and surface characterization of a nickel-titanium alloy, *Biomaterials*, **19,7-9** (1998) 761-769.
 - 67) G. S. Firstov, R. G. Vitchev, H. Kumar, B. Blanpain, J. Van Humbeeck: Surface oxidation of NiTi shape memory alloy, *Biomaterials*, **23,24** (2002) 4863-4871.
 - 68) レーザ学会編, *レーザプロセッシング*, 日本技術図書株式会社, (1986).

第2章 形状記憶合金の相変態を利用した反射率可変ミラー

- 2.1 はじめに
 - 2.1.1 本章の背景と目的
 - 2.1.2 反射率分布可変ミラー
 - 2.1.3 形状記憶合金の反射率変化
 - 2.2 反射率変化増大の方法
 - 2.3 実験方法
 - 2.3.1 実験手順
 - 2.3.2 試料
 - 2.3.3 実験装置
 - 2.4 研磨のオーステナイト変態温度への影響
 - 2.5 形状記憶処理のタイミングによる違い
 - 2.5.1 常温での表面観察および粗さ測定
 - 2.5.2 加熱時の表面粗さの変化
 - 2.5.3 加熱時の反射率の変化
 - 2.6 研磨温度による違い
 - 2.6.1 常温での表面観察および粗さ測定
 - 2.6.2 加熱時の表面粗さの変化
 - 2.6.3 加熱時の反射率の変化
 - 2.7 まとめ
- 参考文献

2.1 はじめに

SMA の反射率が加熱時に変化する性質はあまり知られておらず，報告例も少ないが，光と SMA を結びつける重要な性質である．この性質は Sutapun ら⁶³⁾により明らかにされ，同時に反射率可変ミラーの概念も提案された．本章ではその概念をさらに発展させた反射率分布可変ミラーを提案し，その実現へ向けて SMA ミラーの反射率変化を増大させるための加工法の検討を行う．

2.1.1 本章の背景と目的

通信の高速化やディスプレイの高機能化など様々なシステムにおいて光の果たす役割が飛躍的に大きくなっている近年の状況に伴い，光をコントロールする素子への要求が高まっている．Fig. 2-1 に一般的な光をコントロールする素子の概要を示す．このタイプの素子は入射光(信号)を PD(Photo Diode, フォトダイオード)で電気信号に変換し，電気回路で演算を行い，LED(Light Emitting Diode, 発光ダイオード)や LD(Laser Diode, レーザダイオード)によって出射光(信号)を返すものである．つまり，入力，出力共に光(信号)であるにも関わらず，演算を電氣的に行うために光→電気，電気→光の 2 回の変換を行っている．信号の変換にはエネルギーロスや信号の劣化が伴うので，変換を行わず，光(信号)を光のまま演算することが望ましい．さらに，近年のデバイス技術の発展に伴い，MEMS に代表されるように，電気・電子デバイスの小型・高密度化が進んでおり，電磁波の干渉が大きな問題となっていることから，電気信号を介した光信号のコントロールは望ましくない．このような要求から，マイクロミラーアレイに代表される，光を光のままコントロールする素子が開発され実用化されているが，ミラーの駆動制御のような制御信号には電気信号が用いられている．そのため，変換の問題は解決しているものの，電磁波の問題は解決できていない．そこで，電磁波の問題を解決するため，制御信号も光信号にすることで，電気信号を完全に排除した光で光を光のままコントロールする素子（以降，「光・光・光素子」と呼ぶ）が考えられる．

これに対し，SMA はその名前から形状がマクロに変化する印象が強く，実際マクロな形状変化を利用している例がほとんどであるが，マクロな形状変化は結晶構造の変化に起因しているので，ミクロな変化も同時に起こっており，光の反射率が変化することが知られている．なお，反射率変化の原理については次節で述べる．また，本論文で提案している光による SMA の操作は制御信号を光によって与える手法であり，反射率変化と組み合わせることで光・光・光素子を実現できる．

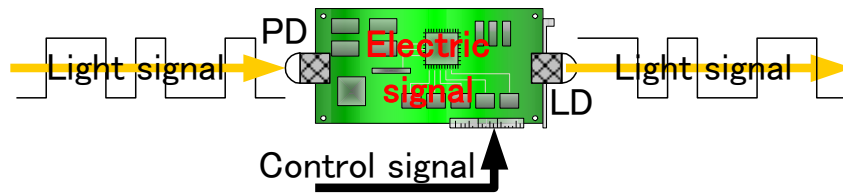
しかし，SMA の反射率変化はその性質が示されているのみであり，変化を増大させる試みはなされていない．そこで，本章では SMA の相変態時の反射率変化を増大させる手法について検討する．具体的には，反射率変化が相変態に起因して起こっていることを考慮して，はじめに，形状記憶処理と鏡面仕上げを行う順の前後を変えたもの，次に，鏡面加工時の相を変えたもので得られる反射率変化の比較を行い，最大の反射率変化を得られる条件を探索する．

2.1.2 反射率分布可変ミラー

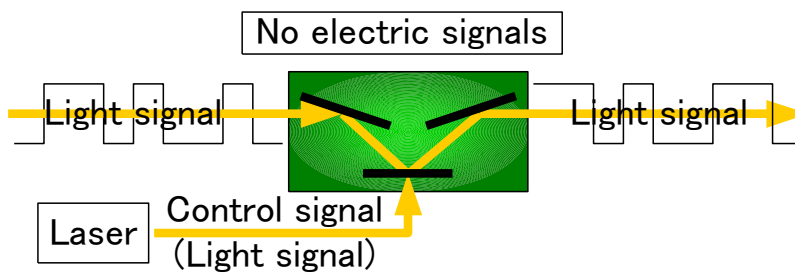
ここでは、本章で提案する反射率分布可変ミラーについて述べる。反射率分布可変ミラーは SMA の反射率変化をレーザー照射によって局所的に発生させることで反射率の分布を任意に作ることでできる素子である。その概略を Fig. 2-2 に示す。出力を変えながらレーザーを走査することで任意の反射率分布を設定できる他、SMA の反射率変化は可逆変化であり、レーザー非照射時には、冷却されることで元の反射率に戻るため、反射率分布の時間変化を与えることも可能である。

2.1.3 形状記憶合金の反射率変化

SMA の形状変化は結晶構造の変化に起因しており、ミクロな変化も同時に起こっていることは前節で述べたが、このミクロな変化は低温のマルテンサイトと高温のオーステナイト間での相変態である。このマルテンサイトとオーステナイト間での相変態において原子同士の整列順は保持されるが、結晶格子が変化し、原子同士の位置関係が変化するので、合金表面の微細形状が変化する。表面を鏡面となるまで加工した場合、この微細形状変化による影響が相対的に大きくなり、相変態前後で入射光と出射光の幾何学的関係が変化し、反射率の変化として現れる^{63) 64)}。反射率変化が現れる要因は、Fig. 2-3 に示すように、表面に微細な凹凸ができることで入射光がその凹凸で複雑に反射を繰り返し、吸収や散乱が起こるためであると考えられているが、その詳細は明らかになっておらず、今後の解明が待たれる。



(a) Usual light control device



(b) Proposed light control device

Fig. 2-1 Schema of light control devices

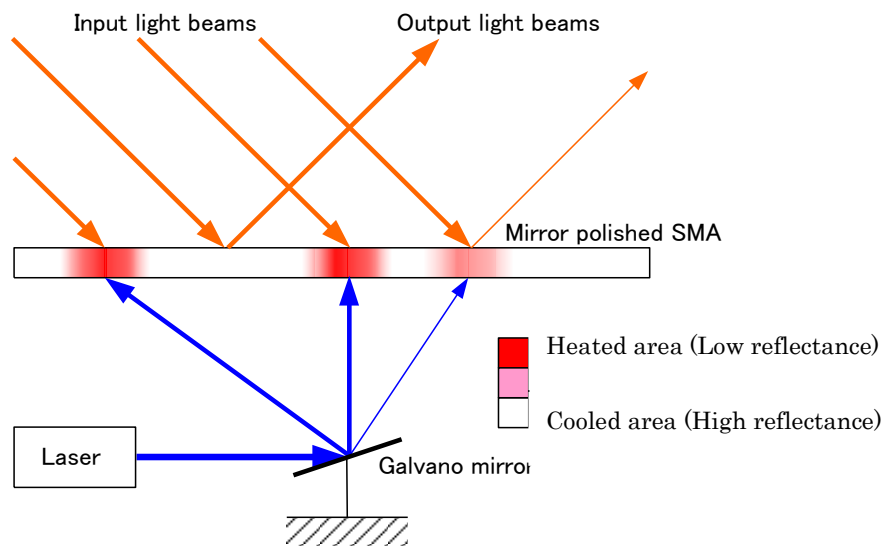


Fig. 2-2 Schema of reflectance distribution changeable mirror

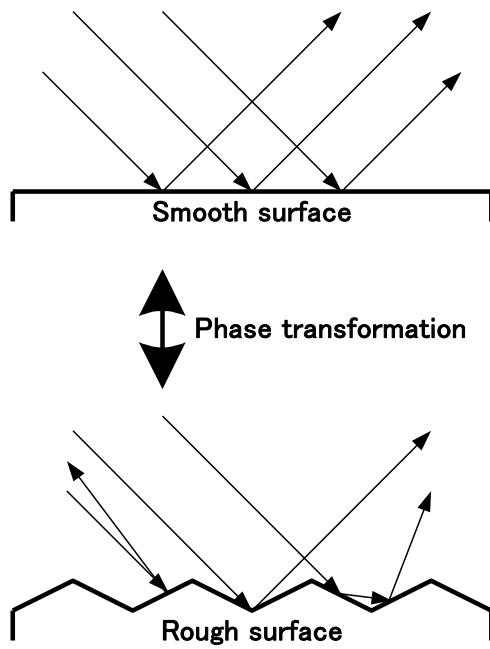


Fig. 2-3 Schema of light reflectance change

2.2 反射率変化増大の方法

反射率変化は表面の微細な形状変化によって起こるため、SMA を鏡面加工する必要がある。また、反射率変化は SMA の相変態に起因しており、形状記憶処理を行わない SMA では形状記憶効果を発揮しないので、表面の変化も生じず、形状記憶処理は表面粗さ変化及び反射率の変化に影響を与えられと考えられる。そこで、本章では、鏡面加工時の加工条件、加工時に SMA がとっている相、加工と形状記憶処理の順番の前後に着目して、反射率変化増大の方法を検討する。

SMA の鏡面加工としては、砥粒研磨、電解研磨⁶⁹⁾、化学研磨⁷⁰⁾が行われているが、ここでは最も一般的な手法であり、容易に鏡面を得ることができることと、研磨中の相をコントロールする必要を考え、温度による加工への影響が少ないことから砥粒研磨を用いた。また、加工時の相は低温状態であるマルテンサイト、高温状態であるオーステナイトおよび変態中である混相の3状態とした。さらに、形状記憶処理を行うタイミングは加工前および加工後とした。

2.3 実験方法

2.3.1 実験手順

本研究ではまず、形状記憶処理による影響を明らかにするため、形状記憶処理を行わず研磨のみを行った試料、形状記憶処理を行った後に研磨を行った試料、研磨を行った後に形状記憶処理を行った試料の3試料にて比較を行った。続いて、研磨時の相の違いによる影響を明らかにするため、低温状態(マルテンサイト相)、中温状態(混相)、高温状態(オーステナイト相)それぞれで研磨を行い、比較を行った。評価したパラメータは試料表面の算術平均粗さ(Ra)と反射率である。これらパラメータを常温(25°C, マルテンサイト相)、中温(75°C, 混相)および高温(125°C, オーステナイト相)で測定し、その変化を調査した。これら測定時の温度は次項に示す試料のDSC測定結果により決定したものである。以下に使用した試料及び装置の詳細を示す。

2.3.2 試料

実験に使用したSMAのスペックをTable 2-1に示す。使用したSMAは冷間圧延によって製造されたNiTi合金であり、初期状態では形状を記憶していない。SMAの相変態開始・終了温度は形状記憶処理条件によって変化するので、使用した全ての試料で処理条件を統一し、空気雰囲気中、500°C、60分の熱処理とした。この処理を行った試料の変態開始・終了温度はDSC(Differential Scanning Calorimetry, 示差走査熱量天秤)によって決定した。DSC測定では昇温時のマルテンサイトからオーステナイトへの変態(オーステナイト変態)で吸熱のピークが、降温時のオーステナイトからマルテンサイトへの変態(マルテンサイト変態)で発熱のピークが観察され、ピークの縁から変態開始温度、変態終了温度が定義される(JIS H7101 01)。なお、本実験において加工および測定時の相変態は常に加熱によって発生させたので、DSCは昇温時のみ測定し、オーステナイト変態開始温度(As)とオーステナイト変態終了温度(Af)を決定した(Fig. 2-4)。この結果より、使用したSMAの相は55°C(As)以下でマルテンサイト、85°C(Af)以上でオーステナイト、その中間温度で混相であるとした。

2.3.3 実験装置

研磨には粒径1 μm のダイヤモンド砥粒(東京ダイヤモンド工具製作所製ダイヤモンドペースト No.1)を用い、試料をステンレス鋼製の研磨治具に樹脂で固定し、Raが0.025 μm 程度になるまでガラス板に貼り付けた研磨布(ストラウス社 DP-NAP)上で加工を行った。相変態を起こすために加熱を必要とする場合は、あらかじめ規定温度まで加熱した試料と研磨布を貼り付けたガラス板をホットプレート上に設置し、温度を保ちながら加工を行った。研磨装置の概略をFig. 2-5に示す。

表面粗さの測定は一般的には触針式の粗さ計が使用されるが、加熱を行った状態で測定を行う必要があるため、非接触で測定が可能なレーザ顕微鏡(キーエンス社製 VF-7510)を用いて測定を行った。また、反射率は積分球を組み込んだ分光分析器(日本分光社製 V-550)を用いて、200nm~850nmの波長で測定をした。

Table 2-1 SMA parameters

Ti volume	55%
Ni volume	45%
Size	20 mm × 5mm
Thickness	0.7 mm

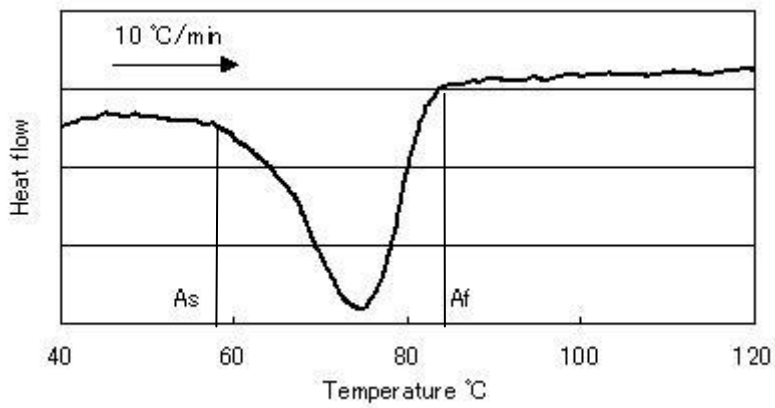


Fig. 2-4 DSC result of shape memorized SMA

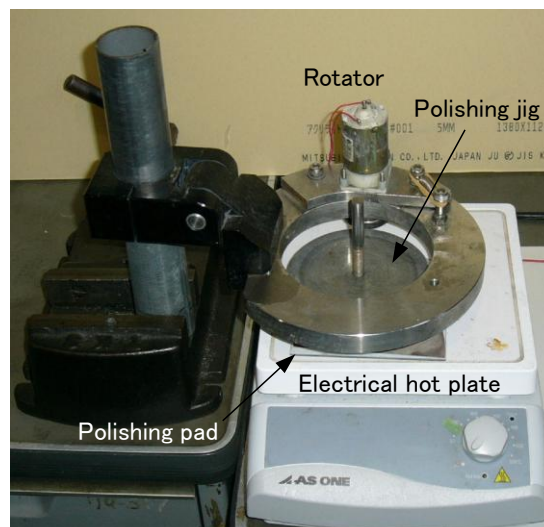


Fig. 2-5 Polishing instrument

2.4 研磨のオーステナイト変態温度への影響

前節により，使用した試料の A_s および A_f はそれぞれ 55°C ， 85°C であるので，これら温度を境に温度が低い順に試料が，マルテンサイト，混相，オーステナイトをとると考えられる．しかし，研磨を行った試料では，その影響で A_s ， A_f が変化する可能性がある．そこで，形状記憶処理後に研磨を行った試料においても DSC 測定を行い，研磨がオーステナイト変態温度へ与える影響を調査した．また，同時に形状記憶処理および研磨ともに行っていない SMA についても DSC 測定し，比較を行った．測定結果を Fig. 2-6 に示す．

未処理の SMA では熱流が一定となり，ピークはみられないはずであるが，測定結果では，他の試料と比較して高さが小さく，幅も極端に広いものの吸熱ピークが見られる．これは，試料の一部でのみ相変態が起こっているものと考えられ，試料作製時の圧延や切断により局所的な加熱が発生し，その部分に局所的な形状記憶処理が行われたものであると推定できる．

形状記憶処理と研磨を行った試料では形状記憶処理のみを行った試料と比較して A_s ， A_f ともにわずかに高温側に移動している．これは，研磨による局所的な熱と応力の発生が影響したものであると考えられる．そこで，このずれを考慮して，実験及び測定温度を，マルテンサイトでは常温(25°C)，混相では 75°C ，オーステナイトでは 125°C とした．ただし，研磨布の耐熱温度の問題から，オーステナイトでの研磨は 90°C で行った．

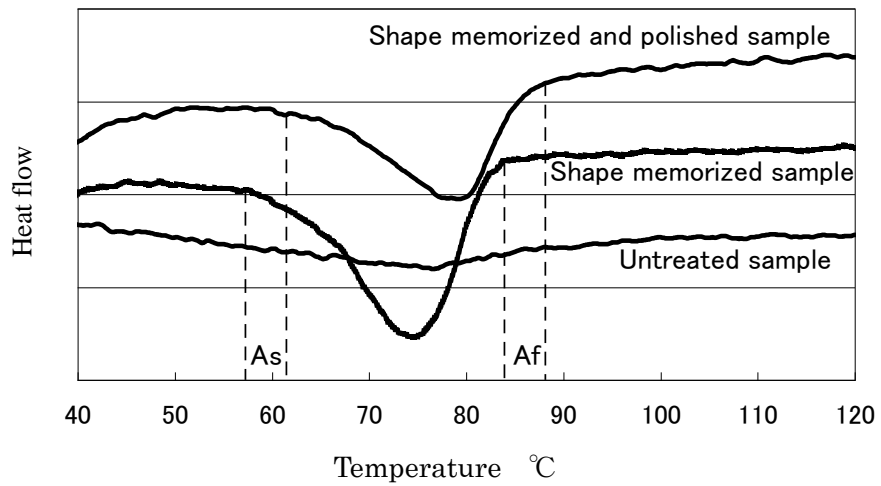


Fig. 2 -6 DSC result of untreated sample, shape memorized sample and shape memorized and polished sample

2.5 形状記憶処理のタイミングによる違い

形状記憶処理のタイミングを研磨の前後に設定して比較を行った。なお、形状記憶処理自体の影響を考え、形状記憶処理を行わずに研磨のみを行った試料の測定も同時に行い、比較した。なお、本節では形状記憶処理を行わず、研磨のみを行った試料を試料A、形状記憶処理を行った後に研磨を行った試料を試料B、研磨を行った後に形状記憶処理を行った試料を試料Cとする。

2.5.1 常温での表面観察および粗さ測定

常温での各試料表面の観察結果を Fig. 2-7 に示す。試料AおよびBでは銀白色の光沢面が得られ、試料Cでは茶色がかった光沢面が得られた。SMA の鏡面加工面は銀白色であることと、試料AおよびBの最終工程が研磨であるのに対し、試料Cの最終工程が形状記憶処理であることから、試料Cでは形状記憶処理によって光沢面が変色したものと考えられる。SMA は空気雰囲気中で 300℃以上に加熱することで表面に酸化膜が形成され、表面性状が変化する⁷⁾ことが知られており、形状記憶処理を行った温度が 500℃であることから、この変色は酸化膜の生成によるものであると考えられる。

常温での各試料表面のレーザ顕微鏡による測定結果を Fig. 2-8 に示す。試料AおよびBの Ra は 20~25nm であるのに対し、試料Cでは 30~50nm であり、Ra が増加している。加熱による酸化膜の形成時には微細な凹凸が形成され、表面粗さの増加が起こると報告されており⁷⁾、このことから試料C表面に酸化膜が形成されていることが確認できる。

2.5.2 加熱時の表面粗さの変化

加熱を行い、75℃(混相)および 125℃(オーステナイト)で Ra の測定を行った結果および、常温(25℃, マルテンサイト)と 125℃での Ra の値の変化率を Table 2-2 に示す。全ての試料において 125℃まで加熱し、オーステナイトに変態させたことによる Ra の増加が見られ、その増加率は試料Aで 32%、試料Bで 67%、試料Cで 4%であった。しかし、75℃の加熱(混相)での Ra の変化については試料によりばらつきがあり、試料Aでは増加しているものの、試料Bでは微減、試料Cでは微増しているのみであった。

75℃での測定における Ra 変化に試料ごとのばらつきが生じた要因として、混相でのマルテンサイトとオーステナイトとの存在比が一定しなかったことが考えられる。前節より、研磨を行った試料では As, Af および吸熱ピークの頂点位置がわずかに高温側にずれることがわかっている。さらに、Fig. 2-6 より研磨を行っていない試料の吸熱ピークの頂点が 75℃付近にあることから、試料によってピーク頂点が 75℃を超えるものと、超えないものが存在したことが、試料ごとのマルテンサイトとオーステナイトとの存在比に差ができた原因であると考えられる。これに対し、125℃での測定においては全ての試料で Ra が増加しており、試料ごとのばらつきは確認されない。これは、125℃が研磨の有無に関わらず、試料の Af(85~90℃)に比べ十分に高温であり、全ての試料で完全にオーステナイトをとっていたためと考えられる。

Ra の増加率は試料A, Bがそれぞれ 32%, 67%であるものの、試料Cでは 4%の変化に

留まっている。形状記憶処理を行っていない試料Aで変化が観察されるのは、前節で示したように、試料の加工時に局所的な形状記憶処理が行われたためであると考えられる。これらから、Ra の変化を最大にする形状記憶処理のタイミングは研磨の前であることが分かる。

2.5.3 加熱時の反射率の変化

常温および 125°Cで測定を行った波長と反射率との関係を Fig. 2-9 に示し、常温での反射率に対する 125°Cでの反射率変化を Fig. 2-10 に示す。試料Aと試料Bでは加熱時に反射率の低下が見られ、試料Cでは波長 340nm 付近でわずかに低下している以外は反射率の変化はほとんど見られなかった。また、全ての波長において試料B（形状記憶処理を研磨の前に行った試料）で最大の反射率変化を得ることができた。反射率変化量は波長により異なるが、800nm 付近の波長で最大の変化量(3.6%)が得られる。これは、相変態により表面に形成された微細な凹凸のサイズの光吸収特性が 800nm 付近の波長に対応しているためだと考えられるが、加熱状態で表面の3次元微細形状を測定することは困難であり、検証にはさらなる検討が必要である。

また、各試料における反射率変化の大小は前項で示した Ra 変化の大小と一致しており、表面の微細形状の変化により反射率変化が起こっていることが推定できる。

以上の結果より、反射率の変化を起こす要因を考察する。形状記憶処理を行った後に研磨を行うことで反射率変化を得ることができるが、研磨を行った後に形状記憶処理を行うと反射率変化を得ることができない。このことから、単純に相変態のみで反射率変化を引き起こすことはできないと考えられる。形状記憶処理後の研磨では加工後に試料表面に加工歪みが存在するが、研磨後に形状記憶処理を行うと、鋼の焼なましと同様に、加工歪みは緩和される。つまり、反射率変化を得られる試料は加工歪みが存在している試料であり、加熱による SMA の形状回復応力が加工歪みに作用し、微細な表面形状の変化を起こすものと考えられる。

