T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	MEMS応用を目指した永久磁石の微細加工と微細着磁
Title(English)	
著者(和文)	藤原良元
Author(English)	Ryogen Fujiwara
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10271号, 授与年月日:2016年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,初澤 毅,吉田 和弘,佐藤 海二,吉岡 勇人
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10271号, Conferred date:2016/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

東京工業大学

平成二十八年度　学位論文

ＭＥＭＳ応用を目指した
永久磁石の微細加工と微細着磁

メカノマイクロ工学専攻

藤原　良元

目　次

第１章　　緒　論 1
１．１　磁気ＭＥＭＳ 1
１．２　永久磁石のＭＥＭＳ適用 4
１．２．１　永久磁石のＭＥＭＳ応用に必要な技術 4
１．２．２　ＭＥＭＳ応用が期待できる永久磁石 5
１．２．３　永久磁石の微細加工と微細着磁の必要性 7
１．３　本研究の目的 11
１．４　本論文の構成 11

第２章　　ＭＥＭＳ応用を目指した永久磁石の微細加工 12
２．１　緒　言 12
２．２　ＰＬＤ磁石の微細加工 12
２．２．１　ＰＬＤ磁石の微細加工方法 12
２．２．２　ウェットエッチングによる微細加工 13
２．２．３　微細鋳型と研磨を用いた微細加工 15
２．３　異方性ボンド磁石の微細加工 18
２．４　ＭＥＭＳ用焼結ネオジム磁石基板の製作 22
２．４．１　既存の小形焼結磁石 22
２．４．２　研削による薄形化 23
２．４．３　ワイヤ放電加工による薄形化 24
２．５　結　言 28

第３章　　ＭＥＭＳ応用を目指した永久磁石の微細着磁..... 30
３．１　緒　言..... 30
３．２　スパッタ磁石の微細着磁..... 31
３．２．１　スパッタ磁石の微細パルス着磁..... 31
３．２．２　スパッタ磁石のレーザアシスト微細着磁..... 33
３．３　ＰＬＤ磁石の微細着磁..... 48
３．４　等方性ボンド磁石の微細着磁..... 53
３．５　焼結ネオジム磁石の微細着磁..... 58
３．６　結　言..... 66

第４章　　微細着磁磁石を応用したＭＥＭＳ..... 68
４．１　緒　言..... 68
４．２　ＭＥＭＳリニアモータ..... 69
４．２．１　ＭＥＭＳリニアモータの提案..... 69
４．２．２　ＭＥＭＳ技術を用いたリニアモータ製作..... 71
４．２．３　コイル電流条件の決定..... 74
４．２．４　リニアモータ評価..... 76
４．３　結　言..... 81

第５章　　結　論..... 82
５．１　本論文のまとめ..... 82
５．２　今後の課題..... 84

参考文献..... 88

第１章　緒　論

１．１　磁気ＭＥＭＳ

微小電気機械システム（以下，Microelectromechanical systems を略し MEMS）は，シリコンやガラス等の基板上に製作される，機械要素部品が電子回路と一体になった小型デバイスである．MEMS は，図１．１に示すように，集積回路において発展した，フォトリソグラフィー[1,2]，エッチング[3,4]，成膜[5,6]，接合[7,8]，転写[9,10]などの微細加工技術の組み合わせにより製作される．そのため，１）寸法数十 nm～数十 mm の要素を有する，複雑，かつ，微小なデバイスを実現可能であり，また，２）直径 300～450mm の基板上に，機能やデバイスを複合集積化し，一括加工できるため，高機能化や低コスト化も可能となる．

このような利点から，近年，様々なマイクロセンサやマイクロアクチュエータが MEMS 技術を利用して製作されている．センサでは，圧力センサ[11,12]，触覚センサ[13,14]，加速度センサ[15,16]，ジャイロセンサ[17,18]，マイクロフォン[19,20]などが既に実用化されている．アクチュエータでは，マイクロミラー[21-23]，インクジェットプリンタ用の印字ヘッド[24,25]，多自由度ステージ[26,27]，マイクロバルブ[28,29]，マイクロスイッチ[30-32]などが実用化されている．これらのマイクロデバイスの動作には，静電気力や（逆）圧電効果を用いたものが多く，磁力を用いたものは少ない．この理由には以下が挙げられる．

理由１：構造

静電気力や（逆）圧電効果を利用するものは，それぞれ，電極，または，電極と一体化した圧電素子のみから構成される．電極は，集積回路製作に長けた MEMS 技術による製造が容易であり，圧電素子も，チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）や窒化アルミニウム（AlN）等の高性能材料が，スパッタ法やゾルゲル法等の成膜手法で実現されている[33,34]．これらはフォトリソグラフィー技術を起点に形成するため，小形化や集積化が容易であり，MEMS 技術との相性も良いといえる．これに対し，磁力を利用する場合は，半導体プロセスや MEMS ではなじみの薄いμm オーダの磁性体をデバイスに組み込む必要があり，製造難度が上がる．

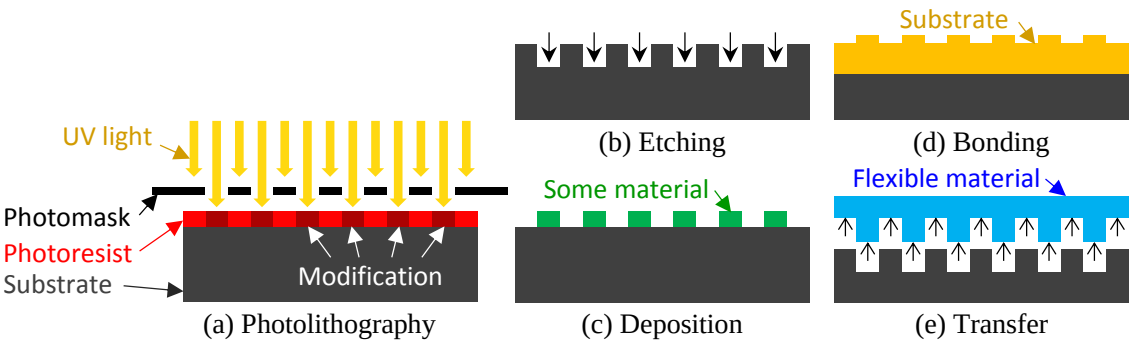


Fig. 1.1　MEMS technologies

理由２：力の寸法効果

静電や圧電タイプの発生力は代表寸法の２乗に比例するのに対し，磁力は４乗に比例することが一般に知られている[35,36]. そのため, デバイスの小型化に伴い, 磁気タイプよりも, 静電・圧電タイプのほうが高出力になりやすい．図１．２に示すように，これらの優位性は，経験的に，代表体積が数 mm^3～数 cm^3 の領域で入れ替わるため，MEMS でも代表寸法がμm オーダのアクチュエータには，静電・圧電タイプの方が優位であると言える．

一方，MEMS 技術を用いない，あるいは，部分的にしか用いないデバイスでは，寸法数 mm～十数 mm 以下の領域においても，磁力を用いたものは多く利用されている．図１．３に，製品化されている小型アクチュエータを，寸法と駆動原理の関係でまとめる．磁気デバイスの例としては，マイクロミラー[23,38]，マイクロスイッチ[32]，イヤホン[39,40]，カメラのレンズ駆動アクチュエータ[41,42]，バイブレータ[43,44]などが挙げられる．これらの磁気デバイスは MEMS 技術で製造可能な寸法であるにも関わらず，その技術が十分に利用されていないのが現状である．マイクロミラー[23,38]やマイクロスイッチ[32]は，構造体こそ MEMS 技術で製作されているが，主要部の一つである永久磁石は，機械加工でバルク磁石から形成し，一方向着磁した寸法数 mm のものを後付けしている．また，イヤホン[39,40]，レンズ駆動アクチュエータ[42,43]，バイブレータ[44,45]では，主要部が機械加工で製作した永久磁石とコイルを組み立てたボイスコイルモータ（以下, Voice Coil Motor を略し VCM）で構成されている．

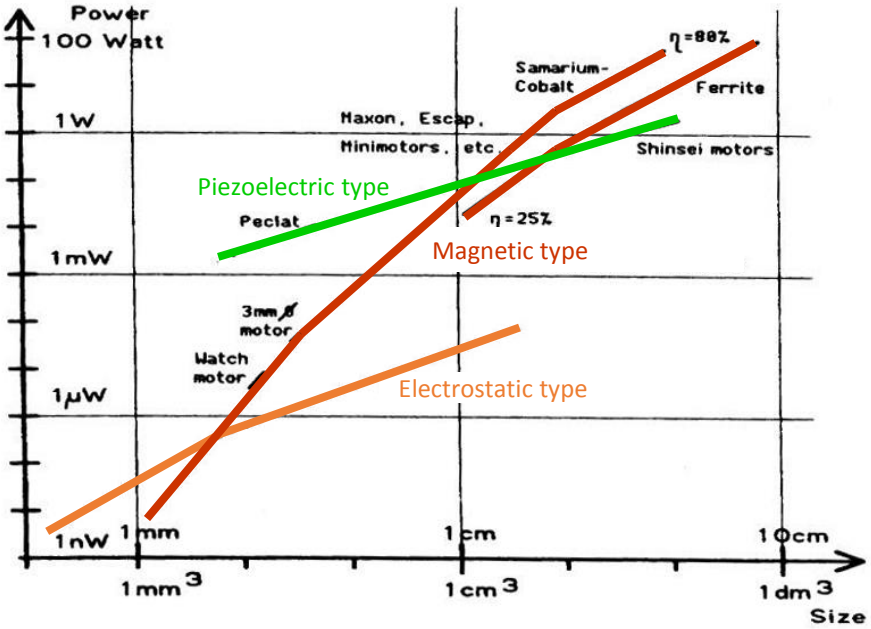


Fig. 1.2　Relationship between actuator size and output power [37]

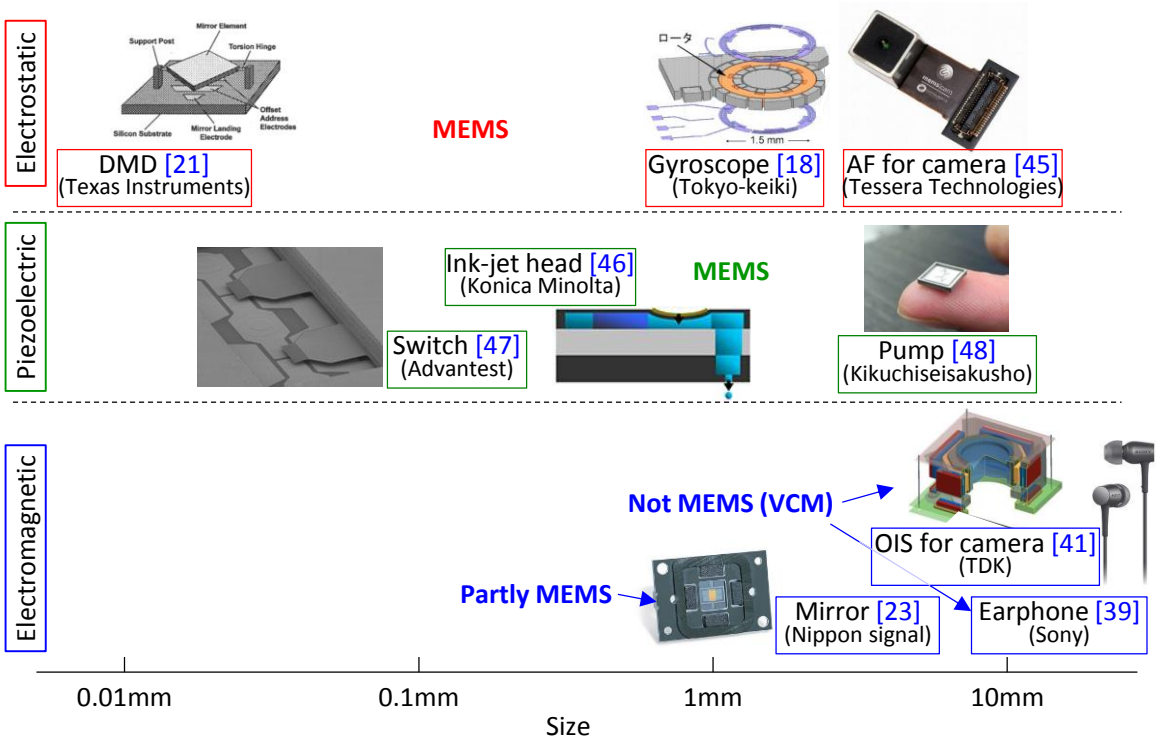


Fig. 1.3　Micro actuators

そのため，これらの磁気デバイスは，１）永久磁石部が大きくデバイスの小形化に限界があり，また，２）一括製作困難で低コスト化に限界がある．また，駆動軸数の増加などで，複雑な磁気回路が求められる際には，一方向着磁磁石を複数組み込む必要があるため，上記課題がより顕著になる．

磁気デバイスに対する MEMS 技術の利用を妨げている最大の原因は，永久磁石部の微細化技術が不十分であると考える．他の磁気デバイス構成要素であるコイルや支持・案内機構は既存の MEMS 技術が転用でき，実際にマイクロミラー[23,38]やマイクロリレー[32]では永久磁石部以外は MEMS 技術で製作されている．永久磁石のフォトリソグラフィーなどを活用した微細加工技術が実現すれば，磁気デバイスのさらなる小形化，および一括加工による低コスト化が期待できる．さらに，静電・圧電タイプにない，以下の利点を取り入れることで，より，寸法の小さい領域の磁気駆動のニーズも創出できると考える．

利点１：耐環境性が高い

静電・圧電タイプは，電場を駆動に利用するため，湿気や埃の混入により，デバイスの性能低下，絶縁破壊による故障が起こりやすい．これに対し，磁気タイプは磁場を駆動に利用するため，これらの影響を受けづらい．静電・圧電タイプでは，耐環境性向上のために，気密封止可能なパッケージング[49,50]を用いる必要があり，製造上の工程や制約が多くなる等の課題があった．

利点２：低電圧駆動が可能

静電・圧電タイプは，発生力が電場に依存するため，駆動電圧の低下には限界があった．これに対し，磁気タイプは発生力が電流に依存するため，コイル設計次第で低電圧駆動も可能となる．これにより，電池等の小型電源で動作可能となり，また，昇圧回路も不要となる．スマートフォン等のモバイル機器内での活躍が期待できる．

また，図１．２に示すように，寸法効果により，代表寸法 1mm 以下の領域では，磁気タイプは静電・圧電タイプよりも低出力とされてきたが [37]，図中の磁性材料は，サマコバ磁石やフェライト磁性体と，ネオジム磁石や純鉄よりは磁気特性が低く，材料の選択により，磁気タイプの出力特性を上方に移動し，磁気タイプの優位な寸法をマイクロ領域にさらに推し進めることが可能と考えられる．

更に，従来の磁気ＭＥＭＳでは，微細加工や微細着磁法の開発が不十分で，永久磁石の最適な形状や着磁状態で利用されていない．これらの技術を研究開発することで，磁力が優位となる領域を更に微小方向に拡大出来る可能性もある．

１．２　永久磁石のＭＥＭＳ適用

１．２．１　永久磁石のＭＥＭＳ応用に必要な技術

従来の小型磁気デバイスでは，機械加工した寸法数 mm のバルク永久磁石の利用が必要とされ，MEMS 技術の利用が限定されており，デバイスの小形化や低コスト化に限界があった．そこで，本論文では，永久磁石の MEMS 適用に必要な技術の研究開発を目指す．この技術として，永久磁石の，１）微細加工による小形化，および２）微細着磁による複雑な磁場の形成，が必要と考えられる．また，この際に，MEMS 適用を前提とし，一括処理可能な手法を利用する必要がある．

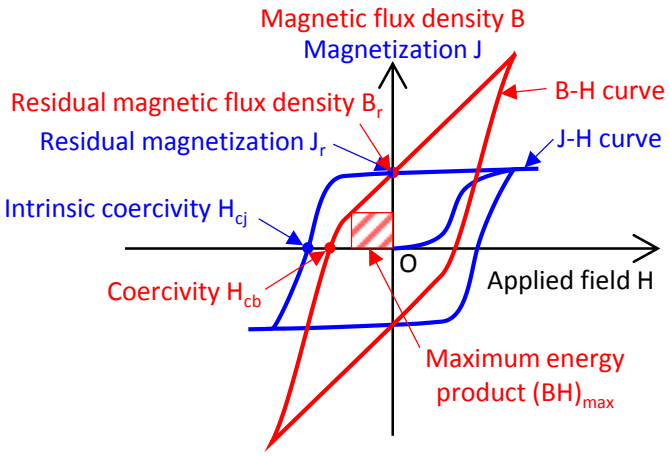


Fig. 1.4　Magnetization curves

１．２．２　ＭＥＭＳ応用が期待できる永久磁石

MEMS 応用において，永久磁石に求められる物性，形状は，１）高い磁気特性，２）高い耐熱性，および３）応用先に適した数～数百μm の厚みである．また，それらの磁石は，付加加工と除去加工の両方で形成される必要がある．

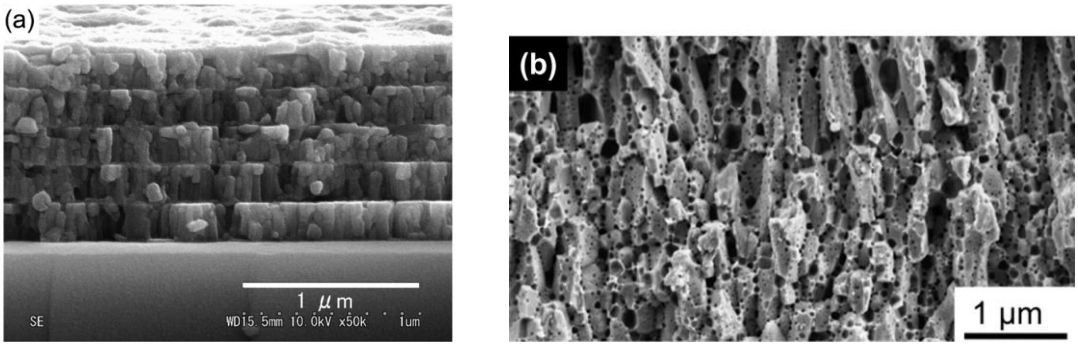
まず，１）高磁気特性を満たす磁石として，Nd-Fe-B 系や Pr-Fe-B 系等の希土類磁石 [51] が第一候補である．２）厚み，３）耐熱性は製造法によって決定される．製造法には，真空成膜法，焼結法，樹脂との混練などがある [51]．以下に，MEMS 応用が期待できると考える永久磁石を示す．なお，本論文において，磁気特性は，図１．４で示すような磁化曲線やその第二象限のみを抜き出した減磁曲線で評価し，簡易的な指標として，最大エネルギ積$(BH)_{max}$や固有保磁力 H_{cj} 等も用いる．

（１）スパッタ磁石（Sputtered magnet）

真空成膜法の一つであるスパッタ法にて形成する，付加加工に適した磁石である．上原らや Dempsey らにより，最大エネルギ積 300kJ/m^3 を超える世界最高レベルの磁気特性を有する Nd-Fe-B 系の異方性磁石が実現されている [52-55]．図１．５に示すように，上原らの膜 [52,53]は，厚み数百 nm の Nd-Fe-B と厚み数十 nm の Ta の多層膜であり，Dempsey らの膜 [54,55] は，多層構造を有しない．両者とも，基板を 450~500℃で加熱しながら成膜することで結晶方位を揃えた高品質な膜の形成を実現している．上原ら，および Dempsey らの膜の Nd-Fe-B 層の成膜速度は，それぞれ約 10，20μm/h であるが，上原らの膜は多層構造のため，スパッタターゲットの切り替えに時間を要する．両者の膜は，スパッタで成膜するため MEMS への組み込みは比較的容易であるものの，熱応力の影響で基板からの剥離が発生するため厚みの増加が難しく，現在は最大膜厚 20~30μm にとどまっている．

（２）ＰＬＤ磁石（PLD magnet）

真空成膜法の一つであるパルスレーザ堆積法（以下，Pulsed Laser Deposition を略し PLD 法）を利用して形成する磁石である．本手法では，合金ターゲットにパルスレーザを照射



(a) Nd-Fe-B/Ta multilayered film developed by Uehara [53]　　(b) Ta/Nd-Fe-B/Ta three layer film developed by Dempsey [55]

Fig. 1.5　Permanent magnet films fabricated by sputtering

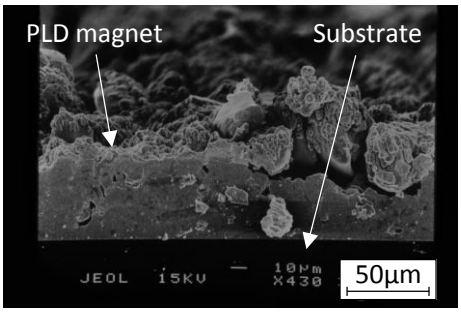


Fig. 1.6　PLD-made Nd-Fe-B magnet film

しアブレーションを起こすことで剥離された粒子を飛ばし基板上に堆積させ，その後，真空加熱処理を施すことで磁石が形成される．中野らにより，Nd-Fe-B 系や Pr-Fe-B 系の磁石の，レート数十μm/h の高速成膜が実現しており，真空成膜法であるにも関わらず，最大厚み 160μm を実現している [56,57]．等方性磁石であるにも関わらず，最大エネルギ積 $(BH)_{max}$50~80kJ/m^3 を実現している．一方，成膜中に比較的大きな粒子（ドロップレット）が発生するため，図１．６に示すように，表面粗さが大きくなり，数十μm の凹凸が形成される．MEMS 適用においては，薄膜フォトレジストの塗布，他基板との接合に影響を与えるため，表面粗さの低減が必要である．

（３）ボンド磁石（Bonded magnet）

永久磁石粉を接合剤で固めて形成する永久磁石である．構造を図１．７に示す．比較的安価なため，実用化され広く利用されている [58,59]．希土類の磁石粉には主に，Nd-Fe-B 系，Sm-Co 系，Sm-Fe-N 系等があり，接合剤には主に，熱可塑性樹脂，熱硬化性樹脂，ゴム等がある．磁石粉の選択により，等方性，異方性の両方のボンド磁石を形成可能である．異方性磁石粉は各粒子内の結晶の磁化容易軸方向が揃っているため，成形中に外部磁場を印加することで，磁石粉を配向可能である．接合剤硬化前は付加加工に，接合剤硬化後は除去加工に使用する．

MEMS 応用においては，１）厚みを数～数百μm まで任意に調整でき，２）形状自由度が大きく，さらに，３）接合剤硬化前であれば容易に MEMS に組み込める利点がある．一方，接合剤を含み，磁石の体積割合が下がるため磁気特性向上には限界があり，最大エネルギ

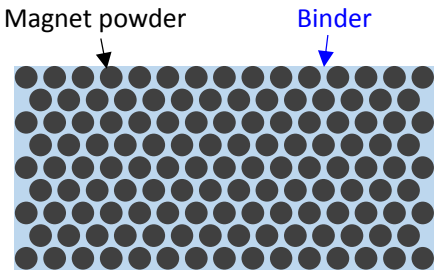


Fig. 1.7　Configuration of bonded magnet

Table 1.1　Candidates for permanent magnets used in magnetic MEMS

Type	Sputtered magnet	PLD magnet	Bonded magnet	Sintered magnet
	Anisotropic	Isotropic	Anisotropic Isotropic	Anisotropic
Compatible micromachining	Surface micromachining	Surface micromachining	Surface or bulk micromachining	Bulk micromachining
Material	Nd-Fe-B/Ta	Nd-Fe-B, Pr-Fe-B	Nd-Fe-B, Sm-Co	Nd-Fe-B, Sm-Co
Fabrication method	Sputtering	Pulsed laser deposition	Magnet powder & resin mixing	Sintering
Thickness	1-20 μm	1-160 μm	Over 2 μm	Over 500 μm
$(BH)_{max}$	300-400 kJ/m^3	50-80 kJ/m^3	10-100 kJ/m^3	250-500 kJ/m^3
Advantage	High magnetic properties	Thick film deposition	Easy and precise micromachining	High magnetic properties
Disadvantage	Maximum thickness limitation less than 20μm	Large surface roughness	Low heat resistance	Degradation due to thinning

積$(BH)_{max}$は通常 100kJ/m^{3}以下である．また，接合剤が耐えられる温度までしか昇温できないため，高温を伴い MEMS プロセスに対応できない可能性がある．

（４）焼結磁石（Sintered magnet）

焼結過程を経て製作されるバルクの永久磁石であり，寸法が数 mm 以上の電磁デバイスにおいて非常に広く使われている [60-62]．等方性磁石としても利用できるが，磁気特性が優れる異方性磁石としての利用が主である．Nd-Fe-B 系の異方性焼結磁石は最大エネルギ積 300kJ/m^{3}を超える世界最高レベルの磁気特性を有する．一方，MEMS 応用においては，他基板との接合が必要であり，また，薄板加工時の応力や熱の影響で磁石表面の組織が破壊されるため，磁石小形化に伴い磁気特性が低下すると報告されている [63,64]．

上記で示した，MEMS 応用が期待できる永久磁石のまとめを表１．１に示す．付加加工では，スパッタ磁石，PLD 磁石，ボンド磁石が，利用可能である．除去加工は，すべての磁石に対して必要である．

１．２．３　永久磁石の微細加工と微細着磁の必要性

前項で挙げた永久磁石を MEMS に適用するために，１）微細加工と，２）微細着磁が必要である．

（１）永久磁石の微細加工

従来，永久磁石部は，焼結磁石を機械加工することで製作していた．機械加工時の磁気特性の劣化を避けるため，磁石の最小寸法は数 mm と大きくせざるを得なかった．一方，これが永久磁石の MEMS への適用，およびデバイスの小形化を妨げてきた．永久磁石に対し，MEMS 技術を利用し，かつ，磁気特性の低下を抑制した微細加工で行うことで，デバイスの小形化，および一括加工による生産性向上が期待できる．具体的には，磁気特性の劣化が少ない加工法を調査し，図１．８（ａ）に示すように，従来は寸法数 mm であった磁石の，幅数十～数百μm，厚み数～数百μm への微細加工を目指す．

（２）永久磁石の微細着磁

従来の小型磁気デバイス内の永久磁石は，一方向着磁であったため，複雑な磁気回路形成には，複数の磁石を組み合わせる必要があり，デバイス微小化の障害となっていた．これに対し，組み立てなしで着磁方向の異なる微細な領域を形成する微細着磁を実現することで，複雑，かつ，微細な磁気回路を連続する磁石内で実現できる．具体的には，図１．８（ｂ）に示すように，幅数十～数百μm の微細着磁実現を目指す．

