



X線結像光学ニュースレター

No. 48 2018年12月発行

高圧変形実験装置で解き明かす地球深部のレオロジー

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター 野村龍一

東真太郎(九州大学)、西原遊(愛媛大学)、上杉健太郎(JASRI/SPring-8)、入船徹男(愛媛大学)

われわれが住む地球の地下深くはとてもダイナミックで、謎に満ちている。マントルは地質学的な時間スケールでは流体としてふるまい、地球深部の熱を地表へと逃がすため対流する。プレートは地表から深部へ沈み込む。一方で太平洋とアフリカ大陸の下では、マントルの底から数千キロメートル規模のプルーム(上昇流)が生じている。このような地球内部の活動は、地球史を通じた地球表層環境の変動や深発地震など、さまざまな時間・空間スケールで人

類の生活に影響を与えるため、その理解は人類の自然な要求である。しかしそこは極めて高い圧力と温度が支配しているため、文字通りのフロンティアで直接探査が不可能な領域である(図1)。例えば掘削による直接探査の世界記録は、ロシア北部のコラ半島超深度掘削坑の深さたった12 kmでしかない。一方で、地震波や電気伝導度、ニュートリノ、地質学的記録といった間接的観測手段は、我々に地球内部に関する様々な情報を与えてくれる。例えば地

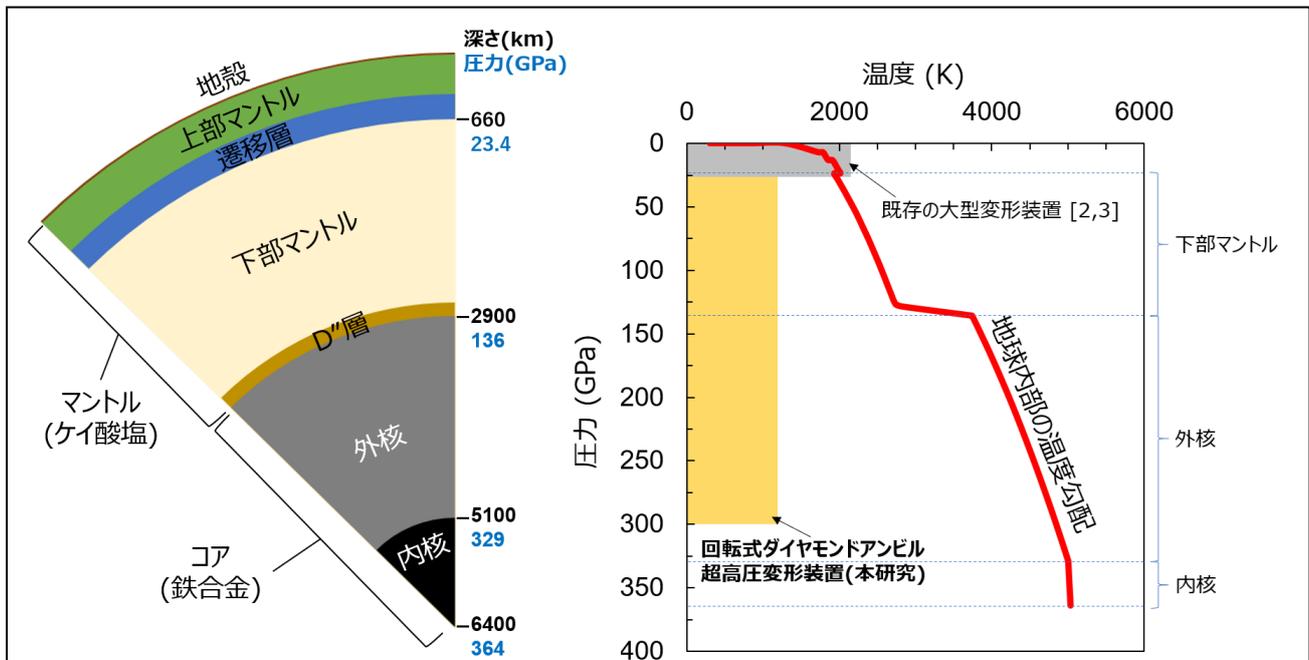


図1 :地球の断面図(左)と変形実験が可能な圧力温度範囲(右)。地球は玉ねぎ型の層構造をしている。各層は組成の違いや結晶構造の違い、状態の違い(液体の外核と固体の内核)による。回転式ダイヤモンドアンビル超高压変形装置の開発により、地球中心核圧力での変形実験が可能になった。

震波速度異方性と呼ばれる、地震波の伝播速度がその方位によって異なる現象は、地球内部の流動に伴う構成物質の変形と選択配向(多結晶体の結晶向きが揃うこと)で説明されると考えられている。どのような選択配向が地震波(=弾性波)観測を説明できるのか、その選択配向はどのような変形、流動場で起きるのか、高圧高温変形実験で明らかとなる力学データによって、さまざまな観測データを地球内部の活動の理解へとつなぐことができる。

近年の高圧地球科学における「静的」圧縮実験技術、特に超高压高温発生技術と放射光X線を組み合わせた各種その場測定技術の進歩はめざましく、今ではダイヤモンドアンビル超高压装置を用いることで地球中心の圧力と温度を実験室に再現、その結晶構造などを決定できるまでになっている[1]。一方で、変形実験による物質の流動特性(レオロジー、「動的」性質)の研究に関しては、大型変形装置(回転ドリッカマー装置、D-DIA装置)による約30 GPaまでに限られている[2,3]。そこで筆者らは、ダイヤモンドアンビル超高压装置をベースとし、変形実験用に改良した回転式ダイヤモンドアンビル変形装置[4]を高度化し、地球全域の圧力温度で変形実験を可能にするため開発に取り組んでいる。