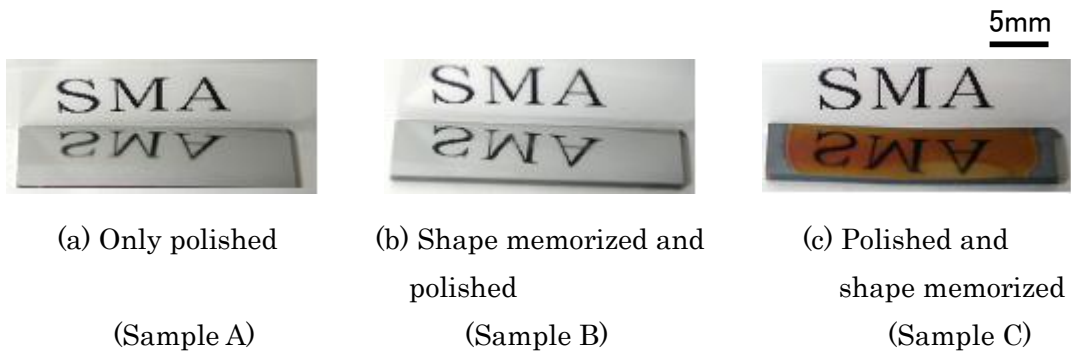


Fig. 2-7 Pictures of SMA samples

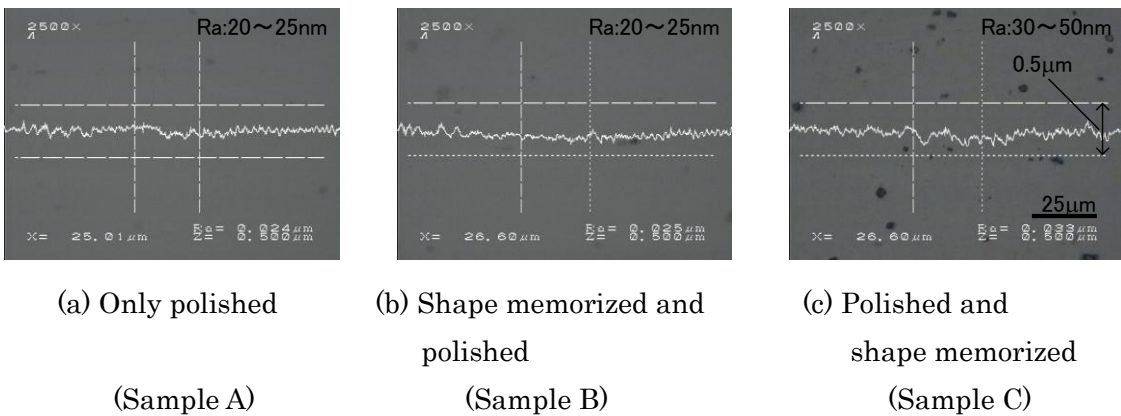


Fig. 2-8 Optical micrographs and laser scanning microscopy images of SMAs

Table 2-2 Surface roughness changes by process change

	Ra nm			Rate of change %
	25°C	75°C	125°C	
Only polished (Sample A)	25	30	33	32
Shape memorized and polished (Sample B)	24	22	40	67
Polished and shape memorized (Sample C)	47	51	49	4

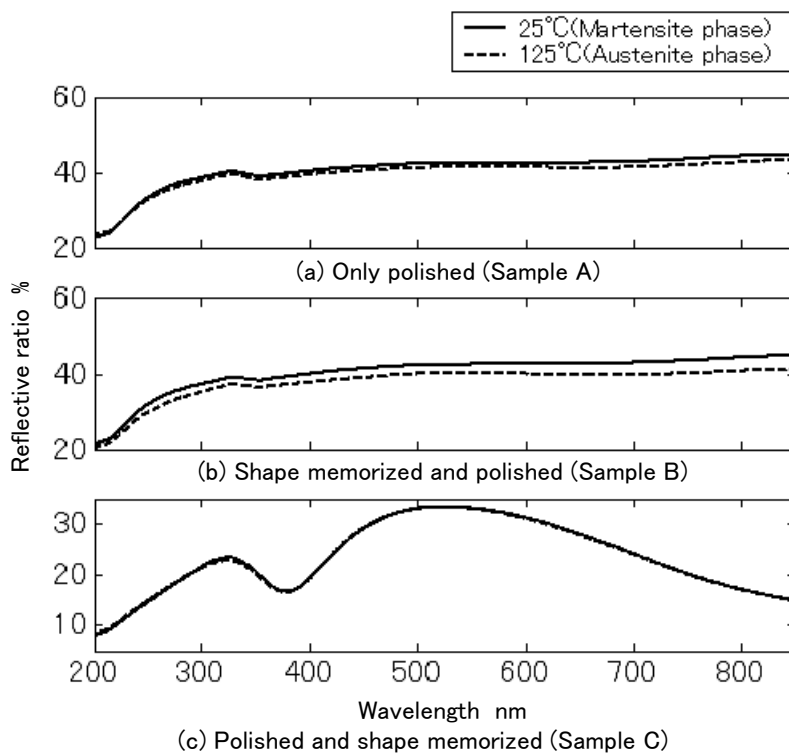


Fig. 2-9 Relations between wave length and reflective ratio (process comparison)

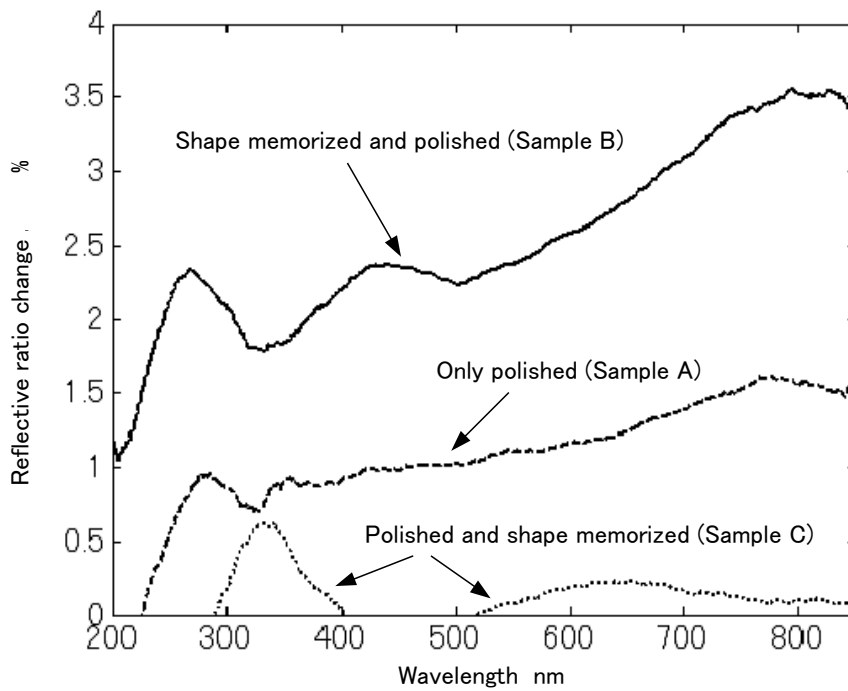


Fig. 2-10 Reflective ratio changes by phase transformation (process comparison)

2.6 研磨温度による違い

研磨を行う際の SMA の相をマルテンサイト、混相、オーステナイトとして比較を行った。実際に処理を行った温度は 2.4 節で決定した 25°C、75°C、90°C である。また、全ての試料で形状記憶処理を行った後に研磨を行った。

2.6.1 常温での表面観察および粗さ測定

研磨後、常温まで冷却した状態での各試料表面の観察結果を Fig. 2-11 に示す。75°C で研磨を行った試料では、わずかに黒色を帯びており、90°C で研磨を行った試料では、わずかに黄色を帯びているがいずれも光沢面となっている。また、研磨後、常温まで冷却した状態での各試料表面のレーザ顕微鏡による測定結果を Fig. 2-12 に示す。いずれの試料も同程度の Ra であり、加熱による研磨への影響はないと考えられる。

2.6.2 加熱時の表面粗さの変化

加熱を行い、75°C(混相)および 125°C(オーステナイト)で Ra の測定を行った結果および、常温(25°C, マルテンサイト)と 125°C での Ra の値の変化率を Table 2-3 に示す。加熱に伴い、25°C および 75°C で加工を行った試料ではそれぞれ 67%、13% の Ra の増加が、90°C で加工を行った試料では 10% の Ra の減少が見られる。25°C で加工を行った試料は、研磨による加工歪の存在のため、加熱により Ra が増加したと考えられる。これに対し、90°C で加工した試料はオーステナイトをとっている状態で研磨を行っており、25°C での研磨では形状復帰前の形状を加工しているのと異なり、形状復帰する形状を加工しているため、加熱による Ra の変化が小さくなったと考えられる。さらに、75°C で加工した試料では 75°C で Ra が上昇した後、125°C で再び減少している。これは、混相で加工を行ったことで、均一でない残留応力が発生したため、加工後に再び混相をとることでこの不均一性が顕在化し Ra が増加したものの、さらに加熱しオーステナイトに変態することで、形状復帰の効果が働き再び Ra が低下したものと予測できるが、75°C でのマルテンサイトとオーステナイトの存在比を知ることは難しく、今後の検討を必要とする。

2.6.3 加熱時の反射率の変化

常温および 125°C で測定を行った波長と反射率との関係を Fig. 2-13 に示し、常温での反射率に対する 125°C での反射率変化を Fig. 2-14 に示す。全ての試料において反射率の低下が観察され、いずれも波長 290nm 付近に低下のピークを持ち、25°C で研磨を行った試料のみ波長 800nm 付近にピークを持つ。また、全ての波長において 25°C で研磨を行った試料、75°C で研磨を行った試料、90°C で研磨を行った試料の順に反射率の変化が大きい。最大の反射率変化は 25°C で研磨を行った試料の 800nm 付近で 3.6% である。このことより、大きな反射率変化を得るためには SMA をマルテンサイトに保ちながら研磨を行えばよいことがわかる。

なお、125°C で加工を行った試料の Ra の増減と、反射率の増減の傾向が一致していない。この要因を明らかにするには、加熱状態で表面の 3 次元微細形状を測定して検討する必要がある。今後の課題である。

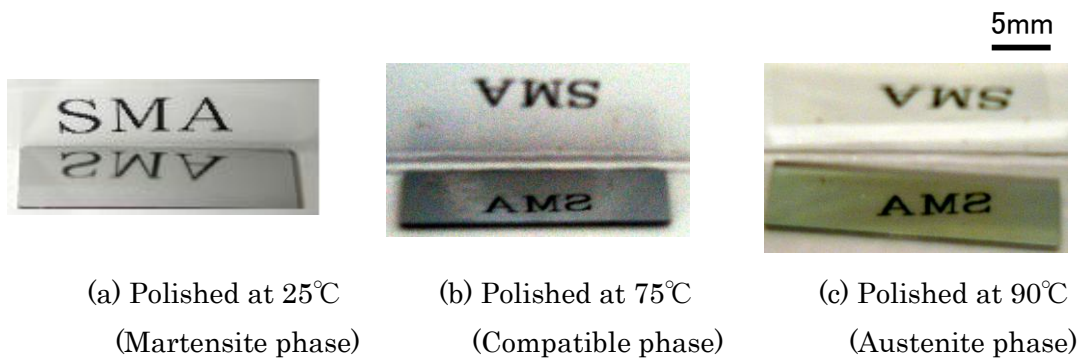


Fig. 2-11 Pictures of polished SMAs

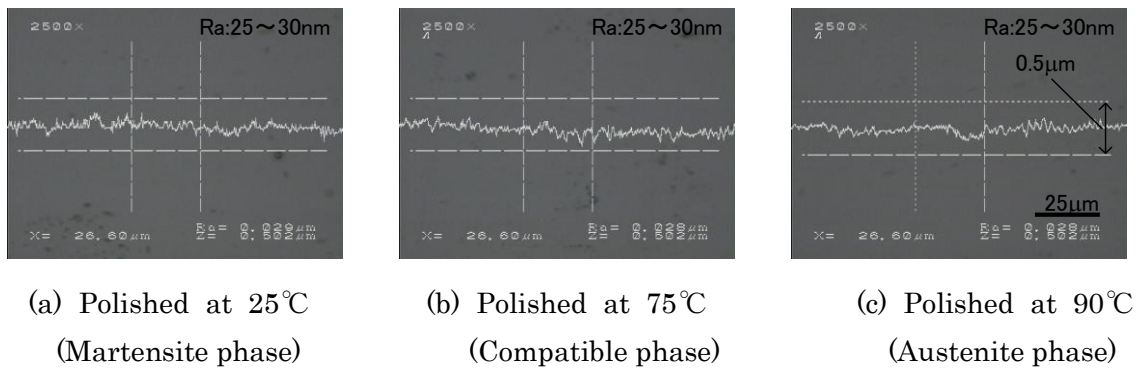


Fig. 2-12 Optical micrographs and laser scanning microscopy images of SMAs

Table 2-3 Surface roughness changes by polished temperature

Polished temperature (Phase of SMA)	Ra nm			Rate of change %
	25°C	75°C	125°C	
25 °C (Martensite phase)	24	22	40	67
75 °C (Compatible phase)	25	36	28	13
90 °C (Austenite phase)	24	22	22	-10

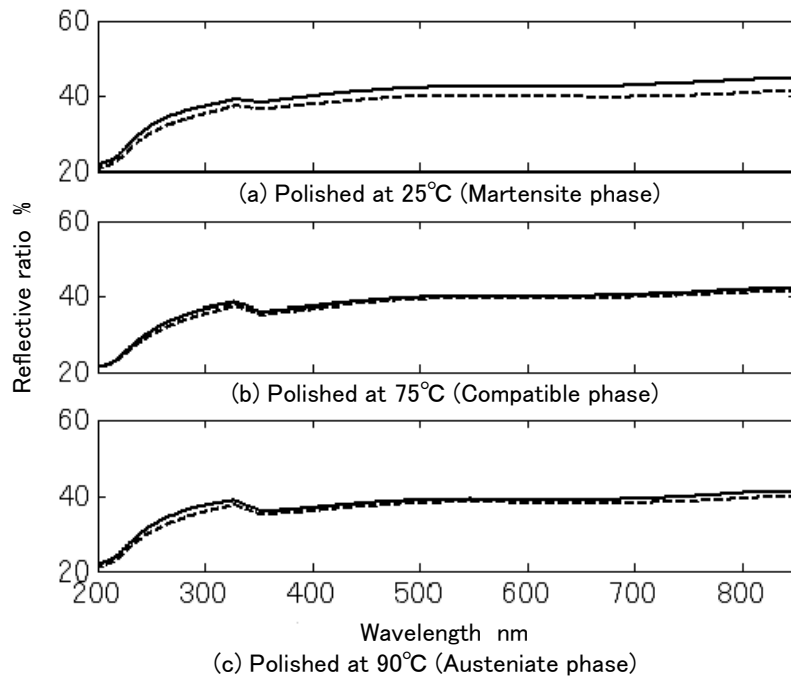


Fig. 2 -13 Relations between wave length and reflective ratio (polished temperature comparison)

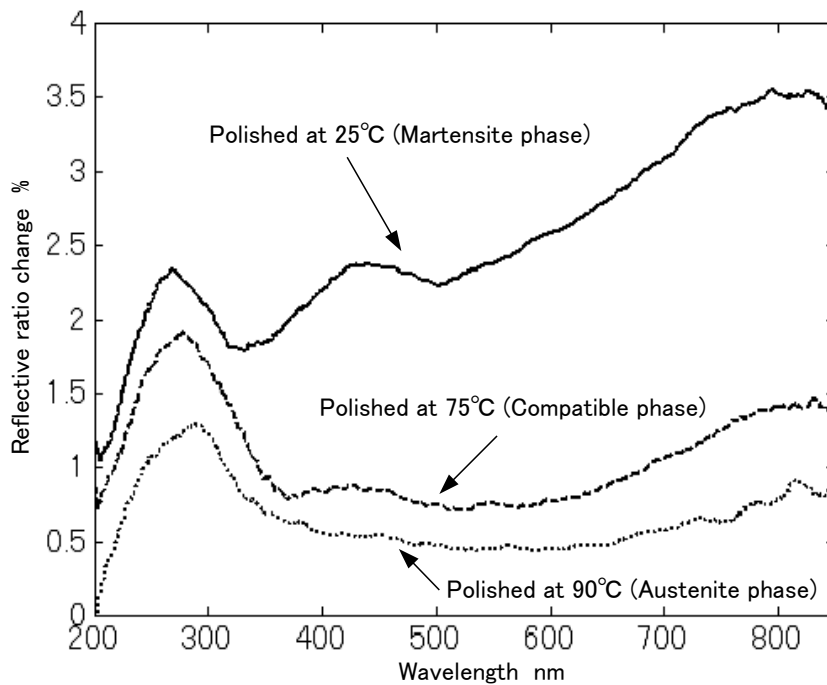


Fig. 2 -14 Reflective ratio changes by phase transformation (polished temperature comparison)

2.7 まとめ

本章では、SMA の相変態により大きな反射率変化を得るための加工法の検討を行い、形状記憶処理を鏡面加工の前に行い、SMA をマルテンサイト相に保ちながら研磨を行うことで、加工手順および加工温度のコントロールにおいて最大の反射率変化を得られることを明らかにした。なお、この方法で加工を行うことで 67%の Ra の増加および 3.6%の反射率低下(波長 800nm 付近において)を得ることができる。

参考文献

- 69) 出口貴久, 戸枝保, 高. 他: チタン合金の電解研磨システムに関する研究(第3報), 埼玉県産業技術総合センター研究報告, **1**(2002) 149-153.
- 70) C. L. Chu, C. Y. Chung, Y. P. Pu, P. H. Lin: Graded surface structure in chemically polished NiTi shape memory alloy after NaOH treatment, *Scripta Materialia*, **52**,11 (2005) 1117-1121.
- 71) 菅原博勝, 五藤寛丈, 小茂鳥潤: 高温酸化処理を施した Ni-Ti 形状記憶合金の表面特性と耐食性の評価, *材料*, **55**,10 (2006) 965-970.

第3章 レーザ照射による形状記憶合金表面へのエッチマスク直接描画

- 3.1 はじめに
 - 3.2 実験方法
 - 3.2.1 試料およびその前処理
 - 3.2.2 エッチング方法および装置
 - 3.2.3 レーザ照射装置
 - 3.3 酸化膜の耐エッチング性能
 - 3.4 形状記憶合金表面へのレーザ照射
 - 3.4.1 レーザ照射条件と表面変化との関係
 - 3.4.2 変色部の形状
 - 3.5 レーザ照射時の温度分布
 - 3.5.1 計算式及びパラメータの設定
 - 3.5.2 照射点の温度
 - 3.5.3 熱の影響範囲
 - 3.6 レーザ照射を行った形状記憶合金のエッチング
 - 3.6.1 エッチング形状
 - 3.6.2 マスク不良
 - 3.6.3 サイドエッチングの影響
 - 3.6.4 レーザ照射条件
 - 3.7 線形状の作製
 - 3.7.1 レーザ走査時の熱分布
 - 3.7.2 レーザ照射とエッチング
 - 3.8 まとめ
- 参考文献

3.1 はじめに

SMA の微細加工法として複雑形状への対応が容易であることや、加工後の試料へのダメージが少ないことなどからエッチングが有望な技術である。エッチングは半導体プロセスで多用されていることから技術の蓄積があることや、MEMS デバイスとの相性が良いなどの利点がある。また、バッチ処理によって大量生産も可能であり、SMA のエッチングにおいても半導体と同様にバッチ処理を前提として研究が行われている³³⁾。しかし、フォトリソグラフィをはじめとしたプロセスは工程数が多く、生産ロット数が少なくなるとコスト高になり、高付加価値を伴わない限り商品として成立しない問題がある⁷²⁾。MEMS では加速度センサやジャイロなどの例外を除いて市場規模が小さく、多品種少量生産への期待が大きい。マイクロアクチュエータに関しても同様であり、多品種少量生産が可能な微細加工技術が期待されている。

これに対して、一般的な半導体プロセスを用いない CELT(Confined Etchant Layer Technique)と呼ばれる型の形状をエッチング液で転写する加工法^{35) 73-75)}が提案されているが、アクチュエータのような複雑形状に対応するためには、型の加工にコストを要するので、多品種少量生産に適しているとは言えない。

一方 Si では、レーザ照射による表面改質部がマスクとして機能し、レーザを走査することで、フォトリソグラフィの工程を経ずに選択的なエッチングを行う手法が提案されている^{43) 76)}。

SMA においては、加熱により表面に形成される酸化膜によって耐腐食性が向上することが報告されており^{40) 71)}、この改質がエッチング液に対しても耐性を有している可能性がある。しかし、SMA の表面改質は生体適合性の向上が目的の研究がほとんどであり、体液への耐腐食性は示されているが、エッチング液に対する耐腐食性は報告されていない。さらに、レーザ照射によって SMA 表面を改質し、酸化膜を形成できることも報告されている^{39) 77)}。これらを利用することで、レーザ照射によって SMA 表面上に選択的に酸化膜をし、Si の場合と同様にフォトリソグラフィを用いずに SMA にマスクを付与し、エッチングによる微細形状を作製することができると考えられる。

そこで、本章では、加熱によって形成される表面改質がエッチング液に対する耐性を有することを明らかにするとともに、レーザ照射によりマスクを作製し、フォトリソグラフィを使用しない SMA のエッチングによる微細加工の可能性を検討する。

3.2 実験方法

3.2.1 試料およびその前処理

試料は 5mm 角に切断した厚さ 0.7mm の NiTi 合金(Ni 含有量 55.02%)であり、初期状態では形状を記憶していない。前処理として、不導体膜の除去と表面の均一化のために、ダイヤモンド砥粒(粒径 3 μ m および 1 μ m)を用いて研磨を行うことで、表面は 0.025 μ m 程度の Ra を持つ鏡面となっている。なお、本章の実験では形状記憶処理は行っていない。

3.2.2 エッチング方法および装置

エッチング手法にはサイドエッチングが比較的少ないことと溶液の取り扱いの簡便さから、塩化リチウム(LiCl)-エタノール溶液を用いた電解エッチングを選択した。実験装置を Fig. 3-1 に示す。陽極には、ステンレス鋼 (SUS304) 板を用いて導通をとった SMA を開口窓部のみが電解液と接触するよう絶縁板で覆って使用した。陰極には同様に開口窓部のみが電解液と接触するよう絶縁板で覆ったステンレス鋼板を用いた。開口窓部は円形で陽極側が ϕ 3.6mm、陰極側が ϕ 8.5mm である。電極間距離は 30mm であり、DC 電源を用いて 8V の電圧を印加した。電解液は濃度 1mol/L に調製し、スターラーにて攪拌を行った。液温は 25 $^{\circ}$ Cとした。

3.2.3 レーザ照射装置

パルス発振のレーザーでは尖塔値が高くなり、アブレーションを引き起こし、除去加工を引き起こす可能性があることと、SMA の光吸収率が波長 250nm 以上でほぼ一定である(前章 Fig.2-9 などを参照)ことから、レーザーには連続発振のアルゴンイオンレーザー(波長 488nm, 514.5nm など)をマルチライン出力にて使用した。空間横モードは高次モードも混合していた。レーザー光はビームエキスパンダを介して球面平凸レンズ(焦点距離 15mm)によって SMA 表面に垂直に入射させた。焦点は試料表面に合わせた。レーザー照射時間はメカニカルシャッターを用いて 0.1 秒単位で調整した。なお、この条件において、集光部分のビームウェスト径はレーザー光をガウシアンビームと仮定し、収差を無視して計算すると 2.0 μ m となる。