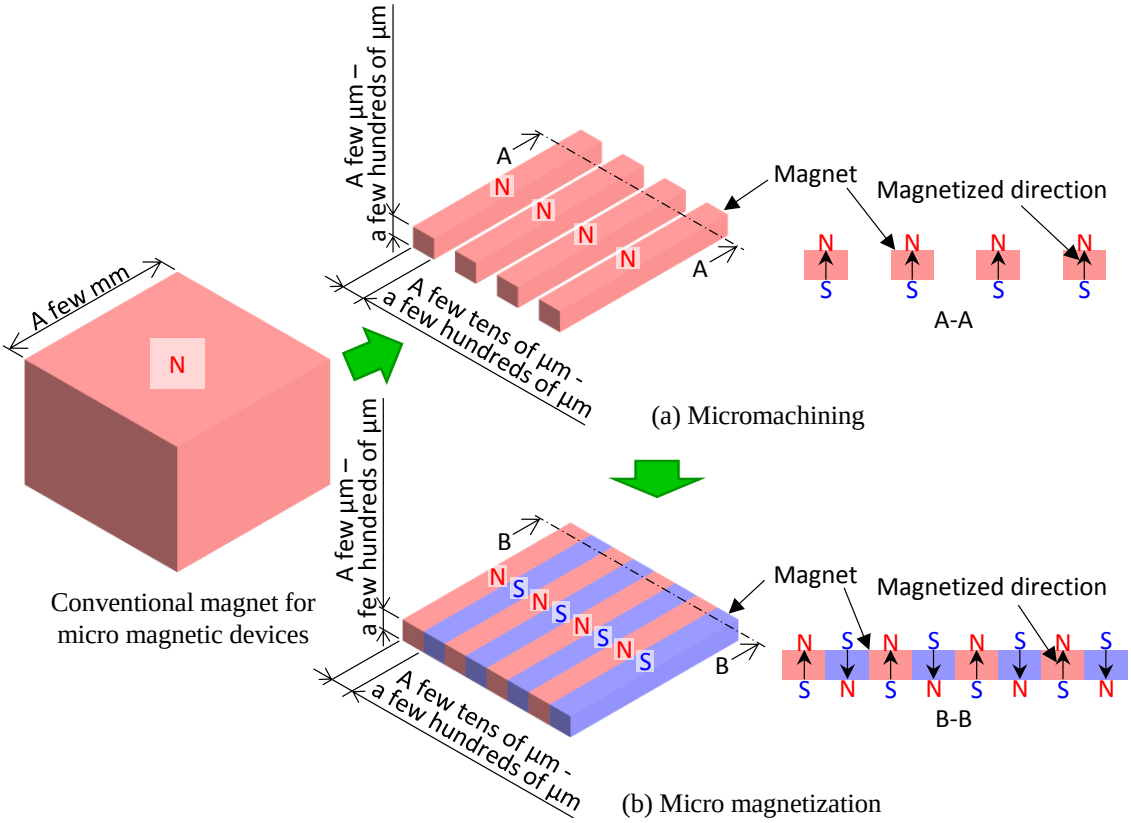


Fig. 1.8　Micromachining and micro-magnetization of permanent magnets

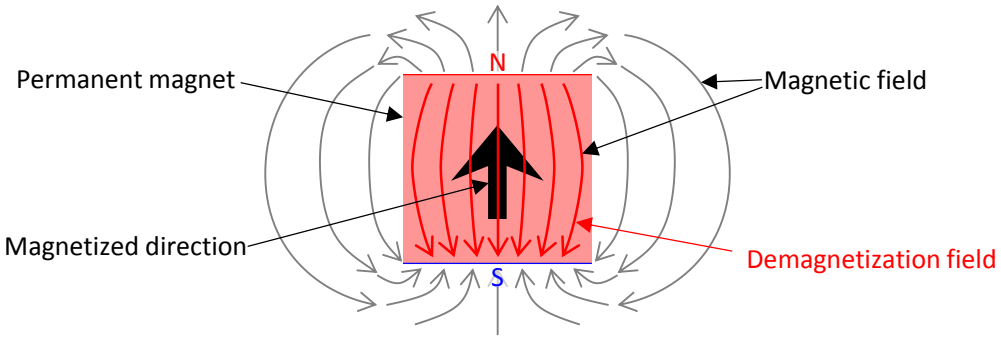
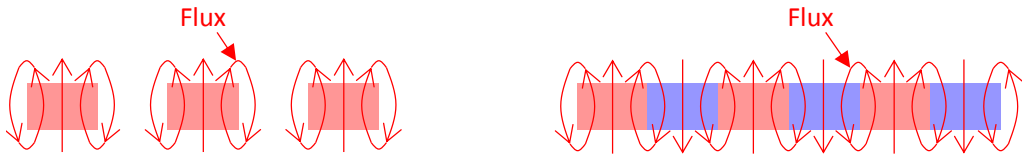


Fig. 1.9　Demagnetization field

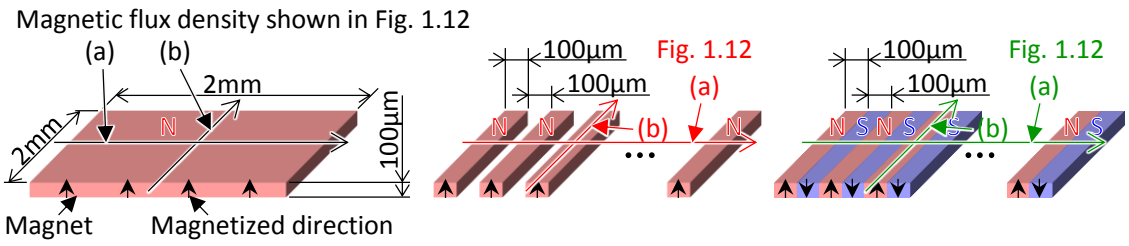


(a) Micromachining　　(b) Micro-magnetization

Fig. 1.10　Flux flow generated by micromachined and micro-magnetized magnet

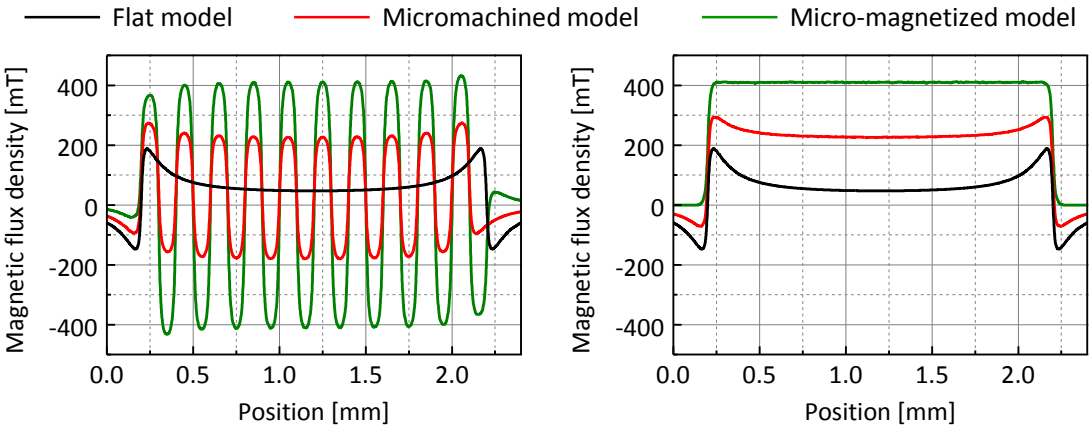
加えて，微細加工と微細着磁により，発生磁場増加も可能である．これは，反磁場低減の影響である．反磁場は，図１．９に示すように，磁石の N 極から，磁石内部を通過して，S 極へ，着磁向きに逆らって流れていく磁束が形成する磁場であり，アスペクト比（着磁方向の磁石厚み／磁石幅）が小さいほど，反磁場が増加する．磁石をただ扁平に加工するだけでは，反磁場が極端に大きくなり多くの磁束が磁石内部を流れるため，磁石表面で得られる磁場が非常に小さくなる．これに対し，微細加工や微細着磁を施すことで，磁石単体のアスペクト比を増加可能であり，図１．１０に示すような，着磁向きに逆らわない磁束流れを形成できるため，磁石表面で得られる磁場が大きく増加する．

反磁界低減の影響を，磁場解析により調査する．図１．１１に示す，（ａ）扁平，（ｂ）微細加工，（ｃ）微細着磁モデルに対し，磁場解析ソフト（Electromagnetics Suite 17, Maxwell 3D, ANSYS Inc.）を用いて，磁場分布を計算する．磁気特性は，焼結ネオジム磁石を想定し，残留磁束密度 B_r1.1T，保磁力 H_{cb}840kA/m とした．



(a) Flat model　　(b) Micromachined model　　(c) Micro-magnetized model

Fig. 1.11　Analytical models for investigating the effect of processing on magnetic field distribution



(a) Across the stripe pattern　　(b) Parallel to the stripe pattern

Fig. 1.12　Simulated vertical magnetic flux density distributions at a distance of 10 μm from the magnet surface

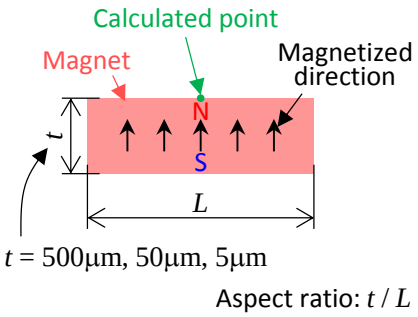


Fig. 1.13　Analytical model for investigating the relationship between aspect ratio and surface magnetic field

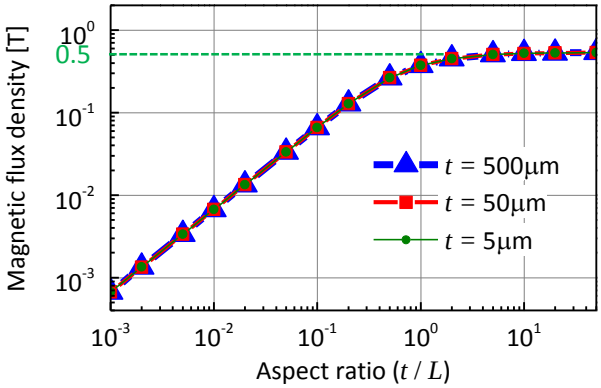


Fig. 1.14　Relationship between aspect ratio and simulated surface magnetic field

図１．１１中に a，b で示す，磁石表面から 10μm 離れた線上の磁石面外方向の磁場分布を図１．１２に示す．扁平な磁石に対し微細加工や微細着磁を施すことで，磁石中央付近において，発生磁場を約５～１０倍に増加可能なことが確認できる．磁石を小形化しつつも，大磁場発生可能となるため，磁気 MEMS の出力密度を向上可能である．

アスペクト比と発生磁場の関係を調査する．図１．１３に示すモデルの表面における磁場の大きさを，磁場解析ソフト（Maxwell 2D ver. 15, ANSYS Inc.）を用いて計算する．磁石厚みは 5μm，50μm，500μm の３種類で固定し，磁石幅を変えることでアスペクト比を調整する．計算により得られた，磁石のアスペクト比と表面磁場の大きさの関係を図１．１４に示す．発生磁場がアスペクト比に依存すること，アスペクト比１までは発生磁場が増加することが確認できる．したがって，微細加工や微細着磁で形成する磁石のアスペクト比は１程度とすることが望ましいと言える．また，既存の小型磁気デバイスは，微細加工や微細着磁なしで大磁場を発生させる必要があったために，寸法が数 mm と比較的大きい永

久磁石を使用せざるを得なかったと言える．

１．３　本研究の目的

永久磁石を微細加工・微細着磁する技術が不十分なことが，磁気 MEMS の実現を妨げてきた．本研究では，MEMS 応用が期待できる高性能永久磁石として，ネオジム系などのスパッタ磁石，PLD 磁石，ボンド磁石，焼結磁石を挙げ，これらの磁石の MEMS 適用に必要な微細加工と微細着磁の実現を目的とする．さらに，実現した技術を用いた新しい磁気 MEMS の実現を目指す．

１．４　本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．

第２章「MEMS 応用を目指した永久磁石の微細加工」では，微細加工が未検討の，

未公表部

第３章「MEMS 応用を目指した永久磁石の微細着磁」では，ネオジム系などのスパッタ磁石，PLD 磁石，等方性ボンド磁石，焼結磁石に対する，サブミリメートルオーダの微細，かつ，アスペクト比１程度の多極着磁を目指す．まず，スパッタ磁石に対して，時定数を限界まで低減させた微小着磁コイル回路を用いたパルス着磁を検討する．その後，さらなる着磁の微細化を目指し，レーザ局所加熱により固有保磁力を低減させた部分のみを外部磁場により着磁する，レーザアシスト微細着磁法を提案，検討する．さらに，本手法を発展させ，深さ方向の着磁寸法を増加し，

未公表部

第４章「微細着磁磁石を応用した MEMS」では，前章までで実現した，永久磁石を MEMS に適用する技術を元にした，新しい磁気 MEMS の提案，実現を目的とする．一例として，微細パルス着磁したスパッタ磁石を利用したマイクロリニアモータを試作，評価する．

第５章「結論」では，各章で得られた結果を述べ，今後の課題を挙げる．

第２章　ＭＥＭＳ応用を目指した永久磁石の微細加工

２．１　緒　言

磁気 MEMS への応用が期待できる希土類磁石として，スパッタ磁石，PLD 磁石，等方性・異方性ボンド磁石，および焼結磁石が挙げられる．これら希土類磁石の微細加工，微細着磁技術が不十分なことが，磁気 MEMS の発展が進まない理由の一つと考えている．本章では，これら希土類磁石の微細加工法を検討し，磁石寸法を，縦横数十～数百μm，厚み数～数百μm に，磁気特性の劣化を少なく加工することを目指す．

これら磁石の微細加工は，希土類磁石の付加加工，および磁石基板からの除去加工の２種類が存在する．希土類磁石の付加加工には，真空成膜法で形成するスパッタ磁石と PLD 磁石，およびボンド磁石などが利用できる．これら磁石に対し，従来，次のような微細加工が検討されてきた．

スパッタ磁石では，１）基板に成膜後の磁石に対し，フォトレジストをマスクに，イオンミリングでエッチングする手法[65,66]，および２）微細な溝を加工した基板上に磁石材料を成膜後，余剰部を研磨することで，基板表面に磁石の微細構造を埋め込む手法[67,68]が既に実現している．また，磁気特性低下も，十分実用に耐えうる範囲に留まっている．

等方性ボンド磁石に対しても，１）スクリーンプリント[69,70]や，２）鋳型への埋め込み[71,72]，また，３）接合剤にフォトレジストを利用してのフォトリソグラフィー[73,74]など，様々な微細加工が実現している．磁気特性の低下も無視できる範囲である．一方，付加した PLD 磁石と異方性ボンド磁石に対する微細加工の検討は，筆者の調べた範囲では行われていない．

希土類磁石の除去加工の対象として，厚み数百μm の磁石基板や，シリコンやガラス基板上に堆積した PLD 磁石等が考えられる．しかしながら，焼結磁石は，薄形化により磁気特性が低下するため，そもそも，厚み数百μm レベルのシリコン基板なみの厚さを有する磁石基板が実現していない．以上の議論から，本章では，PLD 磁石と異方性ボンド磁石の微細加工をまず検討する．さらに，焼結磁石からなる厚み数百μm の磁石基板製作を目指す．

２．２　ＰＬＤ磁石の微細加工

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

２．３　異方性ボンド磁石の微細加工

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

２．４　ＭＥＭＳ用焼結ネオジム磁石基板の製作

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

２．５　結　言

本章では，PLD 磁石と異方性ボンド磁石の，縦横数十～数百μm，厚み数～数百μm への微細加工，および焼結磁石からなる厚み数百μm の MEMS 用磁石基板製作を目的とした.

未公表部

未公表部

第３章　ＭＥＭＳ応用を目指した永久磁石の微細着磁

３．１　緒　言

第２章では，MEMS 応用を目指した希土類磁石の微細加工法を検討した．本章では，希土類磁石の MEMS 応用へのもう一つの課題である微細着磁法を検討する．

永久磁石の一般的な着磁は，コイルに瞬時・大電流を与えることで発生する磁場を利用したパルス着磁である．通常，Nd-Fe-B 系や Sm-Co 系の希土類磁石では 3~8T 程度の大磁場を着磁のため必要とする．既存の微細着磁もパルス着磁を利用したものが多く [80,81]，厚み 360μm の等方性ボンド磁石に対する幅 1mm の着磁，および厚み 1mm の焼結ネオジム磁石に対する幅 2mm の着磁の実現例がある．一方，希土類磁石に対して，数百μm 幅の着磁は実現しておらず，更なる微細化が課題であった．

ハードディスクドライブ（HDD）では，磁気ヘッドを磁気記録媒体に数十 nm の距離まで近接することで，幅数十～数百 nm の着磁を実現している [82]．対象としている磁性体の厚みが数～数十 nm 程度で，その固有保磁力 H_{cj} が 300~400kA/m 程度である．MEMS 応用が期待される希土類磁石は，固有保磁力 H_{cj} が概ね 900kA/m 以上と高く，HDD ヘッドの利用では着磁は困難である．

光磁気ディスク（以下，Magneto-Optical を略し MO ディスク）では，高保磁力磁石に対し，レーザで局所加熱して固有保磁力 H_{cj} を下げた領域を外部コイルからの磁場で着磁する手法（以下，レーザアシスト加熱）により，幅数百 nm の着磁を実現している [83,84]．しかしながら，HDD と同様，磁石厚みが数～数十 nm と薄いため，MEMS 用の磁石に対応できるかは，検討が必要である．

レーザアシスト加熱の適用が，スパッタ磁石に対し行われている [85]．プロセスを図３．１に示す．MO ディスクと異なる点として，磁石厚みが 100~1,000 倍大きいこと，小スポッ

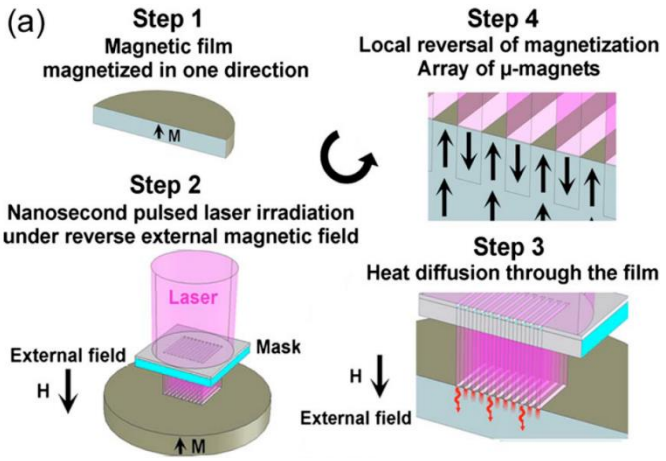


Fig. 3.1　Micro-magnetization method using laser assist heating for sputtered Nd-Fe-B magnet [85]

トレーザではなく大スポットレーザをマスク越しに照射していること，および外部磁場 0.5T を永久磁石で与えていることが挙げられる．本手法では幅 50μm の微細着磁を実現したが，厚み 4μm に対して磁石表面から 1μm 程度の深さまでしか着磁できていない．

本章では，まず，パルス着磁のさらなる微細化をスパッタ磁石に対して検討する．さらに，レーザアシスト加熱を利用した微細着磁をスパッタ磁石，PLD 磁石，等方性ボンド磁石，焼結ネオジム磁石に対して検討する．特に，先行研究 [85] では考慮されていない磁石内の熱伝導に着目し，磁石の表面のみでなく，深部まで着磁する手法やマスクレスで小スポットレーザを走査し加熱する手法を検討する．

３．２　スパッタ磁石の微細着磁

３．２．１　スパッタ磁石の微細パルス着磁

今回検討する微細パルス着磁法を図３．２に示す．基板上に堆積したスパッタ磁石材料上にミアンダ形状の小径コイルを配置し，瞬時電流を印加することで発生する局所的な磁場により着磁する．ミアンダコイルは１本の導線を一往復半折り返すことで製作し，インダクタンスをできるだけ小さく設定する，これにより，コイルの時定数を下げ，パルス幅

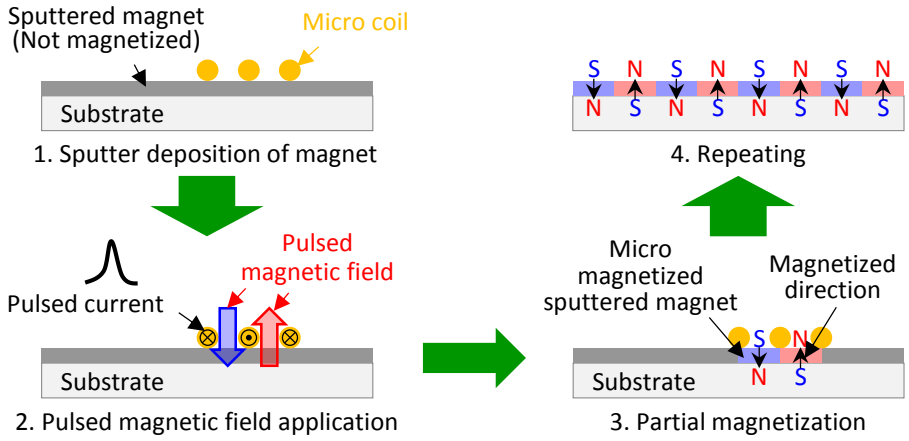


Fig. 3.2　Micro pulse magnetization method for sputtered magnet

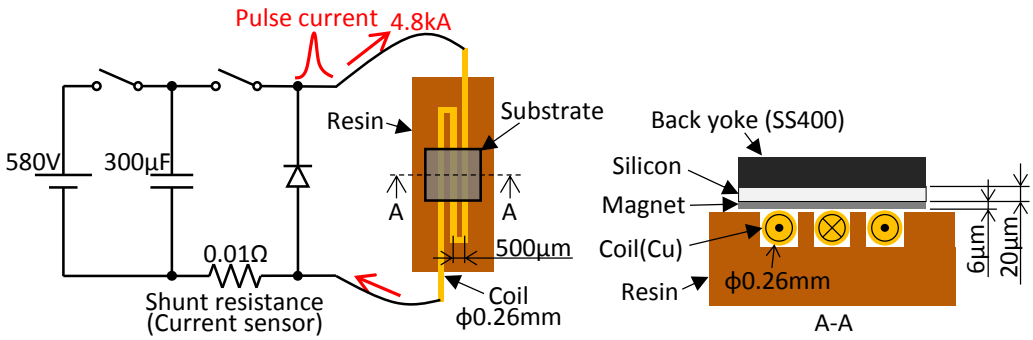


Fig. 3.3　Micro pulse magnetization setup for sputtered magnet

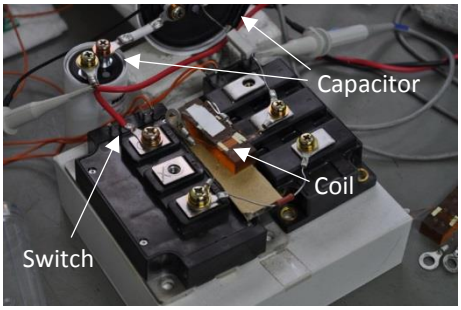


Fig. 3.4　Fabricated micro pulse magnetization setup

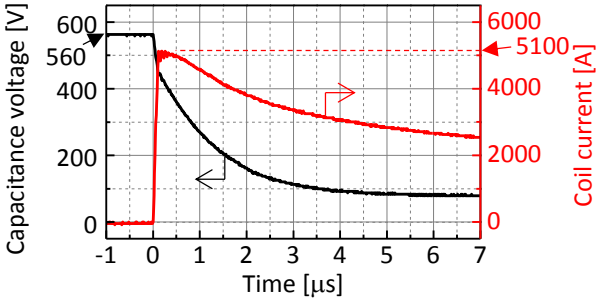


Fig. 3.5　Capacitor voltage and coil current during the discharging

の短縮と最大電流値の増加を狙う．

微細着磁電源とコイルの様子を図３．３に示す．直流電圧 580V で充電する容量 300μF のコンデンサを放電し，着磁コイルに瞬時電流を与える．着磁コイルにはϕ0.26mm のエナメル線を使用し，0.5mm 間隔で折り返すパターンを使用する．磁気飽和を避けるため，コイルを固定するコアには軟磁性体ではなく樹脂を用いる．配線を含めた装置全体のインダクタンス低下のため，着磁器内にコイルを配置した．実際の着磁システムを図３．４に示す．着磁コイルの被覆は厚み 20μm 程度であり，十分に試料をコイルに密着できた場合，コイル－試料間の距離は約 20μm となる．事前に行った通電試験時のコンデンサ電圧値，およびコイル電流値を図３．５に示す．充電電圧 560V，最大電流 5,100A，電流値がピークの半分になるパルス幅は 6.7μs であった．電流値は 0.01Ω のシャント抵抗両端の電圧から測定した．

着磁試料には，縦横 4mm，厚み 200μm のシリコン基板に成膜した，Nd-Fe-B/Ta の多層構造を有する総厚み 6μm のスパッタ磁石材料[53]を用いる．実験は，１）基板上に厚み 19mm の鉄製バックヨーク（SS400）を配置するものと，２）バックヨークを配置しないもの，の２種類を実施する．バックヨーク配置により，磁気抵抗を小さくし，試料への印加磁場を大きくできる可能性がある一方，バックヨークに渦電流が発生し試料への印加磁場が小さくなる可能性もあり，どちらが着磁に有利かを明らかにする．本システムでは，一度の通電で２極対磁極の形成が可能であり，今回は磁石材料とコイルの相対位置を変化させつつ，計８極対分着磁した．バックヨークありの実験での通電は，充電電圧 580V，最大電流 4,800A であった．

着磁評価のため，試料の表面の磁束密度分布を測定し，理想的な着磁を模擬したシミュレーション値と比較する．解析モデルを図３．６に示す．厚み 6μm の磁石が面外方向に完全着磁されており，その着磁向きが 500μm ピッチで反転するモデルとしている．磁気特性には，成膜直後の実測値である残留磁束密度 B_r1.3T，保磁力 H_{cb}790kA/m を使用した．解析には，３次元磁場解析ソフト（Maxwell 3D ver.14，ANSYS Inc.）を使用した．試料表面の磁束密度分布測定には，ガウスメータ（Magnet Analyzer UHS series，日本電磁測器株式会社）を使用する．本装置により，感磁面 110μm×110μm のホール素子で，磁石表面から 250μm 離れた位置において発生している磁場分布面外方向成分を測定した．測定結果とシミュレ

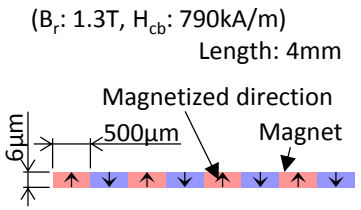


Fig. 3.6　Analytical model of sputtered magnet after the micro pulse magnetization

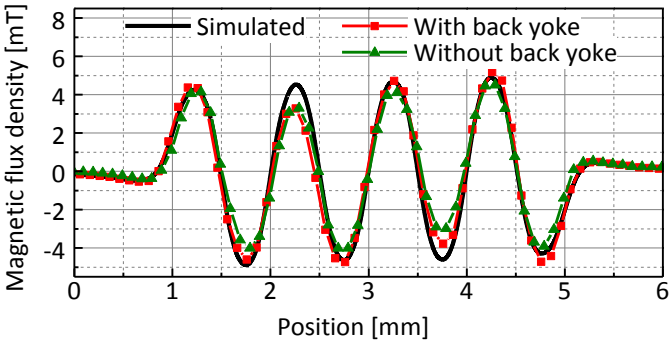


Fig. 3.7　Vertical magnetic flux density distributions generated from sputtered magnet after the micro pulse magnetization