ダイヤモンドアンビル超高压装置において、高圧力は、対向するダイヤモンド(約0.1-0.2カラット、ダイヤモンドアンビル業界では宝石用語がそのまま使用されることが多い)の先端に試料を置き、封圧のためのガスケット(Reがよく用いられる)とともに押し込むことで発生される(図2)。達成可能な圧力はアンビル先端のデザインによって決まる。最も重要なパラメータは先端面(キュレット)の径であり、それによって試料サイズも決まる。80 GPaまでの実験ではキュレット径300 μmで試料の大きさは約100 μmφ、厚み数十μm程度、地球中心の364 GPaではキュレット径40 μm程度で試料の大きさは約20 μmφ、厚み数~sub μm程度となる。圧力印加後、片側のアンビルを回すことで、試料にねじりによる変形を加える。筆者らは、2017年にマントルの底に対応する圧力での変形実験に成功し

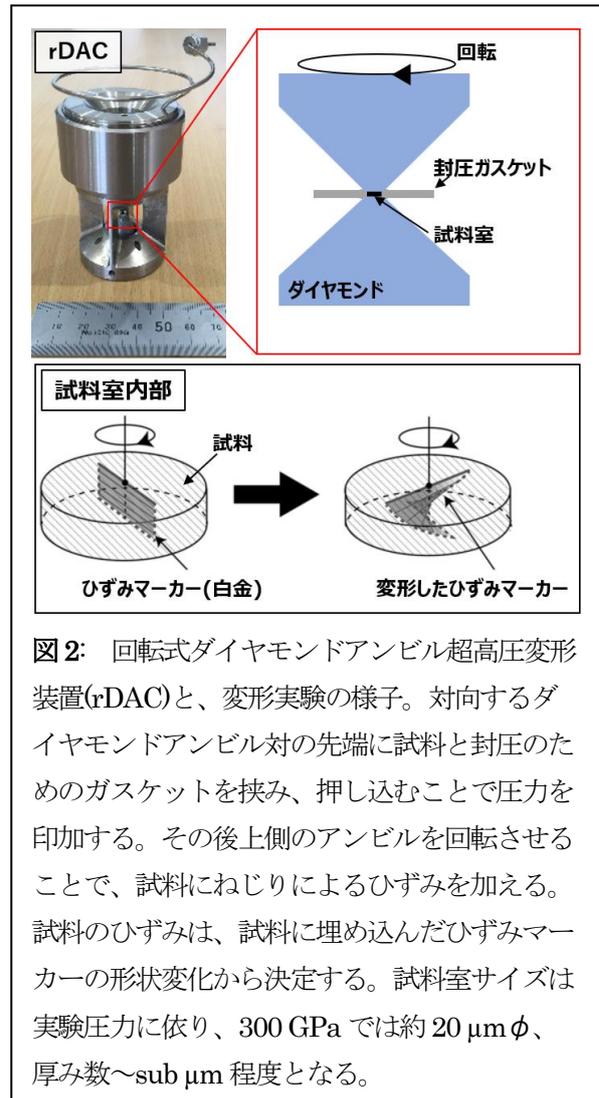


図2: 回転式ダイヤモンドアンビル超高压変形装置(rDAC)と、変形実験の様子。対向するダイヤモンドアンビル対の先端に試料と封圧のためのガスケットを挟み、押し込むことで圧力を印加する。その後上側のアンビルを回転させることで、試料にねじりによるひずみを加える。試料のひずみは、試料に埋め込んだひずみマーカーの形状変化から決定する。試料室サイズは実験圧力に依り、300 GPaでは約20 μmφ、厚み数~sub μm程度となる。

[5]、現在では可能な実験圧力は約300 GPaに到達している。

地球深部のレオロジーを理解する上で、構成物質の選択配向や粘性は最も優先度が高い測定対象である。これらの決定のためには、高圧変形試料中のひずみ(ひずみ速度)、応力、結晶選択配向を知ることが必要となる。そこで筆者らは、大型放射光施設 SPring-8 BL47XUにおいて、微小高圧変形試料内の応力、選択配向とひずみ(ひずみ速度)の測定系立ち上げを行った。

試料内部のひずみとひずみ速度分布は、試料に埋め込んだひずみマーカー(Ptを使用)の三次元形状とその変化速度から決定する。我々は、X線ラミノグラフィ撮影技術を高圧その場環境へ応用する[6]ことで、X線がReガスケットを通過しないジオ

メトリでのひずみマーカ－の高圧その場三次元イメージングに成功した(図3) [5, 7]。撮像には8-12 keVのX線エネルギーを用い、ボクセルサイズは約40-80 nmであった。0.1° 毎、露光時間500 msで計3600枚の投影像を撮像した。試料回転軸は30°