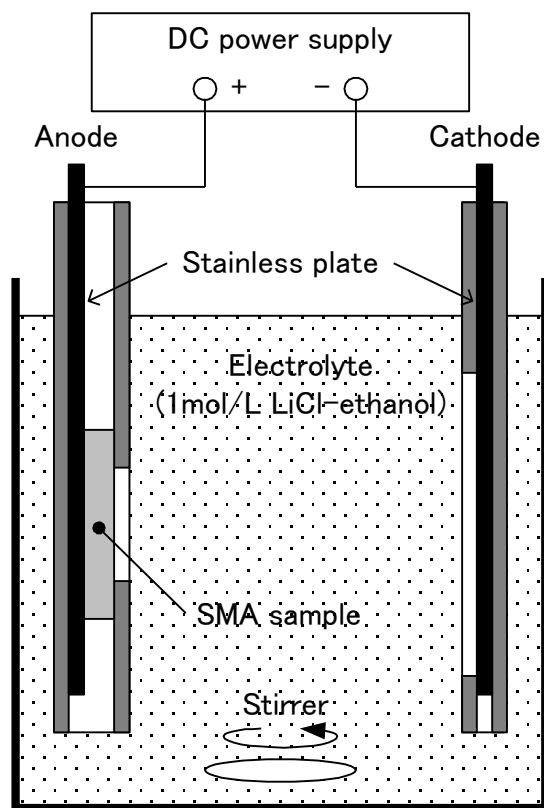


Fig. 3-1 Experimental setup of electrochemical etching

3.3 酸化膜の耐エッチング性能

加熱によって形成される SMA 表面の酸化膜は処理温度に依存して変化し，処理温度の上昇に伴って厚くなり，表面の Ra が増加する他，色彩や光沢が変化することが知られている⁷¹⁾。

そこで，赤外線ゴールドイメージ炉を用いて，空気雰囲気中 200℃-700℃にて 30 分の熱処理を行い，SMA 表面に酸化膜を作製した．その後，加熱処理を行っていない試料も含め 5 分間のエッチングを行い，加熱処理温度と耐エッチング性能との関係を調査した．

加熱処理前後の試料表面を Fig. 3-2 に示す．試料表面は 500℃以下の処理では色彩の変化が見られたものの光沢は維持されているが，600℃以上の処理では光沢が失われている．また，各試料の Ra は光沢を維持している試料では処理前と比べて大きな変化はなく，光沢が失われている試料では著しく増加していた．これらの結果は菅原らの報告⁷¹⁾と一致している．

5 分間のエッチングを行った後の試料表面を Fig. 3-3 にし，エッチングによる除去深さを Fig. 3-4 に示す．加熱処理を行っていない試料と 200℃で処理を行った試料でのみエッチングが進行し，300℃以上で処理を行った試料ではエッチングが進まないことがわかる．このことから，加熱によって形成される酸化膜は 300℃以上の加熱処理で形成され，処理温度によらず LiCl-エタノール溶液を用いた電解エッチングに対して良好な耐性を有し，色彩，光沢や表面粗さが変化しても耐性に変化がないことが分かる．なお，200℃での加熱処理を行った試料のエッチング深さは加熱処理を行っていない試料と異なっているが，200℃が使用した SMA の変態温度よりも高温であり，加熱による結晶状態の変化があったためであると考えられる．しかし，変態温度以上に加熱を行った SMA についても，研磨により表面の酸化膜を除去することで LiCl-エタノール溶液による電解エッチングにより，エッチング速度の違いはあるものの，除去されることを確認しており，耐エッチング性能の評価には影響しない．

以上から，300℃以上の加熱処理を行うことで SMA に耐エッチング性能を付与できることがわかる．

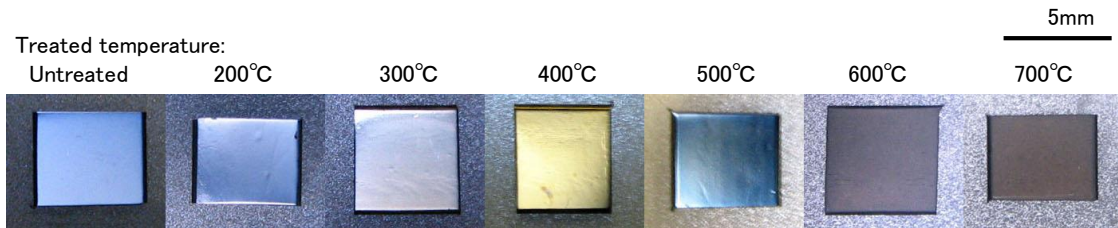


Fig. 3-2 Pictures of heat treated surfaces

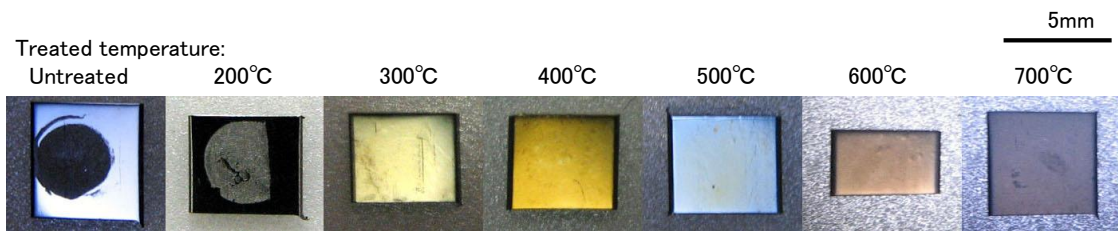


Fig. 3-3 Pictures of heat treated and etched surfaces

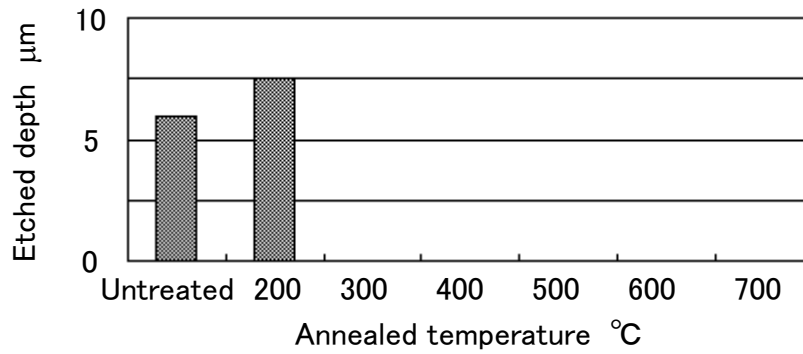


Fig. 3-4 Relation between annealed temperature and etched depth

3.4 形状記憶合金表面へのレーザー照射

3.3節において加熱処理により SMA に耐エッチング性能を付与できることが確かめられ、レーザー照射によるマスク形成の可能性が示された。本節では出力 200-1000mW、照射時間 0.1-7.0 秒のレーザー照射を行い、照射後の表面の様子を観察し、SMA にレーザーを照射した際の表面変化について調査を行う。

3.4.1 レーザー照射条件と表面変化との関係

レーザー照射部の光学顕微鏡写真の一例を Fig. 3-5 に示す。入射エネルギー(レーザー出力×照射時間)が小さいとき、照射部は Fig. 3-5 (b)のようにわずかに変色する。入射エネルギーが大きくなると、Fig. 3-5 (c)のように淡い変色の中央により変色の度合いが大きい部分を持つ 2 重構造の変色部が発生する。さらに入射エネルギーが大きくなると、Fig. 3-5 (d)のように中心から外周に向かい色の濃淡が 3 段階に区別できる 3 重構造の変色部が発生する。各レーザー照射条件においてどのタイプの変色部が生成されるかを Table 3-1 に示す。

変色部のサイズのレーザー出力およびレーザー照射時間との関係を調査した。代表例として、Fig. 3-6 に照射時間を 1.0 秒に固定してレーザー出力を変化させたときの変色部の直径を、Fig. 3-7 にレーザー出力を 500mW および 1000mW に固定して照射時間を変化させたときの変色部の直径を示す。Fig. 3-6 よりレーザー出力の増加に伴い、変色部の直径は直線的に増加することが分かり、Fig. 3-7 より照射時間を増加させたときもその直径は増加傾向を示すが、レーザー出力を増加させた際とは異なり、一定値に収束していることが分かる。これらより、レーザー照射が開始されてから照射部付近の温度分布が平衡に達するまでに時間を要することと、加熱中の酸化膜生成に時間を要することが推定できる。

3.4.2 変色部の形状

次に、レーザー照射部の形状変化を調べるため、照射部の原子間力顕微鏡(AFM)観察を行った。3種類の変色部それぞれについての AFM 像を Fig. 3-8 に示す。変色部が 1 重のとき表面の形状変化は確認されない。変色部が 2 重のときには、中央付近にわずかな窪みが確認される。この窪みの深さは 100-150nm 程度であり、研磨後の最大高さ(Ry)170nm より小さい。これに対し、変色部が 3 重になるときは、中央に大きな隆起が生じていることが確認できる。この隆起の高さはレーザー出力、照射時間によって変化し、条件によっては Ry を大きく超える。

そこで、この隆起の詳細を調べるため、走査型電子顕微鏡(SEM)による観察を行った。Fig. 3-9 に隆起の SEM 像を示す。なお、ここでは、観察を容易にするため、レーザー照射出力を大きく、照射時間を長くすることで隆起のサイズを大きくして観察を行っている。レーザー照射を行った固体の表面形状変化としては、レーザーアブレーションによる除去もしくは熱による熔融が考えられる。レーザーアブレーションによる除去が行われた場合、シャープなエッジを持った円柱もしくは円錐状の穴となり、加工痕周辺にデブリが付着する。しかし、Fig. 3-9 から隆起の内側は非常になめらかな斜面になっており、隆起を取り囲む

ように無数のしわが存在し，周囲に飛散した粒子は存在しないことがわかる．このことからレーザアブレーションによる除去は行われていないと判断できる．よって，この隆起はレーザ照射による加熱で中心部が溶融し体積が増加した後，レーザ照射終了後に急冷され，凝固する際に収縮することによって生成されたと考えられる．つまり，隆起の発生を防ぐためには，レーザ照射部での溶融を防ぐ必要があり，レーザ照射出力を小さく，照射時間を短くしなくてはならない．

本実験の条件では，レーザ照射出力を 300-700mW とし，400mW 以下では照射時間を任意に，500mW では照射時間を 1.0 秒以下に，600mW 以上では照射時間を 0.1 秒とすることで隆起を伴わない変色部を得ることができる．

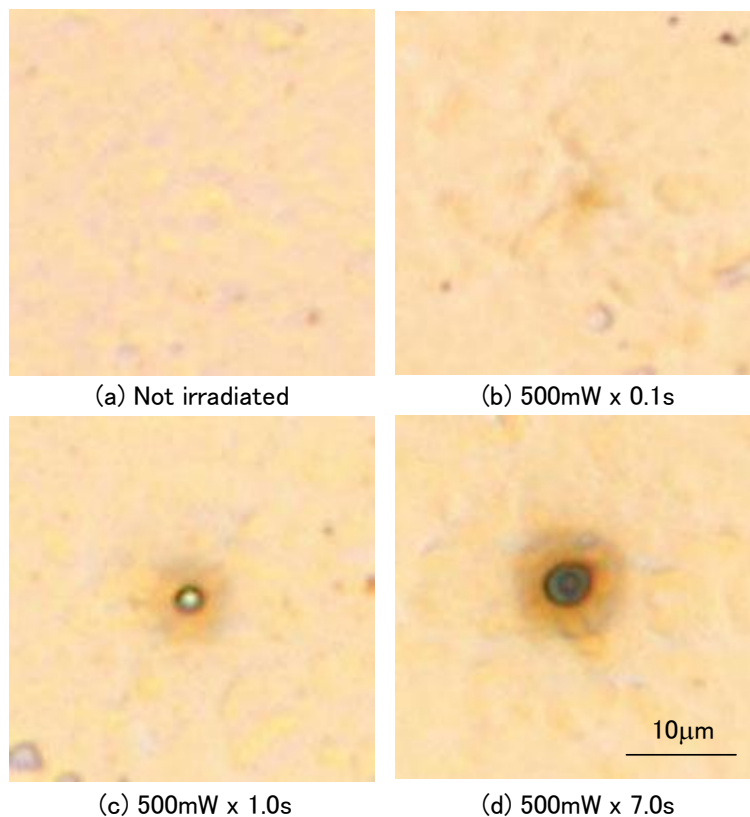


Fig. 3-5 Optical micrographs of SMAs irradiated by laser beam

Table 3-1 Relation between laser irradiated parameters and pattern of discoloration

		Irradiated time s								
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	3.0	5.0	7.0
Laser power mW	200	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	300	×	×	×	×	△	△	△	△	△
	400	△	△	△	○	○	○	○	○	○
	500	△	○	○	○	○	○	●	●	●
	600	○	●	●	●	●	●	●	●	●
	700	○	●	●	●	●	●	●	●	●
	800	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	900	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	1000	●	●	●	●	●	●	●	●	●

×:No discoloration △:Only one circle discoloration(Fig. 3-5(b))

○:Two discoloration circles in concentrically (Fig. 3-5(c))

●:Three discoloration circles in concentrically (Fig. 3-5(d))

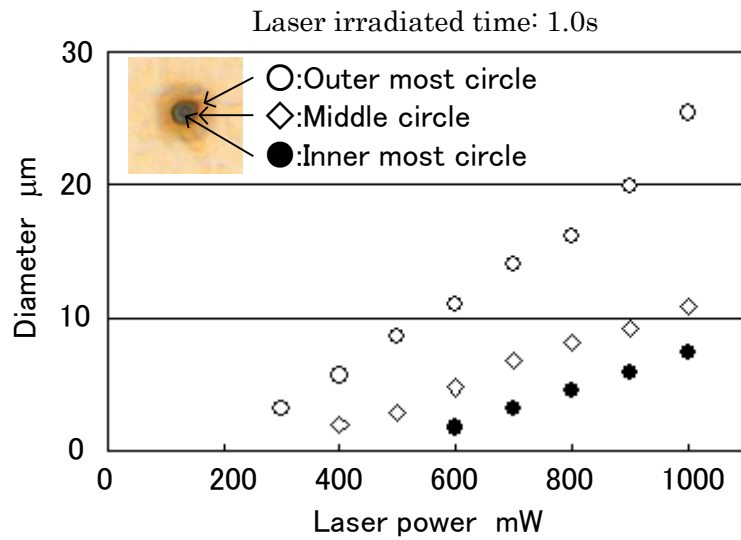


Fig. 3-6 Relation between laser power and diameters of discoloration

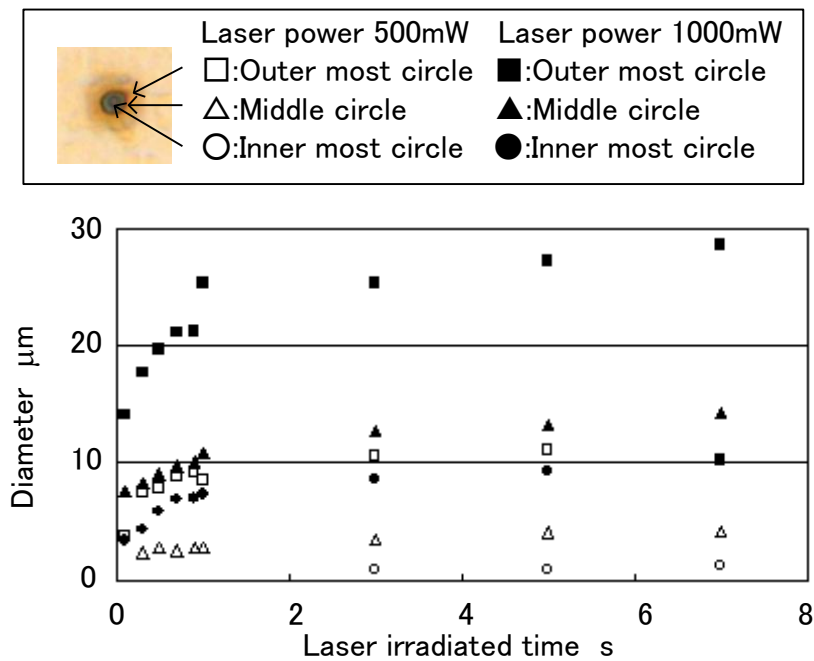


Fig. 3-7 Relation between laser irradiated time and diameters of discolorations

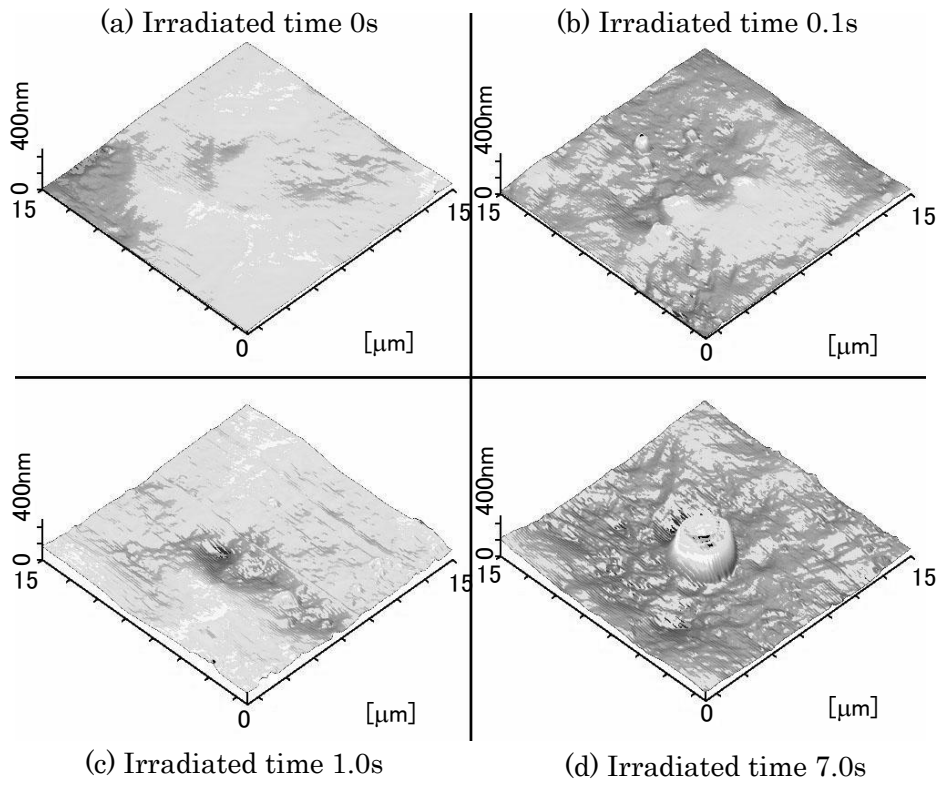


Fig. 3-8 AFM images of SMA surfaces irradiated by 500mW laser beam

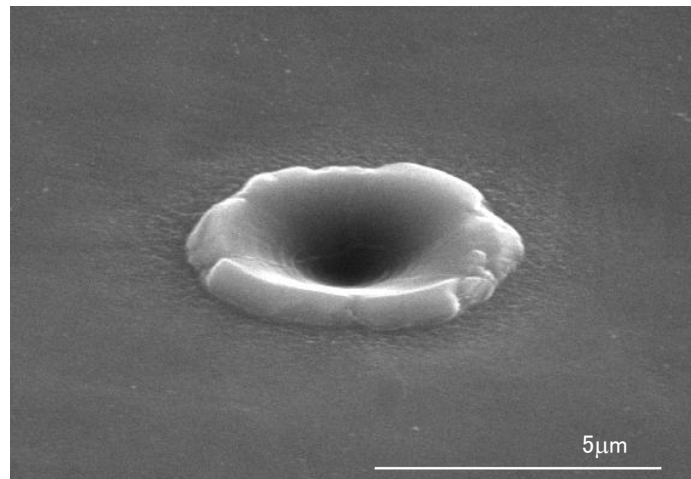


Fig. 3-9 SEM image of SMA surface irradiated by 1000mW x 7.0s laser beam

3.5 レーザ照射時の温度分布

3.5.1 計算式及びパラメータの設定

隆起の SEM 像からアブレーションによる除去加工が起こっていないことが考えられ、レーザ照射時間と変色部直径との関係や、ゴールドイメージ炉を用いた加熱で変色が得られたこと(3.3節)も考慮し、レーザ照射による熱の影響で変色部(および隆起)が形成されると考えられる。そこで、熱の影響であることを確認するため、レーザ照射時の SMA の温度(分布)を見積もった。静止したガウシアンビームを入射した際の物体の温度上昇については Lax⁷⁸⁾の報告があり、深さ方向および平面方向に無限に広がった半無限固体を仮定し、物体表面での周囲雰囲気への熱伝達を無視して、ビームの半径(ビーム中心より光強度が $1/e$ となる点までの距離) w 、レーザ出力 P のレーザを物体に入射した際のビーム中心からの距離 r 、深さ z における温度上昇 $T(r,z,w)$ は、物体の光吸収係数 α 、表面での反射率 R 、熱伝導率 k として

$$T(r,z,w) = \frac{\alpha(1-R)P}{2\pi k} \int_0^{\infty} J_0\left(\frac{\lambda r}{w}\right) \exp\left(-\frac{\lambda^2}{4}\right) \frac{\alpha w \exp\left(-\frac{\lambda z}{w}\right) - \lambda \exp(-\alpha z)}{\alpha^2 w^2 - \lambda^2} d\lambda \quad (3.1)$$

と計算されている。ここで、 J_0 は 0 次のベッセル関数である。ビーム半径は 3.2.3 項で計算したビーム径 $2.0\mu\text{m}$ がビーム中心より光強度が $1/e^2$ となる点を以ってビーム径としていたので、 $w = 2.0 \times 10^{-6} / 2\sqrt{2} \cong 0.7 \times 10^{-6} [\text{m}]$ とした他、SMA の光吸収係数 $\alpha = 7.79 \times 10^6 [\text{1/m}]$ 、反射率 $R = 0.43$ 、熱伝導率 $k = 20 [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ とした。Table 3-2 に計算に使用した数値を示す。なお、温度上昇による物性値の変化は無視している。また、レーザの集光径が $0.7 \times 10^{-6} [\text{m}]$ 、SMA の光吸収係数が $7.79 \times 10^6 [\text{1/m}]$ であるの対し、実験に使用した SMA は 5mm 角、厚さ 0.7mm であることから SMA を半無限固体として扱って問題ない。

3.5.2 照射点の温度

レーザ照射出力と SMA 表面、照射点中央の温度との関係を(3.1)式より計算した結果を Fig. 3-10 に示す。ビーム径が計算値であり球面収差、色収差を考慮していないこと、温度上昇による物性値の変化を考慮していないことに加え、周囲雰囲気への熱の移動の項がなく、無限時間経過後の定常状態の温度分布を計算しているため、実際の温度と厳密には一致してはいないと考えられるものの、例えば、レーザ出力 150mW での温度は 428°C と計算され、酸化膜を形成するのに十分な加熱が行われていることが予想される。また、前項で示した隆起は Table 3-1 よりレーザ照射出力 400mW 以下では照射時間に関わらず(条件中最長の照射時間 7.0 秒)であっても発生しないが、 500mW の時には 3.0 秒以上の照射で発生している。SMA の温度は計算結果より、 400mW で $1,107^\circ\text{C}$ であるのに対し、 500mW で $1,379^\circ\text{C}$ であり SMA の融点である $1,300^\circ\text{C}$ を超える。このことより隆起が熱の影響により形成されたものであることが確認できる。なお、実験結果では Fig. 3-7 よりレーザ照射開始から 1.0 秒程度の経過時間で定常状態に達していると考えられ、上記の 7.0 秒および 3.0 秒の照射はいずれも定常状態に達していると考えて問題ない。

3.5.3 熱の影響範囲

レーザ出力を、実験で隆起が発生しなかった最大出力である 400mW と、実験を行った最大出力であり、熔融による隆起が発生した 1000mW として計算を行い、レーザ照射時に熱の影響が及ぶ範囲を見積もった。なお、熱が SMA に与える影響は温度が低い順に、形状復帰(50~90°C)、酸化膜の形成(300°C~)、形状記憶(400°C~)、熔融(1300°C~)が考えられるが、使用している SMA には形状記憶処理を行っていないため、形状復帰は起こらない。また、酸化膜の深さ方向への成長は表面から酸素が侵入する形で進行するので、温度のみで酸化膜が形成される範囲を規定することはできないため、酸化膜の形成については表面のビーム半径方向のみ考慮した。

