高精度非球面ミラーの加工技術

佐野 泰久, 三村 秀和, 山村 和也, 山内 和人, 森 勇藏

大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Ultraprecision Machining Method for Ultraprecise Aspherical Mirror

Yasuhisa SANO, Hidekazu MIMURA, Kazuya YAMAMURA,

Kazuto YAMAUCHI, and Yuzo MORI

Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received October 3, 2006)

An ultraprecise aspherical mirror, which is difficult to fabricate by conventional mechanical machining, is required for optics, particularly in the field of coherent hard X-rays or extreme-ultraviolet lithography. In this review, we introduce new fabrication methods of elastic emission machining (EEM) and plasma chemical vaporization machining (PCVM). They are noncontact machining methods using chemical reactions and enable ultraprecise numerically controlled figuring by dwell time control. We also introduce ultraprecise aspheric ellipsoid mirrors for focusing hard X-rays fabricated using PCVM and EEM with a new figure testing method, were found to achieve nearly diffraction-limited focusing performance.

Key Words: Ultraprecision machining, Hard X-rays, Focusing mirror, EEM, Plasma CVM

1. はじめに

近年、紫外から硬X線の広波長領域において高輝度かつ優れたコヒーレンシーをもつ光源が、SPRING-8に代表される第3世代のシンクロトロン放射光施設によって実現されている。このような放射光は、基礎学問領域において幅広く利用されているが、中でもX線顕微鏡への応用は、細胞や蛋白質の非破壊分析が可能のため、医学、生命科学といった学問領域から注目されている。X線顕微鏡には高輝度かつ極微小径のX線ビームが求められており、そのため極めて高精度な光学素子の開発が盛んに行われている^{1,2)}。一方、早期実用化が望まれている極端紫外線リソグラフィシステムにおいても、形状誤差および表面粗さがあらゆる空間波長において1 nm以下という極めて精度の高い反射鏡が要求されている。

一般に平面や球面に比べ非球面を高精度に仕上げることは困難であり、様々な加工技術が開発されている。従来の機械研磨を応用したCCP (Computer Controlled Polishing)は、ワーク上における小径ピッチポリッシャの滞在時間をコンピュータ制御して修正加工を行う方法³⁻⁹⁾で、概ね0.1~10 mm³/hの体積加工速度で、50 nm peak-to-valley (p-v) 程度の形状精度が実現可能である。IBF (Ion Beam Figuring)は、イオンスパッタリングを応用したもので、ワーク各場所におけるイオンビーム照射量をコンピュータ制御することで任意の形状加工を行う方法であ

る⁹⁻¹³⁾。加工速度は0.05~2 mm³/h程度とCCPに劣るが、形状精度はCCPよりも優れており、1 nm p-vに迫る例も報告されている⁹⁾。その他、磁性流体研磨 (Magnetorheological Finishing; MRF)¹⁴⁻¹⁶⁾や、PACE (Plasma Assisted Chemical Etching)^{17,18)}、PJCE (Plasma Jet Chemical Etching)¹⁹⁾等、CCP程度の形状精度を有しつつ、高能率な方法が提案されている。

我々のグループでは、原子オーダーで平滑な表面を形成可能なEEM (Elastic Emission Machining)²⁰⁻²³⁾や、高能率にナノメートルオーダーの形状加工が可能なプラズマCVM (Chemical Vaporization Machining)²⁶⁻³²⁾といった独自の加工法を開発してきた。本稿では、EEMおよびプラズマCVMの概要について紹介するとともに、これらの加工法を用いて製作した硬X線集光用非球面ミラーについて解説する。

2. EEMおよびプラズマCVMによる超精密加工

2.1 EEM

EEMは、微粒子表面と被加工物表面間の化学反応を利用した超精密加工法である。Fig. 1に加工原理を示す。微粒子は超純水の流れによって被加工物表面に供給され、被加工物表面近傍に形成されたせん断流によって、被加工物表面を転がり、やがて流れに乗って被加工物表面から離脱する。微粒子が被加工物表面に接触した際、両者

Fig. 1 Schematic of machining mechanism of EEM.