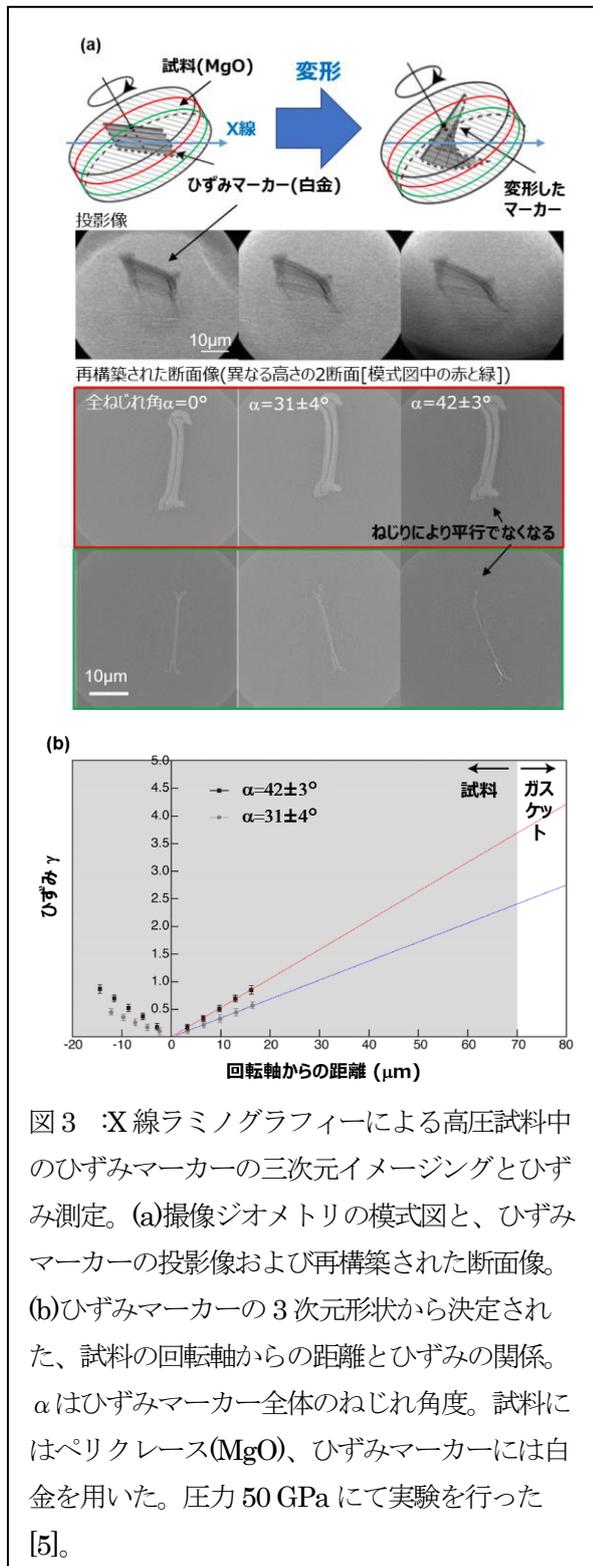


図3 :X線ラミノグラフィーによる高圧試料中のひずみマーカ－の三次元イメージングとひずみ測定。(a)撮像ジオメトリの模式図と、ひずみマーカ－の投影像および再構築された断面像。(b)ひずみマーカ－の3次元形状から決定された、試料の回転軸からの距離とひずみの関係。 α はひずみマーカ－全体のねじれ角度。試料にはペリクレーズ(MgO)、ひずみマーカ－には白金を用いた。圧力50 GPaにて実験を行った [5]。

傾けた。断面像の再構築にはフィルタ補正逆投影法を用いた [8]。ひずみマーカ－の形状から決定された試料内部のひずみ分布は、回転変形軸からの距離に直線的な関係が観察され、試料内部で理想的な変形が起きていることが確認できた(図3)。

応力と選択配向は、X線回折測定における回折線の 2θ と回折強度の回折方向依存性から決定できる。36 keVのX線エネルギーを用いたX線回折測定系をBL47XUに取り入れ、高圧変形その場環境でのX線回折測定が可能となった(図4)。今後はフレネルゾーンプレートを導入により、X線ビームの極小化を行っていく予定である。

本プロジェクトは2016年よりスタートし、ダイヤモンドアンビルデザインの最適化による変形実験可能圧力の向上と、高圧その場X線ラミノグラフィ撮像法によるひずみ測定系の立ち上げ、高圧変形その場X線回折測定による応力と選択配向の測定法確立に取り組んできた。地球科学への応用研究を開始するにあたって、残された課題は高温の発生のみである(図1)。近年、X線に透過で硬く(変形実験において変形せず)、超高温(~ 4000 K)を発生可能なボロン添加ダイヤモンドが抵抗加熱用ヒーターとして開発・実用化され [9]、ダイヤモンドアンビル実験にも応用されはじめている [10]。我々も今後、当技術を回転式ダイヤモンドアンビル変形装置に導入する予定である。

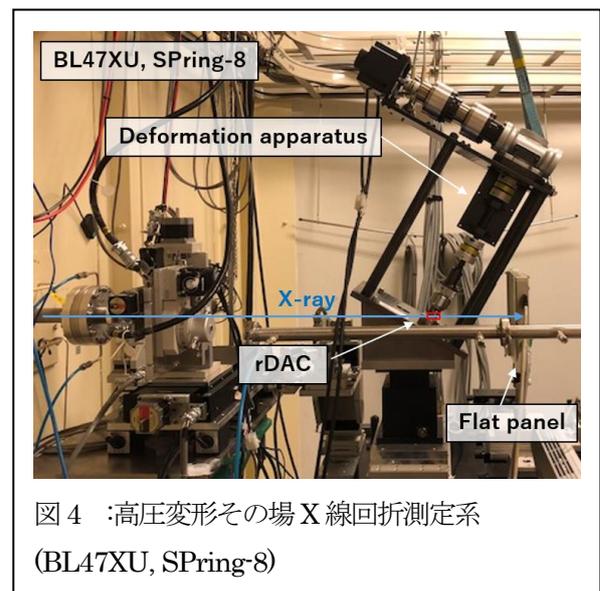


図4 :高圧変形その場X線回折測定系 (BL47XU, SPring-8)

本研究は、科研費「若手研究(A)」「新学術領域研究(研究領域提案型)」、三菱財団「自然科学研究助成」、井上科学振興財団「井上リサーチアワード」の下、遂行された。

参考文献

- [1] S. Tateno et al., *Science* 330 (2010) 359.
- [2] J. Girard et al., *Science* 351 (2016) 144.
- [3] N. Tsujino et al., *Nature* 539 (2016) 81.
- [4] V. D. Blank et al., *Instrum. Exp. Tech.* 27 (1984) 1240.
- [5] R. Nomura et al., *Rev. Sci. Instrum.* 88 (2017) 044501.