ーション値の比較を図３．７に示す．バックヨークを使用することで，磁石からの発生磁場を向上可能であることが確認できる．また，バックヨークを使用して着磁した試料において，理想的な着磁を模擬したシミュレーション値(p-p)を基準とした測定磁場(p-p)の比率（以下，着磁率）は 96%となり，シミュレーション値とほぼ同等の磁場を計測している．

一方，永久磁石の厚みを考慮した磁石の有効活用の観点から，幅 500μm では不十分であり，アスペクト比１を目指した，さらなる微細化が必要である．しかしながら，本実験では，１～３回程度の着磁実験により，コイル発熱による被覆の溶融や，コイルの断線が発生しており，さらに線径の小さいコイルを用いた微細化は困難と考えられる．また，着磁パターンは，コイル配置に依存するため，複雑な形状の着磁は困難である．

３．２．２　スパッタ磁石のレーザアシスト微細着磁

前項の着磁のさらなる微細化，および着磁パターンの複雑化を目指し，レーザアシスト微細着磁を検討する．

（１）レーザアシスト微細着磁の原理

提案，検討するレーザアシスト微細着磁法の基本原理である，熱アシスト磁化反転のプロセスを図３．８に示す．まず，パルス着磁などの一般的な着磁方法で，一方向（図中では上向き）に永久磁石材料を着磁し（１），その永久磁石を，外部から与える一様な静磁場中に配置する（２）．静磁場は，永久磁石の着磁とは逆向きとする（図中では下向き）．この状態で，着磁対象の永久磁石のみを加熱し，その温度を上昇させる（３）．高温になった永久磁石は，固有保磁力 H_{cj} の低下により脱磁され，そのまま外部から与えている静磁場の向き（図中では下向き）に着磁される．そのまま永久磁石の温度を低下させ，十分に温度が低下した後に静磁場を取り除くことで，磁化反転は完了する．

この磁化反転は永久磁石の温度上昇による固有保磁力 H_{cj} の低下を利用している．固有保磁力 H_{cj} の低下した永久磁石は，比較的小さな外部磁場によって着磁することができる．Nd-Fe-B 系の磁石は，温度上昇による固有保磁力 H_{cj} の低下が比較的大きく，今回使用する

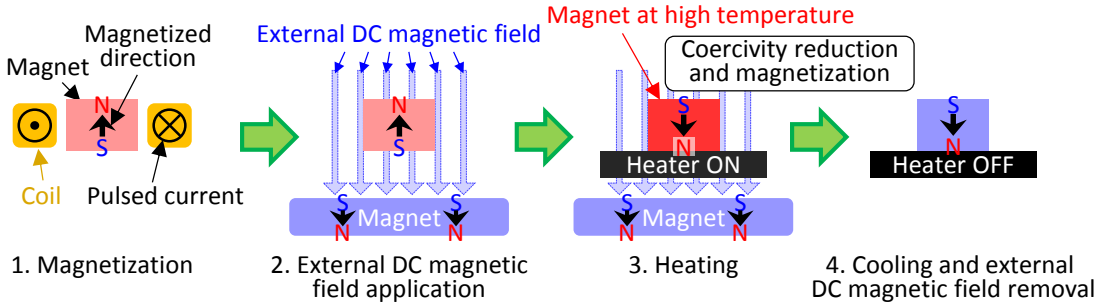


Fig. 3.8　Process flow of magnetization reversal assisted by heating

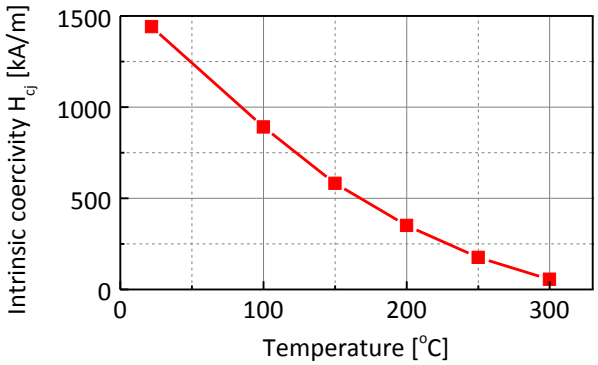


Fig. 3.9　Relationship between the sputtered magnet temperature and the intrinsic coercivity H_{cj}

スパッタ磁石[53]も図３．９に示すように，300℃程度に加熱することで固有保磁力 H_{cj} はほぼ零になる．そのため，この熱アシスト磁化反転を利用し，さらに，加熱領域を小さくすることで，微小領域の着磁の可能性がある．なお，この固有保磁力 H_{cj} は 4.0×4.0×0.20mm の石英基板上に成膜した厚み 4.5μm の磁石に対し，VSM を利用して測定した．

提案，検討するレーザアシスト微細着磁法のプロセスを図３．１０に示す．まず，熱アシスト磁化反転と同様，パルス着磁等で，スパッタ成膜した磁石材料を一方向（図中では上方向）に着磁し（１），その着磁とは逆向きの静磁場中に磁石を配置する（２）．その後，レーザを利用して局所的な加熱と磁化反転を起こすことで，目標の微細着磁パターンを形成する．このレーザを用いた局所的な加熱方法は，（ａ）マスク越しに大スポット径・高パワー密度なレーザの照射，（ｂ）小スポット，かつ，高パワー密度のレーザ走査の２種類が挙げられる．（ａ）はマスク，および出力の高いレーザ光が必要となるが，バッチ処理可能でスループットが高い．（ｂ）は，安価な半導体レーザなどでプロセスを実現できるが，スループットは低い．これらは用途に応じて選択する必要があるが，本報では，既存のレーザマーカなどが転用できる（ｂ）の手法での微細着磁実現を目指す．

前項の微細パルス着磁では，微細な着磁領域に 3T 以上の大磁場を印加する必要があり，微細化が困難であった．しかしながら，本微細着磁法では，微小領域の加熱が重要な制御パラメータであり，スポット径が小さい高エネルギ密度のレーザを利用することで着磁微細化の可能性が十分にある．また，微細パルス着磁では着磁パターンがコイル形状に依存

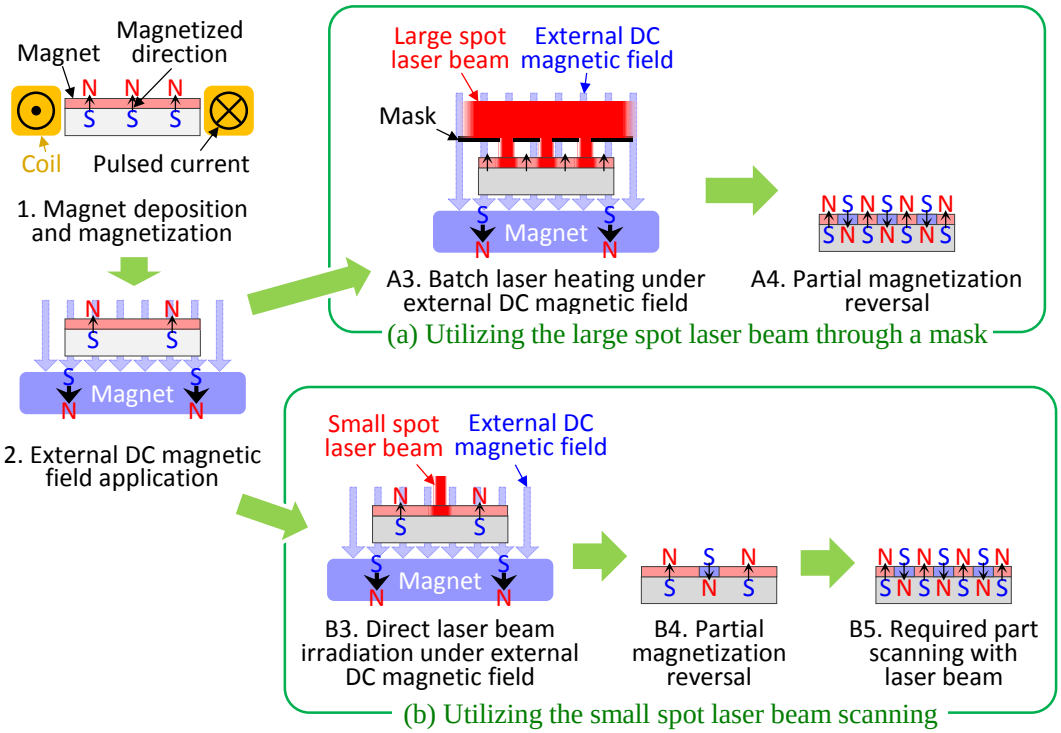


Fig. 3.10　Process flow of proposed micro magnetization assisted by laser heating

するため，パターンに制限があったが，本着磁法ではよりマスクパターンやレーザ走査軌跡を調整することで，複雑なパターン形成の可能性がある．

（２）目標印加磁場，目標加熱温度

レーザアシスト微細着磁に必要な印加磁場，加熱温度を調査する．本微細着磁では，１）加熱部の完全な磁化反転，および２）非加熱部の不可逆減磁回避が必要である．さらに，１）加熱部の完全な磁化反転には，１Ａ）高温状態での磁気飽和，および１Ｂ）その後の冷却中の不可逆減磁回避が必要である．冷却中の不可逆減磁は，キューリー点近傍における，急激な磁化 J の回復に伴う反磁界増加の影響が，固有保磁力 H_{cj} 回復の効果を上回った際に発生する．これに対し，本手法で調整可能なパラメータは，外部から与える静磁場の大きさと，加熱領域，加熱時間，加熱温度である．スパッタ磁石に対する微細着磁では，試行錯誤によるパラメータ決定ではなく，着磁実現が期待できる条件を予め調査した．

室温時，および加熱時の磁気特性を調べるため，スパッタ磁石の，22℃，および 300℃での減磁曲線を VSM により測定した．図３．１１に測定結果を示す．図中の Applied field は磁石全体に印加した磁場を表しており，反磁界補正をしていない．なお，試料には 4.0×4.0×0.20mm の石英基板上にスパッタ成膜した厚み 4.5μm の磁石を使用した．まず，２）非加熱部の不可逆減磁回避には，印加する逆磁場を 0.75MA/m（空気中 0.94T）以下にする必要がある．さらに，１Ａ）加熱部の磁気飽和は，300℃において，0.5MA/m（空気中 0.63T）の印加磁場により，反磁界の影響を最大限考慮しても，可能であることが確認できる．よ

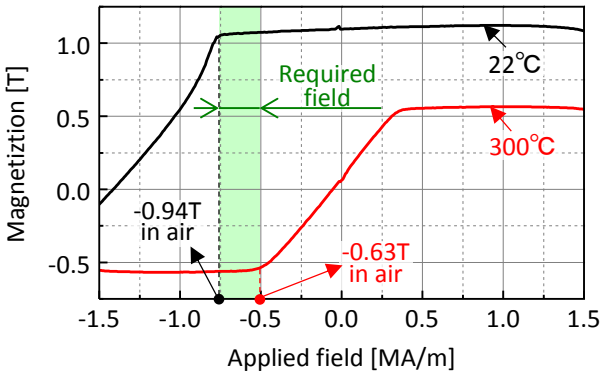


Fig. 3.11　Demagnetization curves of sputtered magnet at 22°C and 300°C

って，0.5~0.75MA/m（空気中 0.63~0.94T）の逆向きの静磁場を与えつつ，300℃に加熱するのが望ましい．一方，１Ｂ）冷却中の不可逆減磁は，印加する逆磁場が大きいほど回避しやすい．そこで，今回の目標印加磁場と目標加熱温度はそれぞれ，0.64~0.72MA/m（空気中 0.8~0.9T），300℃と決定した．

（３）レーザアシスト微細着磁システムの構築

目標印加磁場 0.64~0.72MA/m（空気中 0.8~0.9T），および目標加熱温度 300℃を実現できるシステムを構築する．

（３．１）レーザ加熱方法

本研究で使用するレーザマーカの外観を図３．１２に，その性能を表３．１に示す．レーザには，３次元でレーザ照射位置を制御できる YVO_4 レーザマーカ（MD-S9910A, Keyence Corp.）を使用する．本装置は，レーザ出力，Q スイッチ周波数を設定可能であり，また，デフォーカスによるレーザビームのスポット径調整も可能である．なお，レーザ出力は Q スイッチ周波数にも依存する．

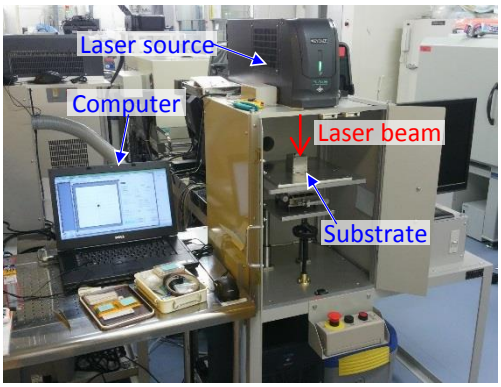


Fig. 3.12　Laser marker for the micro-magnetization

Table 3.1　Specifications of the laser marker

Manufacturer	Keyence Corp.
Model number	MD-S9910
Laser type	YVO_4
Wavelength	532 nm
Power	Maximum 6 W
Oscillation mode	Continuous wave, 1-400 kHz (Q-switch)
Pulse width	2 – 100 ns
Scanning area	120×120×42 mm
Depth of focus	±1mm (3%)
Scanning speed	Maximum 12 m/s

（３．２）レーザ加熱条件

本微細着磁におけるレーザ加熱では，磁石直下に配置される基板の材質が，加熱中の温度分布に大きく影響することが想定された．そのため，まず，目標温度である 300℃まで加熱が実現できる基板の選定を行い，その後，レーザ条件を決定する．

基板の選定，およびレーザ条件の決定には，非定常熱伝導解析を利用する．解析モデル，モデル条件，および物性値を図３．１３，表３．２，３．３にそれぞれ示す．モデル１～３は基板選定に，モデル４は基板選定後のレーザ条件決定に用いる．モデルの単純化のため，本来パルス光であるレーザはＣＷレーザと仮定し，等熱流束モデルとした．また，本来 Nd-Fe-B と Ta の積層構造であるスパッタ磁石は Nd-Fe-B 単層モデルとした．初期温度は 20℃とし，レーザ加熱面以外の面は断熱条件とした．

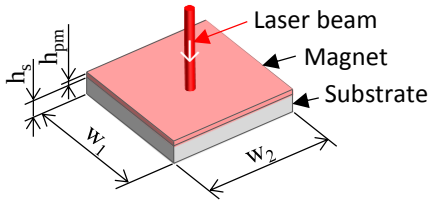


Fig. 3.13　Analytical model for investigating the heat conduction during the laser heating of sputtered magnet

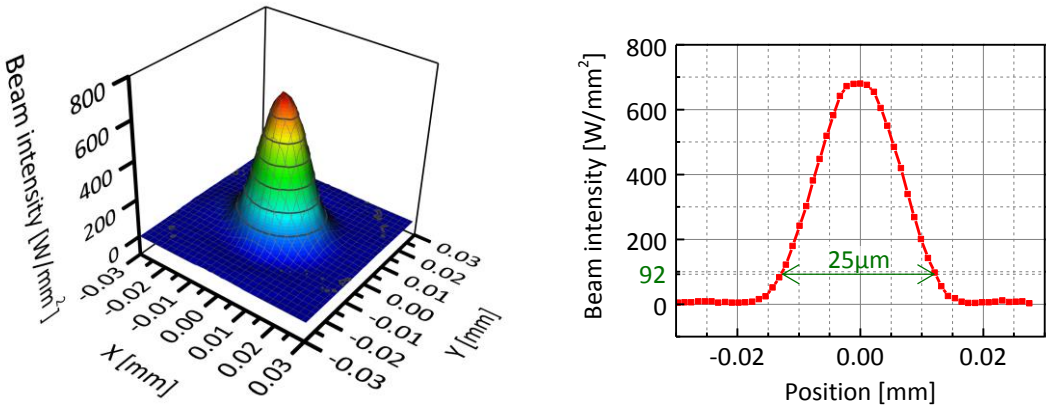
Table 3.2　Conditions of heat conduction analytical models

		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Heat source		Non-moving laser beam			Scanning laser beam (speed of 100 mm/s)
Laser beam	Power	0.21 W	2.1 W	0.21 W	Glass
	Absorptivity	50%			
	Spot diameter	25 μm			
Substrate		Silicon		Glass	
Initial temperature		20°C			
Boundary conditions	Laser heating area	Constant heat flux			
	Interface between magnet and substrate	No thermal contact resistance			
	Outside surface excluding laser heating area	Adiabatic			
Size	w_1	2 mm			0.5 mm
	w_2	2 mm			0.5 mm
	h_s	0.2 mm			0.2 mm
	h_{pm}	4.5 μm			4.5 μm

レーザ強度分布は図３．１４に示す測定値をそのまま利用した．測定には，パワーメータ（PD300-3W-V1, Ophir Optronics Solutions Ltd.），およびビームプロファイラー（BGP-USB-SP620, Ophir Optronics Solutions Ltd.）を使用した．装置設定は，出力 100%，Q スイッチ周波数 400kHz，デフォーカスなしとした．全体出力は 0.21W，出力が最大値の $1/e^2$ となるスポット径は 25μm であった．レーザの吸収率は，図３．１５に示す反射率の測定値から 50%とした．磁石は十分な厚みを有し透過しないと仮定している．測定にはダブルモノクロメータ式分光光度計（SolidSpec 3700DUV, 株式会社島津製作所）を使用した．測定条件は表３．４に示すとおりである．試料には 20×20×0.20mm の石英基板上に成膜した，全体厚み 4.5μm の磁石を使用した．なお，本試料は表面が厚み 100nm の Ta で覆われている．

Table 3.3　Physical properties related with heat conduction of sputtered magnet on substrate

	Magnet	Silicon	Glass
Thermal conductivity	9 W/(m･K)	124 W/(m･K)	1.35 W/(m･K)
Specific heat	500 J/(kg･K)	700 J/(kg･K)	710 J/(kg･K)
Density	7600 kg/m^3	2330 kg/m^3	2200 kg/m^3



(a) General view　　(b) Cross-section view

Fig. 3.14　Measured laser beam intensity distribution

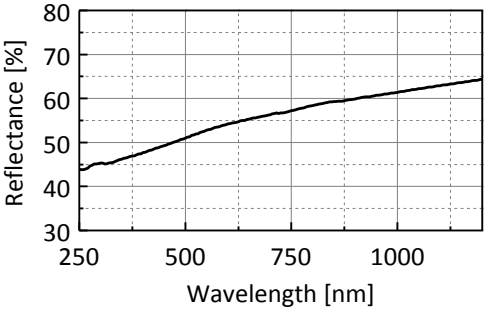


Fig. 3.15 Measured reflectance of the sputtered magnet

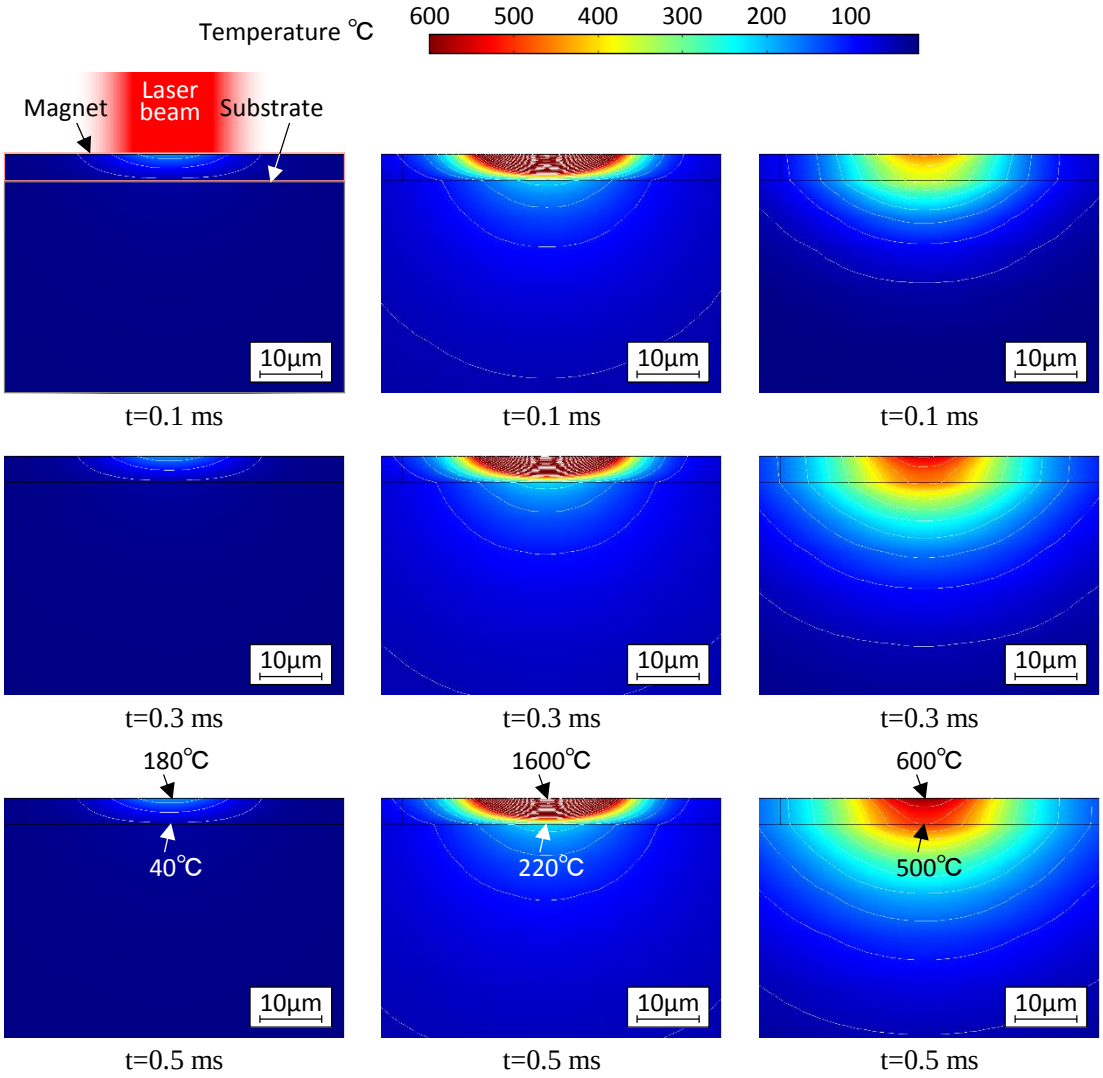
Table 3.4　Measurement conditions of the spectrophotometer

Manufacturer	SHIMADZU Corp.
Model number	SolidSpec 3700DUV
Photometric system	Double beam
Measuring beam	Specular reflection and diffuse reflection
Angle of incidence	8 deg.