レーザ出力を 400mW としたときの 2 次元温度分布を Fig. 3-11 に示し、SMA 表面のビーム半径方向およびビーム中心のビーム軸方向の温度分布を Fig. 3-12 に示す。半径方向の温度低下率に比べ、軸方向の温度低下率が小さくなり、楕円状の等温線をもつ分布となっている。

形状記憶が起こる 400°C 以上に加熱された部分の半径はビーム半径方向で 2.2 μm 、軸方向で 2.5 μm と計算され、ごく小さい影響範囲に留まっている。また、酸化膜が形成される 300°C 以上に加熱された部分のビーム半径方向の半径は 3.2 μm と計算される。400mW で 7.0 秒の照射を行った際の変色部の半径は 3.65 μm であったことから、計算式が厳密でないことを考慮に入れ、顕微鏡観察において確認された変色部は酸化膜であると考えてよい。

レーザ出力 1000mW としたときの SMA 表面のビーム半径方向およびビーム中心のビーム軸方向の温度分布を Fig. 3-13 に示す。SMA の融点以上に加熱された部分の半径は 1.7 μm 、深さは 2.6 μm と計算される。熔融が起こることで SMA の物性値に大きな変化があり、表面形状も変化するので、実際の温度分布とはずれが生じているものと考えられるが、熔融による試料内部への影響は数 μm 程度であると予測できる。また、形状記憶が起こる 400°C 以上に加熱された範囲はビーム半径方向の半径が 6.2 μm 、軸方向で 7.1 μm と計算される。さらに、酸化膜が形成される部分のビーム半径方向の半径は 8.5 μm と計算され、実験で得られた変色部の半径 14.1 μm と大きなずれが存在する。これも、熔融による影響であると考えられる。

Table 3-2 Parameters of laser and SMA

Laser	Continues light
Power (P)	0 – 1000mW
Beam diameter (w)	$0.7 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
SMA	
Photoabsorption coefficient (α)	$7.79 \times 10^5 \text{ 1/m}$
Surface reflectance (R)	0.43
Thermal conductivity (k)	20 W/m · K

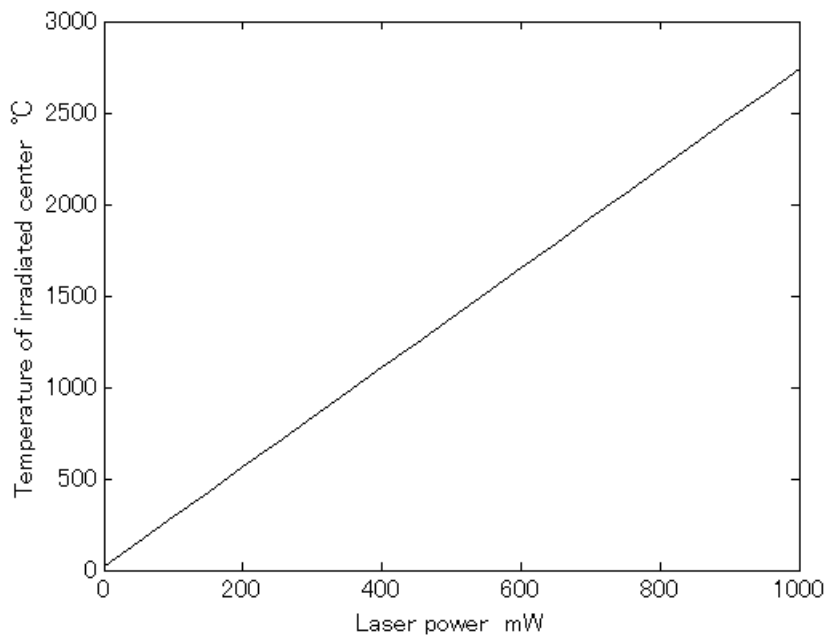


Fig. 3-10 Relation between laser power and temperature of irradiated center

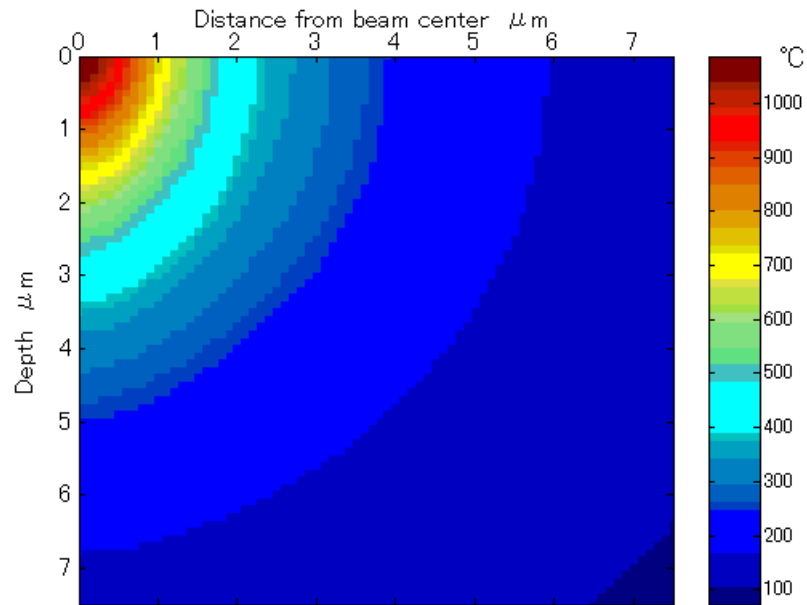


Fig. 3-11 Internal temperature distribution generated by 400mW laser beam

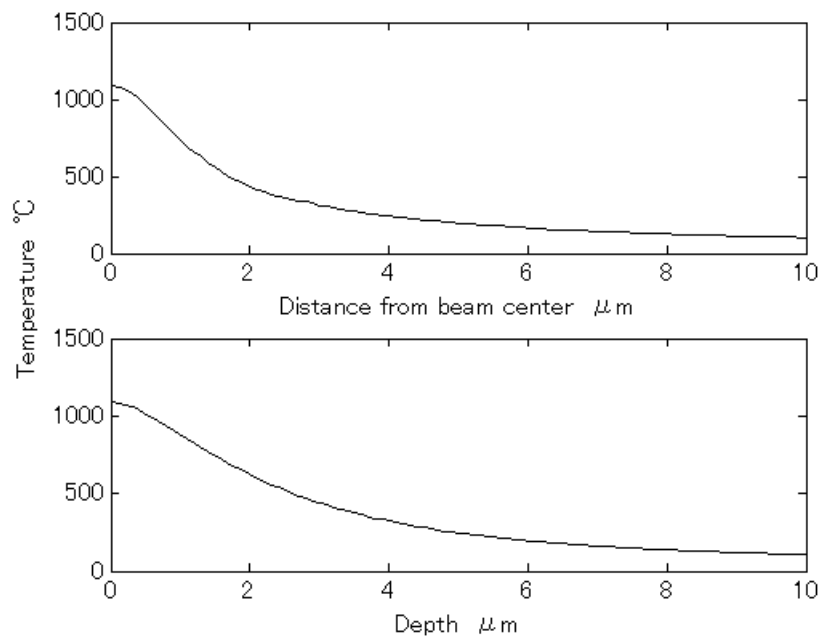


Fig. 3-12 Temperature distributions on surface and light axis generated by 400mW laser beam

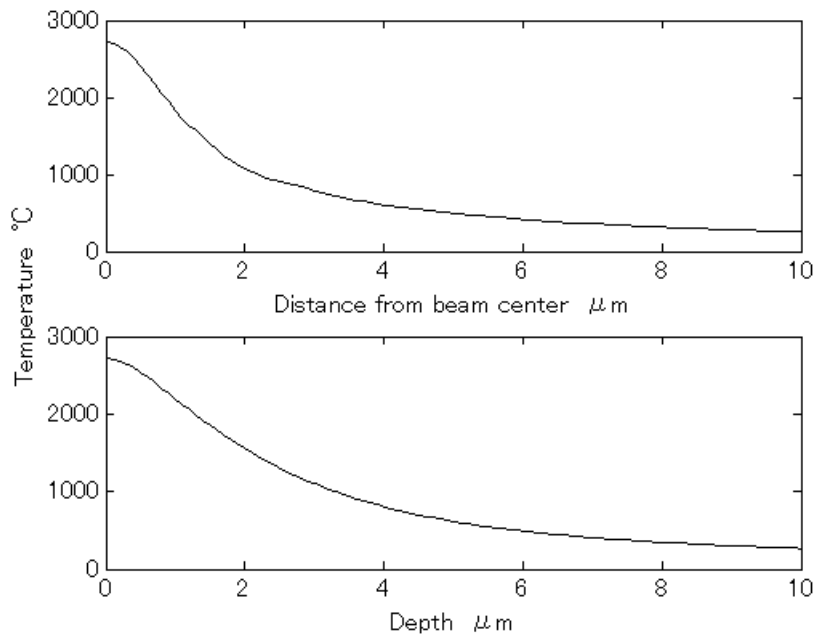


Fig. 3-13 Temperature distributions on surface and light axis generated by 1000mW laser beam

3.6 レーザ照射を行った形状記憶合金のエッチング

3.6.1 エッチング形状

出力 200-1000mW, 照射時間 0.1-7.0 秒のレーザー照射を行った試料に対して, 5 分間エッチングを行った後, エッチング形状の観察を行った. この時のエッチング深さは 7.5-8.5 μm であった. エッチング形状の一例を Fig. 3-14 に示す. レーザ照射を行った部分がマスクとして機能し, 柱形状を得られることが確認できる. 設定したレーザー照射出力 200-1000mW, 照射時間 0.1-7.0 秒の範囲において, この柱の直径は 2.8-53.8 μm であった.

しかし, レーザ照射条件によってエッチング形状が全く観察されないことや, 丘形状 (Fig. 3-15) が観察されることがあった. Table 3-3 にレーザー照射条件とエッチング形状との関係を示す. エッチング形状は, レーザ照射時の入射エネルギーが小さいときに確認されず, エネルギーが大きくなるにつれ, 丘形状, 柱形状となっている. このことより, 形状が確認されないものはレーザー照射時に表面が変質するに至らず耐エッチング性能が付与されなかったと考えられる. さらに, 丘形状が観察されたものは耐エッチング性能の付与はされたが, その径が小さく, サイドエッチングが柱の中心まで到達し, 上部が消滅したものと考えられる.

レーザー出力および, レーザ照射時間と柱直径との関係を Fig. 3-16 に示す. なお, 柱直径は光学顕微鏡により真上から測定したものである. 柱直径はレーザー照射出力の増加により大きくなり, レーザ照射時間の増加に関して一定値に収束することがわかる. この傾向は前章により示されたレーザー照射条件と変色部直径との関係と一致している.

3.6.2 マスク不良

エッチング形状が柱形状となるものに関しても, レーザ照射条件によって, 柱上面がリング状にエッチングされ, 穴となっているものが観察された. Fig. 3-17 に穴を生じたエッチング形状(レーザー照射出力 900mW, 時間 0.5 秒)の SEM 像を示す. また, この穴の発生原因を確かめるため, 断面形状をレーザー顕微鏡によって観察した. 観察結果を Fig. 3-18 に示す. ただし, Fig. 3-18 では, 測定方向を調整するため, Fig. 3-17 を反時計方向に 90° 回転した状態を示した. なお, Table 3-3 より, この穴はレーザー照射時に SMA 表面に隆起を生じる際に発生していることがわかる.

レーザー顕微鏡の観察結果より, 穴の深さは柱周囲のエッチング深さと比較して浅くなっている他, SEM 像から, 写真上で穴の上側半分に薄い膜が蓋のように残っていることおよびこの膜に数本の亀裂が生じていることが確認できる. さらに, この膜は柱上面と同じ高さにあることがレーザー顕微鏡の観察結果よりわかる.

以上から, この穴は膜に生じた亀裂から電解液が侵入し, 内部から SMA がエッチングされて生じたものと考えられる. なお, 穴の上側半分に観察された膜は耐エッチング性のある変質部が溶け残ったものであると考えられる. さらに, 隆起が発生する条件でレーザー照射時を行った際にこの欠陥が生じたことを考慮し, この亀裂は SMA 表面が隆起する際の膨張, 収縮による応力によりできたものであると考えられる.

3.6.3 サイドエッチングの影響

次に、エッチング時の挙動の詳細を調べるため、柱直径とレーザー照射による変色部直径との関係を調べた。

Fig. 3-19 に照射出力が 500, 700, 900mW の際の柱直径とレーザー照射による変色部直径との比をレーザー照射時間との関係で示す。柱直径とレーザー照射による変色部直径との比は 1.0 を超えていることから、変色部直径よりも柱直径が大きくなっていることが分かる。このことより、光学顕微鏡では変色が観察できない部分までレーザー照射による表面の改質が及んでおり、変色部よりも広い範囲がマスクとして機能していることが分かる。また、柱直径と変色部直径との比は一定でなく、レーザー照射時の入射エネルギーが大きくなるときに増加する傾向にある。しかし、3.3 節により改質部は全くエッチングされないことが示されており、改質部は全て溶け残ると考えられるので、柱直径と変色部直径との比は一定であると予想され、この結果とは矛盾する。

これに対し、Fig. 3-20 にエッチング形状を横から観察した際の SEM 像を示す。同図より柱直径が大きいときに柱上部のエッジの反りが大きくなっていることがわかる。このことから、サイドエッチングにより改質部直下の SMA がエッチングされ、改質部が支えを失い、軒先状に柱外側に向けて存在していた改質部が自立できずに消滅したため、柱直径と変色部直径との比が小さくなったものと考えられる。

3.6.4 レーザー照射条件

前節までにより、本研究で設定したエッチング条件において、良好なエッチング形状(柱形状)を得るためには、レーザー照射出力 300-500mW とし、出力 300mW では照射時間を 0.7 秒以上に、出力 400mW では照射時間を任意に、出力 500mW では照射時間を 0.1 秒以下とすればよいことが分かる。

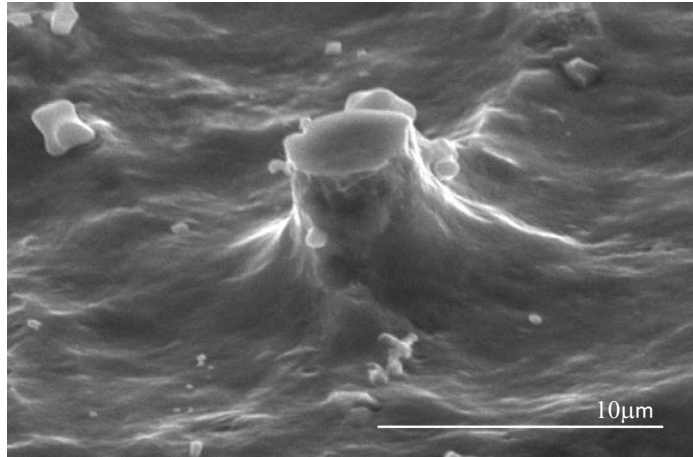


Fig. 3 -14 SEM image of a pillar formed by etching after 400mW x 0.3s laser irradiation

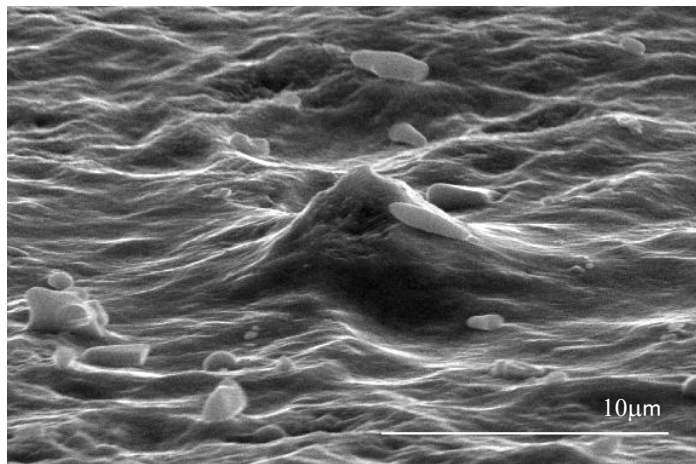


Fig. 3 -15 SEM image of a hill formed by etching after 300mW x 0.5s laser irradiation

Table 3-3 Relation between laser irradiated parameters and pattern of etched shape

		Irradiated time s								
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	3.0	5.0	7.0
Laser power mW	200	×	×	×	×	×	×	△	△	△
	300	△	△	△	○	○	○	○	○	○
	400	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	500	○	●	●	●	●	●	●	●	●
	600	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	700	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	800	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	900	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	1000	●	●	●	●	●	●	●	●	●

×:Flat △:Hill ○:Pillar (without defects) ●:Pillar (with defects)

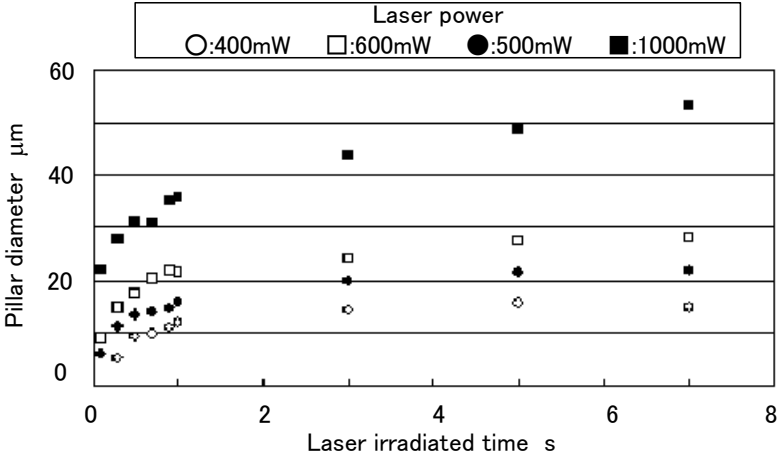


Fig. 3-16 Relation between laser irradiated time and pillar diameter

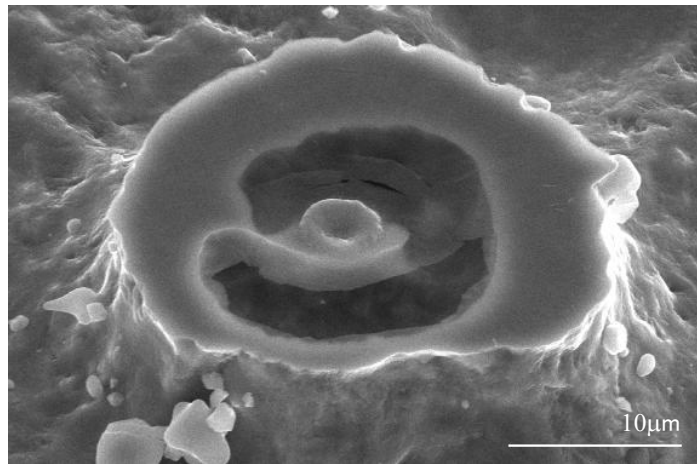


Fig. 3-17 SEM image of a pillar with defects formed by etching after 900mW x 0.5s laser irradiation

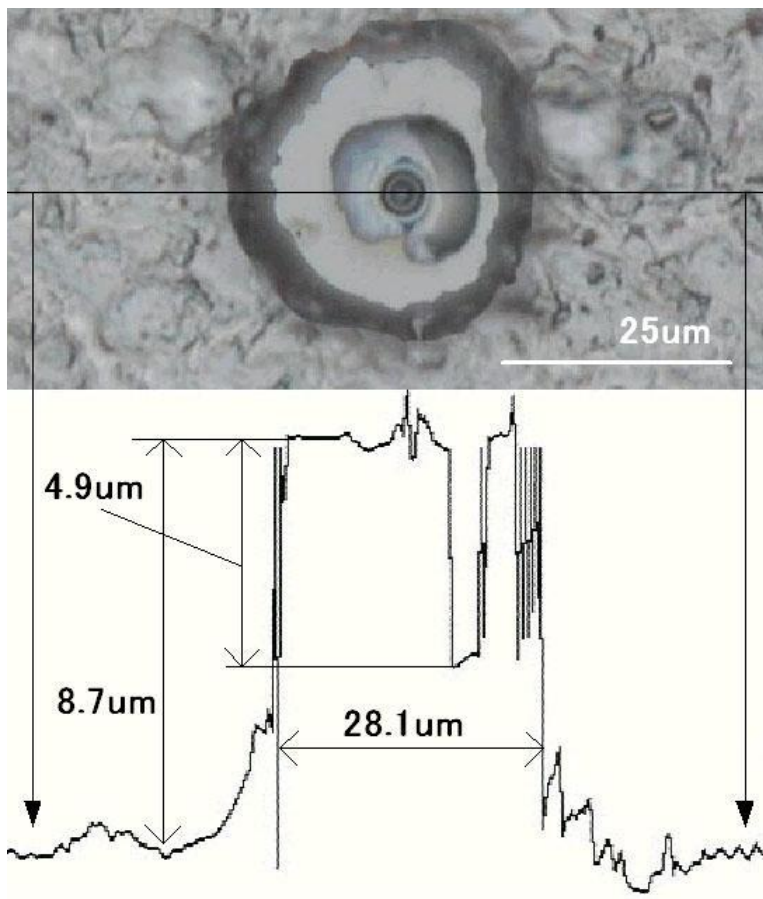


Fig. 3-18 Cross sectional view of a pillar with defects

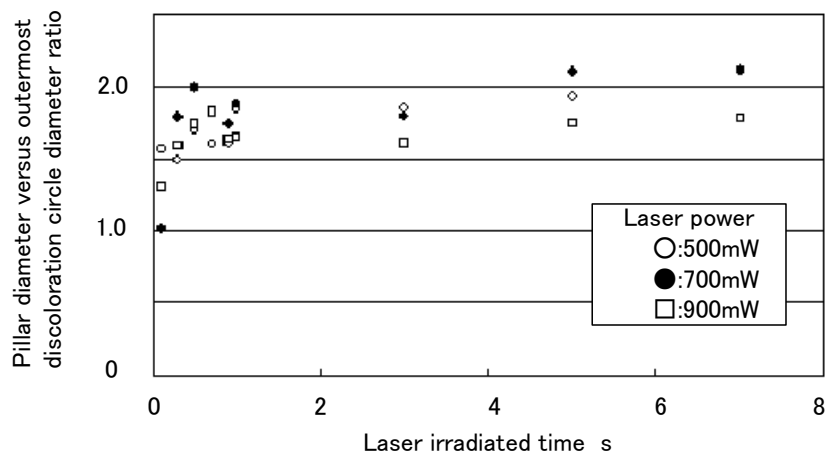


Fig. 3-19 Relation between laser irradiated time and pillar diameter versus discoloration diameter ratio

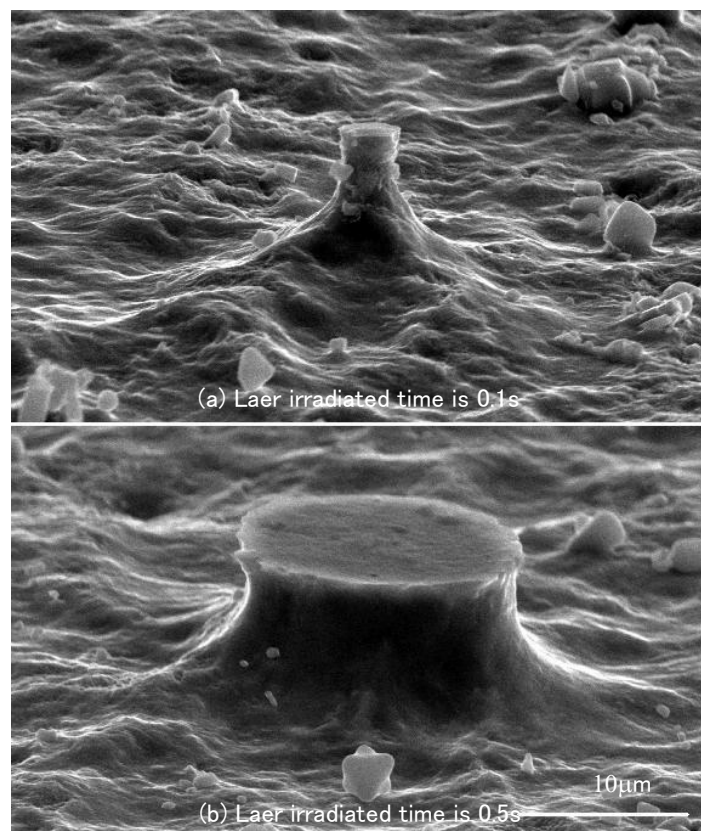


Fig. 3-20 Side views of pillars

3.7 線形状の作製

レーザを静止して照射することで柱形状を作製できる円形状のマスクが得られることが明らかとなった。ここでは、その応用として、レーザを走査することで、線形状を作製できるマスクを得ることを試みた。線形状を作製することができれば、レーザ走査の経路を任意に設定し、自由なパターンの形状を作製することが可能となる。