- [6] R. Nomura and K. Uesugi, *Rev. Sci. Instrum.* 87 (2016) 046105.
- [7] S. Azuma et al., *High Press. Res.* 38 (2018) 23.
- [8] M. Hoshino et al., *Rev. Sci. Instrum.* 82 (2011) 073706.
- [9] L. Xie et al., *Rev. Sci. Instrum.* 88 (2017) 093904.
- [10] H. Ozawa et al., *High Press. Res.* 38 (2018) 120.

Single Crystal Silicon X-ray Mirrors for Astronomy

William W. Zhang
NASA Goddard Space Flight Center
Greenbelt, MD 20771 USA

Introduction

X-ray mirror assemblies are of paramount importance for astronomy. They image as well as concentrate the extremely faint X-ray fluxes that are typical of astrophysical sources. In combination with sensitive detectors, they have been advancing our knowledge of the Universe from as near as the Solar System to as far as the most distant galaxies. It is no wonder that X-ray astronomers are in constant pursuit of ever better X-ray optics. "Better" is measured by three metrics: *higher angular resolution, lighter weight per unit photon-collecting area, and lower production cost per unit photon-collecting area.*

These three metrics define the usefulness of an X-ray mirror technology. They result from the desire of astronomers to have better point-spread-function (PSF) and large photon-collecting area and the fact that X-ray astronomical observation can only be conducted above the atmosphere on satellites orbiting the Earth. This desire is further compounded by the nature of X-rays that only reflect at grazing angles, requiring gigantic physical mirror areas to achieve a modest photon-collecting area.

Over the past five decades, many groups all over the world have advanced and developed many successful ways of making X-ray mirror assemblies for astronomy, culminating in the successful implementation of four X-ray observatories in the last two decades: Chandra, XMM-Newton, Suzaku,

and NuSTAR, three of which are still currently in operation.

In this Newsletter, after a brief review of the state of the art of X-ray mirror making, I will describe an X-ray mirror technology that my group at NASA Goddard Space Flight Center has been developing. It uses knowledge and lessons learned from past mirror technologies and has the potential of making lightweight diffraction-limited X-ray mirrors at affordable cost for future astronomical observatories, both large and small, ranging from flagships such as Lynx, to Probes such as AXIS and TAP, as well as small observatories such as FORCE and STAR-X.

State of the Art

Each successful X-ray mirror assembly is a scientifically useful compromise among three metrics of PSF, photon-collecting area, and cost in its specific context of technology, budget, and spaceflight opportunity. Of the three in operation, Chandra's mirror assembly, implemented at a huge cost using modern grind-and-polish technologies, was optimized for PSF at the expense of photon-collecting area. NuSTAR's mirror assembly, however, implemented at an extremely low cost using a glass-slumping technology, was optimized for photon-collecting area at the expense of PSF. Chandra's mirror assembly was extremely heavy, whereas NuSTAR's very light. XMM-Newton's mirror assemblies, implemented at a moderate cost using

electroforming technology, had a moderate PSF, a moderate photon-collecting area, and a moderate weight.

The holy grail of X-ray mirror development over the last three decades has been to develop a process that can make mirror assemblies that simultaneously meet the three-fold requirement: PSF as good as, if not better than, Chandra's 0.5" HPD, photon-collecting area per unit mass as low as NuSTAR's, and production cost per unit photon-collecting area as low as possible, comparable to those of NuSTAR's and Suzaku's.

New Paradigm Based on Single Crystal Silicon

The experience of past 50 years of making X-ray mirrors indicates that, at any given time, the polishing process achieves the best PSF, but its mirrors are heavy and expensive. The prime examples of the application of the polishing technology are Einstein, ROSAT, and Chandra. Replication processes, whether based on epoxy or electroforming or glass slumping, on the other hand, achieve only modest PSF at extremely light weight and low cost. The prime examples of the application of the replication process are EXOSAT, Suzaku, and NuSTAR.

In 2011 I realized that combining single crystal silicon (SCSi) and precision polishing technology will enable the making of the best possible lightweight X-ray mirrors. The polishing technology has been advancing by leaps and bounds in the past several decades, realizing ever more deterministic and precise material removal without exerting undue stress that typically can break thin substrates. The SCSi material is free of internal stress and therefore allows the material removal process to be the only one changing the figure of the thin mirror segment as

opposed to a typical material where relief of internal stress can change the figure unpredictably as a result of material removal.

SCSi Mirrors

We have chosen SCSi for several reasons. First of all, a single crystal represents the lowest energy state of a collection of atoms. In other words, one cannot lower the binding energy of the collection by rearranging the configurations of the many atoms. As such, the entire block of silicon is free of internal stress. This is in direct contrast with the typical block of non-crystalline material that contains grain boundaries where energy is stored. Any change in the configuration of these boundaries can result in release of energy, causing change in the shape of the block. Unfortunately, the change is not predictable. Second, silicon has a low density. At 2.35 g/cm³, silicon's density is among the lowest of materials that can be used for making optics. Third, silicon has a very high thermal conductivity, about 100 times higher than the typical glass such as Pyrex, or glass ceramic such as Zerodur, making it much easier to achieve thermal equilibrium in a typical spaceflight's hostile thermal environment. Fourth, silicon has a relatively high elastic modulus, about twice the value of a typical glass, making it much less susceptible to figure distortion that can be caused by stray forces. Last but not least, silicon is the foundational material of the semiconductor industry. Many techniques and equipment have been developed in the last five decades to process it. In particular, as a result, very large blocks of single crystals are available abundantly and inexpensively, which is not the case with any other material. All things considered, SCSi is an ideal material for making lightweight X-ray mirrors for spaceflight.