（３．２．１）基板選定

解析モデル１～３を用い，基板選定を行う．本解析では，レーザは固定し，同じ場所を加熱し続ける．モデル１，２では基板にシリコンを使用し，それぞれ，0.21W，2.1W のレーザで加熱する．モデル３では基板に石英を使用し，0.21W のレーザで加熱する．シリコンと石英は，比熱と密度は同等であるものの，熱伝導率は約 100 倍シリコンの方が大きい．非定常熱伝導解析には汎用解析ソフト（COMSOL Multiphysics Ver. 4.3b, COMSOL AB）を使用した．総解析時間と時間ステップは，それぞれ 0.5ms，0.01ms とした．要素数は 204,280 であった．

計算した温度分布のうち，加熱を始めてから 0.1ms，0.3ms，0.5ms 時のものから，加熱部付近を拡大した断面図を図３．１６に示す．（ａ）シリコン基板を利用し 0.21W のレーザで



(a) Model 1
Base: Silicon, Power: 0.21W

(b) Model 2
Base: Silicon, Power: 2.1W

(c) Model 3
Base: Glass, Power: 0.21W

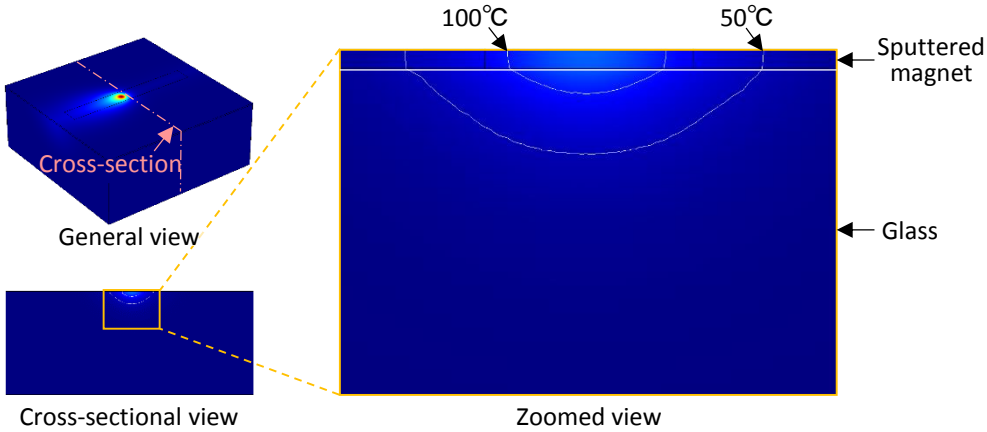
Fig. 3.16　Simulated temperature distribution for determining the substrate material

加熱したモデル１では，基板との境界付近の磁石の温度が上昇しておらず，0.5ms まで加熱を続けても変化がほとんど見られないことから，300℃までの加熱が困難であると言える．（ｂ）同じくシリコン基板を利用し，モデル１に比べて 10 倍の出力（2.1W）のレーザで加熱するモデル２でも，基板境界付近の磁石は 220℃までしか到達しておらず，不十分であり，逆にレーザ直下の表面付近では，Nd と Fe の融点を超える 1,600℃まで上昇している．以上より，シリコン基板を利用すると，最表面の磁石が破損するまで加熱しても基板境界付近の温度が 300℃を超えないため，本着磁法での利用が困難であるといえる．これは，シリコンの熱伝導率が非常に高いために，ヒートシンクの役割を果たしてしまっているためだと考えられる．逆に，熱伝導率の低い（ｃ）石英基板を使用した場合には，0.21W のレーザでも，基板との境界付近の磁石が十分に 300℃を超えており，レーザ直下の表面も比較的低い温度になっている．以上より，本微細着磁においては石英を磁石成膜基板に使用する．

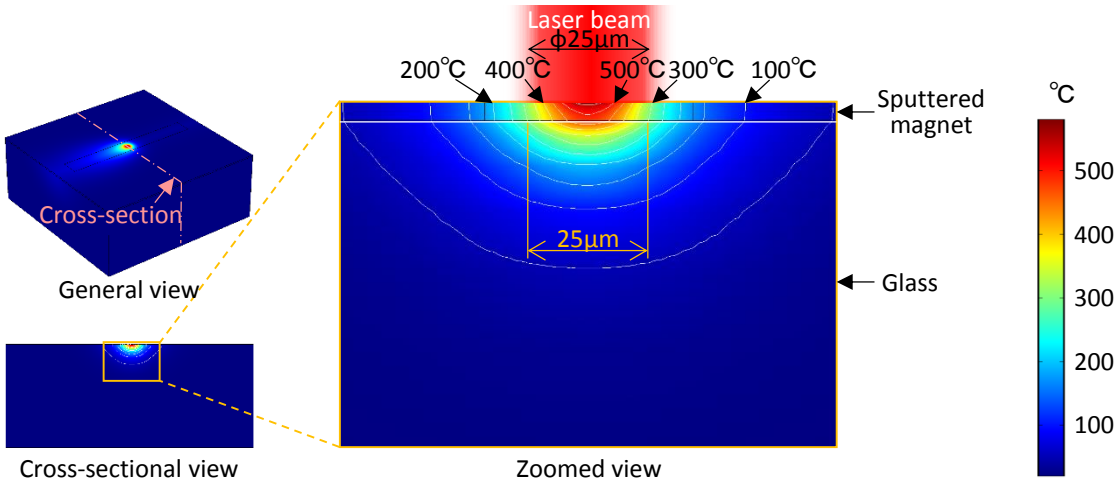
（３．２．２）レーザ加熱条件決定

モデル４を用いて，目標加熱温度である 300℃を超えるレーザ加熱条件を調査する．本モデルでは，成膜面に並行にレーザを走査し，磁石表面を加熱する．本非定常熱伝導解析にも汎用解析ソフト（COMSOL Multiphysics Ver. 4.3b, COMSOL AB）を使用した．総解析時間と時間ステップは，それぞれ 4ms，0.01ms とした．要素数は 299,370 であった．

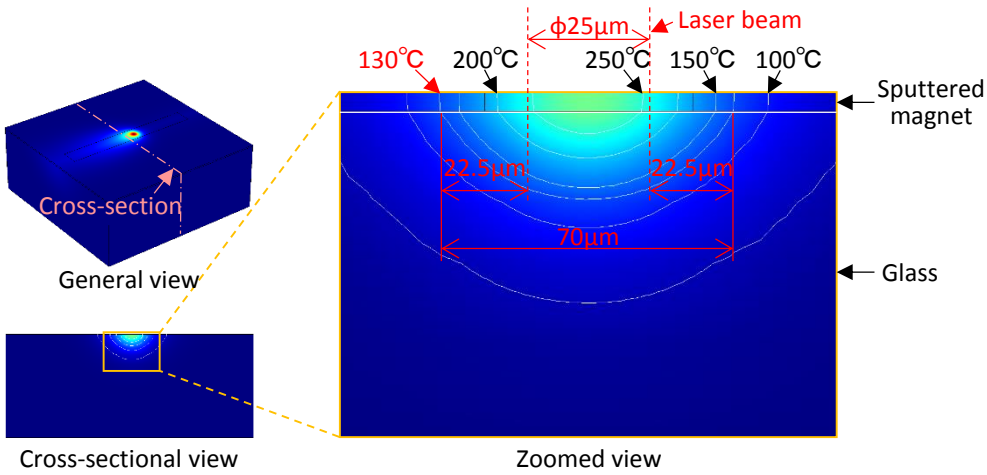
図３．１７に，解析を始めてから(a) 1.80ms, (b) 2.02ms, (c) 2.24ms だけ経過した状態での温度分布を示す．(b) 2.02ms は，図中に示す断面での中心付近の温度が最も高くなった瞬間であり，(a) 1.80ms と(c) 2.24ms はその前後の様子を示している．この結果から，本条件でレーザを直線走査することで，25μm の幅が 300℃を超えることが確認できた．後に行う実験では，この条件を利用する．



(a) t=1.80 ms



(b) t=2.02 ms



(c) t=2.24 ms

Fig. 3.17　Simulated temperature distribution for determining the laser power and its scanning speed

（３．３）静磁場発生源

静磁場発生源への要求として，1）目標印加磁場である 0.64~0.72MA/m（空気中 0.8~0.9T）を発生可能であること，２）その磁場の向きがほぼ一方向に揃っていること，および３）その磁場内に配置したスパッタ磁石に外部からレーザ光が照射可能であることが挙げられる．磁場の発生源としては，電磁石と永久磁石が挙げられる．電磁石は大電流を印加することで非常に大きな磁場を発生させることができるが，与える磁場が 1T 以下の静磁場であること，および発熱がなく磁石にレーザ加熱以外の温度変化をもたらさないことから，今回は永久磁石を用いての磁場発生を検討する．

設計した静磁場発生源を図３．１８に示す．10×10×30mm の焼結ネオジム磁石（NFB-N35,Magfine corp.）７個をハルバッハ配列し，中央に磁束を集める構造とした．発生磁場を，静磁場解析ソフト（Maxwell 3D Ver. 15, ANSYS Inc.）を用いて計算した．焼結磁石の磁気特性は，残留磁束密度 1.23T，保磁力 890kA/m とした．図３．１８中に示す断面での解析結果を図３．１９に示す．磁石を配置する位置において，0.8~0.9T の磁場発生，およびほぼ一方向に揃った磁束の流れを確認した．

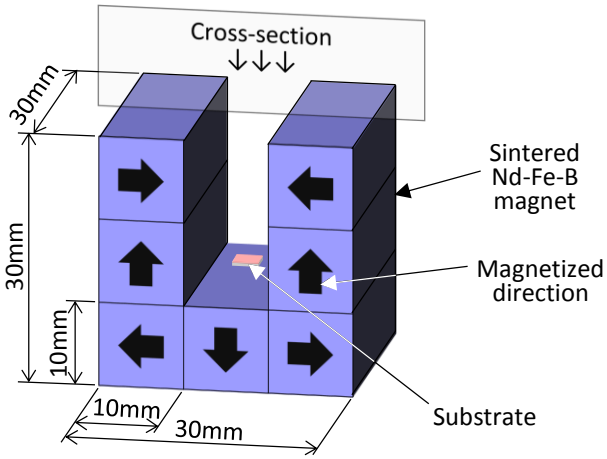
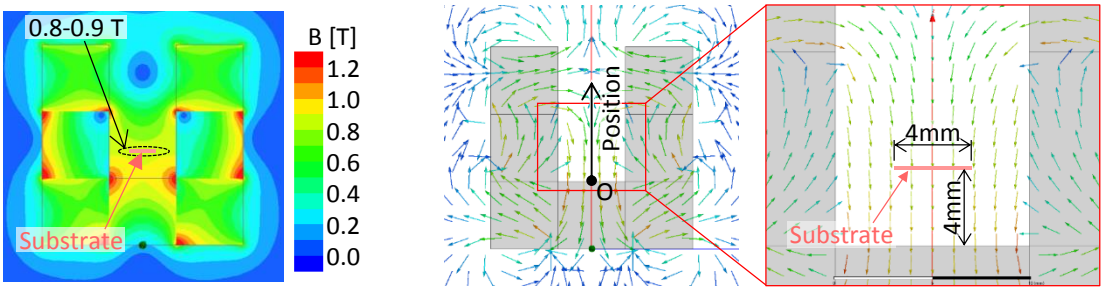


Fig. 3.18　Designed DC magnetic field generator for micro-magnetization of sputtered magnet



(a) Magnitude　　(b) Direction

Fig. 3.19　Simulated magnetic flux density distribution generated by designed DC magnetic field generator

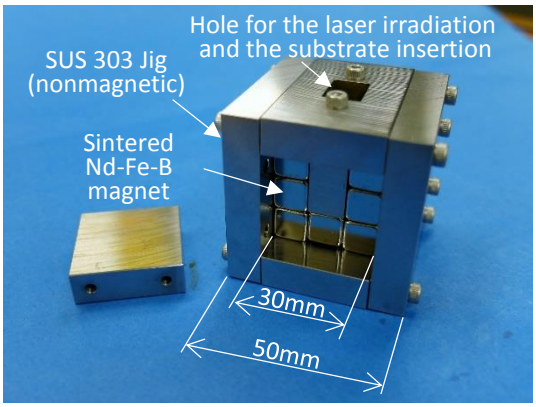


Fig. 3.20　Fabricated DC magnetic field generator for micro-magnetization of sputtered magnet

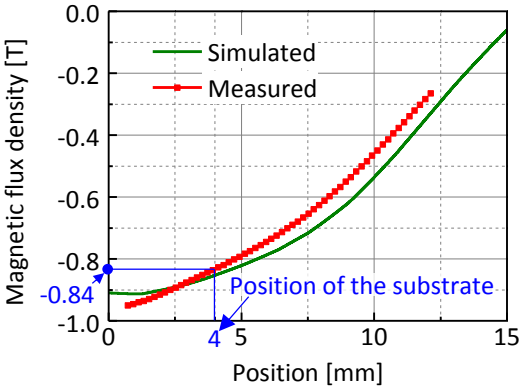


Fig. 3.21　Magnetic flux density distribution generated by DC magnetic field generator

実際に製作した静磁場発生源を図３．２０に示す．焼結ネオジム磁石を固定するため，非磁性ステンレス（SUS303）製の治具を製作した．製作した静磁場発生源内部の，垂直方向の磁場分布を，ホールプローブ（HAD61-2508-05-T，F.W.BELL）にて測定した．図３．２１に測定結果と解析値の比較を示す．図中の Position は図３．１９中に示す下段中央に配置した磁石上面からの垂直方向の距離を表している．測定値は解析値に比べ，磁気勾配がわずかに大きいことが確認できる．この差は組立誤差の影響と考えている．一方，磁石を配置する位置においては，解析値 0.85T に対し，概ね一致する 0.84T を計測し，目標磁場が得られることを確認した．着磁実験ではこの静磁場発生源を使用する．

（４）レーザアシスト微細着磁実験

（４．１）幅 100μm の短冊状微細着磁

構築したレーザアシスト微細着磁システムを用いて，まず，図３．２２に示す 100μm 幅の短冊状の微細着磁を目指す．レーザ加熱により磁化反転する領域は明らかになっていないため，この着磁を実現するレーザ軌跡を実験的に探索する．今回調査するレーザ軌跡Ａ，Ｂ，Ｃを図３．２３に示す．熱伝導解析より一回の直線走査で幅 25μm の領域が目標加熱温度である 300℃以上に加熱できることを確認していたため，レーザ軌跡Ａ，Ｂ，Ｃにおいて，300℃を超える領域はそれぞれ，幅 95μm，65μm，55μm と考えられる．部分的にレーザが

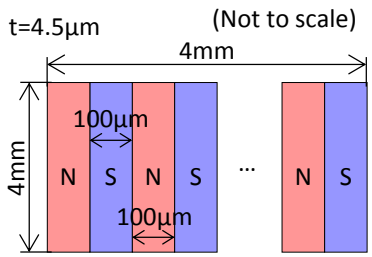
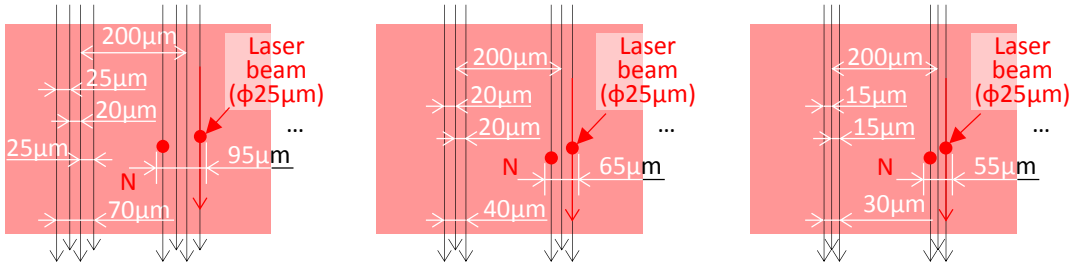


Fig. 3.22　Target micro-magnetization for sputtered magnet



(a) Trajectory A　(b) Trajectory B　(c) Trajectory C

Fig. 3.23　Tested laser beam trajectories

オーバーラップするが，一回の直線走査ごとに磁石温度は十分に低下することが熱伝導解析から確認できているため，極端な昇温はないと考えられる．微細着磁実験には，4mm×4mm×0.20mm の石英基板にスパッタ成膜した厚み 4.5μm の Nd-Fe-B/Ta 多層膜を使用する．

微細着磁後の各試料に対し，着磁評価のため，磁場分布を測定し，理想的な着磁を模擬したシミュレーション結果と比較する．測定には，図２．１９で示した磁場測定セットアップを使用する．感磁面 50μm×50μm のホール素子で磁石表面から 100μm 離れた位置の，磁場分布面外方向成分を測定する．シミュレーションには，図３．２２で示した，厚み 4.5μm の試料が面外方向に理想的に多極着磁されたモデルを使用する．モデルの磁気特性は，残留磁束密度 B_r1.18T，保磁力 H_{cb}810kA/m とした．これは，成膜直後の試料に対し VSM で測定した値をそのまま用いている．

図３．２４に，各試料に対し測定した磁場分布とシミュレーション値の比較を示す．図３．２３（ｃ）で示した軌跡Ｃで着磁したものが，シミュレーション値と良く一致する結果となった．これにより幅 100μm の短冊状の着磁が実現したことが確認できる．着磁率は 91%であった．一方，軌跡Ａで着磁したものは，シミュレーション値と大きく異なる結果となっている．300℃以下の領域も磁化反転している可能性がある．

本着磁結果を，図３．１７で示した熱伝導解析を用いて考察する．本着磁結果より，一回の直線走査で幅 70μm の領域が磁化反転したと考えられる．このとき，磁化反転領域の端

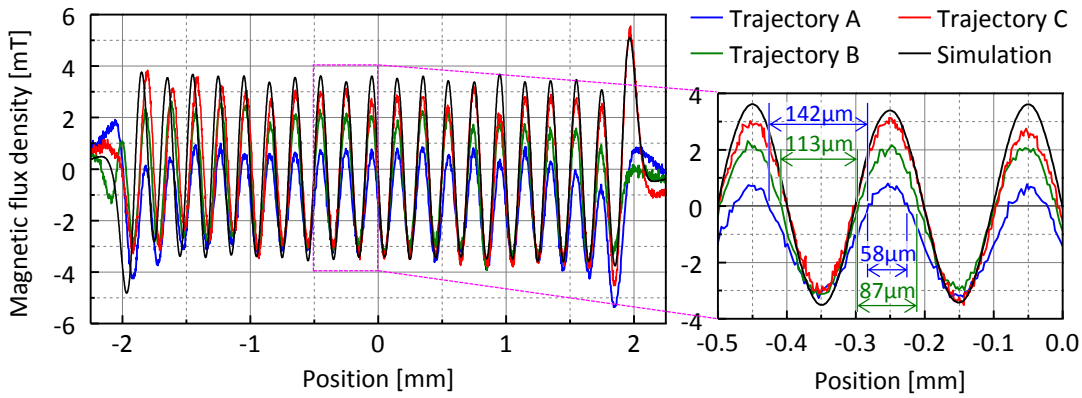


Fig. 3.24　Magnetic flux density distributions generated by micro-magnetized sputtered magnet

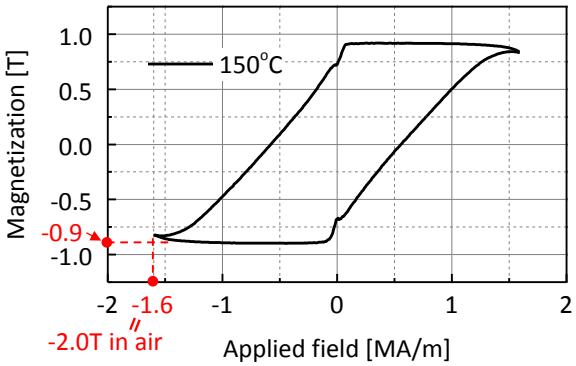


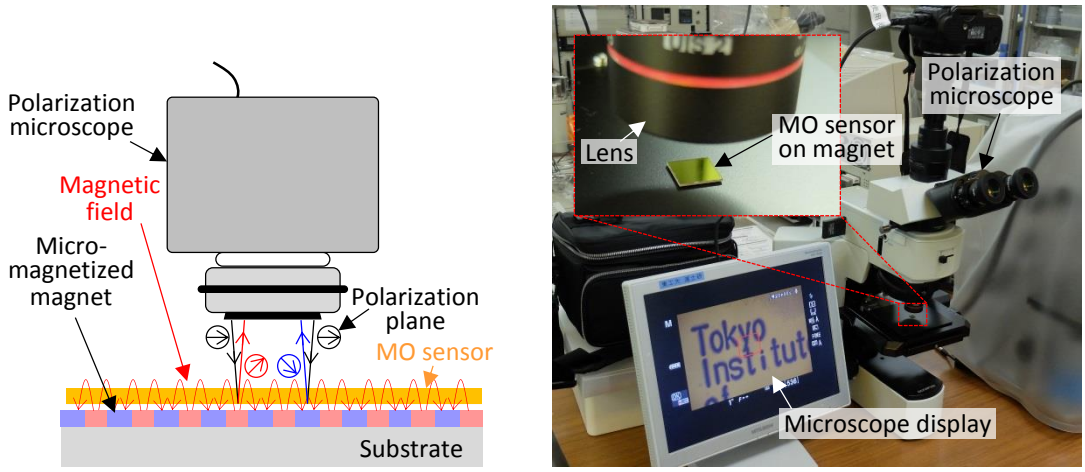
Fig. 3.25　Magnetization curve of sputtered magnet at 150°C

部は，図３．１７より，最大 130℃に昇温している．しかしながら，150℃での着磁には，図３．２５に示す磁化曲線から，0.88~1.6MA/m（空気中 1.1~2.0T）の磁場印加が，反磁界を考慮すると，必要であり，130℃の試料を，今回の印加磁場 0.67MA/m（空気中 0.84T）で着磁できるとは考えにくい．着磁向きが入れ替わる境界周辺に磁気飽和していない領域が存在する可能性があり，着磁状態の詳細な調査が必要である．

（４．２）微細，複雑形状の微細着磁

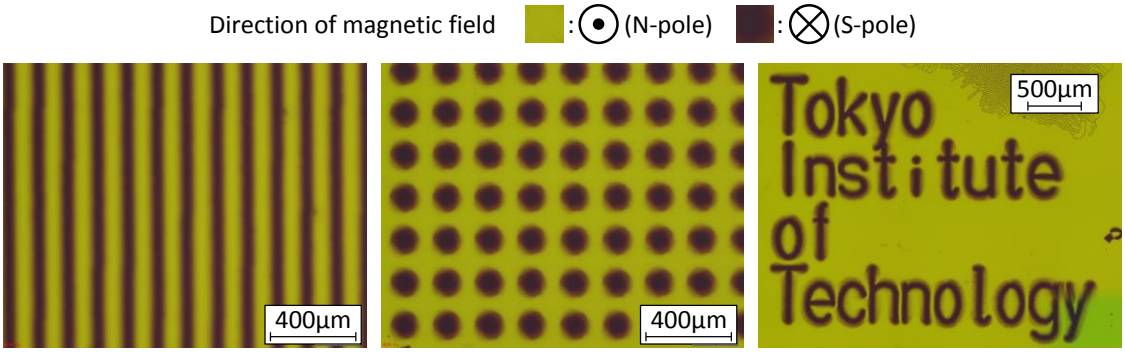
レーザ軌跡を変更することで，より微細な着磁や，文字等の複雑な形状の着磁を検討する．まず，前述の微細着磁により，幅 70μm が着磁可能な最小幅と考え，140μm ピッチでレーザを直線走査する．また，100μm 幅のドットパターン，および文字状の着磁も検討する．レーザ軌跡以外の実験条件は，全て幅 100μm の短冊状着磁実験と同一とした．

実験で得た試料の着磁パターンを，磁場観察により定性的に評価する．磁場観察には，磁気光学効果の一つであるファラデー効果 [86]を利用する．図３．２６に観察システムを示す．磁気光学センサ（MO sensor Type A，Matesy GmbH）を磁石の上に配置し，その上から



(a) Schematic graph　　(b) Photograph

Fig. 3.26　Magnetic field observation setup utilizing Faraday effect



(a) Striped pattern, with 70 μm width　(b) Dot pattern, with 100 μm width　(c) Letter pattern

Fig. 3.27　Observed magnetic field generated by micro-magnetized sputtered magnet

直線偏光を入射する．磁場中の磁気光学センサに入射した直線偏光は，旋光しつつ透過するが，下面はミラーになっており，反射して戻ってくる．その過程で，直線偏光の偏光面は磁石からの発生磁場に依存して回転するため，その回転を観察することで，磁場を可視化することができる．直線偏光の照射，およびその旋光角の観察には，偏光顕微鏡（BX51，オリンパス株式会社）を使用する．観察した磁場を図３．２７に示す．概ね，目標とした磁場分布になっており，パルス着磁では実現困難な複雑な着磁を，レーザアシスト微細着磁で実現できることを確認した．

幅 70μm の短冊状微細着磁に関しては，磁場分布を定量的に評価する．測定には，２次元微小ホール素子アレイ[87]を使用する．100μm 幅短冊状着磁の評価に使用したホール素子が，感磁面 50μm 角，接近距離 100μm であったのに対し，本装置は，感磁面 2.7μm 角のホール素子が，7μm 間隔で 64×64 個（計 4096 個）集積化されたものであるため，磁場測定の分解能向上が期待でき，また，表面保護層の厚みも 8.4μm と小さいため，磁石表面に接近した測定も期待できる．使用するホール素子アレイを図３．２８に，測定イメージを図３．２９に示す．ホール素子アレイ上に，微細着磁した試料を裏返しにして配置する．

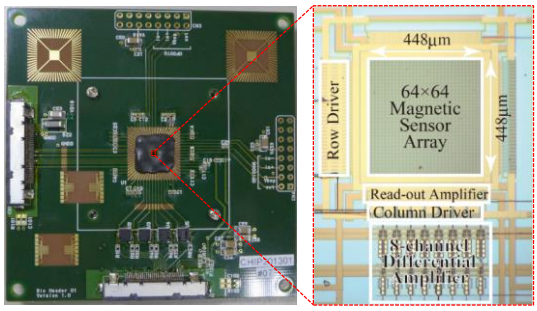


Fig. 3.28　Two-dimensional Hall element array

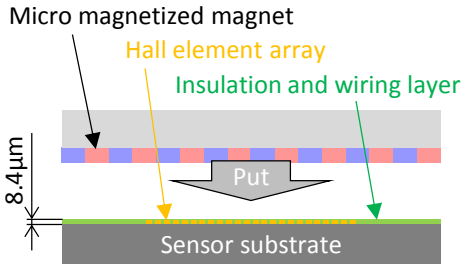
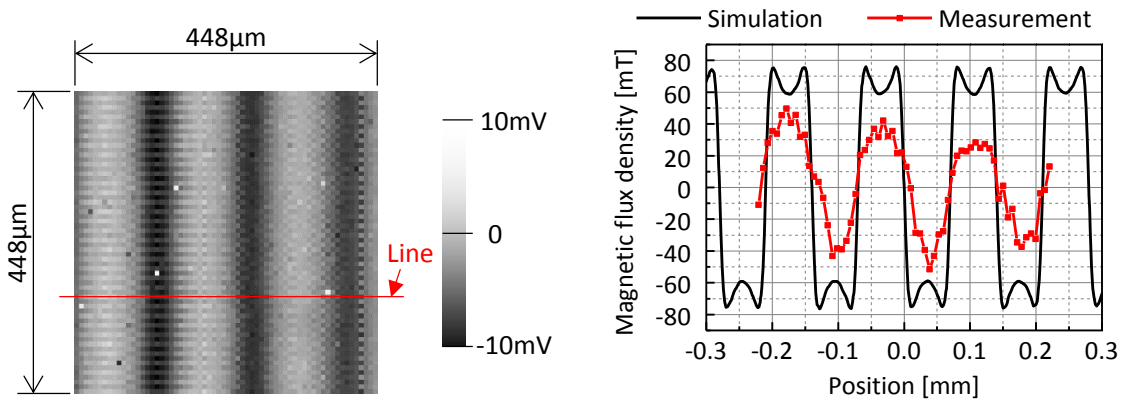


Fig. 3.29　Schematic view of magnetic field distribution measurement using two-dimensional Hall element array



(a) Two-dimensional distribution　　(b) Distribution along the line

Fig. 3.30　Magnetic field distribution generated by sputtered magnet micro-magnetized to produce 70μm wide stripe pattern

ホール素子アレイにて測定した２次元出力分布を図３．３０（ａ）に，その図中の赤線上の磁場分布と理想的な着磁を模擬したシミュレーション値の比較を（ｂ）に示す．概ね 70μm 間隔でＮ極とＳ極が繰り返す短冊状の微細着磁が実現したことを確認した．一方，ノイズが無視できないほど大きいことに加え，計測磁場は解析値に比べ，全体的に小さくなった. 埃等の影響で感磁面－試料間の距離が 8.6μm よりも大きくなっている可能性がある.