の組み合わせ次第で微粒子表面原子と被加工物表面原子の間に化学結合が生じる。たとえばシリコンを加工する場合は微粒子(SiO_2 , ZrO_2 等)表面の酸素原子が被加工物表面のシリコン原子と結合する。被加工物表面原子と微粒子表面原子との間の結合力が、被加工物表面原子と被加工物第二層原子との間の結合力よりも大きい場合、被加工物表面原子は微粒子の運動に伴って被加工物表面から離脱し、加工が進行する。通常、EEMでは微粒子と超純水を混合した加工液を作製し、加工液を被加工物表面に供給することによって加工を行う。加工液の供給方法には、被加工物と回転球間に生じる弾性流体潤滑流れを利用する方法と、加圧した加工液をノズルから被加工物に向けて噴出する方法が用いられている。EEMの特徴の一つは、通常の研磨とは異なり化学反応に基づく加工であるという点である。量子力学の第一原理に基づく分子動力学シミュレーションによる解析²⁵⁾により、EEMは原子単位の加工であることが確認されている。また、シリコンウエハを試料として、加工面の表面準位密度を測定した結果、EEM加工面の表面準位密度は通常の研磨面に比べて1/20以下であり、ケミカルエッチング面と同程度しか存在しないことが分かっている²⁴⁾。これは、EEM加工面には殆ど欠陥が存在していないことを示している。EEMのもう一つの特徴として、原子レベルの平滑面が自動的に形成される点が挙げられる。先に述べたとおり、EEMでは微粒子表面原子に結合した被加工物表面原子が化学反応に基づき除去されるため、微粒子の接しない部分は除去されない。すなわちEEMは、化学反応に基づいた加工でありながら、被加工物表面上の凹部は除去されず凸部のみが優先的に除去されていく特性を有している²³⁾。

Fig. 2はEEMを用いて加工したSi(001)基板の表面を走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope; STM) を用いて観察した結果である²²⁾。20 nm四方を観察したものであるが、個々の原子が完全に解像できていることが分かる。一般にSTMによって観察されているSi(001)表面は、超高真空中での高温アニールにより再構成された表面がほとんどであり、このように超精密加工表面を直接観察したものは他に類を見ない。またFig. 3は100 nm四方を観察した結果を原子層毎に分けて解析した例であるが、Fig. 3(b)の層を基準として、一層手前の層 (Fig. 3(c)) と一層奥

Fig. 2 Scanning tunneling microscopy image (20 nm × 20 nm) of Si(001) surface after EEM process.

Fig. 3 (a) Scanning tunneling microscopy image (100 nm × 100 nm) of Si(001) surface after EEM process. (b) Spatial distribution of most frequent atomic layer, (c) that of layer above (b), and (d) that of layer below (b).

の層 (Fig. 3(d)) の合計3層に、全体の95%以上の原子が属していることが分かり、極めて平坦な表面であることが分かった。

2.2 プラズマCVM

EEMは前述の通り原子単位の加工法であり原子オーダーで平滑な面を作製できるが、加工速度が非常に小さいため最終仕上げ加工に適した方法である。このためEEMに先行して加工面に欠陥をもたらさず比較的短時間でナノメートルオーダーの精度を有する高能率な加工法を用いる必要がある。著者らはそのような加工法としてプラズマCVMを開発した^{26,30)}。プラズマCVMは、大気圧プラズマ中で生成された高密度の中性ラジカルと被加工物表面原子との化学反応を用いた高能率超精密加工法である。Fig. 4に加工原理を示す。フッ素や塩素等を含むハロゲン化合物ガスとヘリウムやアルゴン等の不活性ガスの混合ガスを反応ガスとして加工装置内に充填し、被加工物と電極間に高周波電界を印加することでプラズマを発生させる。プラズマ中ではハロゲン化合物ガスから極めて活性なハロゲン中性ラジカルが生成され、被加工物表面原子はこれらの中性ラジカルと化学結合することで揮発性物質となって表面から離脱し、加工が進行する。このように加工原理そのものは、半導体製造プロセス等で用いられる低圧のプラズマエッチングと同様であるが、反応ガ

Fig. 4 Schematic of machining mechanism of PCVM.