Figure 1 shows a typical SCSi mirror segment that will be the most basic element for building a large X-ray mirror for space flight. It measures approximately 100 mm in the optical axis direction, 100 mm in the azimuthal direction, and 0.5 mm in thickness (or in the radial direction). Compared to Chandra's mirror shell thickness, this mirror segment is about 32 to 50 times thinner, making it 35 to 55 times lighter after accounting the density difference between silicon and Zerodur.

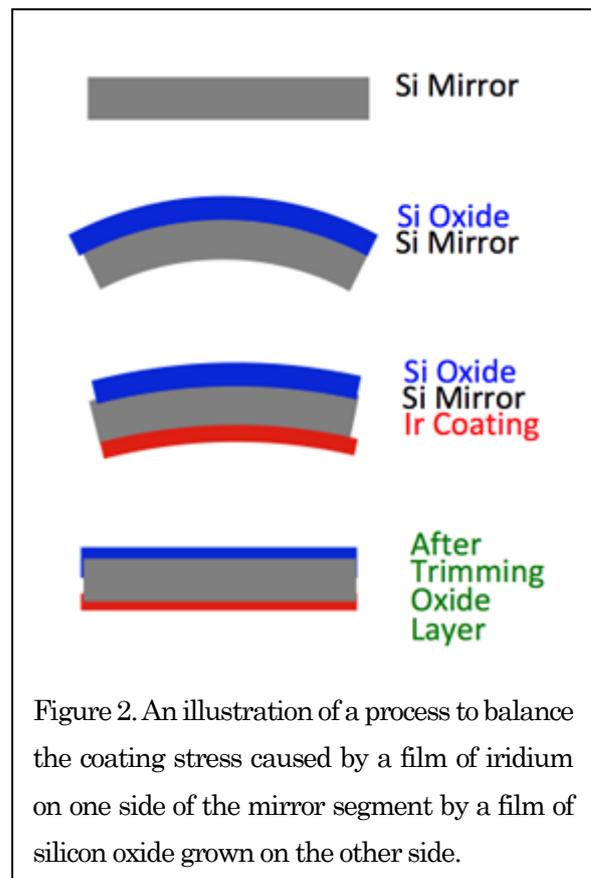


The dimensions of the basic mirror element are determined by a combination of several factors, including dimensions of easily available and affordable single crystal silicon blocks, semiconductor industry processing equipment, gravity distortion when the mirror segment is kinematically supported at four optimal locations, and the fact that shorter axial lengths lead to better off-axis PSF.

In the last few years, my group at NASA GSFC has developed a process that can make mirror segments to a quality of better than 0.5 arc-seconds HPD (two reflection equivalent). These mirror segments are comparable to, in some cases slightly better than, the Chandra mirror elements. We expect to continue to improve and perfect the process in coming years to achieve better PSF and to reduce fabrication time and cost.

Coating

A bare silicon surface has a relatively low reflectance of X-rays. It must be coated with a thin film of iridium or similar material to enhance its reflectance. Unfortunately, even a thin, about 30 nm, film of iridium can severely distort the figure of a 0.5mm thick silicon mirror segment as shown in Figure 1. In collaboration with colleagues at MIT, my group has developed a process using silicon oxide to balance the iridium stress. The basic idea of the process is illustrated in Figure 2.



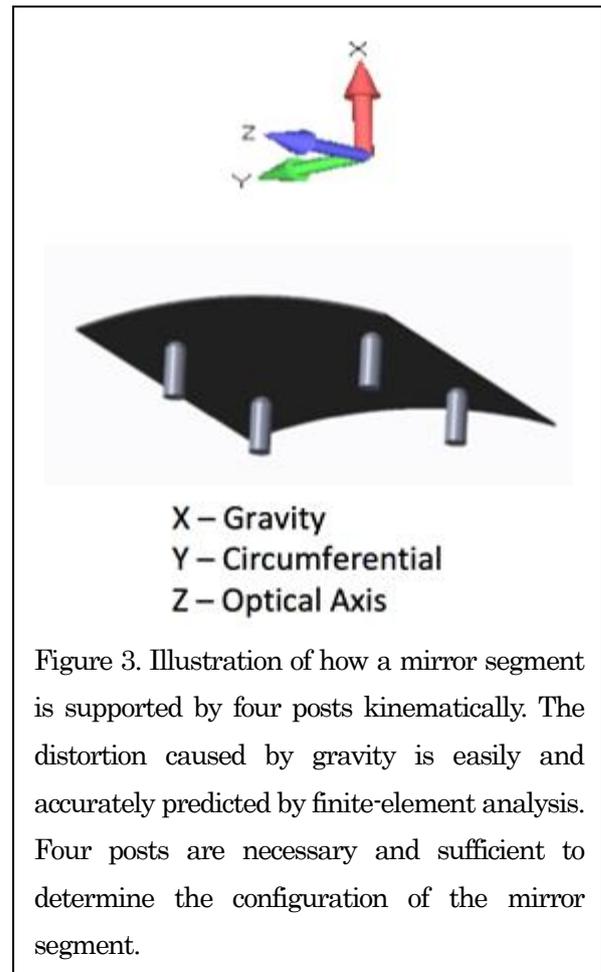
The stress-balancing process takes advantage of the oxide growth process that has been developed and perfected by the semiconductor industry, including commercially available equipment.

As of mid-2018, we have been able to demonstrate that the figure distortion as a result of iridium coating can be reduced to less than 0.3 arc-seconds HPD (two reflection equivalent), making it possible to build a sub-arc-second X-ray mirror assembly for missions such as Lynx and AXIS, both of which are under study by NASA as potential major missions in the 2020s and 2030s.