（５）考察

未公表部

（５．２）厚みの大きい磁石に対してのレーザアシスト微細着磁

未公表部

３．３　ＰＬＤ磁石の微細着磁

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

３．４　等方性ボンド磁石の微細着磁

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

３．５　焼結ネオジム磁石の微細着磁

前節までは，厚み数～数十μm の磁石に対する微細着磁を検討した．本節では，厚み数百μm の焼結ネオジム磁石の微細着磁を検討する．レーザアシスト微細着磁を利用するが，今回は，レーザ加熱時の磁石間の断熱のため，焼結磁石へ複数の溝を設ける方法を検討する．

（１）焼結ネオジムの微細着磁概要

今回提案する焼結磁石用のレーザアシスト微細着磁の概要を図３．５０に示す．基板に接着した焼結磁石材料にスリットを加工し，一様着磁した後に，分割された磁石一つおきに，レーザで局所加熱する．前節までのレーザアシスト微細着磁と原理は同一であるが，１）スリット加工を行う点，２）これに伴い基板への接着が必要な点，および３）外部磁場を印加しない点，が異なる．スリット加工は磁石間の断熱に必要であり，基板への接着はスリット加工後の個々の磁石部の固定のため必要である．接着剤には，レーザ加熱時の耐熱性を有することが求められる．また，外部磁場の代替として，加熱部周囲の非加熱磁石からの漏洩磁場を利用する．今回使用する焼結磁石は厚みが大きく，漏洩磁場が比較的大きくなる．狭ピッチで，周期的に磁化方向が反転する着磁には，外部磁石を配置不要とすることができ，システムを単純化できる可能性がある．

今回目標とする着磁パターンを図３．５１に示す．短冊状では，厚み 500μm の磁石に対する幅 500μm, ピッチ 650μm の着磁を, 市松模様では, 同じく厚み 500μm の磁石に対する，幅 1mm，ピッチ 1.15mm の着磁実現を目指す．それぞれ，アスペクト比は 1，0.5 となる．本節では，まず，短冊状の着磁実現を目指す．

今回の実験には, 縦横 10mm, 厚み 500μm の市販の異方性焼結ネオジム磁石材料（NFB-N35, Magfine corp.）を使用する．VSM により測定した残留磁束密度 B_r，保磁力 H_{cb} はそれぞれ 0.85T，610kA/m である．磁化容易軸は面外方向である．支持基板には，縦横 10mm，厚み 700μm のガラス基板（TEMPAX Float，Schott AG）を使用する．スリットによる磁石面内の断熱に加え，基板も低熱伝導率材料とすることで，昇温領域の制限を狙う．

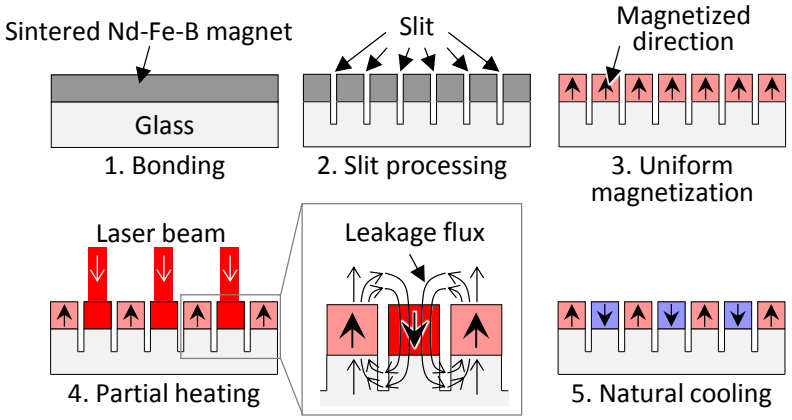
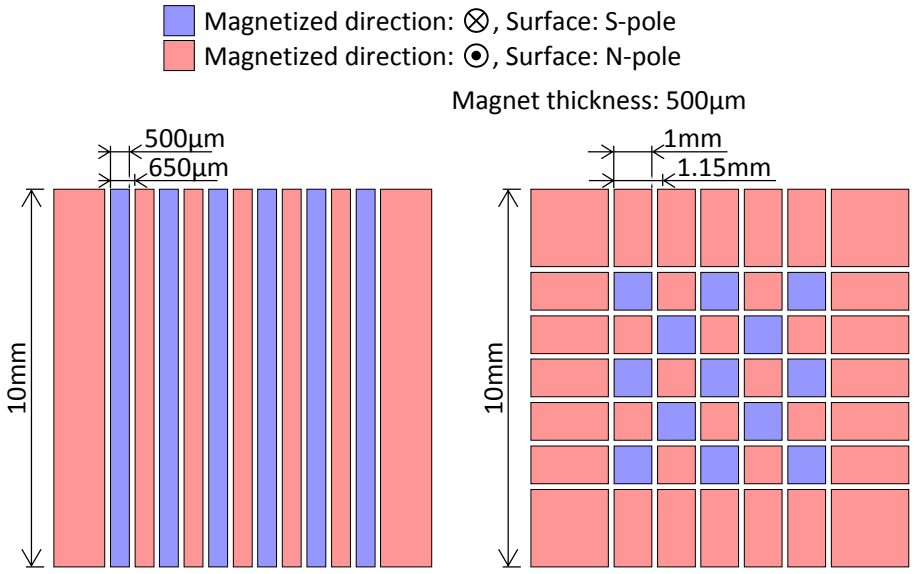


Fig. 3.50　Laser heat assisted micro-magnetization method for sintered magnet



(a) Stripe pattern　　(b) Chessboard pattern

Fig. 3.51　Target micro-magnetization for sintered magnet

（２）目標加熱温度の決定

まず，焼結ネオジム磁石の非加熱部から，加熱部に印加される磁場の大きさを磁場解析により調査する．解析モデルを図３．５２に示す．目標とする着磁パターンから非加熱部のみを抜き出した２次元モデルとなっている．解析には静磁場解析ソフト（Maxwell 2D ver. 15, ANSYS Inc.）を使用した．解析した磁場分布の面外方向成分を図３．５３に示す．加熱部には，最も弱い部分でも，0.18T 程度の磁場印加が可能であることを確認した．

目標加熱温度を決定するため，VSM により，試料を 200℃，300℃に加熱した状態の磁化曲線を測定した．測定結果を図３．５４に示す．200℃においては，印加磁場-140kA/m（空気中-0.18T）では磁気飽和困難なことが確認できる．一方，300℃においては，ほぼ磁性が失われており，さらなる加熱による効果がほぼないことが確認できる．そこで，今回の目標加熱温度を 300℃とする．

（３）焼結ネオジム磁石の微細着磁方法

（３．１）接着方法

焼結ネオジム磁石材料のガラス基板への接着方法を検討する．本接着は，レーザ加熱時も維持される必要がある．そのため，１）300℃以上の耐熱性を有し，２）界面での熱応力

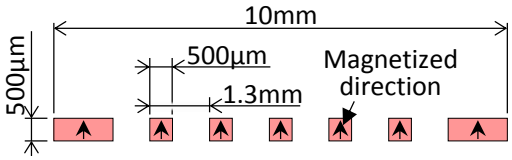


Fig. 3.52　Analytical model for investigating the magnetic field applied to the heating part

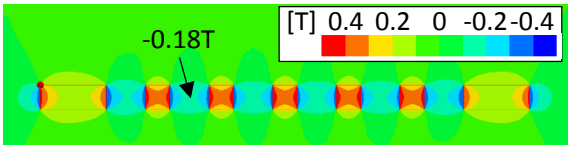


Fig. 3.53　Simulated vertical magnetic flux density distribution generated by non-heated part

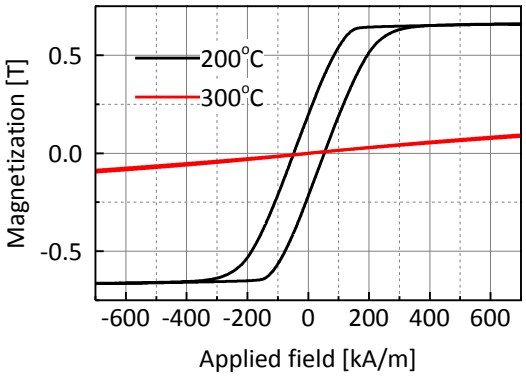


Fig. 3.54　Magnetization curves of sintered Nd-Fe-B magnet at 200°C and 300°C (demagnetization field is corrected)

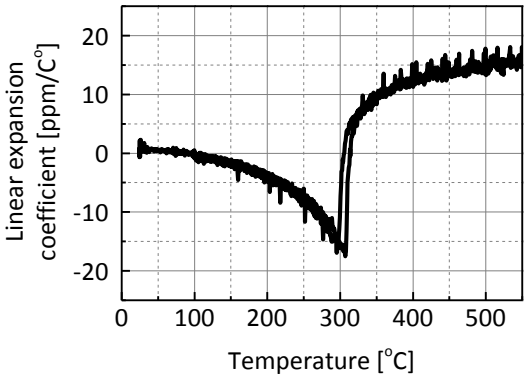


Fig. 3.55　Linear expansion coefficient parallel to the axis of hard magnetization of sintered Nd-Fe-B magnet

による剥離を防止可能であることが求められる．まず，熱応力の程度を調査するため，焼結ネオジム磁石の磁化困難軸方向の線膨張係数を測定する．試料には今回使用する焼結磁石材料と同等の組成を有する寸法 20mm×5 mm×3 mm のものを使用した．本試料の磁化容易軸は 3mm 方向であり，測定はこれに直交する 20mm 方向で行った．測定には，熱分析装置（Thermo plus EVO2 /TMA8310，Rigaku Corp.）を用いた．測定結果を図３．５５に示す．室温から 300℃まででは，焼結磁石材料の線膨張係数は-17～0ppm/℃であり，ガラスの値 3.3 ppm/℃[90]とは大きな差がある．界面における熱応力が大きくなる可能性がある．

今回は，ポリイミド樹脂による接着を検討する．ポリイミド樹脂は，400℃程度の耐熱性を有するため [91]，レーザ加熱時にも破損しないと考えられる．また，バッファー層として役割を持たせることで，磁石材料-ガラス界面の熱応力緩和を狙う．本実験では，ポリイミド前駆体（PW-1000，東レ株式会社）を磁石材料とガラス両方の片面に，1,600rpm で 30 秒スピンコートし，115℃で 3 分間プリベイクした後，荷重 1N，温度 170℃で 30 分間熱圧着することで接着した．なお，予備実験において，陽極接合 [92]（540℃，600V）やポリイミド両面テープ（760H #25, 寺岡製作所, シリコーン粘着層入），セラミック接着剤（Resbond940LE, Cotronics Corp.，石英ベース）を検討したが，それぞれ，接合直後の冷却中，レーザ加熱中，スリット加工中に剥離した．

（３．２）加熱方法

（３．２．１）熱伝導解析モデル

レーザ加熱条件，および断熱用のスリットの深さを，非定常熱伝導解析を用いて決定する．解析モデルとモデル条件を，それぞれ図３．５６，表３．８に示す．ポリイミドを用いてガラスに接着した焼結磁石をレーザで加熱するモデルとした．モデルの単純化のため，本来パルス光であるレーザはＣＷレーザと仮定し，等熱流束モデルとした．また，熱伝達や熱輻射の影響は十分小さいと仮定し，今回は考慮していない．初期温度は 20℃とし，レ

ーザ加熱面以外は断熱条件とした．各物性値は表３．９に示すとおりである．モデル１～３を用いてスリットの深さを決定し，モデル３～４を用いてレーザ走査条件を決定する．レーザの吸収率は，図３．５７に示す反射率から決定した．測定条件は表３．２で示したスパッタ磁石に対する測定と同一とした．

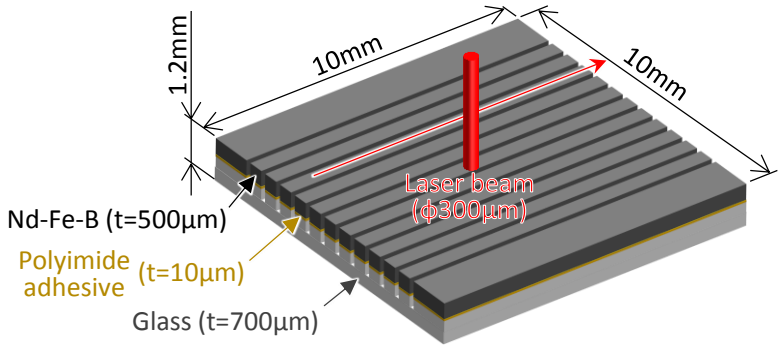


Fig. 3.56　Heat conduction analytical models for laser heating of sintered magnet

Table 3.8　Conditions of heat conduction analytical models for laser heating of sintered magnet

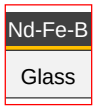
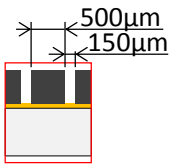
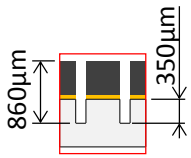
Model	1	2	3	4
Geometry				
Laser power	1.8 W			0.9 W
Intensity distribution	Gaussian distribution of ϕ300 μm in spot diameter			
Absorptivity	90%			
Scanning speed	100 mm/s			1.67 mm/s
Number of scanning	60 times by intervals of 2.6 ms			1 time
Boundary conditions	Laser heating area: Constant heat flux Material interfaces: No contact resistance Other surfaces: Adiabatic			
Initial temperature	20°C			

Table 3.9　Physical properties related with heat conduction of sintered magnet on glass

	Magnet	Glass	Polyimide
Thermal conductivity	9 W/(m･K)	1.2 W/(m･K)	0.16 W/(m･K)
Specific heat	500 J/(kg･K)	900 J/(kg･K)	500 J/(kg･K)
Density	7,600 kg/m^3	2,200 kg/m^3	1,420 kg/m^3

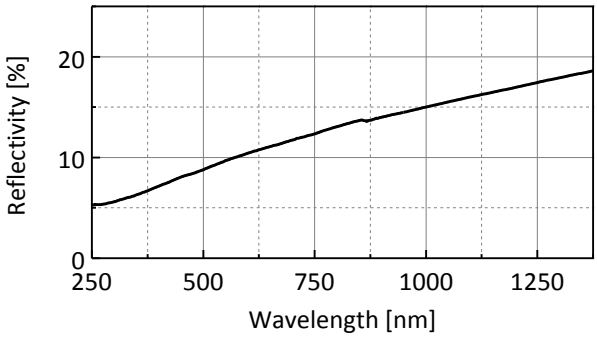
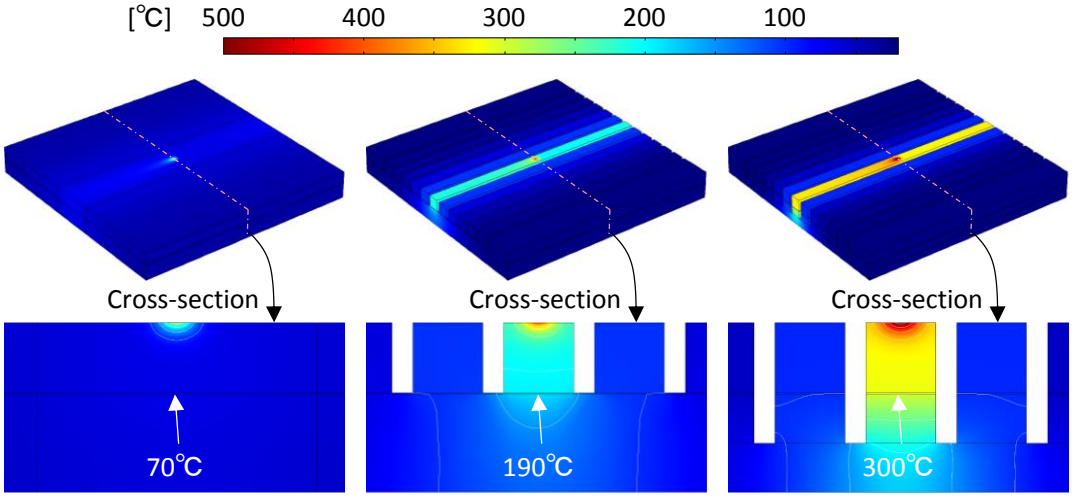


Fig. 3.57　Measured reflectance of the sintered magnet

（３．２．２）スリット深さの決定

まず，スリット深さを決定する．モデル１～３のスリット深さは，それぞれ，0μm（スリットなし），500μm（磁石底面まで），860μm（ガラスの中央まで）とした．レーザは，100mm/s の速度で，加熱面を 60 回連続走査するモデルとした．走査距離は 10mm とした．加熱時間は約 6s となる．これは磁石全体を均等に昇温させるためであり，効果はモデル３～４の比較で後述する．解析には，汎用解析ソフト（COMSOL Multiphysics Ver. 4.3b, COMSOL AB）を使用した．総解析時間と時間ステップは，それぞれ 8s，1ms とした．

モデル１～３を用いた解析結果のうち，もっとも中央断面付近が高温となった，t=6s の温度分布を図３．５８に示す．加熱部の温度が 300℃に到達したのはモデル３のみとなった．より深くスリットを加工することで，効率よく昇温可能なことが確認できる．本結果より，スリット深さは 860μm と決定した．



(a) Model 1　(b) Model 2　(c) Model 3

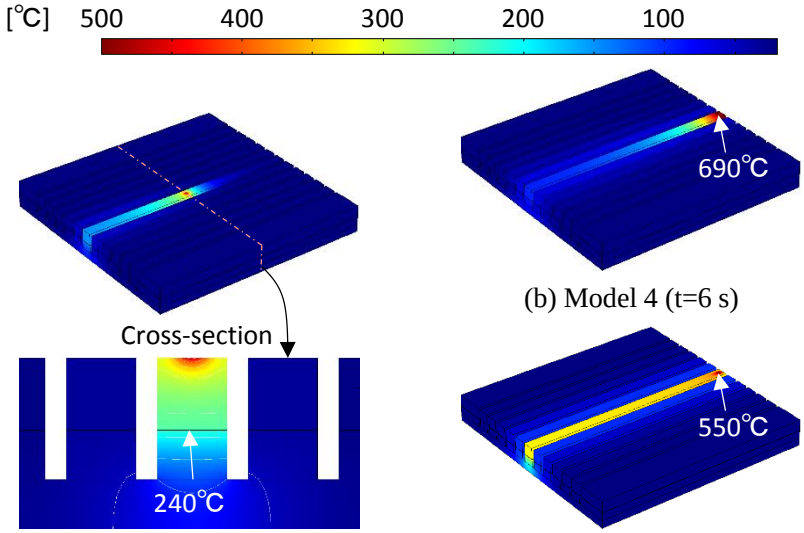
Fig. 3.58　Simulated temperature distribution at t = 6 s for determining the slit depth of sintered magnet

（３．２．３）レーザ走査条件の決定

レーザ走査条件を決定する．モデル３，４を使用する．モデル３は前述のとおり，高速レーザで連続走査するのに対し，モデル４では速度 1.67mm/s の比較的低速のレーザで１回走査する．本解析でも，汎用解析ソフト（COMSOL Multiphysics Ver. 4.3b, COMSOL AB）を使用し，総解析時間と時間ステップは，それぞれ 8s，1ms とした．モデル４で計算した温度分布を図３．５９に示す．中央断面が最も高温となった t=3s でも温度上昇は 240℃にとどまっており不十分であるのに対し，加熱終了直後の t=6s において端部は 690℃まで昇温する結果となった．均一な加熱になっておらず，昇温が不十分な領域が十分に着磁できない可能性がある．また，過加熱領域が焼結ネオジム磁石の時効処理温度である 600℃を超えることで，磁石組織が破壊される可能性がある．これに対し，モデル３で計算した温度分布は，端部においても 550℃までの昇温にとどまる結果となった．微細着磁実験では，モデル３の条件で，磁石を加熱する．

（３．２．４）スリット加工法

スリットの加工にはダイシングを使用する．ワイヤ放電加工は微細スリットの加工に適しているが，今回は絶縁材料であるガラスにも切り込みを入れるため適さない．直線状のスリット加工以外は困難なダイシングと異なり，エンドミルは任意形状のスリットを加工可能であるが，予備実験において，ガラスの溝加工のみで７時間要したため，生産性の高さが特徴の MEMS には不適と考えた．今回，ダイシング装置（DAD321, Disco corp.）に厚み 150μm のブレード（P1A861 SDC320N50BR846 54×0.15×40，Disco corp.）を取り付けてスリットを加工した．加工条件は，回転数 20,000rpm，送り速度 2.0mm/s，スリット深さ 860μm，走査間隔 650μm とした．



(a) Model 4 (t=3 s)　(b) Model 4 (t=6 s)　(c) Model 3 (t=6.15 s)

Fig. 3.59　Simulated temperature distribution for determining the laser scanning conditions for micro-magnetization of sintered magnet

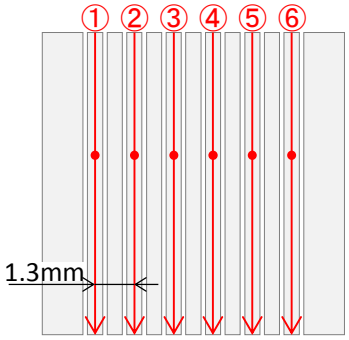


Fig. 3.60　Laser scanning part to produce stripe magnetization pattern on a sintered magnet

（３．３）焼結ネオジム磁石の微細着磁実験

スリット加工後の試料に対して，レーザ加熱を行う．レーザ走査箇所を図３．６０に示す．図中の①②…⑥の順に加熱していく．レーザ条件は，前述の熱伝導解析に用いたモデル３と同様とし，各加熱箇所を 100mm/s の速度のレーザで 60 回走査する．

（４）焼結ネオジム磁石の微細着磁評価

微細着磁後の試料，および加工したスリットを，それぞれ図３．６１，３．６２に示す．基板からの剥離や大きなチッピングなく微細着磁が完了したが，レーザ照射箇所に白い焼け跡のようなものが観察された．極度な昇温や，ダイシング時の応力は，磁石の磁気特性を低下させる可能性がある．そのため，微細着磁後の試料，および接着前の試料に対し，VSM を用いて減磁曲線測定を行った．結果を図３．６３に示す．両者に大きな差はなく，一連のプロセスが磁気特性に与える影響が十分小さいことを確認した．

微細着磁前後の発生磁場分布を評価する．図２．１９で示したセットアップを用いて，感磁面 50μm 角のホール素子で試料表面から 100μm 離れた位置の面外方向磁場分布を測定し，シミュレーション値との比較を行う．シミュレーションには，図３．５１（ａ）で示したモデルを使用し，磁気特性には図３．６３で示した無加工磁石の減磁曲線をそのまま用いた．計算には３次元静磁場解析ソフト（Maxwell 3D ver. 15, ANSYS Inc.）を使用した．

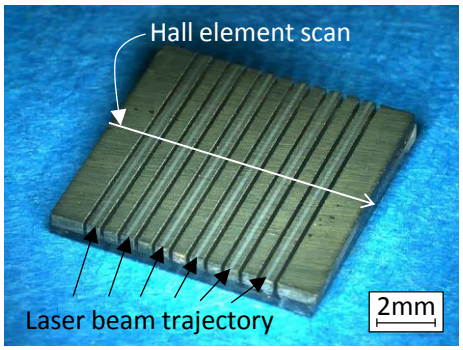


Fig. 3.61　Micro-magnetized sintered magnet, striped pattern of 500 μm in width

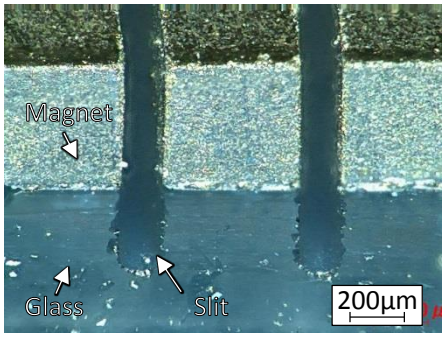


Fig. 3.62　Machined slits for micro-magnetization of sintered magnet

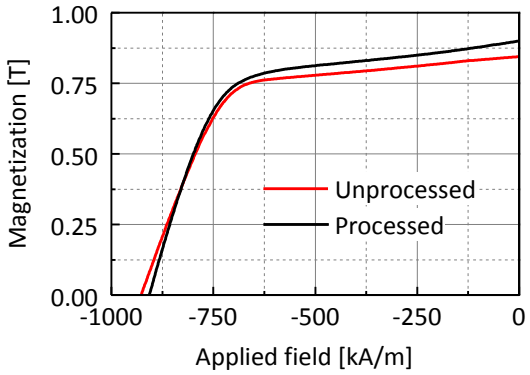


Fig. 3.63　Demagnetization curves of processed and unprocessed sintered magnets

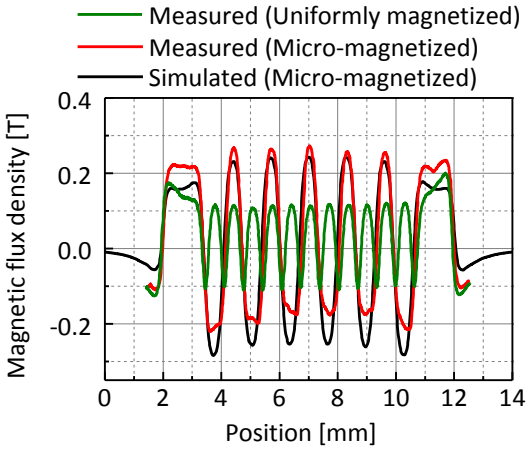


Fig. 3.64　Magnetic flux density distributions generated by uniformly-magnetized and micro-magnetized sintered magnets, striped pattern of 500 μm in width

測定結果，および解析結果を図３．６４に示す．微細着磁により発生磁場が大きくなっていることが確認できる．これは，反磁界低減の効果と考えられる．また，微細着磁した試料からの測定磁場は約 0.48T(p-p)であり，着磁率は 90%であった．概ね，目標とした着磁が実現したことが確認できる．一方，部分的に測定値がシミュレーション値を上回っている．これは，今回シミュレーションに利用した磁気特性が，試料全体の平均値であることに起因している可能性があり，今後，詳細に調査する必要がある．また，加熱順により加熱部に与えられる磁場にバラツキが生じるため，着磁に影響を与えている可能性があり，今後調査が必要である．

同様の手法で，図３．５１（ｂ）で示した，市松模様の着磁を検討する．短冊状と同様の条件で接着し，切り込み位置のみ変更してスリット加工した試料に対し，図３．６５で示す位置に①②…⑫の順でレーザを照射する．レーザは定点照射とし，スポット径と加熱時間を，それぞれϕ300μm（装置設定-96），6s と短冊状着磁と同等にした．これに合わせ，300℃程度の昇温を実現するため，レーザ出力を 0.36W に下げた．

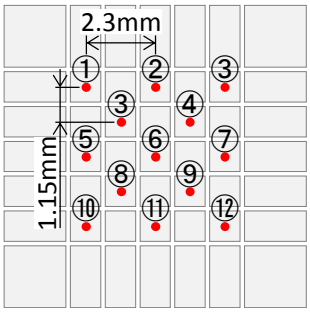


Fig. 3.65　Laser heating part to produce chessboard magnetization pattern on a sintered magnet

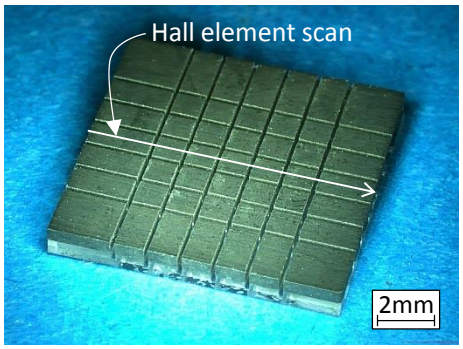


Fig. 3.66　Micro-magnetized sintered magnet, chessboard pattern of 1 mm in width

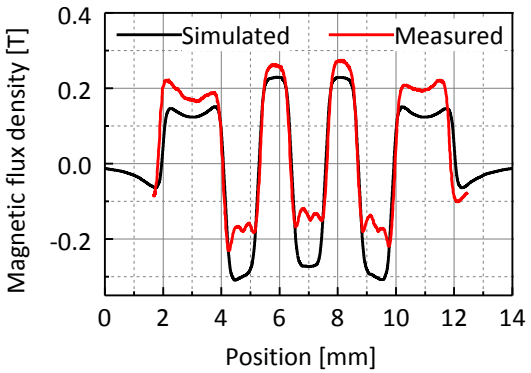


Fig. 3.67　Magnetic flux density distributions generated by micro-magnetized sintered magnets, chessboard pattern of 1 mm in width

市松模様に微細着磁した試料を図３．６６に示す．試料の大きな破損は観察されなかった．本試料に対し，図中の矢印で示す位置の磁場分布を短冊状着磁試料に対して行ったものと同じ手法で測定し，シミュレーション値と比較した結果を図３．６７に示す．解析モデルには図３．５１（ｂ）を利用し，磁気特性と解析ソフトは短冊状着磁のシミュレーションで用いたものと同一とした．測定磁場はシミュレーション値の８～９割となり，不完全ではあるものの，市松模様の着磁実現を確認した．

３．６　結　言

本章では，スパッタ磁石，PLD 磁石，等方性ボンド磁石，焼結磁石の微細着磁実現を目的とした．厚みの大きく異なる各磁石の，微細，かつ，アスペクト比１程度の着磁実現を目指した．このため，パルス着磁の微細化，および熱伝導を考慮したレーザアシスト微細着磁を検討した．

厚み数μmのスパッタ磁石に対しては，まず，通電時間短縮による最大電流値増加のため，時定数を小さくしたパルス着磁を検討し，幅 500μm，着磁率 96%の短冊状の着磁を実現した．しかしながら，アスペクト比は 0.012 と小さく，また，着磁パターンがコイル配置に依存するため，さらなる微細化，および着磁形状の複雑化が課題となった．そこで，レーザで局所加熱し，固有保磁力 H_{cj} を低下させた部分を，外部から印加する静磁場により着磁するレーザアシスト微細着磁法を検討した．この際，スパッタ磁石のレーザ加熱が可能な，磁石成膜基板として石英ガラスを選定した．また，適切なレーザ条件の探索，および必要な磁場印加装置の設計，製作を行った結果，着磁率 91%，幅 100μm，アスペクト比 0.045 の短冊状の着磁を実現した．また，文字状の複雑な着磁も実現した．

未公表部

未公表部

厚み 500μm の焼結ネオジム磁石に対しても，磁石間断熱を利用したレーザアシスト微細着磁を検討した. 磁石間断熱にはダイシングで加工するスリットを利用した. 結果, 幅500μm, アスペクト比 1，着磁率 90%の短冊状の微細着磁，および幅 1mm，アスペクト比 0.5 の市松模様の微細着磁を実現した.