ス圧力が大気圧であることから、次のような3つの特徴を有する。まず、ガス密度が大きいためプラズマ中で生成される中性ラジカル密度が大きく、研削や研磨といった機械加工に匹敵する加工速度で無歪加工が可能であること、そして、反応ガスの平均自由行程が小さいためプラズマは被加工物と電極の間の電界強度の大きい領域のみに局所的に発生させることが可能であり、機械加工に匹敵する高い空間分解能を得ることができること、さらに、同じく平均自由行程が小さいため、プラズマ中の平均イオンエネルギーが小さく、被加工物表面に対するイオン損傷が極めて小さいこと、である。プラズマCVMでは、加工用電極の形状により、様々な応用が検討されている。Fig. 5(a)のワイヤー電極は比較的薄い基板の切断や薄膜のパターニング²⁷⁾等に適しており、Fig. 5(b)のパイプ電極は加工能率よりも空間分解能が要求される際に用いられている^{28,29)}。これらの電極は構造が簡便で良好な空間分解能が得られる反面、電極の耐熱性の問題から投入できる電力の上限が小さく、加工能率が要求される場合には適さない。Figs. 5(c), (d), (e)に示す電極は回転電極と呼ばれている。大気圧雰囲気下において電極を回転させることで電極表面近傍には粘性によるガスの流れが生じ、加工部への反応ガスの供給と加工部からの反応生成物の排出を高効率に実現できると共に、ガスの流れによる冷却効果から大電力の投入が可能になる。そのため、回転電極を用いることで高能率な加工が実現できる。Fig.

Fig. 5 Electrode types for PCVM. (a) wire type for cutting and patterning, (b) pipe type for fine figuring, (c) inner-blade type for slicing, (d) cylindrical type for polishing, and (e) sphere type for numerically controlled figuring.

5(c)はスライシング用の内周刃型回転電極、Fig. 5(d)はポリシング用の円筒型回転電極、Fig. 5(e)は数値制御加工用の球型回転電極をそれぞれ表している。後に述べる数値制御加工法を用いてプラズマCVMにより平面ミラーを加工した例をFig. 6に示す。ミラーの大きさは長さ400 mm、幅50 mm、厚さ30 mmで、材質は面方位(100)のシリコン単結晶である。機械研磨によって仕上げられた前加工面の平面度は158 nm p-vであったが、数値制御プラズマCVM加工を行った結果、22.5 nm p-vまで平坦度を向上させることができる。

2.3 数値制御加工法

EEM, プラズマCVMは共に工具に相当する加工液供給用ノズルやプラズマ発生用電極とワークが接触しない加工法であるため、数値制御加工は微粒子供給時間もしくはプラズマ照射時間、すなわちワーク表面上における反応種の滞在時間制御によって行う。工具とワークが接触する研削や研磨といった加工法においては、それらの相対位置関係あるいは接触圧力等が加工にとって重要なパラメータとなるため、加工中に生ずる僅かな振動や熱変形が直接加工精度に対して悪影響を及ぼす。これに対し、EEMやプラズマCVMにおいては、通常、工具とワークの間に数百 μm から1 mm程度の間隙を設けているため、多少の振動や熱変形は加工精度に殆ど影響を与えない。また、両者とも加工原理は化学反応であり加工面に加工歪層が形成されないことから、加工に伴う残留応力は発生せず、加工後にワークが反ったり、経時変化によってワーク形状が変化したりすることも無い。Fig. 7に具体的な数値制御加工手順を示す。まず、前加工面形状を高精度に計測する。そして、目標形状を得るための各場所の加工量を算出し、予め取得済みのワークテーブル静止状態での単位加工痕形状でデコンボリューションをとることで、各場所の滞在時間分布を算出する。その後、微粒子を供給またはプラズマを発生させた状態で、滞在時間の逆数に相当する送り速度分布でワークテーブルを走査して加工を行う。加工後は再度ワーク形状を計測し、加工と計測を繰り返すことで、要求精度に到達する。

Fig. 6 X-ray flat mirror fabricated by numerically controlled PCVM. (a) Premachined surface profile and (b) figured surface by PCVM.

Fig. 7 Procedures of numerically controlled PCVM and EEM.