Alignment

Once fabricated and coated, each mirror segment needs to be aligned and integrated with other mirror segments. The alignment of the mirror segment is achieved by supporting it at four locations, using gravity as the nesting force. The four locations are optimized so as to minimize gravity distortion and frozen-in distortion when the mirror segment is bonded. Perhaps not entirely obvious, four posts, as shown in Figure 3, are necessary and sufficient to uniquely determine the location and orientation of an X-ray mirror segment. A set of Hartmann measurements, interrogating about a dozen axial lines of each mirror segment, are used to determine the orientation of the mirror segment. These measurements are in turn used to determine the height error of each of the four posts. The iterative process of measurement and correction of the posts' heights have shown to converge quickly and lead to desired alignment of the mirror segment.

As of the middle of 2018, we have been able to align each mirror segment to its prescribed configuration with an error on the order of about 1 arc-second HPD (two reflection equivalent), which is currently dominated by systematic effect associated with diffraction of the laser beam. We expect to reduce substantially this error by using an incoherent light source with a shorter wavelength.



Bonding

Once the mirror segment is determined to have achieved alignment on the four posts, it is removed from the four posts. After a small amount of epoxy is applied to each of the four posts, the mirror segment is placed on the four posts again. After the epoxy cures completely, the mirror is permanently bonded.

Modules

The four technical steps described so far, i.e., 1) mirror fabrication, 2) coating, 3) alignment, and 4) bonding, combine to make the mirror modules, as shown in Figure 4. A mirror module typically contains tens of mirror segments precisely aligned and bonded, representing the first of three levels of

integration, the other two being the meta-shell and the mirror assembly.

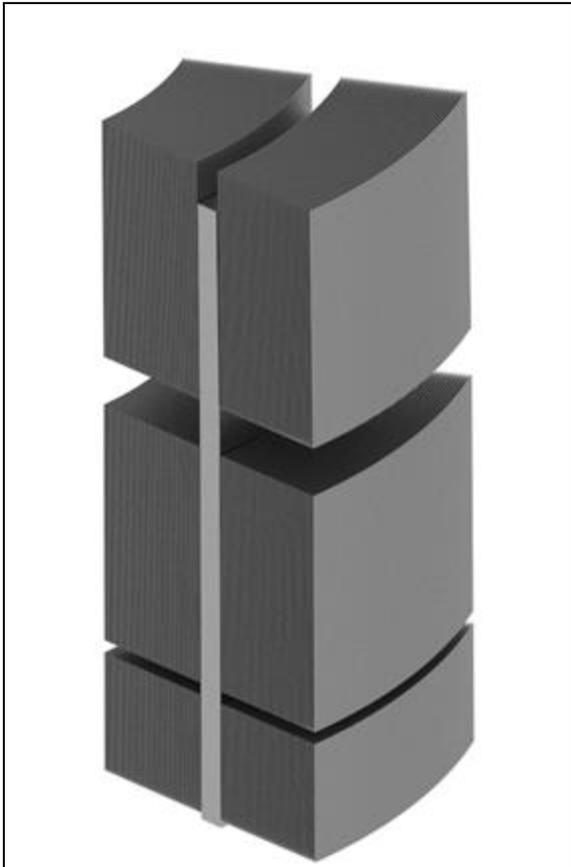


Figure 4. The mirror module consists of tens of mirror segments, both primary and secondary, precisely aligned and permanently bonded together. The three sets of segments are secondaries (top), primaries (middle), and stray light baffles (bottom) which are not polished.

Each mirror module is qualified by performance testing and spaceflight environmental testing. The performance testing includes the measurement of its image quality and effective area at various X-ray energies. The environmental testing may include vibration, thermal vacuum, and acoustic to ensure that not only the module maintains its structural integrity but also its performance before, during, and after being launched on a rocket.

Meta-shells

The next level of integration after the mirror module is the meta-shell which consists of a number of identical modules aligned and bonded to two silicon rings, a forward ring and an aft ring, as shown in Figure 5. When completed, each meta-shell undergoes qualification testing to ensure its structural integrity and to ensure that all modules have been properly aligned and attached without compromising imaging performance.

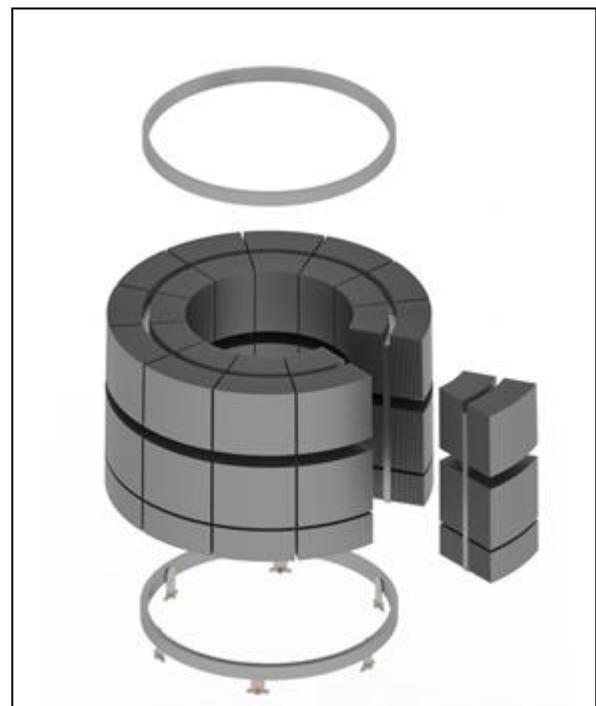


Figure 5. Many identical modules are aligned and bonded together to form a meta-shell.