本章のまとめを表３．１０に示す．今後の課題は，各磁石に対する，さらなる着磁の微細化，着磁率の向上，および焼結磁石のスリット加工高速化とスリット不要な微細着磁の実現である．また，前章と本章で得た成果を利用した磁気 MEMS は未実現であり，次章で検討する.

Table 3.10　Summary of micro-magnetization of permanent magnets

Target magnet	Sputtered magnet		未公表部	Sintered magnet
	Anisotropic			Anisotropic
Method	Pulse magnetization	Laser assisted magnetization		Laser assisted magnetization with thermal insulation slit
Thickness (t)	6 μm	4.5 μm		500 μm
Width (w)	500 μm	100 μm		500 μm
Aspect ratio (t/w)	0.012	0.045		1
Magnetization rate	96%	91%		90%

第４章　微細着磁磁石を応用したＭＥＭＳ

４．１　緒　言

２章，３章では，希土類磁石の MEMS 適用に必要な微細加工，微細着磁の研究開発を実施した．本章では，これらの成果を組み合わせ，従来，一括処理困難な機械加工で製作したバルク磁石を利用していた磁気デバイスの MEMS 技術による製作を検討する．今回使用した磁石とその微細加工，微細着磁の特徴を表４．１にまとめる．使用する磁石は，応用デバイスの寸法，求められる発生力，およびその製造工程でさらされる温度に応じて，決

Table 4.1　Characteristics and processing properties of each magnet

	Magnetic property	Available thickness	Micromachining property	Micro-magnetization property
Sputtered magnet	High	<20μm	Possible	Possible (Small aspect ratio)
PLD magnet	Middle	<160μm	Possible	Possible
Bonded magnet	Low - Middle	>2μm	Easy	Possible (Incomplete magnetization)
Sintered magnet	High	>100μm	Not realized	Possible

Table 4.2　Relationship between suitable magnets and the applications

	Examples	Sputtered magnet	PLD magnet	Bonded magnet	Sintered magnet
small size, small force (~0.2 mN/mm^2)	mirror, switch	Good	Acceptable	Acceptable	Not good
middle size, middle force (0.2~0.5 mN/mm^2)	small speaker, small vibrator, small lens drive actuator for camera	Acceptable	Good	Good	Acceptable
large size, large force (0.5~2mN/mm^2)	speaker, vibrator, lens drive actuator for camera	Not good	Acceptable	Acceptable	Good
high temperature process (200~500℃)	anodic (metallic) bonding, soldering, thermal CVD, thermal diffusion	Acceptable	Acceptable	Not good	Acceptable

定される必要がある．以上の関係を整理したものを表４．２に示す．比較的大形で大発生力が求められるデバイスでは体積の大きい焼結磁石が，比較的小形なデバイスでは軽量なスパッタ磁石が利用でき，その中間では PLD 磁石やボンド磁石が利用できると考えられる．また，ボンド磁石は樹脂を含むため，磁石組み込み後に高温になる MEMS プロセスが必要なデバイスには不適である．

今回は，一例として，スパッタ磁石を利用したアクチュエータ実現を目指す．微細加工したものを利用したアクチュエータとして，これまでに，図４．１に示すマイクロリニアモータ [93]，面外方向駆動アクチュエータ [94]が実現されてきた．これらのアクチュエータでは，１．２．３項で示した，微細加工による反磁場の低減を利用し，発生磁場と駆動力を向上させている．これに対し，微細着磁を利用することで，さらなる駆動力の向上が期待できる．

また，前述のマイクロリニアモータでは，１）スパッタ磁石を含む可動スライダは MEMS 技術で製作されているが，ガイドは一括処理困難な機械加工により製作されたため，MEMS 技術の利用が限定的，２）駆動用コイルが一相のため，任意の位置での停止と始動を伴う位置決め駆動が困難，３）スライダ・ガイド間の摩擦低減が不十分，が挙げられた．そこで本章では，より高性能な MEMS リニアモータ実現を目的とし，１）微細着磁したスパッタ磁石の適用，２）全要素の MEMS 技術による製作，３）コイルの多相化によるスライダ位置決め駆動の実現，４）スライダ・ガイド間の摩擦低減，を目指す．

４．２　ＭＥＭＳリニアモータ

４．２．１　ＭＥＭＳリニアモータの提案

今回提案，製作する MEMS リニアモータの駆動原理を図４．２に示す．微細着磁したスパッタ磁石からの磁場と，コイル電流の間に発生する電磁力を利用する．コイルを固定することで，ローレンツ力の反作用力によりスパッタ磁石をＸ方向に駆動する．磁石の位置に応じて，コイルに適切な電流を与えることで，連続した駆動が可能となる．既報のリニアモータ [93]では１相しかコイルを用いなかったため，磁石位置に応じて駆動力が大きく変

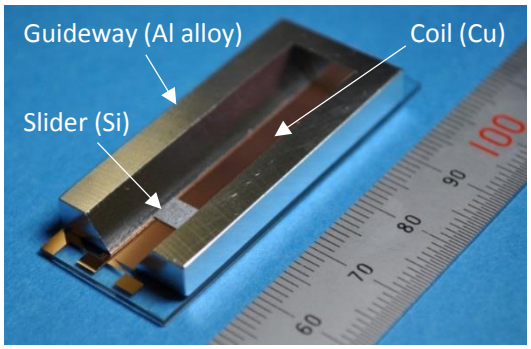
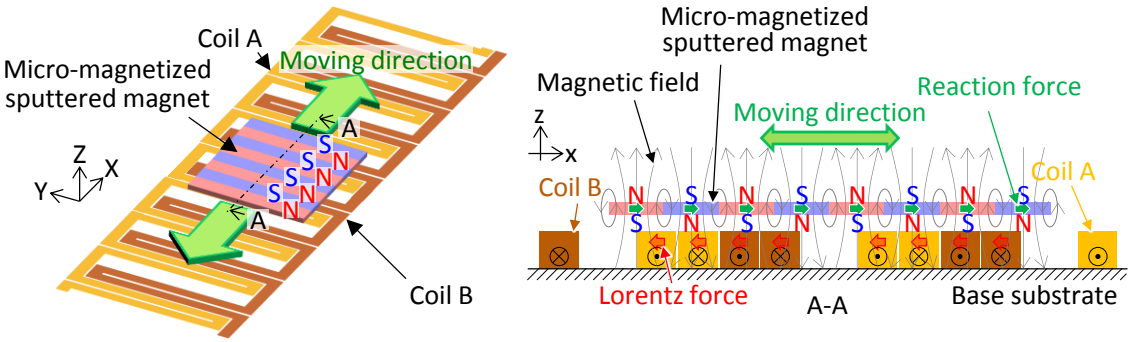


Fig. 4.1　Prototype micro linear motor [93]

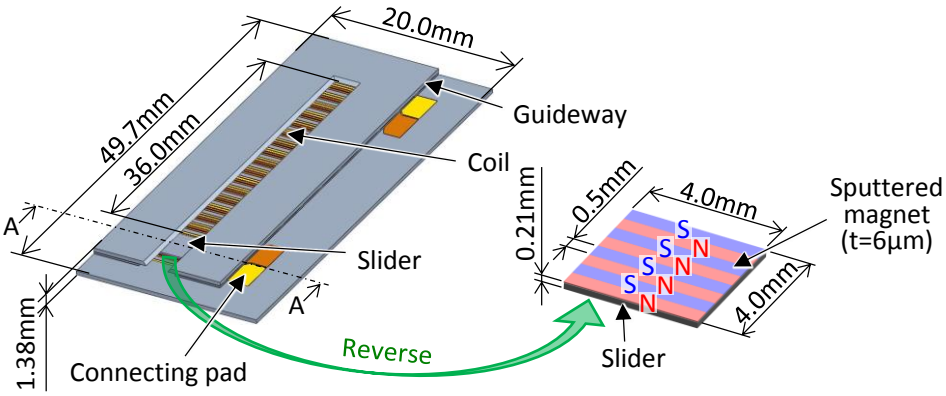


(a) General view of the force generation part　　(b) Simplified cross-sectional view of force generation part

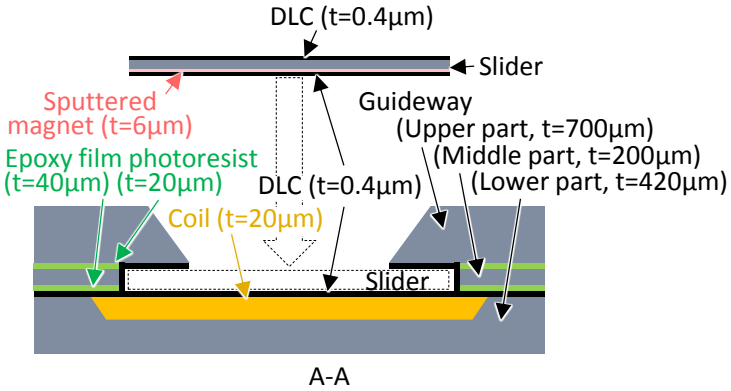
Fig. 4.2　Driving principle of MEMS linear motor

動し，場合により零になることもあった．今回，コイルを２相とすることで，駆動力が零となる位置をなくし，任意のスライダ位置における位置決めを目指す．

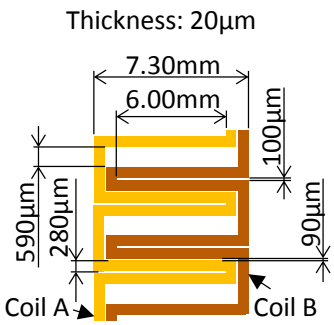
MEMS リニアモータの全体図，断面図，およびコイル形状を図４．３に示す．リニアモータは，スパッタ磁石を含むスライダ，コイル，ガイドから構成する．スライダには，



(a) General view of proposed MEMS linear motor



(b) Simplified cross-sectional view of proposed MEMS linear motor



(c) Coil dimensions

Fig. 4.3　Proposed MEMS linear motor

３．２．１項で 500μm 幅に微細パルス着磁した厚み 6μm のスパッタ磁石を含む, 4mm×4mm ×0.2mm のシリコン基板をそのまま利用する．ガイドは上段，中段，下段の３層のシリコン基板から構成し，上下左右からスライダを挟み込む構造とすることで，駆動方向以外のスライダの動きを制限する．上段に開口部を設け，駆動時にはここからスライダを観察する．コイルはガイド下段の表面に埋め込む構造とする．コイル２相化において，立体配線を伴う構造とすることでコイル体積を増やし駆動力を向上させることも可能であるが，今回は製作を容易とするため図４．３（ｃ）に示す平面構造とした．なお，印加可能な電流値増加のため, 既報のリニアモータ [93]のコイルと比較して，１）コイル厚みを 3μm から 20μm に増加させ，さらに，２）コイル支持基板をガラスから熱伝導率の高いシリコンに変更しヒートシンクの役目を持たせることで，コイルの昇温抑制を狙う．また，スライダの表裏面，およびガイドの摺動部に，ダイヤモンドライクカーボン（以下，Diamond-like carbon を略し DLC）を成膜することで，摩擦低減を狙う．

４．２．２　ＭＥＭＳ技術を用いたリニアモータ製作

（１）ガイド上中段製作

ガイドは上中段を製作後，コイルを含むガイド下段と接着することで完成させる．ガイド上中段の製作プロセスを図４．４に示す．まず，ガイド上段となるシリコン基板に，スライダ駆動観察用の開口部を形成する．厚み 3μm の窒化シリコン膜が形成された 46mm×14mm×0.70mm のシリコン基板上に，フォトレジスト（THB-151N，JSR corp.）をパターニングし，そのフォトレジストをマスクに，露出した窒化シリコンを RIE で除去する．反応ガスには SF_6 を用いる．レジストを除去後，窒化シリコンをマスクに，水酸化テトラメチルアンモニウム（TMAH）水溶液で，シリコン基板の結晶異方性エッチングを行い，最後に残った窒化シリコンを RIE で除去する．

次に，ガイド中段に，接着用のレジストを形成する．46mm×14mm×0.20mm のシリコン基板上にフィルムタイプのフォトレジスト（PerMX3020，デュポン MRC ドライフィルム株式会社）をラミネート後，ガイド上段と接着する部分のみ露光する．

ガイド上中段を接着する．両基板を重ねあわせ，荷重を印加した状態で，90℃，5 分間ベイクすることで，接着する．その後，ガイド中段側から，ダイシングにより，深さ 0.2mm の切り込みを入れ，フォトレジストを現像することで，ガイド中段の中央部を除去する．最後に，180℃，45 分間ベイクすることで，フォトレジストを固化し，プラズマ CVD を用いて厚み 0.4μm の DLC を成膜する．なお，DLC の成膜は，スライダ，およびコイルを含むガイド下段と同時に行った．製作したガイド上中段を図４．５に示す．概ね，目標とする寸法に，仕上がったことを確認した．

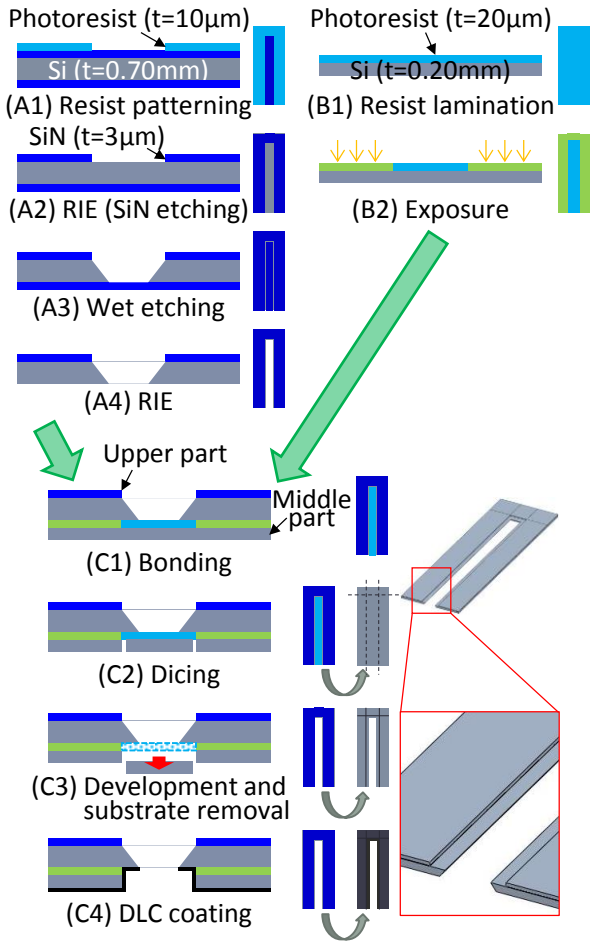
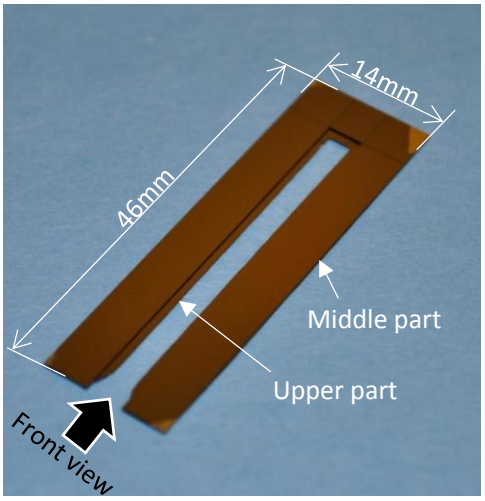
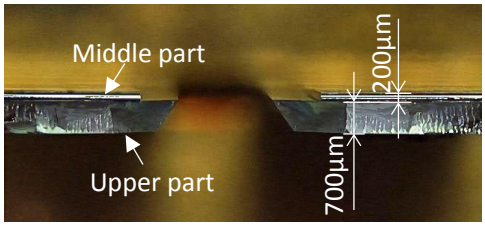


Fig. 4.4　Fabrication process of upper and middle parts of the guideway



(a) General view



(b) Front view

Fig. 4.5　Fabricated upper and middle parts of the guideway

（２）コイルを含むガイド下段製作

ガイド下段の製作プロセスを図４．６に示す．本プロセスでは，ガイド下段となるシリコン基板に溝を加工し，そこにコイルに埋め込む．まず，プラズマ CVD で表面に厚み 0.1μm の酸化シリコン膜を形成した 49.7mm×20mm×0.42mm のシリコン基板上に，フォトレジスト（OFPR-800LB，東京応化工業株式会社）をパターニングし，露出した酸化シリコンを RIE で除去する．反応ガスには SF_6 を用いる．レジスト除去後，酸化シリコンをマスクに TMAH 水溶液でシリコン基板の結晶異方性エッチングを行う．溝の深さは 20μm とした．加工した溝の上から，銅をスパッタにより成膜する．溝が十分埋まるよう，銅の厚みは約 25μm とした．なお，絶縁層，密着層として，酸化シリコンとクロムを，銅の前にスパッタ成膜している．溝以外の部分に成膜された銅を研磨により除去し，表面を平滑にする．図２．８で示したセットアップを用い，粒度#1,000，#2,000 の耐水研磨紙（S31SR-250-DN シリーズ，IMT co., ltd.）を用いて荒削りした後に，粒径 3μm，1μm のダイヤモンドスラリー（S10SG-P05-AS シリーズ，IMT co., ltd.）で仕上げた．錘質量，回転数は，それぞれ，1.1kg，250rpm とした．最後に，ガイド上中段，およびスライダと共に，DLC を成膜した．なお，

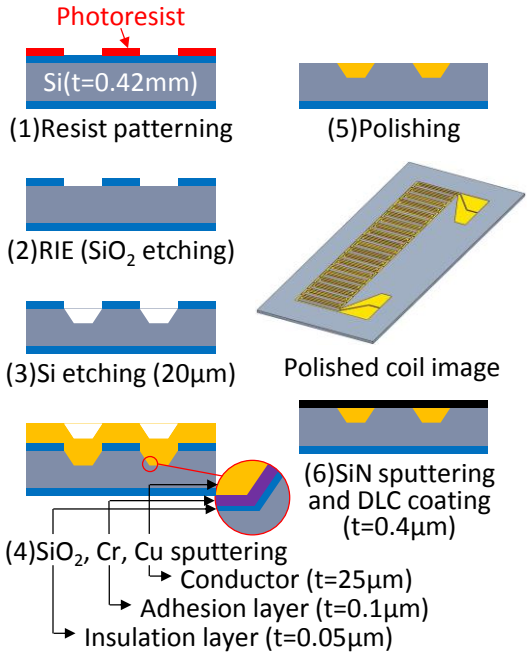


Fig. 4.6　Fabrication process of lower part of the guideway including coil

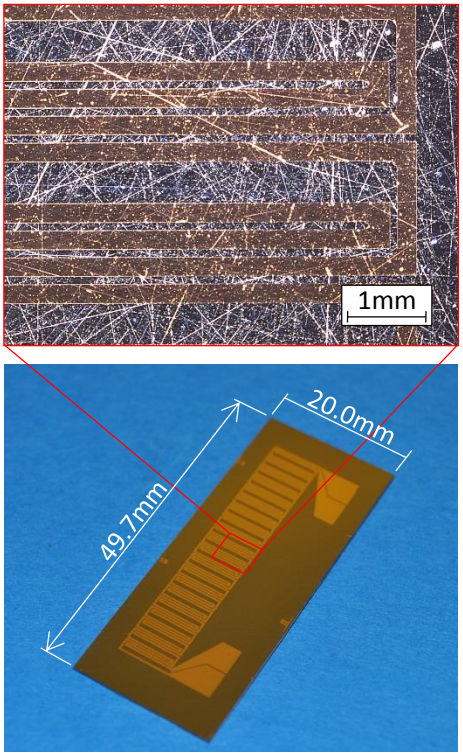


Fig. 4.7　Coil patterns of the fabricated lower part of the guideway

銅と DLC の密着性向上のため，事前に厚み 0.4μm の窒化シリコンをスパッタにより成膜している．

研磨後の試料を図４．７に示す．概ね，目標とする寸法に加工できた．しかしながら，試料表面に研磨によるものと思われるキズが確認された．スライダの摩擦増加の要因となりうるため，今後，研磨条件の最適化が必要である．DLC 成膜後のコイル抵抗，インダクタンスは，１相目，２相目ともに，それぞれ 2.3Ω，14.8μH であり，相間抵抗は 278Ω であった．DLC 成膜前に比べ相間抵抗は７分の１程度に減少している．DLC 膜自体は，絶縁体であるため，DLC 成膜時の発熱により，銅が，シリコン中に拡散し，相間抵抗を低減したと考えている．一方，各コイルの抵抗値は相間抵抗の１％以下であり，今回のリニアモータ駆動には，本コイルを使用する．

（３）リニアモータ組立

ガイドの上中段と下段を接着する．ガイド下段にフォトレジスト（PerMX3020，デュポン MRC ドライフィルム株式会社）２枚をラミネート，パターニング後，ガイドの上中段を重ねあわせ，荷重を印加した状態で，180℃，45 分間ベイクすることで，接着する．その後，スライダをガイドに挿入する．完成したリニアモータを図４．８に示す．

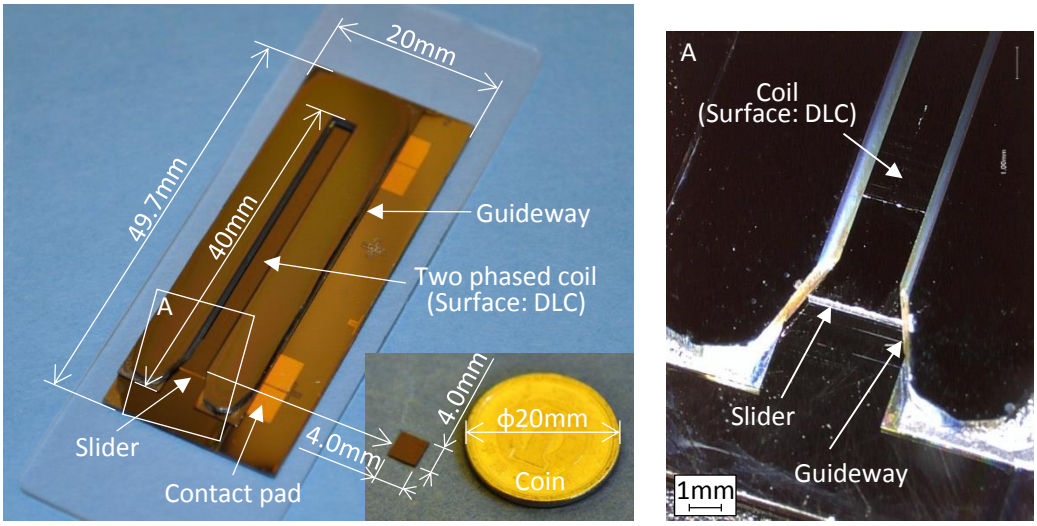


Fig. 4.8　Fabricated MEMS linear motor

４．２．３　コイル電流条件の決定

既報のリニアモータ [93]では，スライダ位置に応じて駆動力変動が大きかった．今回，コイルを２相化することで，駆動力が零となる位置の解消を狙うが，同時に，スライダ位置に応じたコイル電流値を，より適切に制御することで，駆動力変動のさらなる低下を狙う．

まず，MEMS リニアモータの，電流･力係数とスライダ位置の関係を，磁場解析により計算する．図４．９に示す２モデルを使用し，それぞれのコイルが発生させる駆動力を計算する．なお，各モデルは，図４．３から駆動力に関与しない部分，および通電しない方のコイルを取り除いたものであり，磁石部は，図３．６で示したものと同一である．各コイルには 1A の電流を図中で示す向きに与える．磁石部を駆動方向に変位させ，各位置での静的な発生力を計算する．磁石部の駆動範囲は半ピッチの 0.5mm とした．解析ではコイル部に発生するローレンツ力を計算し，その反作用力が磁石部に働くものとした．解析には静磁場解析ソフト（Maxwell 3D Ver. 16, ANSYS Inc.）を用いた．

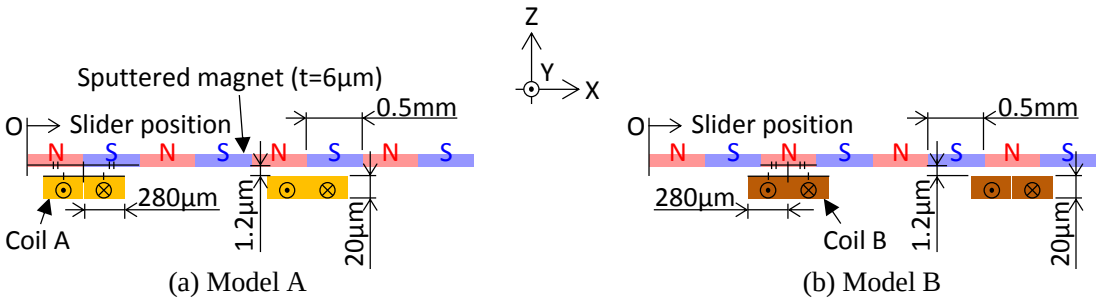
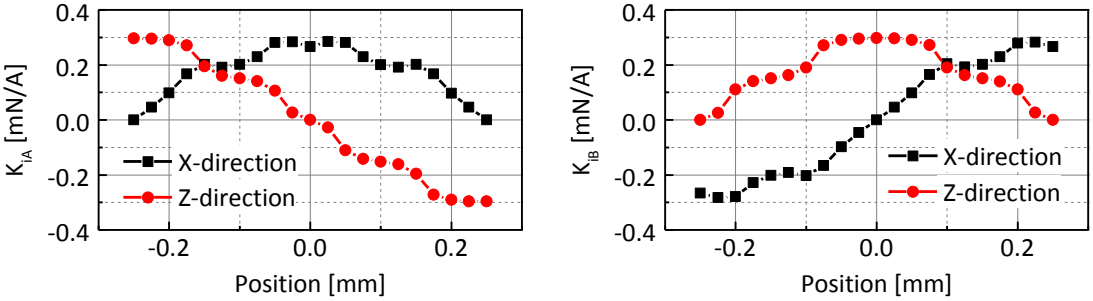