3.7.1 レーザ走査時の熱分布

はじめに、レーザを走査することによる影響について考察を行った。Sanders⁷⁹⁾は物体表面にレーザ走査した際の温度上昇が、走査速度 v 、ガウシアンビーム半径 w 、試料の密度 ρ 、比熱 C 、熱伝導率 k とし、

$$\frac{vw\rho C}{4k} < 0.01 \quad (3.2)$$

を満たしているとき、ビームが静止している場合と温度分布の差がほとんどないことを示している。走査速度 $1.0 \times 10^{-4} [\text{m/s}]$ 、SMA の密度 $6.4 \times 10^3 [\text{kg/m}^3]$ 、比熱 $270 [\text{J/kg} \cdot \text{K}]$ とし、その他ビーム半径 $w = 2.0 \times 10^{-6} / 2\sqrt{2} \cong 0.7 \times 10^{-6} [\text{m}]$ 、熱伝導率 $k = 20 [\text{W/m} \cdot \text{K}]$ は 3.5 節の値を用いて計算を行った。このとき、 $vw\rho C/4k \cong 1.51 \times 10^{-6}$ となり、温度分布にレーザ走査はほとんど影響しないことが分かる。そこで、照射時間に関わらず欠陥のないエッチング形状を得られた 400mW をレーザ出力とした。

3.7.2 レーザ照射とエッチング

パターン形状を $40\mu\text{m}$ の直線を $20\mu\text{m}$ 間隔でジグザグに繋いだ形状とした。レーザ照射後のエッチング時間は 3.6 節と同じ 5 分である。このとき得られたエッチング形状の SEM 像を Fig. 3-21 に示し、レーザ顕微鏡により測定した、断面形状を Fig. 3-22 に示す。ただし、Fig. 3-22 においては、測定方向を調整するため、Fig. 3-21 を反時計方向に 90° 回転した状態である。なお、この線形状の幅は $5.7\text{-}7.0\mu\text{m}$ 、高さは $9.1\text{-}10.2\mu\text{m}$ であった。

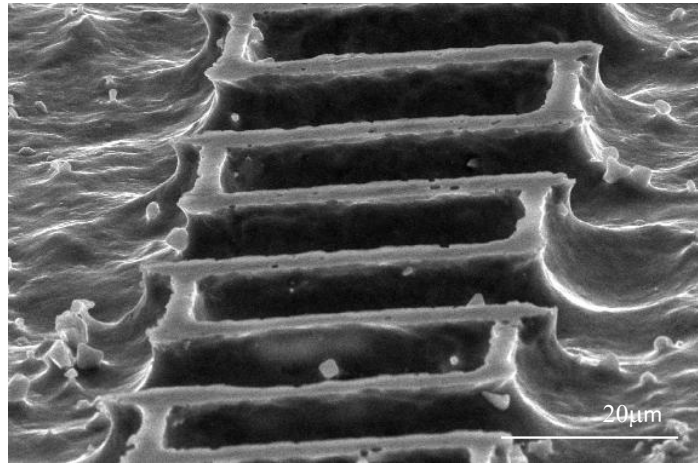


Fig. 3 -21 SEM image of a line formed by etching after 400mW laser beam scanning

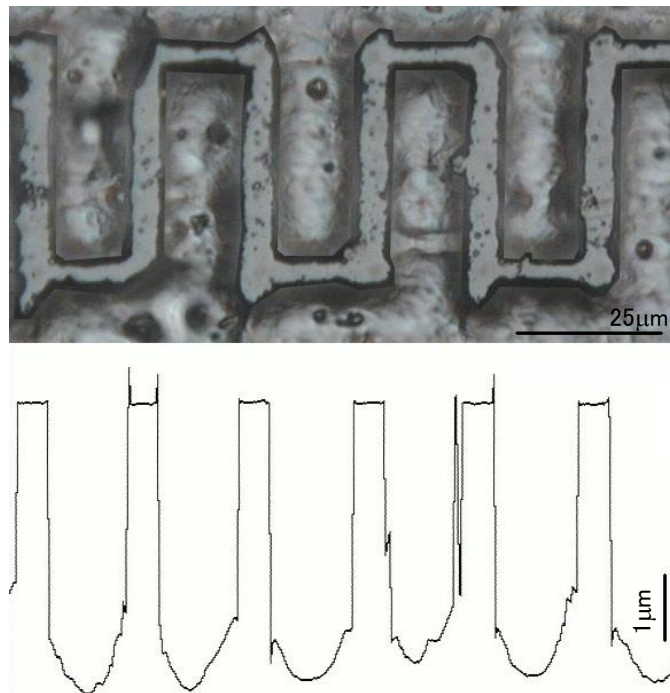


Fig. 3 -22 Cross sectional view of a line formed by etching

3.8 まとめ

本章では、フォトリソグラフィを利用しない SMA の微細エッチング加工を目的に、レーザー照射によってマスクを直接描画し、エッチングを行うことを試み、以下を明らかにした。

- 1) 300℃以上の熱処理で形成される酸化膜は LiCl-エタノール溶液を用いた電解エッチングに対して良好な耐性を持ち、マスクとして使用することができる。
- 2) SMA 表面にレーザー照射を行うことで局所的に熱処理を行い、マスクを描画することができる。
- 3) SMA 表面へのレーザー照射時に入射エネルギーが大きくなると、熔融に伴う変形が発生するため、マスクの描画は 400mW 以下のレーザー出力で行うことが望ましい。
- 4) レーザー照射を行った試料を LiCl-エタノール溶液を用いて 8V、5 分の加工を行い、直径 2.8-15.6 μm 、高さ 7.5-8.5 μm の柱形状を得ることができる。また、400mW、100 $\mu\text{m}/\text{s}$ でレーザーを走査した SMA では幅 5.7-7.0 μm 、高さ 9.1-10.2 μm の線状のエッチング形状を得ることができる。

以上より、レーザー照射を用いることで、フォトリソグラフィや型を用いずに 5 μm 程度の分解能で微細エッチング加工を行えることが確かめられた。

参考文献

- 72) 藤田博之: MEMS の技術動向と設計技術の役割, 精密工学会誌, **70**,9 (2004) 1133-1145.
- 73) Y. Zu, L. Xie, B. Mao, Z. Tian: Studies on silicon etching using the confined etchant layer technique, *Electrochimica Acta*, **43**,12-13 (1998) 1683-1690.
- 74) R. Schuster, V. Kirchner, P. Allongue, G. Ertl: Electrochemical Micromachining, *Science*, **289**,5476 (2000) 98-101.
- 75) J. J. Sun, H. G. Huang, Z. Q. Tian, L. Xie, J. Luo, X. Y. Ye, Z. Y. Zhou, S. H. Xia, Z. W. Tian: Three-dimensional micromachining for microsystems by confined etchant layer technique, *Electrochimica Acta*, **47**,1-2 (2001) 95-101.
- 76) 細野高史, 戸倉和: 単結晶シリコンのレーザパターニング, 精密工学会誌, **71**,6 (2005) 729-733.
- 77) F. Villermaux, M. Tabrizian, L. H. Yahia, M. Meunier, D. L. Piron: Excimer laser treatment of NiTi shape memory alloy biomaterials, *Appl. Surf. Sci.*, **110**(1997) 62-66.
- 78) M. Lax: Temperature rise induced by a laser beam, *Journal of Applied Physics*, **48**,9 (1977) 3919-3924.
- 79) D. J. Sanders: TEMPERATURE DISTRIBUTIONS PRODUCED BY SCANNING GAUSSIAN LASER-BEAMS, *Applied Optics*, **23**,1 (1984) 30-35.
- 80) N. Ma, G. Song: Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation, *Smart Materials & Structures*, **12**,5 (2003) 712-719.
- 81) 秦誠一, 林健彦, 福重孝志, 下河辺明: アナログ的基板面外変位アクチュエータ, 2004 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2004) 887.
- 82) 奥根充弘, 藤本公三, 仲田周次: TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの動作特性の検討, 精密工学会誌, **66**,9 (2000) 1406-1411.

第4章 レーザ照射による形状記憶合金アクチュエータの駆動

4.1 はじめに

4.1.1 本章の背景と目的

4.1.2 3D 触覚ディスプレイ

4.1.3 面外変位アクチュエータ

4.2 レーザ照射による形状記憶合金箔の局所加熱

4.2.1 試料および実験装置

4.2.2 実験の結果と考察

4.3 3D 触覚ディスプレイ

4.3.1 実験装置

4.3.2 局所変形の確認

4.3.3 突起のサイズおよびアスペクト比とレーザ照射条件および形状記憶合金パラメータとの関係

4.3.4 突起の最接近距離

4.3.5 変形に要する時間

4.3.6 3D 触覚ディスプレイのまとめ

4.4 面外変位アクチュエータ

4.4.1 幾何学モデルによるアクチュエータ動作の予測

4.4.2 アクチュエータの作製とレーザ照射実験

4.4.3 シミュレーション結果と実験結果との比較

4.4.4 面外変位アクチュエータまとめ

4.5 まとめ

参考文献

4.1 はじめに

SMA アクチュエータは熱を加えることで駆動するので、エネルギーを入力することで熱を発生させることが駆動のために必要不可欠である。このため、エネルギーの入力は SMA に限らず全てのアクチュエータにおいて必要であるが、SMA はエネルギーが熱として与えられるか、その他の種類のエネルギーが熱に変換される必要があり、エネルギーの入力は SMA アクチュエータにおいて重要な要素である。レーザー光はアクチュエータの駆動に十分なエネルギーを持っており、さらに、空气中を拡散せずに伝播されるので電線のようなガイドを要せず、直接照射できるなどの利点もあるので、エネルギー入力手法として優れた特徴を有している。本章ではエネルギー入力にレーザー光を利用することで SMA アクチュエータの高機能化を試みる。

4.1.1 本章の背景と目的

SMA アクチュエータは加工法の制約から従来線やコイルの形状で使用されていたが、加工技術の進歩に伴い箔状のアクチュエータの作製が可能となり、応用の範囲が広がっている²⁾⁶⁾。従来の線やコイルの動作は形状が1次元であることから「伸び」と「縮み」や「伸展」と「屈曲」など1次元に限られている。これに対し、箔は2次元形状であり、形状の自由度が高いため、「伸び・縮み」と「伸展・屈曲」を組み合わせるなど、2次元以上の動作が可能となると考えられる。しかし、現状では駆動のためのエネルギー入力が線やコイルと同じく、ジュール加熱や雰囲気からの熱伝達であり²⁾⁴⁸⁾、SMA アクチュエータ全体を加熱して駆動していることで、「変形なし」もしくは「最大変形」のいずれかの状態のみしかとることができない (Fig. 4-1(b))。これに対し、オンオフ制御や PWM 制御などを用いて加熱量を制御することで、中間量の変形を得ることが行われている⁸⁰⁾。しかし、SMA の変形はヒステリシスを持つため変形モデルの構築が困難であり、変位量を逐次測定しフィードバックを行う必要がある。さらに、中間量の変形をとることで1次元変形の途中の状態を得られるだけであり、2次元以上の変形を得ることはできない。

これに対し、レーザー光は物体を局所的に加熱することができ、ミラーなどの簡単な光学系を用いて照射位置を変えることで容易に加熱域を操作できる性質を持っている。そこで、箔状 SMA アクチュエータへのエネルギー入力にレーザー光を用い、局所加熱を行うことで、局所的に変形を得ることが可能であり、加熱域を操作することで変形を制御できると考えた。この方法では、加熱域内で SMA は完全に変形しているため、変形の制御に関してヒステリシスを考える必要がなく、加熱域を変えることで2次元以上の変形を得ることができる (Fig. 4-1(c))。

本章では、レーザー照射により SMA を局所的に加熱し、局所的に駆動できることを確認し、レーザー光による SMA アクチュエータの駆動を試みる。さらに、レーザー光を用いた SMA アクチュエータとの利用例として、3D 触覚ディスプレイ用の点表示器および面外変位アクチュエータを提案し、基礎的検討を行う。

4.1.2 3D 触覚ディスプレイ

3D 触覚ディスプレイとはディスプレイの面上に立体形状を表示するものであり、バーチャルリアリティの技術と組み合わせることにより臨場感のある映像を表示できるほか、視覚障害者が触知で情報を読み取ることができるなど様々な用途での活躍が期待されている。特に、視覚障害者にとっては PC などでも取り扱うデジタルデータを受け取る手段が少なく、情報のバリアフリーに向けて大きな貢献が可能な技術である。

従来の触覚ディスプレイは Fig. 4-2 に示すように無数のピンをマトリクス状に配置し、各々を独立に駆動することによって立体形状を表示するもので、その機構の特徴からピンディスプレイと呼ばれている。このタイプのディスプレイはピンごとにアクチュエータを設置し、制御する必要があることから、機構が複雑になり、コスト高、メンテナンスの手間、小型化および高解像度化の困難さに加え、ピンの配置に自由度がなく、階段状にしか形状を表現できないといった多岐にわたる問題が存在する。

これに対し、本章で提案する SMA の光駆動を利用した 3D 触覚ディスプレイは光学系と SMA 箔のみの簡単な構造で実現できるものであり、ピンディスプレイの問題を解決するものである。以下その構造について述べる。ディスプレイは Fig. 4-3(a)に示すように複数の短冊状 SMA 箔を並列に並べて配置したものであり、この短冊を局所的に面外方向へ変形させることで立体形状を表示する (Fig. 4-3(b))。この短冊は長さ方向にロール状に巻いた形状 (Fig. 4-4(b)) が記憶されており、両端に張力を与えることで平らな状態を保っている。レーザー照射を裏面から行うことで照射部が加熱され、記憶しているロール形状に復帰する。このとき、その他の部分は平らな形状を保ったままであるので、面外方向へ突起が形成される (Fig. 4-4(c))。このディスプレイはレーザー照射の出力や位置により突起のサイズや形状、組合せを任意に変えることにより自由な形状を表現できる。なお、なめらかな形状を表現するためには、3次元形状を連続的に表現する必要がある。しかし、レーザー照射条件と温度分布や変形量などとの関係の手がかりがなく、最初から連続的な形状の表示を行うことは困難であるため、ここではその足がかりとして、突起を表示し、そのサイズおよび形状を制御することを目的とする。連続的に 3次元形状を表示する際には、突起の形状制御を参考に 2つ以上の突起を結合して表示すればよい。

4.1.3 面外変位アクチュエータ

面外変位アクチュエータとは、基板上もしくはカンチレバー状に設置された矩形のアクチュエータであり、基板面外方向へ駆動する屈曲型アクチュエータであり、根元を固定して使用する。平面上に設置され、面に対して垂直方向へ駆動する特性からマイクロマシンや MEMS において多用されているアクチュエータである。 piezo素子を用いたもの、異種金属を接合したもの、薄膜金属ガラスを用いたもの⁸¹⁾などがこのタイプのアクチュエータとして提案されている。SMA 箔(薄膜)を用いた面外変位アクチュエータ⁸²⁾は、これらアクチュエータに比べ大きな変位量および発生力が得られることに加え、耐久性にも優れている。しかし、4.1.1項で示したように、駆動軌跡や変位量に自由度がないことが問題

となっている(Fig. 4-5).

これに対し、本章で提案する SMA の光駆動を利用した面外変位アクチュエータを Fig. 4-6 に示す。このアクチュエータは SMA 箔およびそれに接着され、バイアス力を発生する弾性板から構成される(Fig. 4-6(a))。SMA 箔は前項で示したロール形状(Fig. 4-4)を記憶している。加熱を行っていない状態ではバイアス力により平板状に保たれ、加熱時に SMA の形状復帰力によって面外方向へ変位する。レーザ照射の出力や位置によって自由な駆動軌跡や変位量を得ることができ(Fig. 4-6(b))、SMA 面外変位アクチュエータの問題を解決することができる。

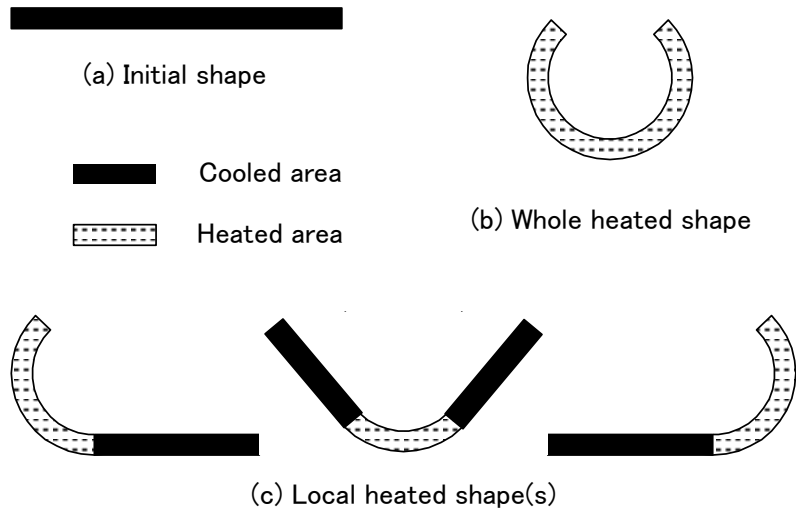


Fig. 4-1 Schema of multiple degrees of freedom moving

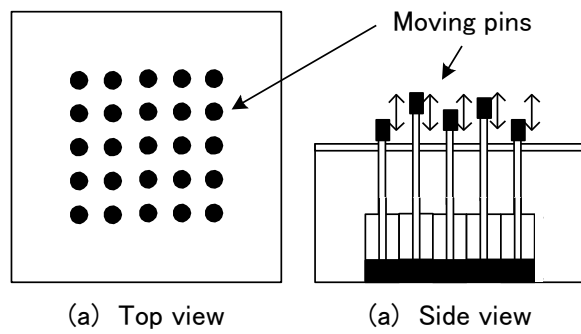


Fig. 4-2 Schema of usual tactile display

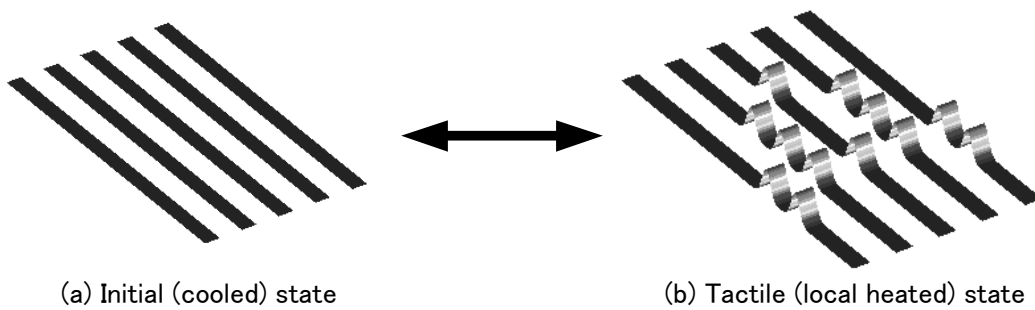


Fig. 4-3 Schema of proposed tactile display

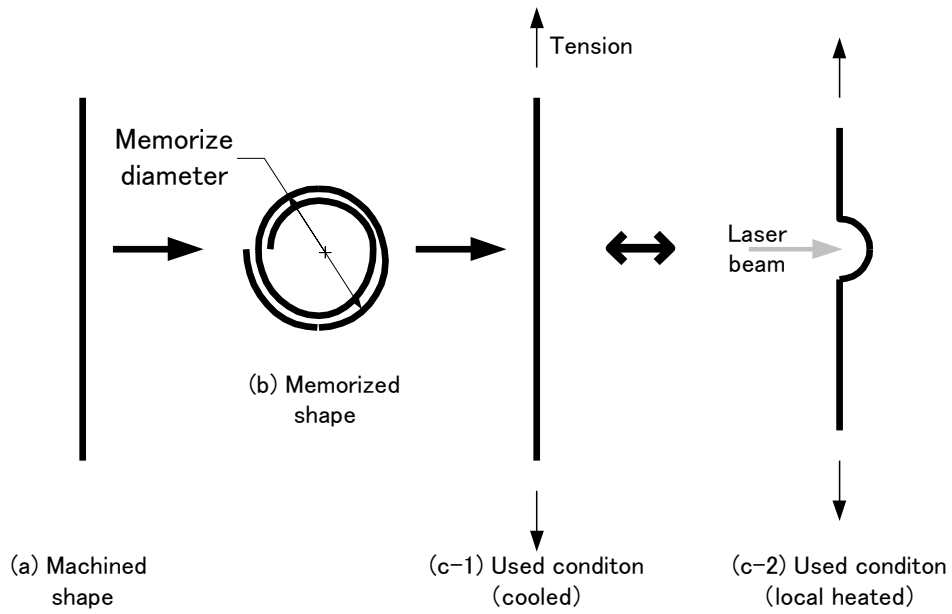


Fig. 4-4 Schema of making protrusion(s)

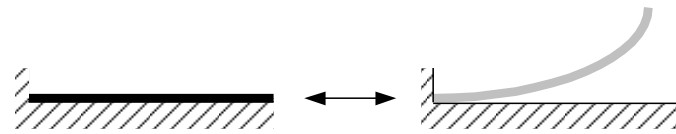


Fig. 4-5 Schema of usual SMA foil actuator

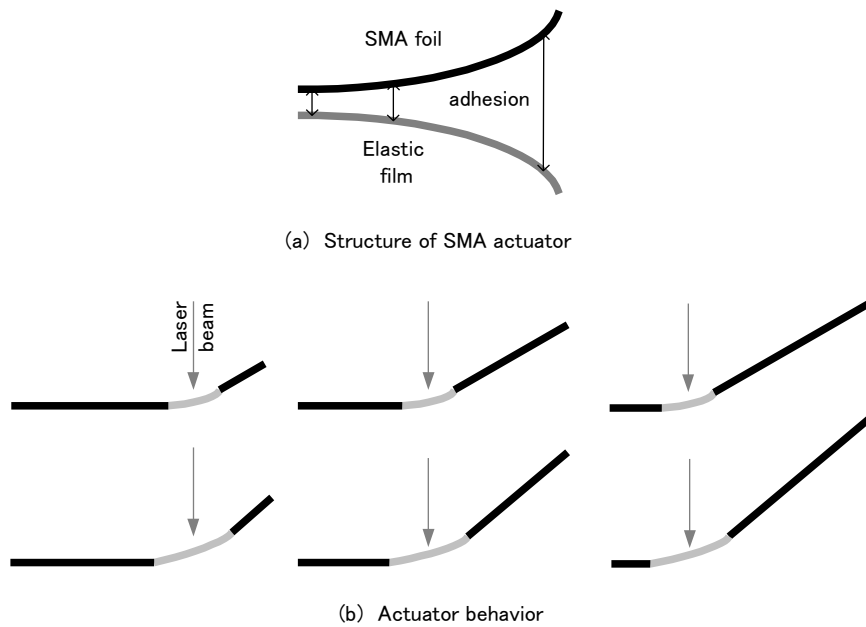


Fig. 4-6 Schema of proposed SMA foil actuator and its actuation

4.2 レーザ照射による形状記憶合金箔の局所加熱

本節では SMA 箔の局所変形を得るための局所加熱について述べる。はじめにレーザー照射を行った状態で SMA 箔の温度分布を測定し、局所加熱が可能であることを確かめる。続いて、局所変形を制御するために、加熱範囲を制御することを目的に、レーザー照射条件と加熱範囲との関係を調査した。