2.4 高精度形状計測法

このように、本加工法において数値制御加工は前加工面形状に基づいて行われるため、加工精度は前加工面の形状計測の精度に依存する。従って、高精度の加工を実現するためには、高精度の形状計測法が不可欠である。硬X線用ミラーへの応用を考えた場合、理想的な反射率や集光特性を得るためには、表面粗さから形状までの全空間波長領域において、1 nm p-vレベルの精度が求められる。特に、空間波長0.3 mm～数mmの領域の凹凸は反射光の強度ムラを発生させるため、完全に除去する必要がある。従って数値制御加工に使用する形状データには、0.1 mmレベルの高分解能領域と長空間波長領域の両方の領域においてナノメートルレベルの精度が求められる。光干渉計、接触式形状計測³³⁾、LTP(Long Trace Profiler)^{34,35)}等の既存の計測器では、このような要求を満たす計測データを得ることはできない。そこで、数mm以下の短い空間波長領域において高精計測が可能なマイケルソン型顕微干涉計(ZYGO NewView 200HR)と、数mm～数百mmの中長周期の空間波長領域において高精度計測が可能なフィゾー型干涉計(ZYGO GPI XP-HR)の二つの干涉計を用いることで、X線ミラー作製に十分な精度を有する形状計測システム(Microstitching Interferometry; MSI)を開発した³⁶⁾。通常、顕微干涉計を用いて1視野に納まらない広域形状を計測する場合、重なり部を設けながら視野をずらして全域を計測し、隣り合う計測データの重なり部の傾斜が一致するように両者の傾きを補正して全データを繋ぎ合わせることで、広域形状データを得る。しかし、この方法では、繋ぎ合わせる際の角度誤差が積算され、全体の形状としては十分な精度が得られない。開発したシステムでは、繋ぎ合わせる際の角度補正に、フィゾー型干涉計による計測結果を用いることで、X線ミラーに求められる全空間波長領域において1 nm以下の測定精度を実現した。さらに、曲率の大きいミラーにもMSIを適用するため、角度参照用基準平面と高精度傾斜ステージを用い、試料を既知角度傾斜させながらミラー全域の干涉計測を

行う、RADSI (Relative Angle Determinable Stitching Interferometry) も開発済みである³⁷⁾。

3. 硬X線集光用ミラーの製作

硬X線2次元集光用ミラーの製作を試みた³⁸⁻⁴¹⁾。光学系は、SPring-8の1 km長尺ビームライン (BL29XUL)において、2枚の全反射楕円面ミラーをKirkpatrick-Baez (K-B)型に配置して集光するように設計した。Fig. 8にその概要を示す。ミラーの大きさは長さ100 mm、幅50 mm、厚さ10 mmであり、材質は面方位(100)のシリコン単結晶である。水平集光ミラーの焦点距離と楕円面最大深さはそれぞれ150 mm、約16 μm であり、垂直集光ミラーに関しては、それぞれ253 mm、約10 μm である。なお、本ミラーは全反射条件で使用するため、シリコン単体では極めて浅くなってしまう入射角をできるだけ深くとする目的で表面に白金を蒸着している。Fig. 9に製作した2枚のミラーの形

Fig. 8 Schematic of optical system for X-ray focusing using Kirkpatrick-Baez arrangement.

Fig. 9 (a) Figure profiles of horizontal and vertical focusing mirrors, (b) residual figure error of horizontal mirror, and (c) that of vertical mirror.

状および形状誤差を示すが、2枚のミラーとも、形状精度は2 nm p-v以下であることが分かる。本ミラーを用いて硬X線 (15 keV) を集光した結果をFig. 10に示す。水平方向に関しては36 nm、垂直方向に関しては48 nmの半値幅が得られており、極めて微細なX線プローブの形成に成功した。なお、Fig. 10中のシミュレーション値とは、ミラー形状として設計形状を用い、波動光学理論に基づく計算機シミュレーション³⁹⁾を行った結果であり、回折限界に相当するものである。測定値はシミュレーション値とよく一致していることから、回折限界集光を達成していると言え、加工法、計測法ともに十分な精度が得られた結果と言える。製作したK-B光学系による高分解能走査型蛍光X線顕微鏡を用いて細胞内の元素分布観察を行う共同研究が進行中であり⁴²⁾、生命科学への貢献が大いに期待されている。