Fig. 4.9　Analytical models for investigating the coefficient of the current-force relationship



(a) Model A　　(b) Model B

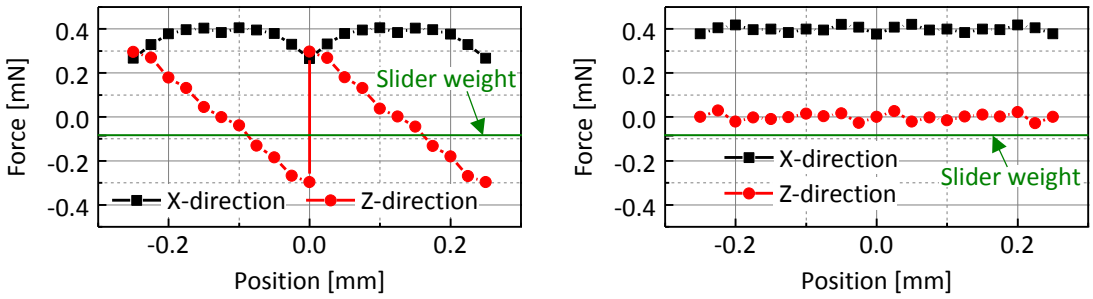
Fig. 4.10　Calculated coefficient of the current-force relationship

計算により得られた，各モデルにおける電流･力係数を図４．１０に示す．１相コイルのみでは，磁石位置によって推進力であるＸ方向の力が零になる箇所が存在するが，各相において零になる位置が異なるため，２相利用することで，任意の磁石位置で推進力を発生可能となることを確認した．一方，面外方向であるＺ方向にも力が発生することが確認できる．摩擦増加が懸念されるため，Ｚ方向の発生力は両相でキャンセルし，合計は零とすることが望ましい．

スライダ位置に応じた，各コイルの電流値を決定する．計算には，図４．１０の電流･力係数を使用し，発生力は電流値に比例すると仮定する．電流値を図４．１１（ａ）に示す矩形波状にした場合，および図４．１１（ｂ）に示す正弦波状にした場合の，トータルの駆動力を図４．１２に示す．矩形波状に電流を与えた場合は，Ｘ方向の駆動力の変動，お

(a) Square wave　　(b) Sinusoidal wave

Fig. 4.11　Candidate coil current depending on the slider position



(a) Square wave　　(b) Sinusoidal wave

Fig. 4.12　Calculated total force

よび摩擦増加の要因となるＺ方向の面外方向発生力が大きいが，正弦波状に与えた場合，これらは比較的小さくなった．よって，以下の駆動実験では，正弦波状の電流値をコイルに与える．なお，得られたＸ方向の駆動力約 0.4mN は，既報のリニアモータよりも約 40%大きい値である．微細加工を施していたスパッタ磁石に微細着磁を施した影響が大きいと考えられる．ただし，スライダ面積と電流実効値こそ同一であるが，スライダ位置に応じたコイル電流の与え方，微細加工や微細着磁で形成した磁石ピッチ，コイル形状，スライダ・コイル間ギャップが異なるため，必ずしも微細着磁の影響のみではない．

４．２．４　リニアモータ評価

（１）リニアモータ駆動システム

図４．１３に，リニアモータ駆動時に使用する，位置検出，制御システムを示す．スライダ位置を，外部に設置したレーザ変位センサ（LK-G155，Keyence Corp.，測定範囲 50mm，サンプリング周波数 20kHz，分解能 12.5μm）で検出し，その位置情報を元に，コイル印加電圧を制御する．図４．１４に示すように，位置検出では，1.7mm×0.12mm の楕円形状のスポットを有する変位センサのレーザを，ターゲットである 4.0mm×0.21mm のスライダ側面に照射する．変位情報は 12bit の A/D コンバータを通して，DSP システム（DS1104, dSPACE GmbH）に取り込み，信号処理を行う．サンプリング周波数は 20kHz とする．

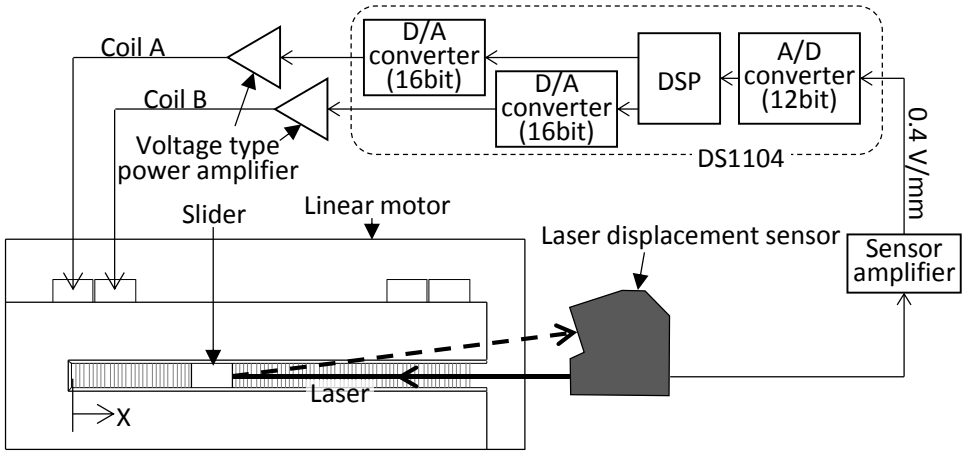
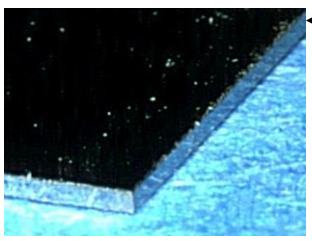


Fig. 4.13　Driving system of the MEMS linear motor



Side view of the fabricated slider

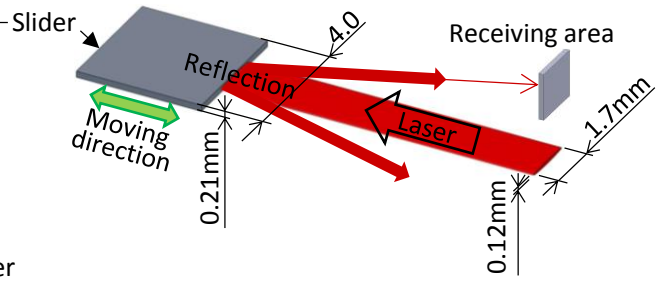


Fig. 4.14　Laser beam from displacement sensor and the target

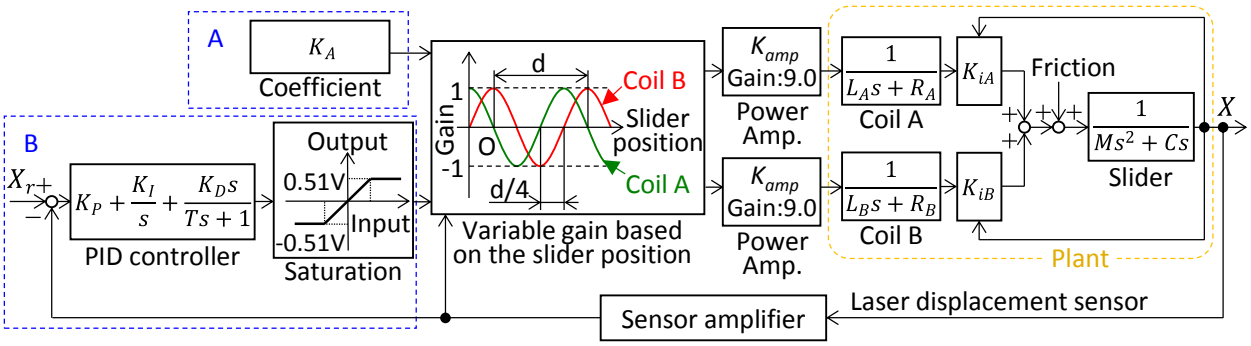


Fig. 4.15　Block diagram of the MEMS linear motor driving system

Table 4.3　Parameters of the plant and the power amplifier

Parameters	Symbol	Values
Pitch	d	1 mm
Gain of the power amplifier	K_{amp}	9.0
Coefficient of the current-force relationship	K_i	Fig. 4.10
Coil inductance	L	14.8 μH
Coil resistance	R	2.3 Ω
Mass of the slider	M	8.7 mg

図４．１５に制御ブロック線図を，表４．３にそのモデル条件を示す．基本特性評価ではブロックＡを，位置決め特性評価ではブロックＢを使用し，使用しない方のブロックの出力を零とする．スライダ位置に応じて，各コイルには，４分の１だけ位相をずらした正弦波状の電圧を印加する．これにより，前項で決定したコイル電流の印加を狙う．コイルの時定数は6.4μs と十分小さいため，電圧印加に対する電流の遅れは十分小さいと仮定した．

（２）基本特性評価

リニアモータの基本特性評価では，位置決め目標を設けず，図４．１５のブロックＡを使用する．まず，係数 K_A を 0.51 で固定とし，一方向にスライダを加速させ続ける実験を行う．駆動時のスライダ位置，スライダ速度，およびコイル電流を図４．１６に示す．ストローク 36mm，最大化速度 35.5m/s^2，最高速度 1,300mm/s を確認した．駆動中に加速度が減少する原因は，製作したコイルの寸法誤差，変位計の計測誤差，信号処理時間の遅れの影響で，スライダ位置に応じた適切な電圧が印加できなかったためと考えている．コイル電流は-2.0～2.0A であった．なお，同等の電流実効値を与えた既報のリニアモータ [93] と比べ，加速度が約 37%増加した．

リニアモータ始動に必要な，最小の電圧，電流値を調査する．駆動力が静止摩擦力を上回った時に，スライダは動き始める．図４．１５のブロックＡの係数 K_A を 0 から，スライ

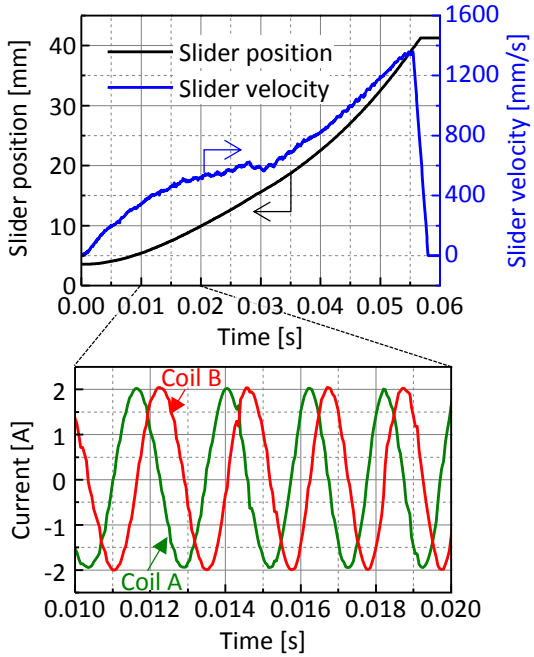


Fig. 4.16　Acceleration test of the MEMS linear motor

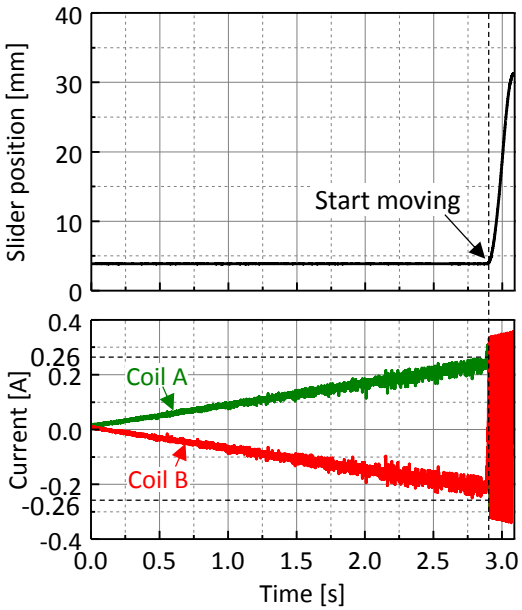


Fig. 4.17　Start-up test of the MEMS linear motor

ダが動き出すまで，徐々に大きくする．この時のスライダ位置，スライダ速度，およびコイル電流を図４．１７に示す．リニアモータ始動には，コイルに電圧±0.60V，電流±0.26A の印加が必要であることを確認した．小型電池で十分に供給可能な値である．

スライダ・ガイド間の動摩擦係数を調査する．図４．１５のブロックＡの係数 K_A を 0.51 で固定し，スライダを 5ms 間だけ加速させた後に，通電を止めることで，スライダの減速カーブを測定した．この時のスライダ位置，スライダ速度，およびコイル電流を図４．１８に示す．減速開始時のスライダの運動エネルギーが，全て動摩擦で消費されたと仮定すると，動摩擦係数は 0.14 と算出できる．

スライダ・ガイド間の静止摩擦係数を調査する．リニアモータ始動実験では，スライダに面外方向の力が働くため，静止摩擦係数の正確な評価が困難であった．そこで，試作したガイドにスライダを挿入し，全体を傾け，スライダが滑り始める角度を測定することで，静止摩擦係数を評価する．静止摩擦係数μと角度 θ の関係は$\mu=\tan\theta$ となる．実験の様子を図４．１９に示す．スライダ位置を変更しつつ，複数回実験を行った．なお，本実験では，コイルの埋め込まれていない試作ガイドを使用するが，DLC は実際のリニアモータと同条件で成膜されている．結果，静止摩擦係数は平均で 0.48（σ0.14）となった．既報のリニアモータで同実験を行ったところ，スライダは垂直にしても滑らなかった．DLC 成膜有無の影響と考えられる．

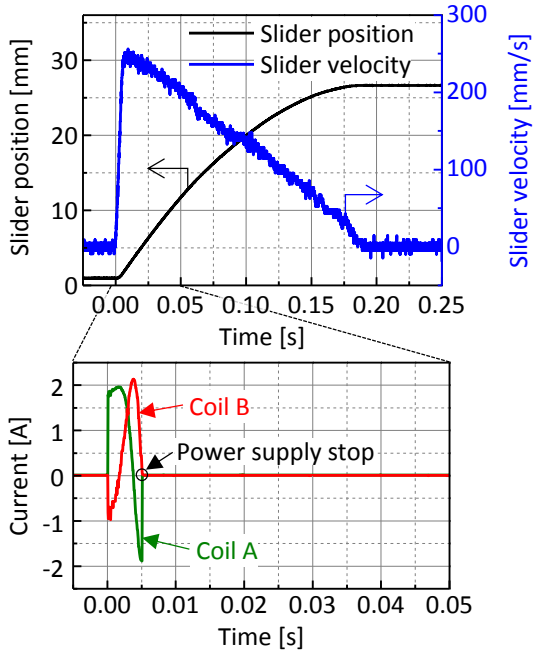


Fig. 4.18　Deceleration curve of MEMS linear motor

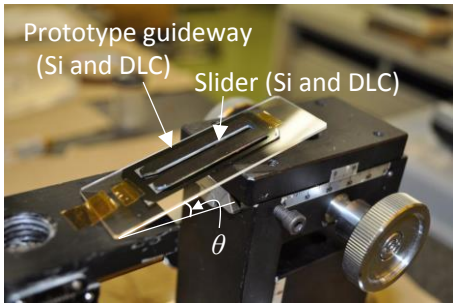


Fig. 4.19　Static friction coefficient measurement of the prototype guideway

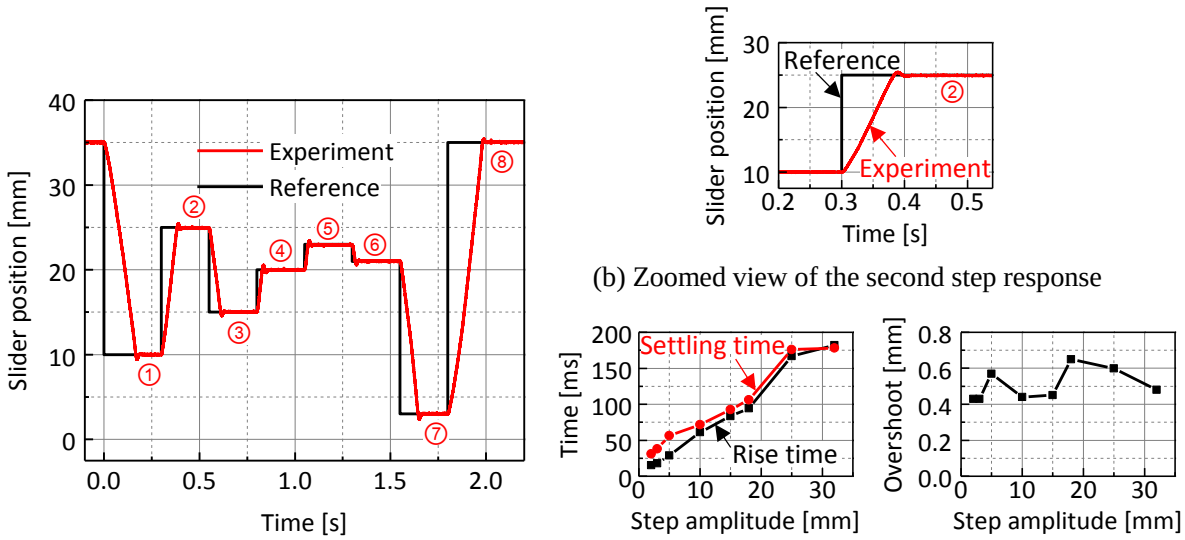
Table 4.4　Parameters of the PID controller

Parameters	Symbol	Values	
		Type 1	Type 2
Proportional gain	K_P	0.69 V/mm	10 V/mm
Integral gain	K_I	0.0105 V/(mm･s)	3.0 V/(mm･s)
Derivative gain	K_D	0.00263 V･s/mm	0.25 V･s/mm
Time constant	T	3 ms	3 ms

（３）位置決め特性評価

位置決め特性評価には，図４．１５のブロックＢを使用する．PID コントローラの各ゲインを表４．４に示す．タイプ１のパラメータは限界感度法で，タイプ２のパラメータは位置決め分解能向上のため試行錯誤で決定した．実験では，主にタイプ１を使用し，位置決め分解能を調査する実験のみタイプ２を使用する．なお，コイル電流制限のため，PID コントローラの出力は±0.51V で飽和する設定とした．

連続ステップ応答を図４．２０（ａ）に，そこから，２番目のステップのみを拡大したものを（ｂ）に，立ち上がり時間と整定時間を（ｃ）に，オーバーシュートを（ｄ）に示す．スライダが目標位置に概ね追従していること，立ち上がり時間と整定時間が概ねステップ幅に比例していること，オーバーシュートが概ね一定であることを確認した．PID コントローラ出力の飽和，センサ校正誤差，DSP やレーザ変位センサの信号処理時間の影響で，



(a) Reference and experimental result　(b) Zoomed view of the second step response

(c) Rise time and settling time　(d) Overshoot

Fig. 4.20　Multi-step response (using Type 1 controller)

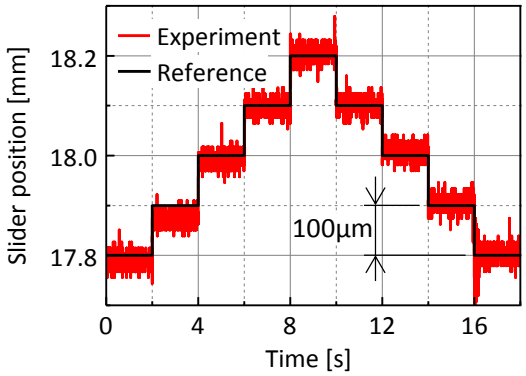


Fig. 4.21　Positioning resolution (using Type 2 controller)

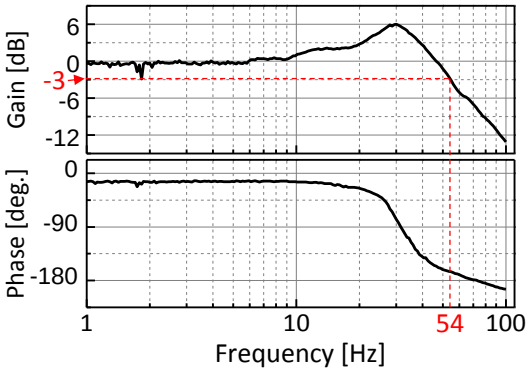


Fig. 4.22　Frequency response (using Type 1 controller)

理想的なコイル電圧を印加できなくなり，スライダ加速が制限されている可能性がある．今後，詳細な調査が必要である．

位置決め分解能調査の実験結果を図４．２１に示す. 位置決め分解能 100μm を確認した．さらなる位置決め分解能の向上には，摩擦低減，および変位センサのノイズ低減が必要と考えられる．

周波数応答の測定を行う．目標位置には両振幅 1mm の正弦波を入力する．測定結果を図４．２２に示す．バンド幅は 54Hz となった．また，1~10Hz で 20°程度の位相遅れが見られる．これは，静止摩擦の影響と考えている．

４．３　結　言

本章では，２，３章で実現した希土類磁石の微細加工，微細着磁技術を応用した磁気 MEMS の実現を目的とした．今回は一例として，既報の微細加工したスパッタ磁石を用いたマイクロリニアモータ[93]よりも高性能な MEMS リニアモータ実現を目的とし，１）微細着磁したスパッタ磁石の適用，２）全要素の MEMS 技術による製作，３）コイルの多相化によるスライダ位置決め駆動の実現，４）DLC 膜を利用したスライダ・ガイド間の摩擦低減，を目指した．

MEMS リニアモータは，微細パルス着磁したスパッタ磁石を含むスライダ，滑りガイド，２相コイルから構成し，全ての要素を MEMS 技術により製作した．摺動面には DLC を配置し，また，スライダ位置に応じた適切な電流値を，シミュレーションにより検討した．製作後，外部に設定したレーザ変位センサでスライダ位置を検出し，その位置情報を元に，コイル印加電圧を制御することで，駆動した．既報のリニアモータの性能[93]と，今回のものの比較を表４．５にまとめる．

今後の課題は，駆動力の測定，さらなる摩擦低減による駆動性能向上，リニアモータ内部でのスライダ位置検出である．また，本リニアモータを基本に，高アスペクトに微細加工，微細着磁した磁石利用による高出力化，およびレーザアシスト微細着磁利用による複雑な着磁パターンを用いた多軸化が可能と考えられ，今後，試作と評価が望まれる．

Table 4.5　Performance of liner motors

	Previous work [93]		This work
MEMS process	Only slider	→	All parts
Slider thickness	0.26 mm	→	0.20 mm
Total thickness	6.0 mm	→	1.38 mm
Processing of sputtered magnet	Micromachining	→	Micro-magnetization
Simulated thrust force	280 μN	→	400 μN
Contact	Al alloy + silicon	→	DLC + DLC
Static friction coefficient Kinetic friction coefficient	-		static : 0.54 kinetic : 0.14
Coil thickness	3 μm	→	20 μm
Stroke	36 mm	→	36 mm
Driving style	Open loop	→	Closed loop
Maximum velocity	1,000 mm/s	→	1,300 mm/s
Maximum acceleration	26.0 m/s^2	→	35.5 m/s^2
Positioning resolution			100 μm
Bandwidth			54 Hz

第５章　結　論

５．１　本論文のまとめ

従来の小型磁気デバイスでは，一括処理困難な機械加工で製作した寸法数 mm のバルク永久磁石が用いられており，MEMS 技術の適用が不十分で，デバイスの小形化，高集積化や低コスト化等に限界があった．そこで，本研究では，高性能な希土類のスパッタ磁石，PLD 磁石，ボンド磁石，焼結磁石の MEMS 適用とデバイスの高出力化・高機能化などに必要な微細加工と微細着磁技術の研究，およびこの技術を用いた新しい磁気 MEMS の実現を目指した．各章で得られた結論を以下に示す．

第２章「MEMS 応用を目指した永久磁石の微細加工」では，

未公表部

第３章「MEMS 応用を目指した永久磁石の微細着磁」では，複数の一方向着磁磁石の組立なしで複雑な磁気回路形成を可能とする，多極微細着磁の実現を目的とした．具体的には，高性能な希土類のスパッタ磁石，PLD 磁石，等方性ボンド磁石，焼結磁石に対する，微細，かつ，アスペクト比１程度の着磁実現を目的とした．

厚み数μm のスパッタ磁石では，着磁のために用いる微小コイルの溶断を避けるため，最大電流通電時間を最小化するパルス着磁法を検討し，理想モデルによる計算値を基準とし

Table 5.1　Summary of results in chapter 2 and 3

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Target magnet</td><td colspan="2">Sputtered magnet</td><td>PLD magnet</td><td colspan="2">Bonded magnet</td><td>Sintered magnet</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anisotropic</td><td>Isotropic</td><td>Isotropic</td><td>Anisotropic</td><td>Anisotropic</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Micromachining</td><td>Method</td><td colspan="2" rowspan="4">-</td><td colspan="4" rowspan="4">未公表部</td></tr>
<tr><td>Thickness</td></tr>
<tr><td>Width</td></tr>
<tr><td>Magnetic property degradation</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Micro-magnetization</td><td>Method</td><td>Pulse magnetization</td><td>Laser assisted magnetization</td><td colspan="2" rowspan="5">未公表部</td><td rowspan="5">-</td><td>Laser assisted magnetization with thermal insulation slit</td></tr>
<tr><td>Thickness (t)</td><td>6 μm</td><td>4.5 μm</td><td>500 μm</td></tr>
<tr><td>Width (w)</td><td>500 μm</td><td>100 μm</td><td>500 μm</td></tr>
<tr><td>Aspect ratio (t/w)</td><td>0.012</td><td>0.045</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Magnetization rate</td><td>96%</td><td>91%</td><td>90%</td></tr>
</table>

た測定磁場(p-p)の比率（以下，着磁率）96%，幅 500μm の短冊状の着磁を実現した．しかしながら，アスペクト比は 0.012 と小さく，着磁パターンがコイル形状，配置に依存するため，さらなる微細化，および着磁の複雑化が課題となった．そこで，レーザで局所加熱し，固有保磁力を低下させた部分を，外部から印加する静磁場により着磁するレーザアシスト微細着磁法を提案，検討した．この際，スパッタ磁石のレーザ加熱が可能な，磁石成膜基板として石英ガラスを選定した．また，適切なレーザ条件の探索，および必要な磁場印加装置の設計，製作を行った結果，着磁率 91%，幅 100μm，アスペクト比 0.045 の短冊状の着磁を実現した．