Mirror Assembly

Having been built and qualified, each meta-shell is aligned and integrated on a spider web to form the mirror assembly. While this alignment and integration must be engineered and done with great care and sophistication, it does not involve any new technology because substantially similar work has been done for many past spaceflight missions. Figure

6 shows an artist's rendition of a very large X-ray mirror assembly, consisting of 12 meta-shells.



Figure 6. An artist's rendition of an X-ray mirror assembly based on our technology described in this paper.

All things considered, a mirror assembly built using the process described so far has the following characteristics.

1. It has the potential of reaching better, possibly much better, than the 0.5" HPD angular resolution of *Chandra*.
2. Its mass per unit photon-collecting, aka effective, area is 20 to 50 times lighter than *Chandra*. In other words, for the same given mass, this technology can build a mirror assembly that has 20 to 50 times more photon-collecting area.
3. For a number of reasons, most important of which is the use of mass production technology and equipment developed by the semiconductor industry, this technology is capable of reducing the production cost of a

mirror assembly by at least a factor of ten on a per unit photon-collecting area basis.

Similar comparisons can be made of this technology with the technologies that were used to build XMM-Newton, Suzaku, and NuSTAR mirror assemblies.

Prospects

The approach and technical elements described in this Newsletter has been undergoing rapid development at NASA Goddard Space Flight Center. We expect to continue to develop and mature this approach in the coming years to enable one or more of the many missions that are currently under study, including AXIS, Lynx, TAP, HEX-P, FORCE, and STAR-X. Our development is to realize ever higher resolution and at an ever-lower production cost while maintaining the lightweight nature of this technology. We hope to achieve sub-arc-second X-ray images in 2019 and reach 0.1" HPD by some time in the 2020s.

Acknowledgements

The work described in this Letter represents the work over many years of many people, especially K.D. Allgood, M.P. Biskach, K.W. Chan, M. Hlinka, J.D. Kearney, L.D. Kolos, J.R. Mazzarella, A. Numata, R.E. Riveros, T.T. Saha, and P.M. Solly, each of whom has made unique and indispensable contributions.

会議報告「SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation

2018」

名古屋大学 KMI 現象解析研究センター/理学研究科 中澤知洋

2018年のSPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation は、テキサス州の州都、オースティンで、6月10日（日）から15日（金）にかけて開催された。天体観測に関わる観測技術について12個の会議が開催され、電波、赤外から可視光、紫外線、X線、ガンマ線までの広い波長で、光学機器、検出器、人工衛星や天文台そのもの、さらには観測所の運用やプロジェクトマネジメントまで、幅広く扱う会議である。天文観測に関わるほぼ全分野の多くの研究者が参加する、装置開発において2年に1度の重要な国際会議となっている。千人を超える聴衆を集めるPlenary Talkは、12会議全体を通じて1セッションで先端の天文学の講演を聞ける場で、毎回非常にレベルが高い。今回も、次世代の巨大宇宙可視光天文台JWSTの現状や、国際宇宙ステーション搭載の面積X線検出器NICERの実績、居住可能系外惑星の探査ミッションの議論など、素晴らしい講演が聞けた。

次回の2020年会合は、横浜でオリンピック直前の6月14日から19日の日程で開催される。日本の関係者には、ぜひ積極的な参加をお願いしたい。

今回私は、「Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray」という会議の3人のConference Chairsの一人として会議を開催するとともに、日本で検討を進めている次世代硬X線観測衛星FORCEの講演をした。さらに、Chairの一人として、重さ数kgの超小型衛星Cubesatに注目し、これを単機、あるいは多数用いて展開する新しい天文学を議論する場を設けた。

二日目の朝、月曜の朝には光赤外の会議と合同で、アメリカで進むDecadal Studyの4種の提案の紹介がなされた。The habitable exoplanet imaging mission (HabEx)は、可視光天文衛星の1万2000km彼方にstar shadeを設置して惑星を直接観測する提案で、the Origins Space telescopeは温度4Kに冷却した3mの望遠鏡を用いる赤外線次世代天文衛星計画、The Lynx X-ray ObservatoryはChandra X線天文衛星と同等以上の角度分解能で大面積を実現する次世代の大型X線天文衛星計画、そしてThe large UV/optical/infrared surveyor (LUVOIR)は可視光の大型将来計画である。いずれも巨大な計画で予算規模も数千億円に達する莫大なものとなっている。X線衛星を除き、いずれもHabitable惑星の発見をトップサイエンスに掲げたことが非常に印象的であったが、同時にあまりに画一的で、却って危惧を覚えるほどであった。選択と集中も、行き過ぎは良くない。

X線望遠鏡関係の講演では、ESAのAthena衛星用に開発が進むSi pore opticsでも進捗が見られたが、一番気を吐いていたのはNASAのZhang博士のSi研磨テクノロジーで、Walter-I型の2回反射鏡1セットを製作して、4.5 keVのX線で集光結像を実測し、half power diameterで3秒角という実績を示して注目されていた。ただし、まだ1セットであるため今後は多数のSiミラーの組み立て・アライメント技術と、量産体制の確立が注目される。



図 1

日本の X 線関係では、2016 年に打ち上げられ 2 ヶ月で失われてしまった「ひとみ」衛星の成果を受けた、次世代計画の講演が重要である。X 線分光撮像衛星 XRISM は、日米欧の連携で開発が進められ「ひとみ」の軟 X 線精密分光を引き継ぐ計画で、着々と進行している様子が報告された(図 1)。硬 X 線帯域を引き継ぐのは、私が発表した FORCE 衛星計画であり、上記の Zhang 氏の X 線望遠鏡に多層膜スーパーミラーを蒸着し、日本の先端の検出器技術と組み合わせて NASA の現役の硬 X 線撮像衛星 NuSTAR の 1 桁上の感度を目指すものである。会議では、NuSTAR のグループを中心に、広帯域 X 線観測に興