4.2.1 試料および実験装置

本実験に用いた SMA のスペックを Table 4-1 に示す。使用した SMA は工業的に圧延で作製可能な最薄である厚さ $30\mu\text{m}$ の SMA 箔であり、その組成比は $\text{Ti:Ni}=1:1$ である。また、実際に使用する状態での測定を行うため、あらかじめ 500°C の加熱処理を 1 時間行ったものを使用した。加熱用のレーザーには連続発振のアルゴンイオンレーザー(波長 488nm , 514.5nm など)をマルチライン出力にて使用し、空間横モードは高次モードも混合していた。温度分布測定には、熱電対などの接触式のものを使用すると、箔の厚さが $30\mu\text{m}$ と薄いため、プローブ自体の熱容量が問題となり正確な温度の測定が困難であることから、非接触で温度測定が可能な赤外線放射温度計を用いた。

実験装置を Fig. 4-7 に示す。レーザー光をレンズで集光し SMA 箔に対して垂直に入力し、十分時間が経過し定常状態に達した後、裏面から温度測定を行った。ここでは箔の厚さが $30\mu\text{m}$ であるため厚さ方向の温度分布は微小であり、裏面の温度分布が全体の温度分布を表していると考えた。集光に用いたレンズはレーザー光の光軸に対し水平方向に移動可能であり、SMA 箔表面でのビーム径を $1\sim 5\text{mm}$ で変えることが可能となっている。また、温度測定面には外部熱源からの反射などの影響を避けるための黒色塗料を塗布した。なお、使用した SMA の変形開始温度(A_s)が 50°C であることから、以後、 50°C 以上に加熱された部分を変形範囲と呼ぶ。

4.2.2 実験の結果と考察

Fig. 4-8 にレーザー出力 100mW 、スポット径 1mm で照射を行い、温度分布が平衡状態に達した後の赤外線放射温度計写真を示す。図中央がレーザー照射点であり、この点を中心に放射状に温度が分布しており、局所加熱が起こっていることが確認できる。また、この時の変形範囲はレーザー照射点を中心に直径およそ 2mm の円形である。同図より、温度分布は放射状であり方向特性を持たないことから局所変形を利用する際に向きによる制限を受けることなく SMA 箔を設置できると考えられる。

Fig. 4-9 にレーザー出力および照射スポット径と変形範囲直径との関係を示す。同図(a)には、照射スポット径を 1mm に固定し、レーザー出力を 20mW から 100mW まで変化させたとき、同図(b)にはレーザー出力を 100mW に固定し、照射スポット径を 1mm から 5mm まで変化させたときの結果を示す。同図より変形範囲の直径はレーザー出力の増加に伴い拡大するものの、照射スポット径を変化させても変化しないことが確認できる。このことから、変形範囲をレーザー照射条件で制御することができ、パラメータにはレーザー照射出力を用いれば良いことが分かる。

なお、同図において照射スポット径よりも変形範囲直径が小さい領域((a)のレーザー出力 20mW および(b)の照射スポット径が 3mm 以上の領域)が存在する。これは、使用したレーザーの空間横モードに複数のモードが混在していたため、スポット内でのレーザー強度分布が一定でなく、スポット中心に強度のピークを持っているためだと考えられる。この影響で、測定を行った 1~5mm より大きい照射スポット径では、レーザー照射条件と変形範囲直径との関係が変わる可能性がある。しかし、レーザー照射は局所変形を得るために行っており、照射スポット径が大きくなることで全体加熱に近づき、局所変形の利点を活かさないで、より大きなスポット径での評価は行っていない。

Table 4-1 SMA parameters

Ti volume	50 %
Ni volume	50 %
Size	40 mm × 30 mm
Thickness	0.03 mm
Shape memory treatment	500 °C × 1h heating

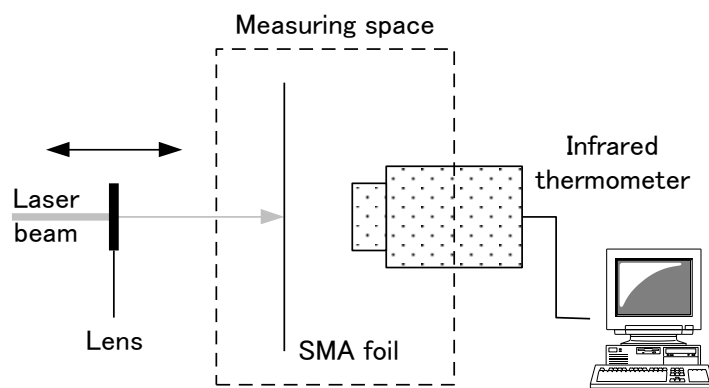


Fig. 4-7 Experimental setup of local heating

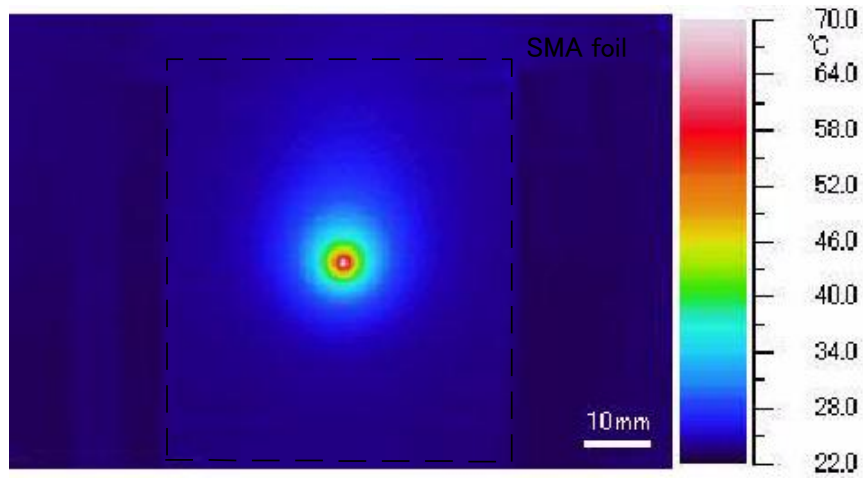
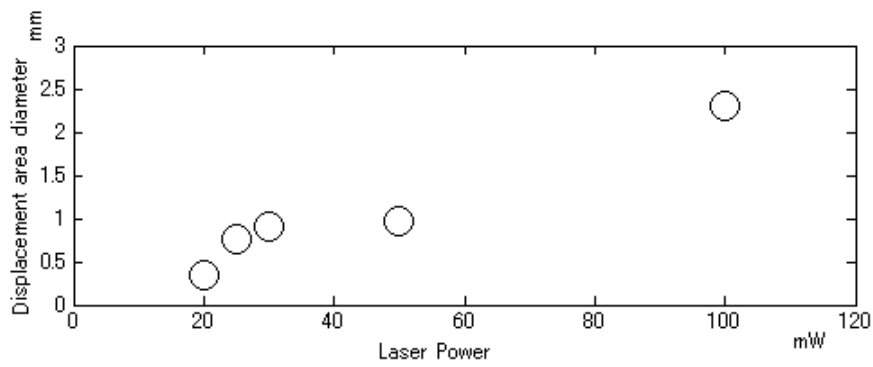
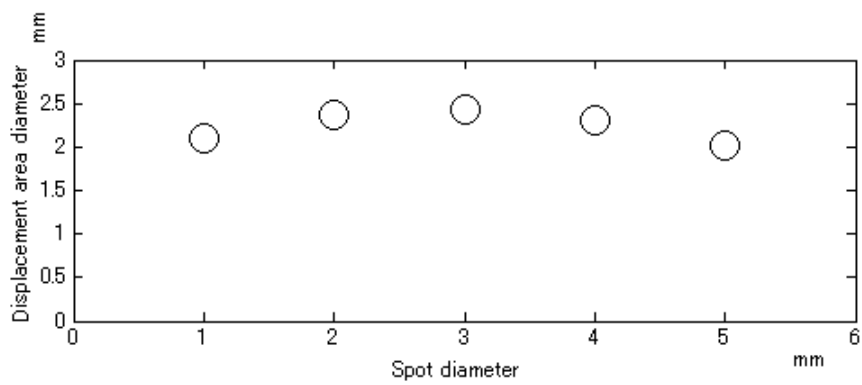


Fig. 4-8 Temperature distribution generated by laser heating



(a) Laser power - displacement area diameter diagram



(b) Laser spot diameter - displacement area diameter diagram

Fig. 4-9 Relation between laser irradiated conditions and displacement area diameter

4.3 3D 触覚ディスプレイ

3D 触覚ディスプレイの開発を目指し、出現させる突起について検討を行った。突起のサイズ(高さ&幅)およびアスペクト比について、レーザー照射出力、SMA 箔に与える張力、SMA 箔の幅、記憶させる直径などのパラメータとの関係を調査した。なお、今後の応用を考慮し、小サイズかつ高アスペクト比の突起の表示を目標とした。また、2 点を重ならずに表示できる最接近距離や突起の生成・消滅に要する時間についても調査した。

4.3.1 実験装置

実験装置の概略を Fig. 4-10(a)に示す。レーザー光は取り外しが可能かつ光軸に沿って平行に移動できるスプリッタにより 2 分割され、反射光は直接、透過光はスプリッタと同じく光軸に沿って移動できるミラーによって反射され短冊状 SMA 箔に照射される。なお、SMA 箔に入射する 2 本のレーザー光は同強度かつ平行になるようスプリッタとミラーを調整している。SMA 箔への張力の印加は上部を固定し、下部に荷重を吊り下げることで行っている。

レーザー照射条件および SMA 箔のパラメータを Table 4-2 に示す。レーザー出力は 50-150mW とし、前節の結果より変形範囲はスポット径に影響されないことから、スポット径を 2mm で固定した。SMA 箔の形状は幅 2-4mm の短冊である。ディスプレイの横方向の解像度を考えると幅は小さいことが望ましいが、加熱時に発生するねじれの影響で幅 2mm 未満の短冊で実験を行うことはできなかった。短冊の長さは、端の熱分布への影響を無視できるよう、想定される変形範囲に対し十分大きい 40mm とした。また、精度の高い変形を得るために、SMA 箔に記憶させるロール形状の直径を小さくすることが望ましいが、本実験では筒状の治具を利用し形状記憶処理を行っており、その制約から記憶直径は 3-5mm とした。

測定は Fig. 4-10(b)に示す突起の幅と高さおよびそれらから計算によって求めることのできる突起のアスペクト比(高さ/幅)について、レーザー照射開始から十分時間が経過し定常状態に達した後に、真横からデジタルカメラで撮影して行った。

4.3.2 局所変形の確認

レーザー照射を行った際の様子を Fig. 4-11 に示す。図中の青色の輝部がレーザー照射部である。同図(a)が照射前の初期形状であり、同図(b)および(c)が 100mW のレーザー照射をそれぞれ別の位置に行ったもの、同図(d)が同出力 (100mW) のレーザー照射を 2 箇所 (間隔 15mm) に行ったもの、同図(e)が 150mW のレーザー照射を行ったものである。同図より、局所変形可能であることが分かり、位置、個数、サイズを変更できることが分かる。なお、本実験は張力を 6mN に設定して行ったものである。

4.3.3 突起のサイズおよびアスペクト比とレーザー照射条件および形状記憶合金パラメータとの関係

突起のサイズや形状の制御を行うため、レーザー照射条件および SMA 箔のパラメータが突起のサイズおよびアスペクト比へ与える影響を調査した。

レーザー照射条件は前節の結果より、レーザー出力は変形範囲に影響するが、スポット径は影響しなかったことから、レーザー出力のみをパラメータとした。幅 2-4mm の SMA 箔を用い、張力 6mN、記憶直径 3mm とし、レーザー出力を 50-150mW で変化させた際の突起の高さ、幅、アスペクト比を Fig. 4-12 に示す。レーザー出力の増加に伴い突起の高さと幅は増加しているが、アスペクト比は変化していない。これより、小サイズの突起を得ることは出力を小さくすることで可能であるが、高アスペクト比はレーザー出力の調整では得られないことがわかる。

レーザー出力の調整でアスペクト比の操作ができないことから、張力が突起を打ち消す方向に働いていることに着目し、張力を変えることで突起のサイズおよびアスペクト比を制御できると考えた。Fig. 4-13 に張力と突起のサイズおよびアスペクト比との関係を示す。このときのレーザー照射出力は 80mW、SMA 箔の幅は 2-4mm、記憶直径は 3mm である。張力の増加に伴い突起の高さと幅は減少している。アスペクト比は張力が 10mN 以下では張力の増加に伴い減少し、10mN 以上ではほぼ一定である。これより、張力によって突起の高さ及び幅を制御することができ、低張力においてはアスペクト比を制御できることがわかる。しかし、小サイズかつ高アスペクト比の突起を得ることを目的としているので、低張力化によってアスペクト比を高くしても、大サイズの突起になってしまうため、張力により高アスペクト比を実現することは望ましくない。

レーザー照射出力ではアスペクト比を制御することができず、高アスペクト比を得るためには張力による制御もサイズが大きくなり適さないため、その他のパラメータを検討する必要がある。レーザー照射出力および張力は共に SMA に外部から与えられる条件であったため、外部の条件からアスペクト比を制御することは難しいと考え、新たに SMA 自体の条件として短冊の幅と記憶させる直径を挙げて調査を行った。SMA の幅が変わることで、箔の端による影響のため温度分布が変化し、変形範囲に影響を及ぼすことで突起のサイズ及びアスペクト比に影響すると考えられる。また、記憶させる直径は復帰するロール形状に影響するため、突起のサイズ及びアスペクト比に影響すると考えられる。

SMA 箔の幅と突起のサイズおよびアスペクト比との関係を Fig. 4-14 に示す。なお、与えた張力は 6mN、記憶させた直径は 3mm、レーザー照射出力は 80mW 及び 100mW である。また、記憶直径と突起のサイズおよびアスペクト比との関係を Fig. 4-15 に示す。なお、与えた張力は 6mN、幅は 2mm、3mm、4mm の 3 種類、レーザー照射出力は 80mW である。SMA 箔の幅と突起の高さ、幅、アスペクト比との間にはいずれとも関係が認められず、この条件では突起のサイズを制御することができない。しかし、記憶直径と突起のサイズとの関係において、高さとは明確な関係を見出すことはできないものの、幅は記憶直径が小さくなるほど小さくなっている。さらに、アスペクト比においても記憶直径が小さいほど高アスペクト比になっている。これにより、記憶直径を小さくすることで高アスペクト比かつ小サイズの突起を得ることができると考えられる。

以上より、サイズに関しては数種類のパラメータによって制御できるが、アスペクト比

は記憶直径でのみ制御可能であるため、小サイズかつ高アスペクト比を得るためには、まず、小さな記憶直径により高アスペクト比を得ることになるが、本実験で使用した 3mm 以下の直径を SMA 箔に記憶させることは難しく、その手法を検討する必要がある。その後、小サイズを与えることになり、その方法として、低レーザ照射出力もしくは高張力が考えられる。しかし、低レーザ出力では変形範囲が得られないことや加熱速度が遅くなることなどが考えられるため、高張力によって実現することが望ましい。また、突起のサイズを制御する際は、張力が箔全体にかかるため表示する全ての突起に影響し、レーザ照射が各突起それぞれに独立に影響するので、張力により大まかな制御を行い、レーザ照射出力により詳細な制御を行うことで、複数の突起のサイズを制御すればよいと考えられる。

4.3.4 突起の最接近距離

提案した 3D 触覚ディスプレイの方式では点を複数表示することで立体形状を表示している。そこで、2 つの点を重ならずに表示できる最接近距離の測定を行った。幅 2mm の短冊状 SMA 箔、100mW のレーザ光を 2 本用い、短冊状 SMA 箔上に同サイズの突起を 2 個出現させ、突起の中心間距離を 10mm から徐々に近づけ 2 個の突起を表示できる最接近距離を測定した。中心間距離が 10mm, 9mm, 8mm の際の突起形状を Fig. 4-16(a)に示す。この条件での再接近距離は 9mm であることが確認できる。また、記憶直径が 4mm, 5mm の場合においても同様の測定を行った結果、最接近距離はそれぞれ 13mm, 14mm であった。この時の突起形状を Fig. 4-16(b), (c)に示す。触覚ディスプレイの実現には突起間の最接近距離を縮めることが必須であり、本実験結果中の最小値では 9mm であったが、改善が必要であると考えられる。記憶直径の減少に伴い最接近距離が減少しているため、記憶直径をより小さくすることで実現可能であると考えられるが、小さな直径を記憶させることは難しく、そのための手法を検討する必要がある。

4.3.5 変形に要する時間

幅 2mm の短冊状 SMA 箔に 100mW の出力でレーザ照射を行い、突起の生成と消滅に要する時間の測定を行った。Fig. 4-17 に変形量の時間変化を示す。ここで、変形量は突起の高さを最大高さとの比で表している。また、レーザ出力と張力を変え、応答時間の変化を調査した結果を Table 4-3, Fig. 4-18 および Fig. 4-19 に示す。

加熱（突起生成）には 2~3 秒、冷却（突起消滅）には 3~6 秒を要していることが分かる。また、加熱時には変形に要する時間はレーザ照射出力に影響しない。これは、出力の増加に伴い変形量の絶対値も増加しているため、加熱速度が上がった分を打ち消してしまっているためと考えられる。さらに、張力にも依存していない。これは、加熱により発生する力（形状復帰力）が張力に比べて十分大きいためと考えられる。

冷却時には張力の増加と共に、要する時間が減少している。これは、冷却を周囲への放熱のみによって行っているため、冷却速度は SMA のサイズ及び形状のみに影響し張力には依存しないものの、張力によって突起を両端から引っ張ることで突起を消滅させているため、張力の増加によって消滅の速度が上がったと考えられる。

ここで、突起の生成および消滅に要する時間の短縮については、生成時間の短縮と消滅時間の短縮をそれぞれ検討する必要がある。消滅時間の短縮については張力を増加することで容易に実現できるが、生成時間の短縮はこれらの条件では不可能である。そこで、SMA の形状や雰囲気の改善などで加熱特性を向上させることが考えられる。しかし、加熱特性の向上は放熱（冷却）特性の減少を同時に招くため、触覚ディスプレイのスペックから生成時間と消滅時間両方をパラメータとして最適値を求める必要がある。

4.3.6 3D 触覚ディスプレイのまとめ

本節では光を用いた SMA の操作の応用例として 3D 触覚ディスプレイを提案し、その実現に向けた検討を行った。ロール形状を記憶した SMA 箔にレーザー照射を行うことで、SMA 箔が局所的に変形し、突起を表示できることが確認され、レーザー照射出力によって突起のサイズをコントロール可能であることを示した。また、SMA 箔に記憶させる直径や与える荷重によって突起の形状を変えることができ、突起を小サイズ、高アスペクト比化し、ディスプレイを高解像度化することで良触知性を実現できる可能性を示した。なお、触覚ディスプレイを構成する際には、小さい記憶直径により高アスペクト比を得、最接近距離を近づけた上で、突起のサイズ制御を張力により大まかに、レーザー照射出力により詳細に行えばよいと考えられる。また、触覚ディスプレイのスペックから生成時間と消滅時間両方をパラメータとして最適値を求める必要がある。

Table 4-2 Experimental conditions of local actuation

Laser	Ar ion laser
Power	50-150 mW
Spot diameter	2 mm
SMA	
Size	2-4 mm × 40 mm
Memorized diameter	3-5 mm
Tension	2.3-17.2 mN
Ambient temperature	24°C

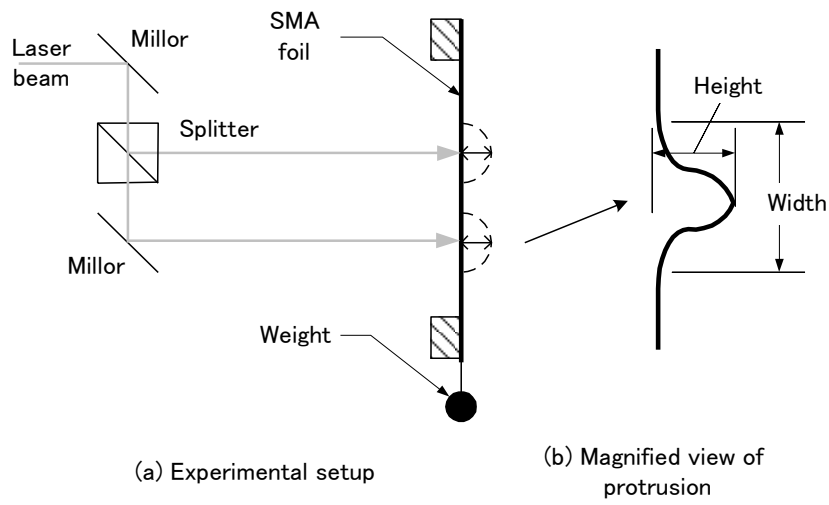


Fig. 4-10 Experimental setup of local actuation

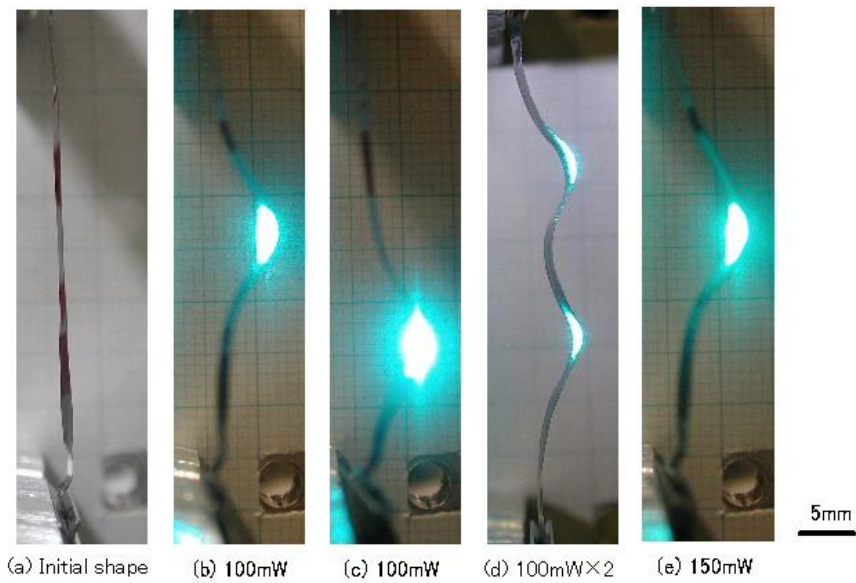
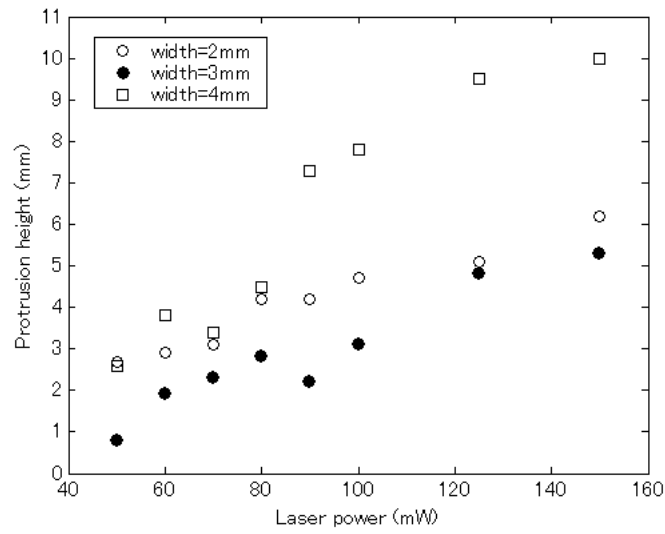
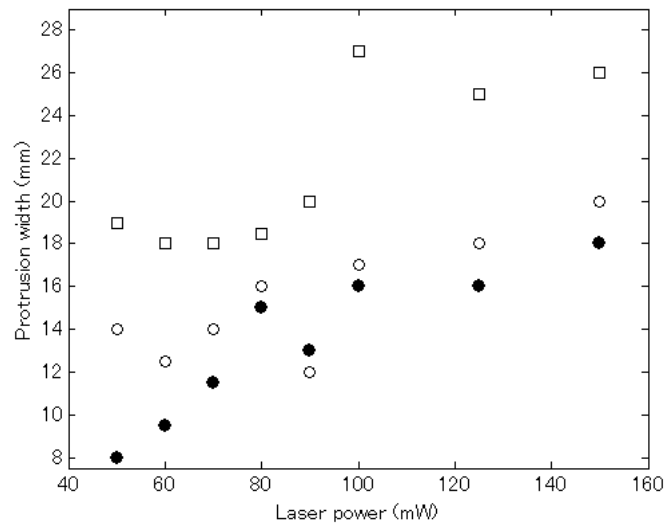