4. おわりに

ミラーの高精度加工技術ということで、我々のグループが開発してきたEEMおよびプラズマCVMについてその概要を紹介し、最近の成果として硬X線集光用の非球面ミラーの製作について紹介した。大雑把な説明のため分かりにくい点も多々あると思われるが、詳細については参考文献を参照いただきたい。我々は現在さらなる極限を目指すべく、さらに微小な集光サイズを得ることが可能な開口数 (Numerical Aperture ; NA) の大きなミラーの製作を計画している。そのためには、より曲率の大きな非球面形状をより高精度に製作する必要がある、新たな形状計測技術や形状修正技術を鋭意開発中である。なお、今回紹介した研究は、筆者らと理化学研究所播磨研究所の石川哲也氏、玉作賢治氏、西野吉則氏、高輝度光科学研究センターのAlexei Souvorov氏、矢橋牧名氏、熊本大学の久保田章亀氏、ならびに大阪大学の有馬健太氏、稲垣耕司氏、斎藤彰氏等、多くの方々との共同研究によって行われたものである。

Fig. 10 (a) Intensity distribution profile of focused X-ray beam in horizontal direction and (b) that in vertical direction.

参考文献

- 1) A. Takeuchi, Y. Suzuki, H. Takano, and Y. Terada: *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005) 093708.
- 2) Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano, and H. Takenaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 1994.
- 3) G. Derst, H. Handschuh, M. Schmit, and K. Werner: *Proc. SPIE* **3152** (1997) 51.
- 4) 根岸 真人, 安藤 学, 瀧本 雅文, 出口 明信, 中村 宣夫: 精密工学会誌 **62** (1996) 408.
- 5) 山下一博, 笹子 勝, 野村 登, 新宮 克喜, 持田 省郎, 上田 修治: 超精密生産技術大系 第2巻 実用技術 (フジ・テクノシステム, 東京, 1994) 1005.
- 6) 鈴木 浩文, 原 成一, 松永 博之: 精密工学会誌 **59** (1993) 1713.
- 7) 鈴木 浩文, 小寺 直, 島野 裕樹: 精密工学会誌 **60** (1994) 827.
- 8) 鈴木 浩文, 小寺 直, 中筋 智明, 太田 努, 庄司 克雄: 精密工学会誌 **63** (1997) 1280.
- 9) M. Weiser, J. Fröschke, H. Handschuh, M. Jülich, M. Mayer, and G. Seitz: *Proceedings of 9th International Conference on Production Engineering* (1999) p. 61.
- 10) M. Fruit, A. Schindler, and T. Hansel: *Proc. SPIE* **3739** (1999) 142.
- 11) A. Schindler, T. Haensel, D. Flamm, A. Nickel, H. J. Thomas, and F. Bigl: *Proceedings of 9th International Conference on Production Engineering* (1999) p. 243.
- 12) M. Weiser: *Nucl. Instrum. Meth.* **B80/81** (1993) 1174.
- 13) K. B. Becker: *Proceedings of 9th International Conference on Production Engineering* (1999) p. 51.
- 14) S. D. Jacobs, D. Golini, Y. Hsu, B. E. Puchebner, and D. Strafford: *Proc. SPIE* **2576** (1995) 372.
- 15) W. Kordonski, D. Golini, P. Dumas, and S. Hogan: *Proc. SPIE* **3326** (1998) 527.
- 16) D. Golini: *Proceedings of 9th International Conference on Production Engineering* (1999) p. 132.
- 17) D. Bollinger, G. Gallatin, J. Samuels, G. Steinberg, and C. Zarowin: *Proc. SPIE* **1333** (1990) 44.
- 18) J. Hoskins: *Proc. SPIE* **2542** (1995) 220.
- 19) G. Boehm, W. Frank, A. Schindler, A. Nickel, H. J. Thomas, F. Bigl, and M. Weiser: *Proceedings of 9th International Conference on Production Engineering* (1999) 231.
- 20) 森 勇藏, 山内 和人, 遠藤 勝義: 精密工学会誌 **55** (1989) 480.
- 21) 森 勇藏, 山内 和人, 杉山 和久, 稲垣 耕司, 三村 秀和, 今井 利幸: 精密工学会誌 **67** (2001) 607.
- 22) 山内 和人, 三村 秀和, 久保田, 章亀, 有馬 健太, 稲垣 耕司, 遠藤 勝義, 森 勇藏: 精密工学会誌論文集 **70** (2004) 547.
- 23) 久保田 章亀, 三村 秀和, 稲垣 耕司, 森 勇藏, 山内 和人: 精密工学会誌論文集 **71** (2005) 762.
- 24) 山内 和人, 杉山 和久, 稲垣 耕司, 山村 和也, 佐野 泰久, 森 勇藏: 精密工学会誌 **66** (2000) 630.
- 25) 山内 和人, 稲垣 耕司, 三村 秀和, 杉山 和久, 広瀬 喜久治, 森 勇藏: 精密工学会誌 **68** (2002) 456.
- 26) Y. Mori, K. Yamamura, K. Yamauchi, K. Yoshii, T. Kataoka, K. Endo, K. Inagaki, and H. Kakiuchi: *Nanotechnology* **4** (1993) 225.
- 27) S. Kiyama, S. Nakano, Y. Domoto, H. Hirano, H. Tarui, K. Wakisaka, M. Tanaka, S. Tsuda, and S. Nakano: *Solar Energy Material. Solar Cells* **48** (1997) 373.
- 28) H. Takino, N. Shibata, H. Itoh, T. Kobayashi, H. Tanaka, M. Ebi, K. Yamamura, Y. Sano, and Y. Mori: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** (1998) L894.
- 29) K. Yamamura, K. Yamauchi, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and Y. Mori: *Rev. Sci. Instrum.* **74** (2003) 4549.
- 30) 森 勇藏, 山内 和人, 山村 和也, 佐野 泰久: 精密工学会誌 **66** (2000) 1280.
- 31) 森 勇藏, 山内 和人, 山村 和也, 三村 秀和, 佐野 泰久, 斎藤 彰, S. Alexei, 玉作 賢治, 矢橋 牧名, 石川 哲也: 精密工学会誌 **68** (2002) 1347.
- 32) 森 勇藏, 山村 和也, 佐野 泰久: 精密工学会誌 **68** (2001) 1590.
- 33) 根岸 真人: 精密工学会誌 **67** (2001) 1632.
- 34) P. Z. Takacs, S. Qian, and J. Colbert: *Proc. SPIE* **749** (1987) 59.
- 35) H. Li, P. Z. Takacs, and T. Oversluizen: *Proc. SPIE* **3152** (1997) 180.
- 36) 山内 和人, 山村 和也, 三村 秀和, 佐野 泰久, 久保田 章亀,