未公表部

厚み 500μm の焼結ネオジム磁石に対しては，磁石間断熱にダイシングで加工するスリットを利用したレーザアシスト微細着磁を検討した．幅 500μm，アスペクト比 1，着磁率 90%

の短冊状の微細着磁，および幅 1mm，アスペクト比 0.5 の市松模様の微細着磁を実現した．第２，３章の成果を表５．１にまとめる．

第４章「微細着磁磁石を応用した MEMS」では，前章までで実現した，微細加工，微細着磁技術を用いた磁気 MEMS の実現を目的とし，今回は一例として，微細加工したスパッタ磁石を用いたマイクロリニアモータの，微細着磁による高性能化を目指した．

MEMS リニアモータは，500μm 幅に微細パルス着磁した厚み 6μm のスパッタ磁石を含む 4mm 角のスライダ，滑り案内，２相コイルから構成し，全ての要素を MEMS 技術により製作した．移動および固定部の両摺動面には摩擦低減のため DLC を成膜した．製作後，外部に設定したレーザ変位センサでスライダ位置を検出し，その位置情報を元に，コイル印加電圧を制御することで，駆動した．結果，ストローク 36mm，最高速度 1,300mm/s，最高加速度 35.5m/s^2，動摩擦係数 0.14，静止摩擦係数 0.54 を実現した．また，位置決め駆動を実現し，位置決め分解能 100μm，バンド幅 54Hz を確認した．

５．２　今後の課題

（１）商業化可能な磁気ＭＥＭＳの実現

今回研究開発した微細加工･微細着磁の商用化可能な MEMS デバイスへの適用を目指す．具体的な応用例として，モバイル機器内蔵カメラのレンズ駆動アクチュエータ，スマートウォッチ等内臓の小型バイブレータ，イヤホン等の小型スピーカーが挙げられる．この際に，表５．１に示した成果の中で，着磁のアスペクト比の大きいものを利用することで，発生力向上が期待できる．

未公表部

未公表部

未公表部

（２）焼結磁石に対するスリット不要な微細着磁の実現

３．５節で実現した焼結磁石のレーザアシスト微細着磁を実用化する際には，スリットのダイシング加工に時間を要し，量産化の足かせになる．

未公表部

（３）微細加工，微細着磁の更なる検討

焼結磁石基板の微細加工，異方性ボンド磁石の微細着磁は未検討である．前者ではマイクロブラスト等の脆性材料に適した一括加工法の適用が考えられる．後者では３．４節で等方性ボンド磁石に対して実施したものと同じ手法の適用が考えられる．

未公表部

未公表部

（６）スパッタ磁石の高アスペクト微細着磁

スパッタ磁石のレーザアシスト微細着磁では，アスペクト比は 0.045 に留まった．

未公表部

（７）各レーザアシスト微細着磁条件の最適化

第３章で実施したレーザアシスト微細着磁条件を最適化することで，着磁の微細化，着磁率の向上，磁石の磁気特性劣化低減の可能性がある．

未公表部

参考文献

(1) C. Wagner and N. Harned, EUV lithography: Lithography gets extreme, Nature Photonics, Vol. 4, pp. 24-26, 2010

(2) N. Ikegami, T. Yoshida, A. Kojima, H. Ohyi, N. Koshida and M. Esashi, Active-matrix nanocrystalline Si electron emitter array for massively parallel direct-write electron-beam system: first results of the performance evaluation, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, Vol. 11, No. 3, 031406, 2012

(3) F. Laermer and A. Urban, Challenges, developments and applications of silicon deep reactive ion etching, Microelectronic Engineering, Vol. 67-68, pp. 349-355, 2003

(4) H. F. Winters and J. W. Coburn, The etching of silicon with XeF_2 vapor, Applied Physics Letters, Vol. 70, No. 1, pp. 70-73, 1979

(5) J. A. Thornton, The microstructure of sputter-deposited coatings, Journal of Vacuum Science & Technology A, Vol. 4, No. 6, pp. 3059-3065, 1986

(6) D. Grujicic and B. Pesic, Electrodeposition of copper: the nucleation mechanisms, Electrochimica Acta, Vol. 47, No. 18, pp. 2901-2912, 2002

(7) M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda and K. Tanzawa, Silicon-to-silicon direct bonding method, Journal of Applied Physics, Vol. 60, No. 8, pp. 2987-2989, 1986

(8) Y. K. Kim, E. K. Kim, S. W. Kim and B. K. Ju, Low temperature epoxy bonding for wafer level MEMS packaging, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 143, No. 2, pp. 323-328, 2008

(9) Y. Hirai, S. Yoshida, N. Takagi, Y. Tanaka, H. Yabe, K. Sasaki, H. Sumitani and K. Yamamoto, High aspect pattern fabrication by nano imprint lithography using fine diamond mold, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 42, Part 1, No. 6B, pp. 3863-3866, 2003

(10) B. H. Jo, L. M. Van Lerberghe, K. M. Motsegood and D. J. Beebe, Three-dimensional micro-channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 76-80, 2000

(11) W. P. Eaton and J. H. Smith, Micromachined pressure sensors: review and recent developments, Smart Materials and Structures, Vol. 6, No. 5, pp. 530-539, 1997

(12) D. C. Abeysinghe, S. Dasgupta, J. T. Boyd and H. E. Jackson, A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 9, pp. 993-995, 2001

(13) R. Furuya, H. Takahashi, N. T. Vinh, T. Yano, K. Ito, T. Takahata, K. Matsumoto and I. Shimoyama, Measurement of jumping force of a fruit fly using a mesa structured force plate, Proceedings of 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2016), pp. 165-168, 2016

(14) J. Engel, J. Chen and C. Liu, Development of polyimide flexible tactile sensor skin, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, No. 3, pp. 359-366, 2003

(15) J. Wu, G. K. Fedder and L. R. Carley, A low-noise low-offset capacitive sensing amplifier for a 50-μg/√Hz monolithic CMOS MEMS accelerometer, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 39, No. 5, pp. 722-730, 2004

(16) C. C. Yang and Y. L. Hsu, A Review of Accelerometry-Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring, Sensors, Vol. 10, pp. 7772-7788, 2010

(17) K. Liu, W. Zhang, W. Chen, K. Li, F. Dai, F. Cui, X. Wu, G. Ma and Q. Xiao, The development of micro-gyroscope technology, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 19, No. 11, 113001, 2009

(18) T. Murakoshi, Y. Endo, K. Fukatsu, S. Nakamura and M. Esashi, Electrostatically levitated ring-shaped rotational-gyro/accelerometer, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 42, Part 1, No. 4B, pp. 2468-2472, 2003

(19) P. R. Scheeper, A. G. H. van der Donk, W. Olthuis and P. Bergveld, A review of silicon microphones, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 44, No. 1, pp. 1-11, 1994

(20) J. W. Weigold, T. J. Brosnihan, J. Bergeron and X. Zhang, A MEMS condenser microphone for consumer applications, Proceedings of 19th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2006), pp. 86-89, 2006

(21) D. W. Monk and R. O. Gale, The digital micromirror device for projection display, Microelectronic Engineering, Vol. 27, No. 1-4, pp. 489-493, 1995

(22) N. Asada, H. Matsuki, K. Minami and M. Esashi, Silicon micromachined two-dimensional galvano optical scanner, IEEE Transactions Magnetics, Vol. 30, No. 6, pp. 4647-4649, 1994

(23) 日本信号株式会社，ECO SCAN（http://www.signal.co.jp/vbc/mems/ecoscan/index.php）

(24) J. E. Fromm, Numerical calculation of the fluid dynamics of drop-on-demand jets, IBM Journal of Research and Development, Vol. 28, No. 3, pp. 322-333, 1984

(25) N. Reis, C. Ainsley and B. Derby, Ink-jet delivery of particle suspensions by piezoelectric droplet ejectors, Journal of Applied Physics, Vol. 97, No. 9, 094903, 2005

(26) D. Y. Zhang, T. Ono and M. Esashi, Piezoactuator-integrated monolithic microstage with six degrees of freedom, Proceedings of the 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems 2003 (TRANSDUCERS 2003), Vol. 2, 3E88.P, pp. 1518-1521, 2003

(27) M. F. M. Sabri, T. Ono and M. Esashi, Modeling and experimental validation of the performance of a silicon XY-microstage driven by PZT actuators, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 19, No. 9, pp. 1-9, 2009
(28) T. Ohnstein, T. Fukiura, J. Ridley and U. Bonne, Micromachined silicon microvalve, Proceedings of 3rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2006), pp. 95-98, 1990
(29) L. Yobas, M. A. Huff, F. J. Lisy and D. M. Durand, A novel bulk micromachined electrostatic microvalve with a curved-compliant structure applicable for a pneumatic tactile display, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 187-196, 2001
(30) I. Schiele, J. Huber, B. Hillerich and F. Kozlowski, Surface-micromachined electrostatic microrelay, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 66, No. 1-3, pp. 345-354, 1998
(31) S. J. Gross, S. Tadigadapa, T. N. Jackson, S. Trolier-McKinstry and Q. Q. Zhang, Lead-zirconate-titanate-based piezoelectric micromachined switch, Applied Physics Letters, Vol. 83, No. 1, pp. 174-176, 2003
(32) Y. Naito, Y. Nakanishi, N. Shimizu and K. Nakamura, Switch, US patent 6891454, 2003
(33) 国立研究開発法人産業技術総合研究所，自動ゾルゲル形成装置（http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140128/pr20140128.html）
(34) T. Shiosaki, T. Yamamoto, T. Oda and A. Kawabata, Low-temperature growth of piezoelectric AlN film by rf reactive planar magnetron sputtering, Applied Physics Letters, Vol. 36, No. 8, pp. 643-645, 1980
(35) 藤田博之，マイクロ・ナノマシン技術入門，工業調査会，p. 33，2003
(36) K. E. Drexler, Nanosystems, John Wiley & Sons, p. 34, 1992
(37) 江刺正喜，マイクロアクチュエータ，2013 年 MEMS 集中講義，p. 2, 2013
(38) 浜松ホトニクス株式会社，電磁式駆動レーザー走査型 MEMS ミラー（https://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/development/20120927000000.html）
(39) ソニー株式会社，商品一覧　ヘッドホン（http://www.sony.jp/headphone/lineup/）
(40) 株式会社オーディオテクニカ，ヘッドホン（https://www.audio-technica.co.jp/headphone/index.html）
(41) TDK 株式会社，カメラモジュール用レンズアクチュエータ（http://www.tdk.co.jp/ceatec_2013/pdf/CEATEC2013_18.pdf）
(42) アルプス電気株式会社，オートフォーカス用カメラアクチュエータ（http://www.alps.com/j/news_release/2015/0706_01.html）
(43) 日本電産株式会社，振動モータ（http://www.nidec.com/product/specific/vibration）
(44) レキシンジャパン株式会社，振動モータ（http://www.lexin.jp/domain/vibration/）

(45) DigitalOptics Corporation, Smartphone Camera Advances Made Possible by mems|cam™ Technologies（http://www.doc.com/Technology/documents/Smartphone%20Camera%20Advances%20Made%20Possible%20by%20mems%20cam%20Technologies%20March%202013.pdf）

(46) 西 秦男，坂井 繁一，東野 楠，町田 裕一，吉田 康二郎，プリンテッドエレクトロニクス用途のベンドタイプ新インクジェットヘッド開発，KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, Vol. 10, pp. 114-117, 2013

(47) H. Sanpei, J. Mizuno, M. Yasuoka, H. Takayanagi, T. Takoshima, M. Miyazaki and M. Esashi, Bimorph switch, bimorph switch manufacturing method, electronic circuitry and electronic circuitry manufacturing method, US patent 20050195056, 2005

(48) 菊池製作所，Micro Fluid Device（http://www.kikuchiseisakusho.co.jp/mechatro2/MicroFluidDevice.html）

(49) H. Takagi, K. Kikuchi, R. Maeda, T. R. Chung and T. Suga, Surface activated bonding of silicon wafers at room temperature, Applied Physics Letters, Vol. 68, No. 16, 2222, 1996

(50) S. Satoh, H. Fukushi, M. Esashi and S. Tanaka, Low-temperature aluminum thermo-compression wafer bonding with tin antioxidation layer for hermetic sealing of MEMS, Proceedings of 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2016), pp. 581-584, 2016

(51) 佐川眞人，浜野正昭，平林眞，永久磁石―材料科学と応用―，アグネ技術センター，pp. 122-133, 215-216, 221-222 and 284-289, 2007

(52) M. Uehara, Microstructure and permanent magnet properties of a perpendicular anisotropic NdFeB/Ta multilayered thin film prepared by magnetron sputtering, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 284, pp. 281-286, 2004

(53) M. Uehara, N. Gennai, M. Fujiwara and T. Tanaka, Improved perpendicular anisotropy and permanent magnet properties in Co-doped Nd-Fe-B films multilayered with Ta, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 10, pp. 3838-3843, 2005

(54) N. M. Dempsey, A. Walther, F. May, D. Givord, K. Khlopkov and O. Gutfleisch, High performance hard magnetic NdFeB thick films for integration into Micro-Electro-Mechanical-Systems, Applied Physics Letters, Vol. 90, 092509, 2007

(55) N. M. Dempsey, T. G. Woodcock, H. Sepehri-Amin, Y. Zhang, H. Kennedy, D. Givord, K. Hono and O. Gutfleisch, High-coercivity Nd–Fe–B thick films without heavy rare earth additions, Acta Materialia, Vol. 61, No. 13, pp. 4920-4927, 2013

(56) M. Nakano, Y. Chikuba, M. Oryoshi, A. Yamashita, T. Yanai, R. Fujiwara, T. Shinshi and H. Fukunaga, Nd-Fe-B film magnets with the thickness above 100μm deposited on Si substrates, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 11, 2102604, 2015

(57) M. Nakano, S. Oshima, T. Yanai and H. Fukunaga, Magnetic properties of pulsed laser deposition-fabricated isotropic Pr-Fe-B thick-films magnets for magnetic micro-machines, Journal of Applied Physics, Vol. 115, No. 17, 17A741, 2014
(58) ネオマグ株式会社，ネオジムボンド磁石の特徴（http://www.neomag.jp/products_navi/ndfebBond/ndfebBond_introduction.php）
(59) 株式会社ダイドー電子，等方性ネオジムボンド磁石「NEOQUENCH-P」（http://www.daido-electronics.co.jp/product/neoquench_p/）
(60) 日立金属株式会社，ネオジム・鉄・ボロン系焼結磁石 NEOMAX®（https://www.hitachi-metals.co.jp/products/auto/el/p0_7.html）
(61) TDK 株式会社，ネオジムマグネット NEOREC series（https://product.tdk.com/info/ja/products/magnet/catalog.html）
(62) 信越化学工業株式会社，信越ネオジウム（Nd）磁石 N シリーズ（http://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/products/）
(63) H. Nakamura, K. Hirota, M. Shimao, T. Minowa and M. Honshima, Magnetic properties of extremely small Nd-Fe-B sintered magnets, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 10, pp. 3844-3846, 2005
(64) H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo and K. Hono, Grain boundary structure and chemistry of Dy-diffusion processed Nd–Fe–B sintered magnets, Journal of Applied Physics, Vol. 107, No. 9, 09A745, 2010
(65) 石橋正登，進士忠彦，バトサイハンバンズラグチ，堀充孝，上原稔，ネオジム薄膜磁石を用いたマイクロリニアモーター薄膜磁石の微細加工・微細着磁法の検討ー，第 19 回 MAGDA コンファレンス電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp. 289-292，2010
(66) Y. Jiang, S. Masaoka, M. Uehara, T. Fujita, K. Higuchi and K. Maenaka, Micro-structuring of thick NdFeB films using high-power plasma etching for magnetic MEMS application, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 21, No. 4, pp. 1-5, 2011
(67) Y. Jiang, T. Fujita, M. Uehara, Y. Iga, T. Hashimoto, X. Hao, K. Higuchi and K. Maenaka, Fabrication of NdFeB microstructures using a silicon molding technique for NdFeB/Ta multilayered films and NdFeB magnetic powder, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 323, No. 21, pp. 2696-2700, 2011
(68) A. Walther, C. Marcoux, B. Desloges, R. Grechishkin, D. Givord and N. M. Dempsey, Micro-patterning of NdFeB and SmCo magnet films for integration into micro-electro-mechanical-systems, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 321, No. 6, pp. 590-594, 2009
(69) T. S. Chin, Permanent magnet films for applications in microelectromechanical systems, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 209, No. 1-3, pp. 75-79, 2000

(70) L. K. Lagorce and M. G. Allen, Magnetic and mechanical properties of micromachined strontium ferrite/polyimide composites, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 307-312, 1997

(71) N. Wang, B. J. Bowers and D. P. Arnold, Wax-bonded NdFeB micromagnets for microelectromechanical systems applications, Journal of Applied Physics, Vol. 103, No. 7, 07E109, 2008

(72) O. D. Oniku, B. J. Bowers, S. B. Shetye, N. Wang and D. P. Arnold, Permanent magnet microstructures using dry-pressed magnetic powders, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 23, No. 7, 07527, 2013

(73) H. Li, T. J. Flynn, J. C. Nation, J. Kershaw, L. S. Stephens and C. A. Trinkle, Photopatternable NdFeB polymer micromagnets for microfluidics and microrobotics applications, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 23, No. 6, 065002, 2013

(74) J. C. Kuo, C. S. Li, H. C. Cheng and Y. J. Yang, Suspended magnetic polymer structures fabricated using dose-controlled ultraviolet exposure, IET Micro & Nano Letters, Vol. 8, No. 10, pp. 676-680, 2013

(75) X. Li, T. Abe and M. Esashi, Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF_6 plasma, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 87, No. 3, pp. 139-145, 2001

(76) P. J. Slikkerveer, P. C. P. Bouten and F. C. M. De Haas, High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 85, No. 1-3, pp. 296-303, 2000

(77) 戸田工業株式会社，ボンド磁石用コンパウンド（http://www.todakogyo.co.jp/product/electronic/compound.html）

(78) 中村元，超微小に加工された Nd-Fe-B 系焼結磁石―マイクロ磁気アクチュエータへの適用を目指して―，電気学会誌，Vol. 124，No. 11，pp. 699-702，2004

(79) S. Hirosawa, K. Tokuhara and M. Sagawa, Coercivity of surface grains of Nd-Fe-B sintered magnet, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 26, Part 2, No. 8, pp. L1359-L1361, 1987

(80) J. Töpfer and V. Christoph, Multi-pole magnetization of NdFeB sintered magnets and thick films for magnetic micro-actuators, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 113, No. 2, pp. 257-263, 2004

(81) J. Töpfer, B. Pawlowski, H. Beer, K. Plötner, P. Hofmann and J. Herrfurth, Multi-pole magnetization of NdFeB magnets for magnetic micro-actuators and its characterization with a magnetic field mapping device, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 270, No. 1-2, pp. 124-129, 2004

(82) E. Grochowski and R. F. Hoyt, Future trends in hard disk drives, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, pp. 1850-1854, 1996

(83) M. Kaneko, K. Aratani and M. Ohta, Multilayered magneto-optical disks for magnetically induced superresolution, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 31, Part 1, No. 2B, pp. 568-575, 1992

(84) K. Kayanuma, T. Iwanaga, H. Inada, K. Okanoue, R. Katayama, K. Yoshihara, Y. Yamanaka, M. Tsunekane and O. Okada, High track density magneto-optical recording using a crosstalk canceler, Proceedings of SPIE 1316, Optical Data Storage, pp. 35-39, 1990

(85) F. Dumas-Bouchiat, L. F. Zanini, M. Kustov, N. M. Dempsey, R. Grechishkin, K. Hasselbach, J. C. Orlianges, Champeaux, Catherinot and D. Givord, Thermomagnetically patterned micromagnets, Applied Physics Letters, Vol. 96, No. 10, 102511, 2010

(86) H. S. Bennett and E. A. Stern, Faraday effect in solids, Physical Review, Vol. 137, No. 2A, pp. A448-A461, 1965

(87) 木村孝之，宇野一弥，増澤徹，２次元集積化磁気センサにおける画素微細化のための構造最適化に関する検討，第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム講演論文集，5PM3-PSS-093，2013

(88) 山本日登志，開道力，自動車モータ開発のための磁性材料技術―HEV，EV 化に向けて―，トリケップス，p. 8，2010

(89) Molycorp, Inc.，The most comprehensive bonded Neo powder portfolio（http://www.mqitechnology.com/jp/product-name-mqp.jsp）

(90) Schott AG，TEMPAX Float®（http://www.schott.com/japan/japanese/products/white_goods/tempax.html）

(91) 江坂明，柿本雅明，耐熱性高分子電子材料の展開，シーエムシー出版，pp.17-19，2008

(92) 豊田真彦，藤谷泰之，名山理介，山田正，陽極接合によるホウ珪酸ガラスと金属の接合，溶接学会論文集，Vol. 11，No. 1，pp. 208-213，1993

(93) T. Shinshi, M. Ishibashi and M. Uehara, A MEMS linear motor utilizing a thin film permanent magnet, Proceedings of the 20th MAGDA Conference in Pacific Asia, pp. 187-190, 2011

(94) C. Zhi, T. Shinshi, M. Saito and K. Kato, Planar-type micro-electromagnetic actuators using patterned thin film permanent magnets and mesh type coils, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 220, pp. 365-372, 2014

(95) 糸数篤，三宅英孝，橋本隆，福島一彦，湯澤隆，シリコンカーバイドのマルチワイヤ放電加工(第 2 報) 40 並列放電加工による薄板生産性の向上，2013 年度精密工学会春季大会講演論文集，H14，2013

謝　辞

東京工業大学，未来産業技術研究所，進士忠彦教授には，学部生のときから５年３ヶ月にわたり，御多忙である際も，親身にご指導いただきました．深く敬意と感謝の意を表します．先生から教わった「研究の進め方」，「わかりやすい説明方法」，「論文等の執筆方法」を大切に，今後，より一層，社会人として頑張っていこうと思います．また，研究室旅行にて，樽酒の鏡割りをさせて頂いたのは忘れられない思い出です．ありがとうございました．

未来産業技術研究所，初澤毅教授，吉田和弘教授，吉岡勇人准教授，佐藤海二准教授には，本研究・論文をまとめる上で，貴重な助言と御意見を頂きました．厚く御礼申し上げます．また，精密工学研究所，北條春夫名誉教授からも，退職以前に有益なアドバイスを多く頂きました．深く感謝いたします．

元日立金属株式会社，上原稔様に厚く御礼申し上げます．高磁気特性スパッタ磁石の開発と提供から本研究は始まりました．上原様のサポートなくして成果をあげることはできませんでした．

TDK 株式会社，小室栄樹様，鈴木英治様，鈴木健一様，門田祥悟様に深く感謝いたします．毎月の研究報告会での数多くのアドバイスや磁石の評価等は，磁石の知識が乏しかった私にとって，本当に有意義で，かつ，大きな助けになりました．

長崎大学大学院，中野正基教授，山下昂洋君ならびに関係者の皆様に厚く御礼申し上げます．将来の可能性に満ちた PLD 磁石を提供頂けたことは，本研究において大変有意義でした．また，フランス国立ニール研究所の Dempsey 様への推薦，ありがとうございました．

株式会社 KRI，山本日登志様，高野裕夫様，松本信子様に深く感謝いたします．等方性ボンド磁石の微細加工や粉体の微細焼結等，数多くの実験で協力いただき，非常に助かりました．また，磁性材料についても，色々とご教授頂き，本当にありがとうございました．

茨城大学工学部，木村孝之准教授に厚く御礼申し上げます．研究開発中のホール素子アレイ使用を快く承諾してくださり，本当にありがとうございました．将来の磁気 MEMS 用磁石の一括評価法として，このホール素子アレイは非常に有用だと信じております．

日本電磁測器株式会社，堀充孝様ならびに関係者の皆様に深く感謝いたします．微細パルス着磁実験は，その後の着磁実験における指標になりました．また，借用させて頂いたガウスメータとホールプローブのおかげで，磁場測定系の構築をスムーズに行うことができました．

東京都立産業技術研究センター，加沢エリト様，海老澤瑞枝様，吉野徹様に御礼申し上げます．レーザマーカの利用，磁石の反射率・正膨張係数測定のおかげで有意義なデータを得ることができました．

株式会社オフィールジャパン，石井勝巳様，一ノ瀬拓也様に感謝いたします．実施して頂いたレーザ強度分布評価により，スパッタ磁石加熱時の熱伝導解析を実現象に近づけることができました．

東京工業大学，工学院，機械系，土方亘准教授に深く感謝いたします．進士研助教だった頃，公私ともに大変お世話になりました．また，報告会等で非常に有益なコメントを多く頂きました．客員研究員の Li Lichuan 様に深く感謝いたします．学会発表練習等で数多くご質問いただきました．

東京工業大学，技術部，マイクロプロセス部門，松谷晃宏部門長，庄司大様，西岡國生様，佐藤美那様に厚く御礼申し上げます．数多く相談に乗って頂いたことに加え，EDX 解析までして頂きました．

東京工業大学，技術部，すずかけ台設計工作部門，長峯靖之部門長，杉原輝哉様，大森翔様，八幡直樹様をはじめとした工場の方々に深く感謝いたします．未経験で難易度の高い加工を多くして頂きました．

名古屋大学，櫻井淳平准教授，前谷卓哉様に御礼申し上げます．境遇が近いこともあり，色々と相談に乗っていただけたことで，良いガス抜きになりました．

補佐員の無量林直子さんには，事務手続きでよくお世話になりました．かげながら快適な生活を整えてくださり感謝しております．特に，研究費関連のシステムの使い方でご迷惑を多々お掛けしました．

湯本淳史様，上山吉崇様，He Dongjue 様，石橋正登様，間宮太一様，百瀬洸様，Pai Chi Nan 様をはじめとした，進士研の先輩方には，公私ともに，大変お世話になりました．また，森本貴景先輩は，ひとつ上の先輩として，いつも私の道標となってくださいました．Zhi Chao 様，佐々木裕史様，神谷龍彦君，田中駿也君，吾妻載栄君は，同じ MEMS 班のメンバーとして，長時間一緒に，楽しく研究させて頂きました．

佐原玄太様，勝又大介君，冨岡洸太君など後輩達は，卒業後であるにも関わらず，事あるごとに一緒に遊ばせて頂きました．また，博士後期課程の Rao Jun 君，津野田亘君，修士課程の長戸誠良君，吉田博貴君，清水大輔君，柳樂佳樹君，学部の明野晃季君，吉田研の三好智也君，佐藤千明研の川崎翔大君，金研の松原竜也君などのおかげで，楽しい研究生活を送ることができました．本当にありがとうございました．

最後に，DLC 膜の提供をしてくれた兵庫県立大学大学院教授の父と，いつも体調に気をかけてくれた母に深く感謝します．

平成 28 年 6 月 10 日

藤原 良元