Fig. 4-11 Pictures of protrusion(s)



(a) Protrusion height



(b) Protrusion width

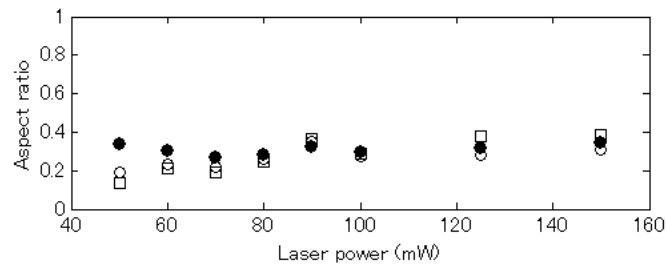
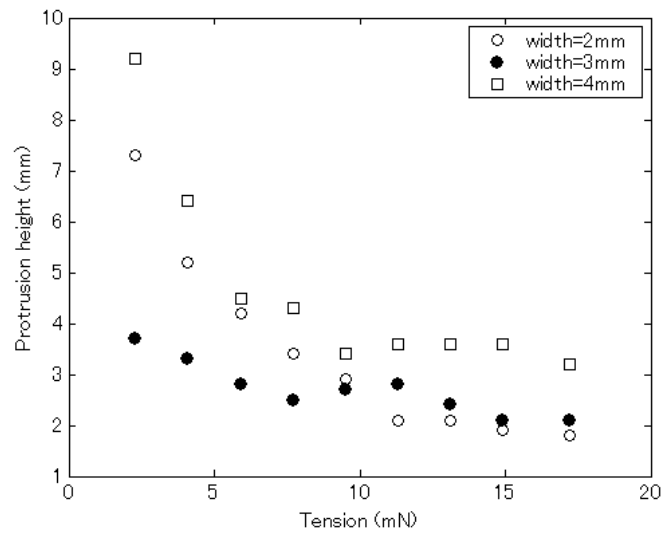
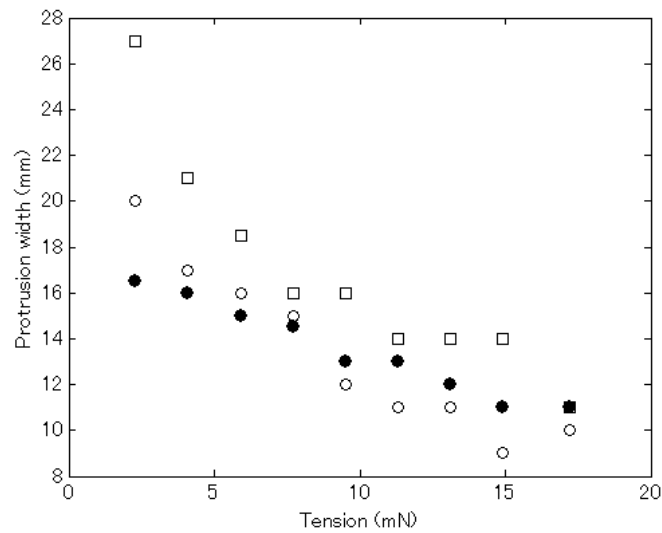


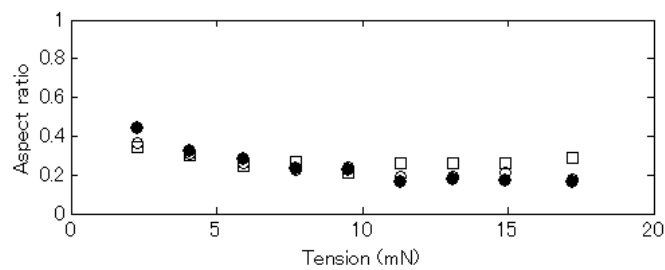
Fig. 4-12 Relation between laser power and protrusion size



(a) Protrusion height

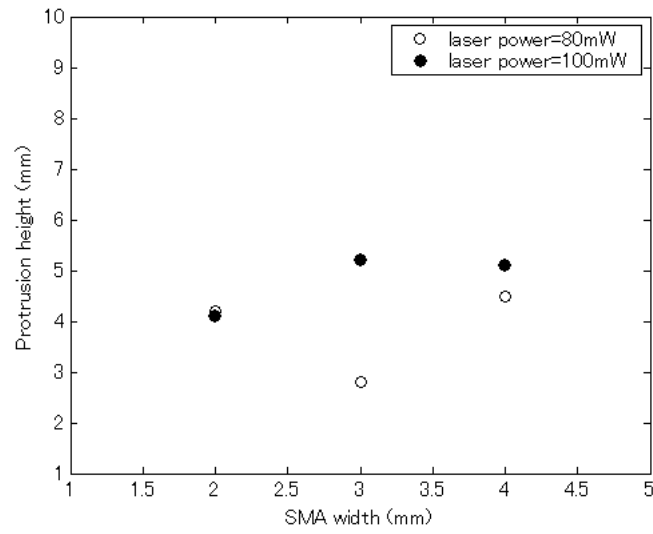


(b) Protrusion width

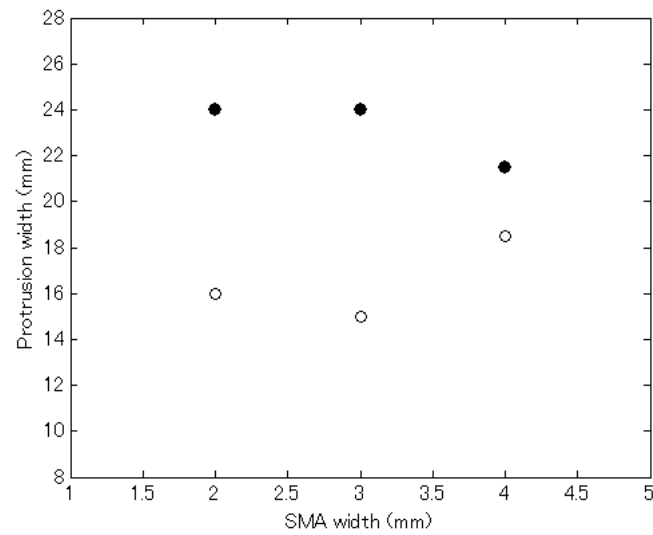


(c) Aspect ratio

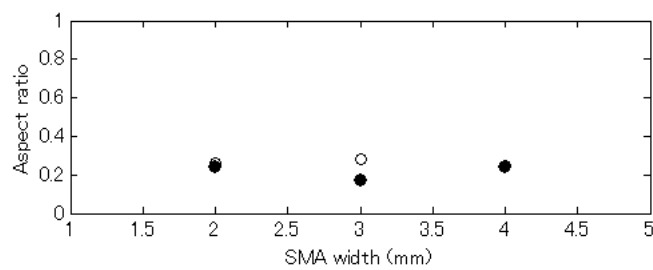
Fig. 4-13 Relation between tension and protrusion size



(a) Protrusion height

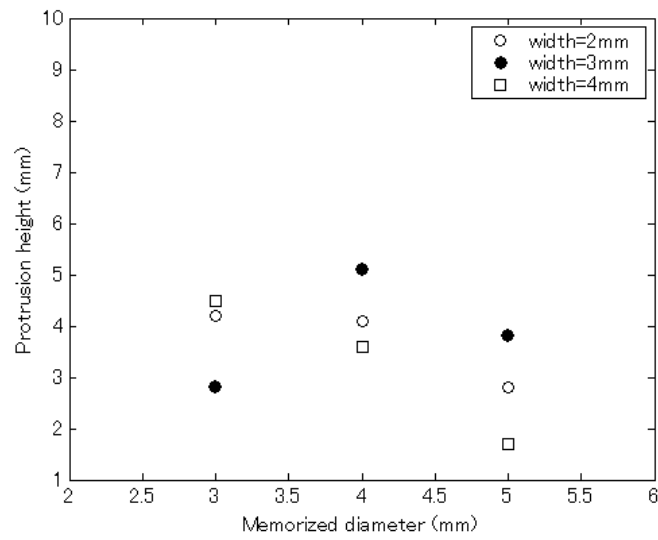


(b) Protrusion width

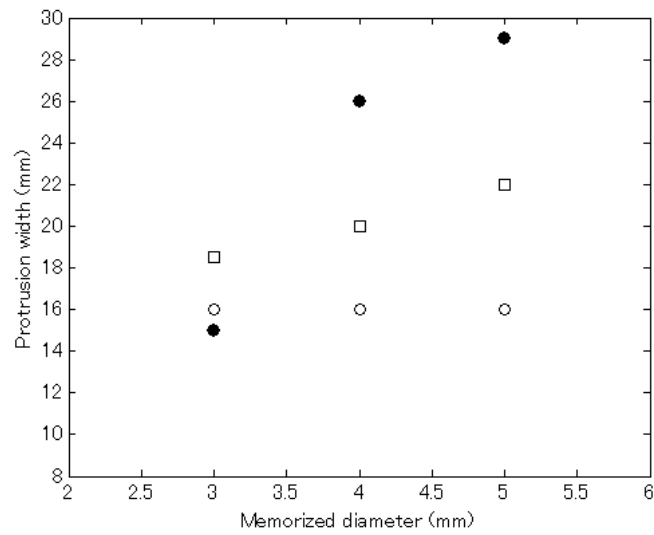


(c) Aspect ratio

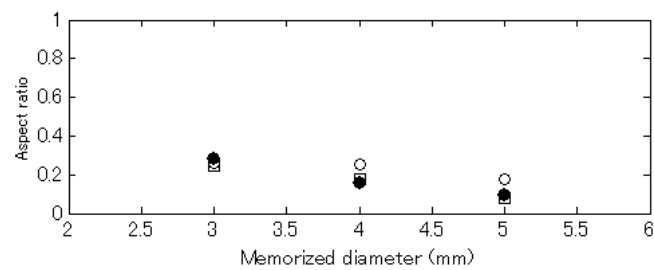
Fig. 4-14 Relation between width of SMA rectangle and protrusion size



(a) Protrusion height

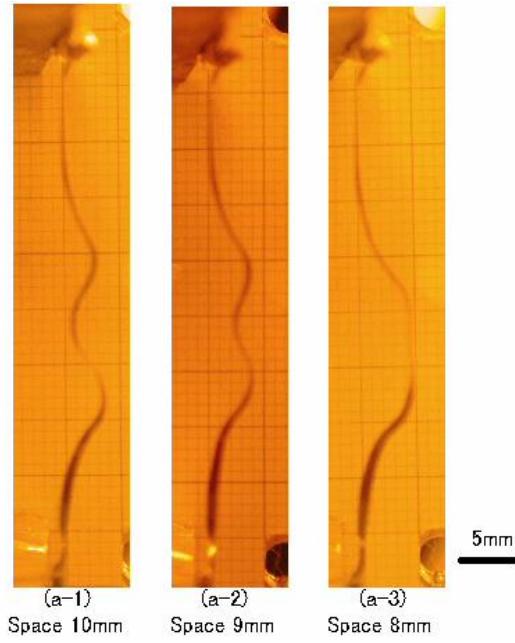


(b) Protrusion width

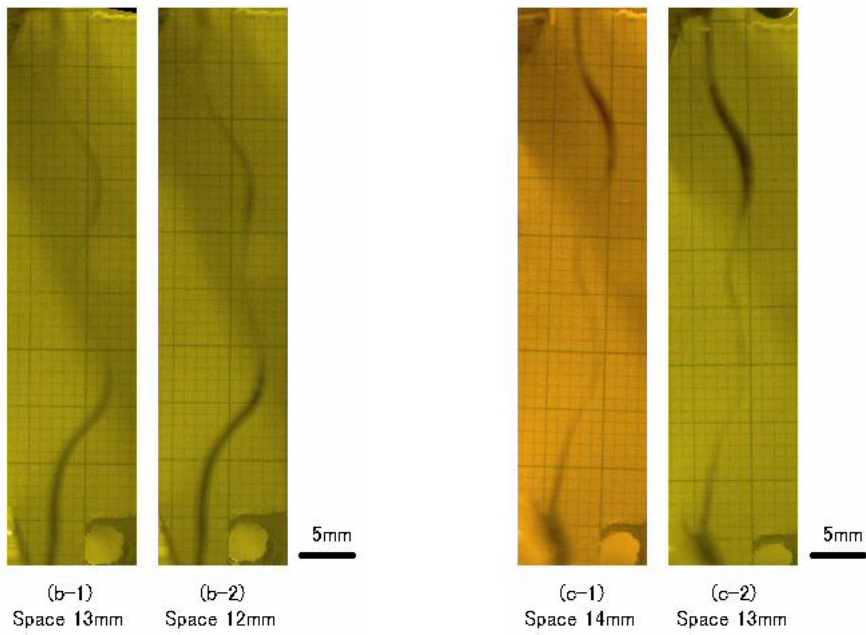


(c) Aspect ratio

Fig. 4-15 Relation between memorized diameter and protrusion size



(a) Memorized diameter is 3mm



(b) Memorized diameter is 4mm

(c) Memorized diameter is 5mm

Fig. 4-16 Minimum space between two protrusions

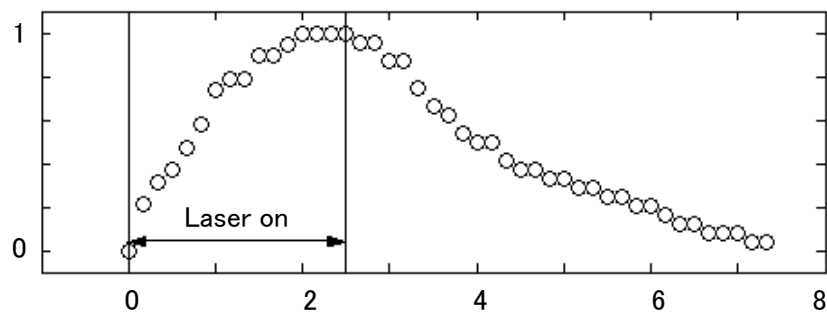
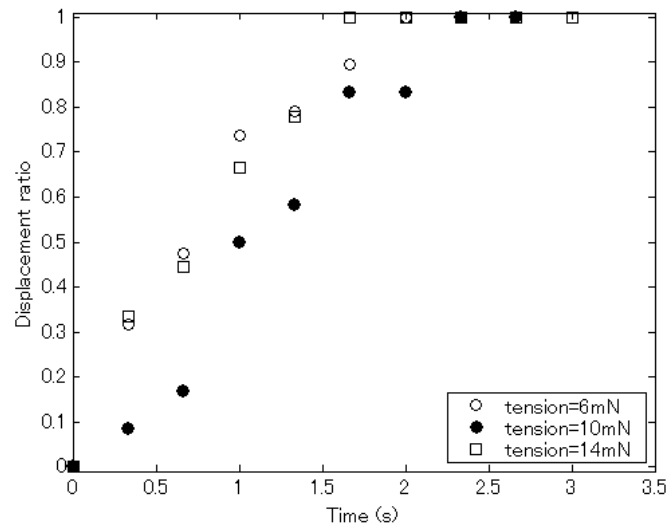


Fig. 4-17 Time response of a protrusion

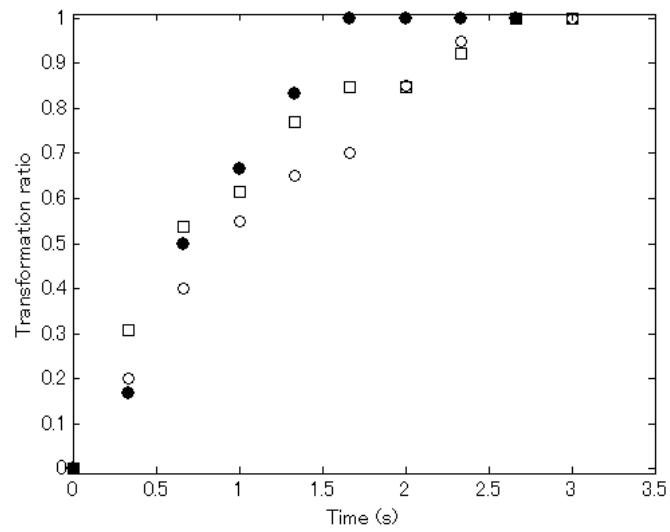
Table 4-3 Transformation time

Conditions	100mW 6mN	100mW 10mN	100mW 14mN	125mW 6mN	125mW 10mN	125mW 14mN
Heating	2.3	2.7	1.7	3.0	2.0	3.0
Cooling	4.7	3.7	3.3	5.7	4.0	3.3

(s)

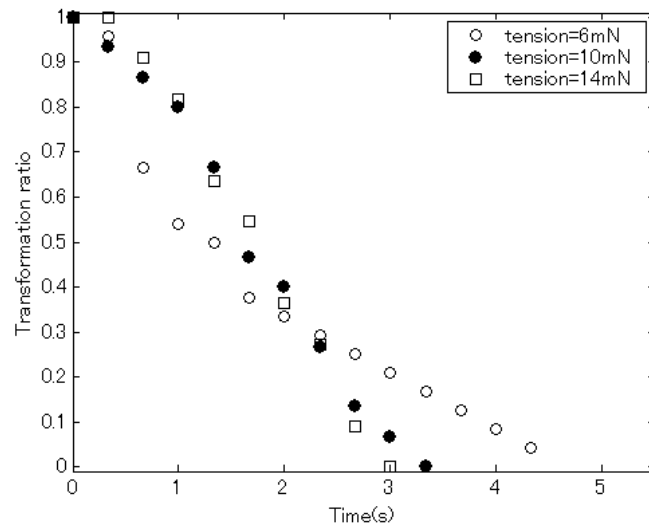


(a) Laser power is 100mW

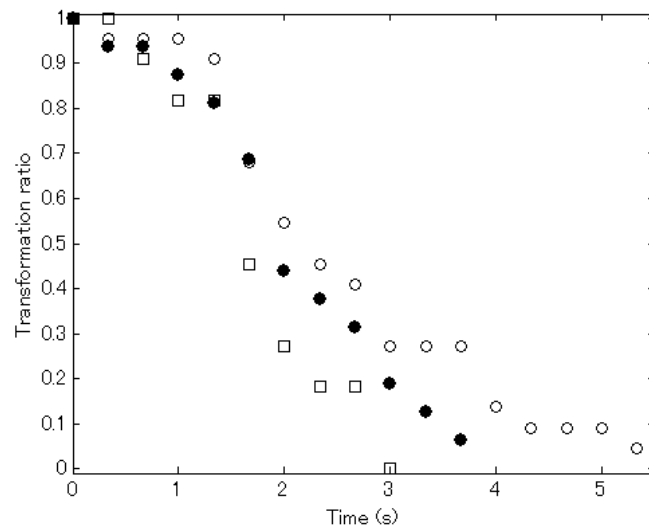


(b) Laser power is 125mW

Fig. 4-18 Time response of generating protrusion



(a) Laser power is 100mW



(b) Laser power is 125mW

Fig. 4-19 Time response of disappearing protrusion

4.4 面外変位アクチュエータ

ここでは、本章で提案する面外アクチュエータの性能をシミュレーションと実験の両面から検討する。

4.4.1 幾何学モデルによるアクチュエータ動作の予測

提案する面外変位アクチュエータは線状のアクチュエータの一部が屈曲し、面外に変位すると仮定し、幾何学的に簡単にモデル化することができる。計算に使用するパラメータを Table 4-4 に、モデルを Fig. 4-20 に示す。X-Y 座標原点にアクチュエータ根元が固定され、根元からの距離 x の位置にレーザー光が照射され、レーザー出力に応じた長さ $2a$ の変形範囲が記憶直径 $2r$ の円弧に変形し、根元から変形範囲まで(直線部(a))および変形範囲から先端まで(直線部(b))は直線に保たれる。 θ は円弧の中心角である。なお、変形範囲の長さ $2a$ は SMA 薄膜および弾性板、接触雰囲気、固定台など様々な要素の絡む伝熱系であり、レーザー出力から計算的に求めることが困難であったため、実験的に求めた(Table 4-5)。

直線部(a)の長さは

$$x-a \quad (5.1)$$

であり、レーザー照射点(x)を中心に長さ $2a$ の部分が半径 r の円弧の一部となるため、変形部右端の座標は

$$\begin{aligned} X_{def} &= (x-a) + r \sin\theta \\ Y_{def} &= r(1-\cos\theta) \end{aligned} \quad (5.2)$$

となる。さらに直線部(b)の長さが

$$l-(x+a) \quad (5.3)$$

であり、この直線部は(5.2)を始点とし、水平方向となす角が θ であるから、アクチュエータ先端部の座標は、

$$\begin{aligned} X_{edge} &= x-a + r \sin\theta + \{l-a(x+a)\} \cos\theta \\ Y_{edge} &= r(1-\cos\theta) + \{l-a(x+a)\} \sin\theta \end{aligned} \quad (5.4)$$

となる。ただし、(5.2)-(5.4)式が成り立つのは変形範囲 $2a$ 全てが短冊上にある場合のみである。レーザー照射点がアクチュエータ根元もしくは先端に近づき、変形範囲の一部が短冊からはみ出てしまった場合は以下のように補正をする必要がある。

変形範囲がアクチュエータ根元に近づいた場合 ($x-a < 0$) は直線部(a)が消滅し、変形範囲が短冊上からはみ出だした部分 ($a-x$) の分だけ短くなると考え、先端の座標は

$$\begin{aligned} X_{edge} &= r \sin\theta + \{l-(a+b)\} \cos\theta \\ Y_{edge} &= r(1-\cos\theta) + \{l-(a+b)\} \sin\theta \end{aligned} \quad (5.5)$$

となる。変形範囲がアクチュエータ先端に近づいた場合 ($x+a > l$) は直線部(b)が消滅し、変形範囲が短冊上からはみ出だした部分 ($x+a-l$) だけ短くなると考え、先端の座標は

$$\begin{aligned} X_{edge} &= (x-a) + r \sin\theta \\ Y_{edge} &= r(1-\cos\theta) \end{aligned} \quad (5.6)$$

となり、アクチュエータの変位を見積もることが可能となる。

以上に基づき、アクチュエータの長さ及び記憶直径を実際に製作した値(Table 4-6 を参照)とし、計算を行った。変形範囲及びレーザ照射点をそれぞれ(4mm,15mm), (4mm,30mm), (6mm,15mm), (6mm,30mm)として計算をしたアクチュエータの全体像を Fig. 4-21 に示す。同図より実際の変形 (Fig. 4-25 および Fig. 4-26 を参照) とほぼ同等の形状をシミュレーションにより得られることが分かり、先端位置をレーザ照射条件により制御できることが予測できる。

さらに、実際には根元を固定し、先端部を支えるために変形させずに残す部分が必要であることから、この部分にレーザ照射点を与えることはない想定し、照射位置を 5~35mm、変形範囲を 1~6mm とした際のアクチュエータ先端位置が取りうる範囲を計算し、全体が屈曲する従来のアクチュエータと先端の駆動軌跡の比較を行った。Fig. 4-22 にその結果を示す。赤線がアクチュエータ本体を示し、黒線が従来のアクチュエータ先端の駆動軌跡、灰色の領域が提案するアクチュエータの先端がとることのできる範囲を示す。なお、従来のアクチュエータの先端駆動軌跡は、長さ 40mm のアクチュエータ全体の曲率を 0 から徐々に増加させることで計算を行ったものである。同図により従来のアクチュエータの駆動軌跡が 1 本の曲線であるのに対して、提案するアクチュエータでは領域となっている。このことより、本研究で提案するアクチュエータは任意の駆動軌跡をアナログ制御しながら駆動することができると考えられる。なお、このモデルの妥当性については後述する(4.4.3項を参照)。