- 関戸 康裕, 上野 一匡, S. Alexei, 玉作 賢治, 矢橋 牧名, 石川 哲也, 森 勇藏: 精密工学会誌 **69** (2003) 856.
- 37) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi: *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005) 045102.
- 38) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, A. Saito, H. Kishimoto, Y. Sekito, M. Kanaoka, A. Souvorov, M. Yabashi, T. Kenji, and T. Ishikawa: *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* **4501** (2001) 30.
- 39) 山内 和人, 山村 和也, 三村 秀和, 佐野 泰久, 齋藤 彰, 久保田 章亀, 金岡 政彦, S. Alexei, 玉作 賢治, 矢橋 牧名, 石川 哲也, 森 勇藏: 精密工学会誌 **69** (2003) 997.
- 40) 松山 智至, 三村 秀和, 湯本 博勝, 原 英之, 山村 和也, 佐野 泰久, 西野 吉則, 玉作 賢治, 矢橋 牧名, 石川 哲也, 山内 和人: 精密工学会誌論文集 **72** (2006) 884.
- 41) H. Mimura, S. Matsuyama, H. Yumoto, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, M. Shibahara, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) L539.
- 42) M. Shimura, A. Saito, S. Matsuyama, T. Sakuma, Y. Terui, K. Ueno, H. Yumoto, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, M. Yabashi, K. Tamasaku, K. Nishio, Y. Nishino, K. Endo, K. Hatake, Y. Mori, Y. Ishizaka, and T. Ishikawa: *Cancer Research* **65** (2005) 4998.

レーザーワード

硬X線ミラー(hard X-ray mirror)

物質のX線に対する屈折率は1よりも小さいため、X線領域においては可視光領域におけるレンズのような屈折光学系を用いることが出来ない。また硬X線領域においては、直入射における反射率が極めて小さく、直入射反射光学系を用いることも困難である。そのため硬X線集光には、主にフレネルゾーンプレートや全反射光学系が用い

られているが、集光強度が必要とされる場合は全反射光学系が適しており、楕円面鏡を2枚組み合わせたKirkpatrick-Baez(K-B)型ミラーや、回転双曲面と回転楕円面を組み合わせたWolter型ミラー等が用いられている。

(佐野 泰久)