味のあるみなさんと活発で有意義な議論をすることができた。

数 kg の超小型衛星の天文学への応用はすでに始まりつつあり、本研究会でも多くの提案がなされた。昨年の中性子星連星の合体からの重力波が検出され、同時にショートガンマ線バーストと呼ばれる現象が観測されたことで、このガンマ線を観測するために 10-20 個の Cubesat を展開して、その到来時刻差から到来方向を知る計画の提案が複数なされた。日本も参加しているハンガリーの提案では、9 個の衛星を軌道上に上げることで、全天に対し典型的に 10 分角レベルの位置分解能を得る。同様の計画間でデータを共有してさらに精度が上がる検討も進んでおり、全員の貢献で新しいサイエンスを実現する興味深い観測技法である。今後の発展から目が離せない。

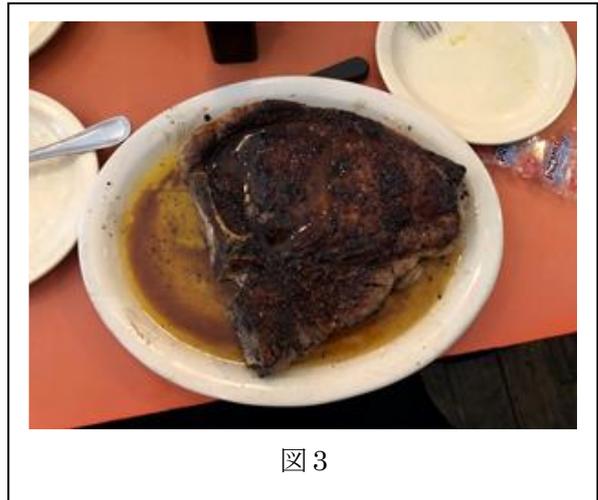


図 2

最後に、オースティンについてご紹介したい。テキサス州の州都として、立派な議事堂が町のシンボルとなっている(図 2)。中を見学することもでき、大統領となったブッシュ親子の州知事時代の紹介を見たり、州議会の会議場の中を歩くこともできる。その場にいた事務所の方が、若い頃、軍隊で日

本でにいたこそうで、最後は日本語で「さようなら」とあいさつしてくれたのが印象に残っている。テキサスといえば、カウボーイ、カウボーイといえばビーフステーキである。一食 100 ドルの高級レストランのヒレスステーキは大変上品で満足できる味であったが、一食 30 ドルの地元のステーキ屋さんの「T ボーンステーキ（図 3）」は、塩味とガーリック、そして肉の旨味と脂で、ガツンとくる逸品であった。

冒頭に述べたように、2020 年の会議は横浜で開催される。横浜にも美味しい日本料理や中華街があり、食において参加者が満足できると思われるので、研究発表においても大いに成果をアピールしたい。再びのお願いとなるが、皆さんの積極的な参加をお願いしたい。





X-RAY
IMAGING OPTICS



編集部より

野村先生、W. Zhang 先生、中澤先生に記事を執筆して頂いたおかげで、今回もニュースレターを発行することが出来ました。みなさんきっちり仕事をされたのですが、私自身の作業が滞ったため、今回の発行も 12 月になってしまいました。すみません。中澤氏の原稿にもありますが、宇宙観測用光学系・検出器の学会としては、おそらく最大規模のものである、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation は、2019 年は横浜で開催の予定です。みなさん、ふるってご参加下さい。ニュースレターを通じて、みなさまには新鮮な話題をタイムリーにお知らせしていきたいと思っております。今後ともよろしく願いいたします。

(文責・松本浩典)

【メーリングリスト（登録メールアドレスの変更などについて）】

本ニュースレターは原則、メーリングリスト (xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp) によるメール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部 (xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp) までご連絡ください。メーリングリストは、研究会のお知らせなど、会員全員に情報を配信したいときなどにも便利なので、積極的にご活用ください。

X 線結像光学ニュースレター
No. 46 (2018 年 12 月)

発行 X 線結像光学研究会
(代表 兵庫県立大 籠島靖)

編集部 山内和人 (大阪大)、齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、
松本浩典 (大阪大)、東口武史 (宇都宮大)
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成28年度X線結像光学研究会運営組織』

- ・代表者：籠島 靖（兵庫県立大）
- ・事務局担当者：高山 裕貴（兵庫県立大）
- ・編集局責任者：山内 和人（大阪大）
- ・編集局委員：齋藤 彰（大阪大）、 矢代 航（東北大）、 松本 浩典（大阪大）、
東口 武史（宇都宮大）、 籠島 靖（兵庫県立大）、 豊田 光紀（東北大）
- ・幹事：
伊藤 敦（東海大）、 太田 俊明（立命館大）、 大東 琢治（分子研）
籠島 靖（兵庫県立大）、 加道 雅孝（原研）、 木下 博雄（兵庫県立大）
國枝 秀世（名古屋大）、 鈴木 芳生（東京大）、 竹内 晃久（JASRI）
田原 謙（名古屋大）、 常深 博（大阪大）、 難波 義治（中部大）
西野 吉則（北海道大）、 西村 博明（大阪大）、 羽多野 忠（東北大）
兵藤 一行（KEK）、 牧村 哲也（筑波大）、 百生 敦（東北大）
森田 繁（核融合研）、 矢橋 牧名（理研）、 山内 和人（大阪大）
渡辺 紀生（筑波大）
- ・特別顧問：
波岡 武（東北大名誉教授） 青木 貞雄（筑波大名誉教授） 柳原 美廣（東北大名誉教授）