4.4.2 アクチュエータの作製とレーザ照射実験

作製したアクチュエータを Fig. 4-23 に示す。弾性膜には厚さ 50 μ m のポリイミドフィルムを使用し、SMA には 3D 触覚ディスプレイに使用したのと同じ、厚さ 30 μ m のものを用いた。接着には両面テープを用いた。また、SMA に記憶させた形状は前節と同様に長さ方向にロール状に巻いた形状であり、記憶直径は 8mm である。実験装置を Fig. 4-24 に、そのスペックを Table 4-6 に示す。1 軸ステージ上にアクチュエータ根元部を固定し、垂直上方からレーザ照射を行う。アクチュエータをステージ上に直接設置してしまうと、ステージへ熱が逃げてしまい、うまく駆動できなかったため、ステージ上に断熱材を敷き、アクチュエータを設置した。アクチュエータの先端位置はレーザ照射開始から十分時間が経過し定常状態に達した後に、真横からデジタルカメラで撮影することで行った。

作製したアクチュエータにレーザ照射を行い、駆動させたときの様子を Fig. 4-25 に示す。なお、レーザ照射出力を 200mW、照射位置を 10~25mm としている。同図より、先端位置をアナログ的に制御できていることが確認できる。また、変形がモデルとほぼ同等の形状をとっていることも確認でき、このときの最大変位が X 軸方向に 11.8mm、Y 軸方向に 27.3mm であった。

レーザ照射出力を 200~350mW、照射位置を 5~35mm として先端位置の測定を行った結果を Fig. 4-26 に示す。駆動軌跡の直線は最小自乗法により求めた。同図よりアクチュエータの駆動軌跡が 1 通りに規定されず、複数設定できることがわかる。

Table 4-4 Modeling parameters

Actuator length	1
Memorized diameter	2r
Laser irradiated point	x
Deformation area length	2a
Deformation area center angle	$\theta=2a/r$

Table 4-5 Measured deformation area length

Laser power	200mW	250mW	300mW	350mW
Deformation area	3mm	3.5mm	4mm	4.5mm

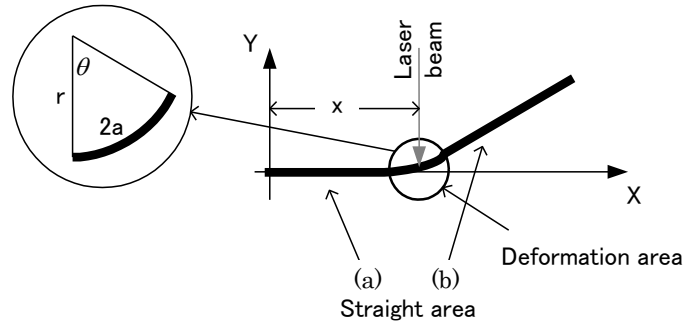


Fig. 4-20 Geometric model of out-of-plane displacement actuator

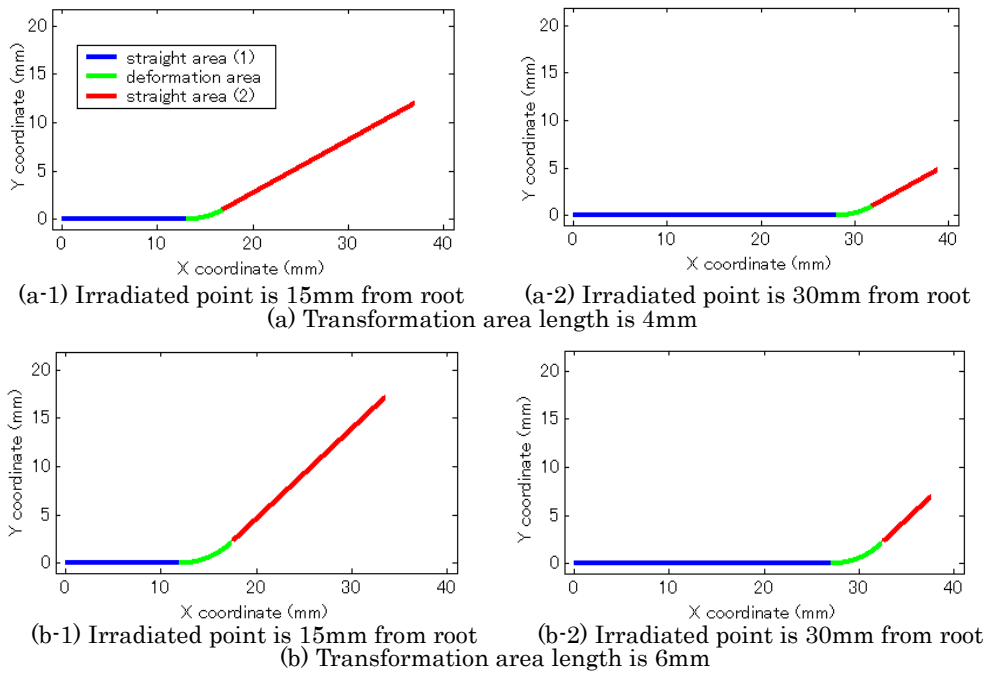


Fig. 4-21 Calculated out-of-plane displacement actuator shape

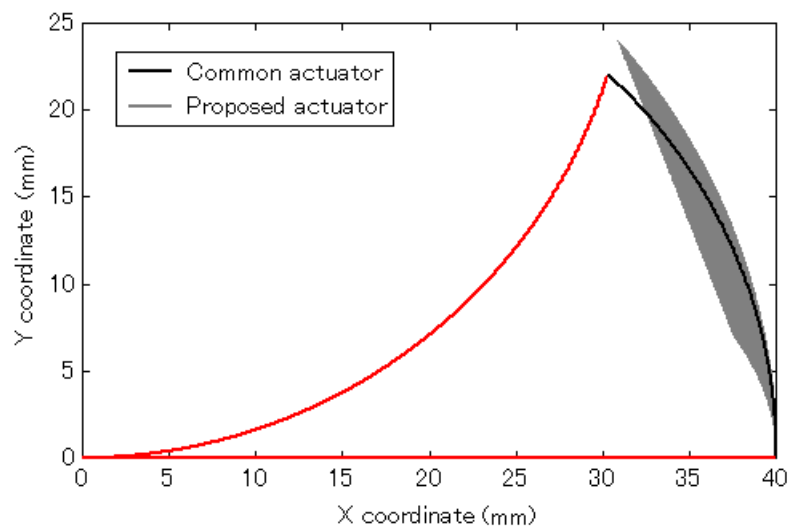


Fig. 4-22 Comparing of actuator edge moving area in simulation

Table 4-6 Experimental conditions of out-of-plane displacement actuator

Laser	Ar ion Laser
Power	150-250 mW
Spot diameter	3 mm
Irradiated point	15-30 mm (from actuator root)
SMA sheet size	6×40×0.03 mm
Memorized diameter	8 mm
Polyimide sheet size	6.5×40×0.05 mm

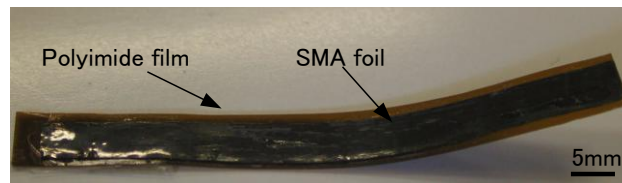


Fig. 4-23 Picture of out-of-plane displacement actuator

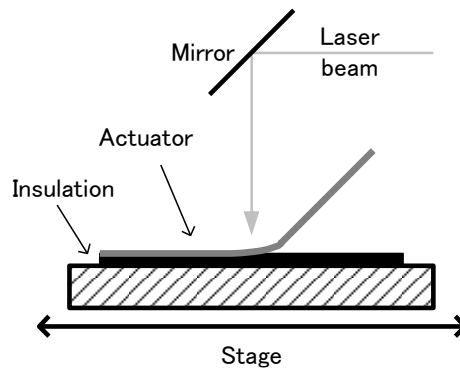


Fig. 4-24 Experimental setup of out-of-plane displacement actuator

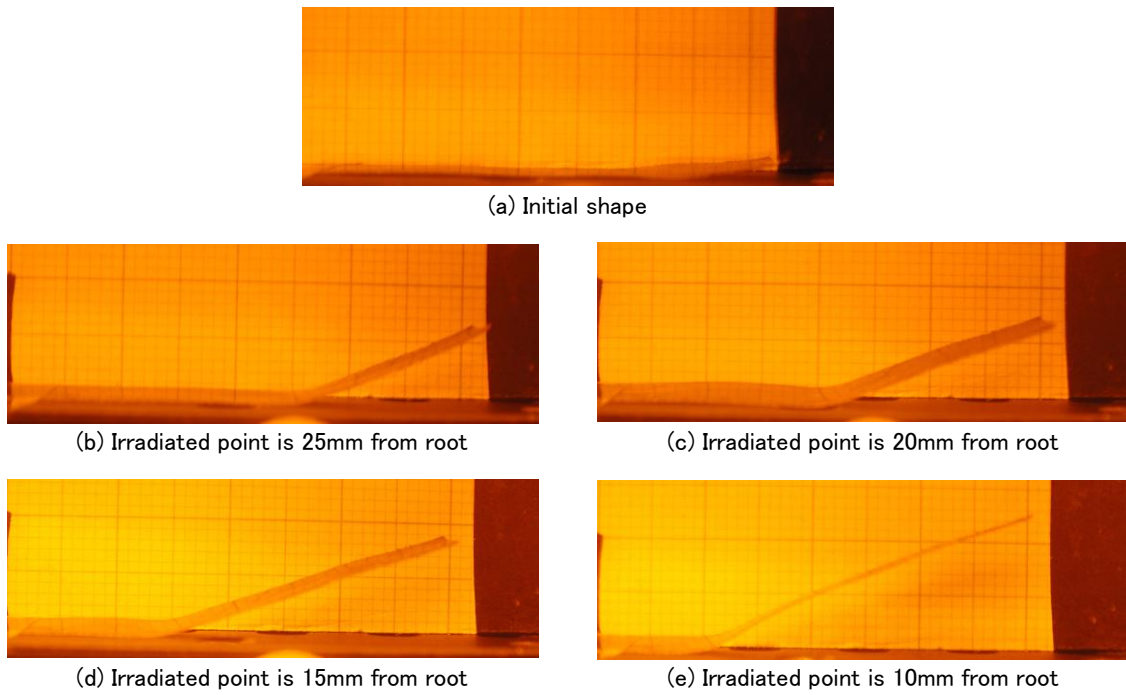


Fig. 4-25 Pictures of operated actuator

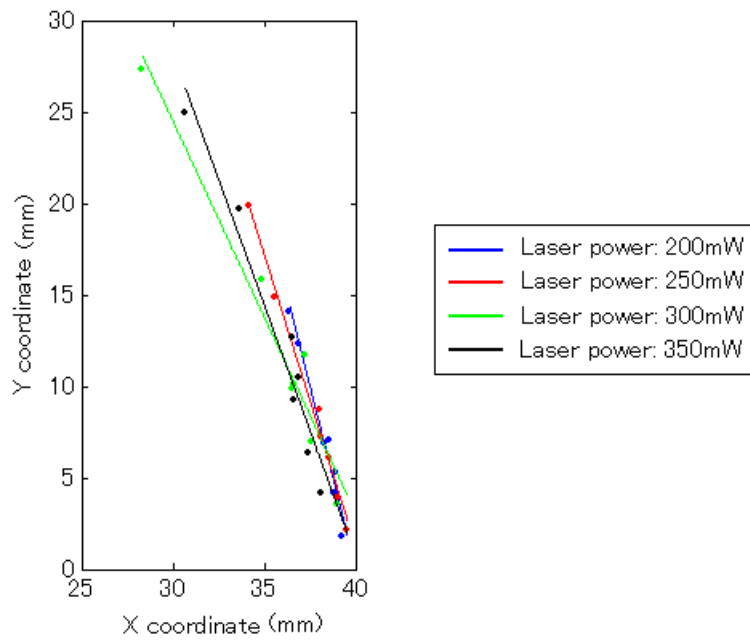


Fig. 4-26 Operated actuator edge diagram

4.4.3 シミュレーション結果と実験結果との比較

シミュレーションに使用したモデルの妥当性を検討するため、シミュレーション結果と実験結果との比較を行った。

Fig. 4-27 にアクチュエータ先端が駆動できる領域の比較を示す。図中の灰色の領域がシミュレーションにより求めた領域を、各色の点の実験により測定した先端位置を示す。実験結果において、シミュレーションと比較して、より広い領域を駆動できているものの、これらは概ね一致していると言える。

レーザ照射条件を変えて比較を行った結果を Fig. 4-28 に示す。いずれのレーザ照射出力においても、先端の軌跡はほぼ一致しているが、各条件での先端の位置に着目すると、X 座標について実験値は計算値より大きく、Y 座標については実験値が計算値よりも小さくなっていることが確認できる。このことより、実験では変形部の円弧が記憶直径まで完全に復帰できず、より大きな曲率半径を持つ円弧になっていたと考えられる。この原因として、シミュレーションと実験結果とのずれが照射位置を先端に近づけるほど減少していることからアクチュエータ自身の質量により直線部(b)が鉛直下方向に重力を受けたことおよび弾性板や接着層の影響で記憶させた直径まで変形が進まなかったことが考えられる。これは、シミュレーションに重力による補正を加えることや SMA 上に直接弾性板を成膜することなどで、接着層のないアクチュエータを作製することで解決できる考えられる。

4.4.4 面外変位アクチュエータまとめ

本節では、光を用いた SMA の操作の応用例として、面外変位アクチュエータを提案し、提案する SMA アクチュエータが任意の駆動軌跡をアナログ制御しながら駆動できることが確認され、簡単なシミュレーションによりアクチュエータの駆動の見積りができることを示した。

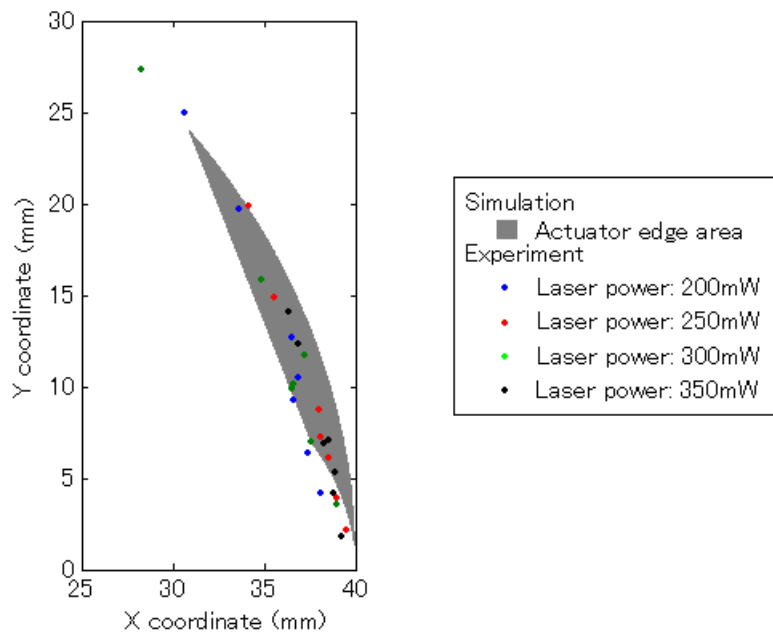
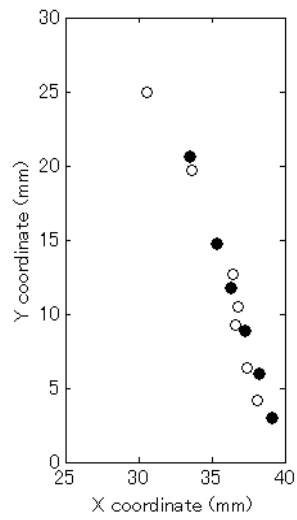
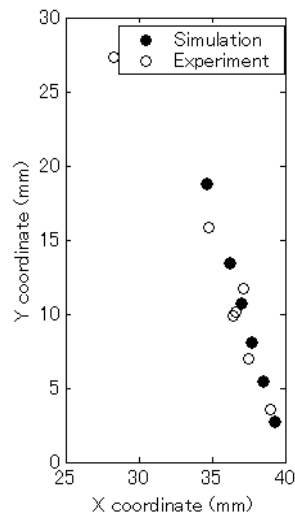


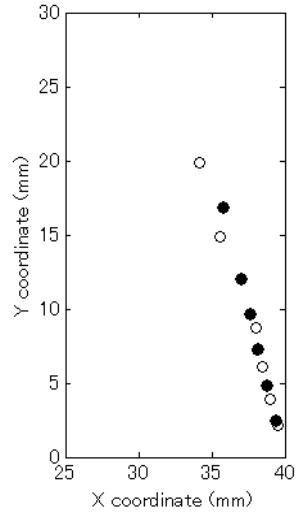
Fig. 4-27 Operated actuator edges by simulation and experiment



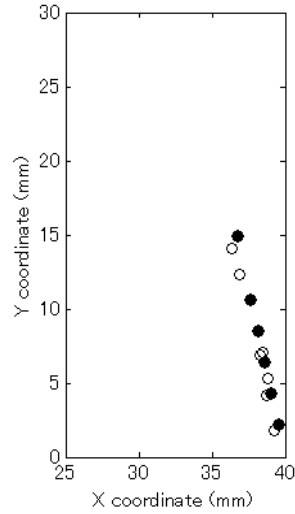
(a) Laser power is 350mW



(b) Laser power is 300mW



(c) Laser power is 250mW



(b) Laser power is 200mW

Fig. 4-28 Comparing of actuator edge location

4.5 まとめ

本章では、光を用いた SMA アクチュエータの駆動法として 3D 触覚ディスプレイおよび面外変位アクチュエータを提案し、その実現に向けた検討を行い、以下を明らかにした。

- 1) レーザ照射により SMA 箔を局部的に加熱し、局部的に変形させることができる。
- 2) SMA の局所変形を利用し、短冊状の SMA 箔に突起を任意のサイズで任意の個数形成できる光駆動アクチュエータを作製でき、3D 触覚ディスプレイに応用可能である。
- 3) 面外変位アクチュエータを SMA 箔により作製し、駆動にレーザ光を用いることで、今までのアクチュエータに比べて広い領域を駆動でき、変位量制御が容易な光駆動アクチュエータを作製できる。

以上より、光を用いた SMA アクチュエータの駆動制御が可能であることを明らかにし、その実現可能性を示した。

参考文献

- 83) Y. Fu, H. Du, W. Huang, S. Zhang, M. Hu: TiNi-based thin films in MEMS applications: a review, *Sensors and Actuators A: Physical*, **112**,2-3 (2004) 395-408.
- 84) 細田秀樹, 宮崎修一: 形状記憶材料の技術動向, *日本機械学会誌*, **107**,7 (2004) 509-515.
- 85) 中里裕一, 菊池直人, 渡辺剛寿, 有賀幸則: シート状形状記憶合金のマイクロアクチュエータへの応用に関する研究(第 1 報 シート状形状記憶合金の加熱方法の検討), *マイクロメカトロニクス*, **45**,3 (2002) 22-30.
- 86) N. Ma, G. Song: Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation, *Smart Materials & Structures*, **12**,5 (2003) 712-719.
- 87) 秦誠一, 林健彦, 福重孝志, 下河辺明: アナログ的基板面外変位アクチュエータ, 2004 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2004) 887.
- 88) 奥根充弘, 藤本公三, 仲田周次: TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの動作特性の検討, *精密工学会誌*, **66**,9 (2000) 1406-1411.

第5章 結論

- 5.1 形状記憶合金の相変態を利用した反射率可変ミラー
- 5.2 レーザ照射による形状記憶合金表面へのエッチマスク直接描画
- 5.3 レーザ照射による形状記憶合金アクチュエータの駆動
 - 5.3.1 3D 触覚ディスプレイ
 - 5.3.2 面外変位アクチュエータ
- 5.4 光と形状記憶合金

本研究では、多くの有用な特徴を持ちながら本格的に普及するに至っていない SMA について、課題となっている加工難度の高さおよび操作性の悪さの解決として光を利用する方法をそれぞれ提案するとともに、光を用いた形状記憶合金の新たな使用方法を提案し、検討を行った。

5.1 形状記憶合金の相変態を利用した反射率可変ミラー

SMA の新たな使用方法として、鏡面加工を行った表面が加熱によって反射率を変える性質に着目し、それを応用した反射率分布可変ミラーの提案を行った。また、反射率分布可変ミラーの実現に向けて、加熱時の反射率変化量を増大させる鏡面加工法の検討を行い、以下を明らかにした。

- ・ 鏡面加工と形状記憶の順番を変えることで、加熱時に得られる Ra および反射率変化量が変化する。
- ・ 鏡面加工時の SMA の相を変えることで、加熱時に得られる Ra および反射率変化量が変化する。
- ・ 予め形状記憶処理を行った上で、SMA をマルテンサイト相に保ちながら研磨を行い鏡面仕上げすることで、67%の Ra の増加および最大で 3.6%の反射率低下を得ることができる。

5.2 レーザ照射による形状記憶合金表面へのエッチマスク直接描画

SMA の微細加工に用いられるエッチングの前工程であるエッチマスク作製工程を簡易化することを目指し、レーザー照射によってエッチマスクを直接描画する手法を提案し、検討を行い、以下を明らかにした。

- ・ SMA を 300℃以上に加熱することで、表面に酸化膜が形成され、その酸化膜は LiCl-エタノール溶液を用いた電解エッチングに対して良好な耐性を持つ。
- ・ SMA 表面にレーザー照射を行うことで局所的に熱処理を行い、エッチマスクを描画することができる。
- ・ レーザを照射および走査することでエッチマスクを描画した SMA をエッチングすることで 5 μ m 程度の分解能で微小形状を作製できる。

5.3 レーザ照射による形状記憶合金アクチュエータの駆動

光を用いた駆動によって SMA アクチュエータの操作性向上を目指し、レーザー照射による SMA 箔アクチュエータの局所的な変形を得る方法を検討し、レーザー照射によって局所加熱と局所変形を得ることに成功した。また、このアクチュエータの応用例として 3D 触覚ディスプレイと面外変位アクチュエータを提案し、検討を行った。

5.3.1 3D 触覚ディスプレイ

3D 触覚ディスプレイとして、複数の並列した短冊状 SMA 箔を用い、レーザー照射による局所変形により、任意のサイズの突起を任意の個数短冊上に表示する方式を提案し、その可能性を検討するため、突起の形状制御を試み、以下の結果を得た。

- ・ レーザ出力により突起のサイズ制御は可能であるが、アスペクト比は制御することが

できない。

- ・ SMA 箔に記憶させる直径を小さくすることでアスペクト比を大きくすることができる。

5.3.2 面外変位アクチュエータ

ロール形状を記憶した SMA 箔に弾性板を貼り付ける構造の面外変位アクチュエータを提案し、シミュレーションと実験の両面からアクチュエータの性能評価を行い以下の結論を得た。

- ・ ロール形状を記憶した SMA と弾性板とを張り合わせたものにレーザ照射を行うことで、複数の駆動軌跡をとり、アナログ的に変位を制御することのできる面外変位アクチュエータを実現することができる。
- ・ 簡単な幾何学モデルを用いてアクチュエータを表現することができ、駆動特性の評価を行うことができる。

5.4 光と形状記憶合金

以上より、従来 SMA と関連して語られることの少なかった光を用いることで、SMA の加工難度の高さおよび操作性の悪さを克服できた。さらに従来のアクチュエータだけでなく、光操作素子としての SMA の可能性も示された。これらの手法を用いることで、より高機能な SMA アクチュエータを作製することが可能となり、従来から着目されていた SMA の有用性と合わせることで、マイクロマシンや MEMS をはじめ、様々な工業分野で使用できる SMA アクチュエータの作製が可能になると考えられる。今後は光を考慮して SMA アクチュエータを設計するなど、実用に向けた各種検討が必要になると考えている。