

大口径・薄板・耐圧を実現する金属積層造形による Ti-6Al-4V 合金製ビーム窓の開発

DEVELOPMENT OF BEAM WINDOW WITH A LARGE DIAMETER, A THIN WALL THICKNESS, AND A LARGE PROOF PRESSURE OUT OF Ti-6Al-4V THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING

牧村俊助^{#, A)}, 設楽弘之^{B)}, 長澤 豊^{B)}, 尾ノ井正裕^{B)}, 深尾祥紀^{A)}, 亀井直矢^{A)}, 栗下裕明^{A)}
Shunsuke Makimura^{#, A)}, Hiroyuki Shidara^{A)}, Yutaka Nagasawa^{B)}, Masahiro Onoi^{B)}, Yoshinori Fukao^{A)},
Naoya Kamei^{A)}, Hiroaki Kurishita^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, J-PARC Center

^{B)} Metal Technology Co. Ltd.

Abstract

In next-generation particle accelerators composed of the superconducting magnets, the high proof pressure is required to prepare for a severe accident of liquid helium leakage into the beamline. Furthermore, the beam window should be made of thin and low-density material to reduce loss of the beam through the beam window. It is known that the proof pressure of the sphere-shaped window is higher than that of the plate-shaped window. In KEK under collaboration with Metal Technology Co., LTD., the development is underway to realize the large-diameter, thin, and high-pressure resistant beam window made of Ti-6Al4V through an additive manufacturing. Currently, we are manufacturing a spherical beam window with a diameter of 260 mm and a thickness of 0.5 mm, which is expected to have a proof pressure of higher than 0.9 MPa according to analysis. After additive manufacturing by laser or electron beam, hot isostatic pressing (HIP) to eliminate the pores remaining in the manufacturing process, and subsequent polishing process was successfully completed. At last, the manufactured beam windows were installed in the beamline at COMET experimental facility. In this presentation, we will report on the status of the development for Ti-6Al-4V beam windows by additive manufacturing.

1. はじめに

粒子加速器の運転において、粒子は真空中を輸送されるが、標的周辺環境の隔離、ビームライン領域の隔壁、二次粒子取り出し口など様々な目的でビーム窓が使用される。このとき、輸送する粒子のロスを低減するために低密度で薄い材料で大口径なビーム窓を製造する事が望まれる。次世代粒子加速器では高輝度な粒子ビームを得るために超伝導電磁石が主要なビーム光学機器として利用されているが、電磁石に重大な事象が発生した場合には、電磁石を冷却する液体ヘリウムがビームライン中に急激に放出される重大事故が危惧されている。そのため、例えば、J-PARC ハドロン実験施設で建設が進む COMET 実験でのビーム窓のように、放射化のため近接して交換することが困難なビーム窓や、上流の加速器真空中に影響の与える可能性のあるビーム窓には、高い耐圧性能が要求される。

球殻形状をもつビーム窓では、凹面側からの加圧に対して高い耐圧性能を持つことが既に知られており、本研究ではあらかじめ大きなたわみを有する球殻形状を持ち、端部は角度を付け厚みを増やし、フランジと一体構造となったビーム窓(以後、球殻ビーム窓とする)の開発を目指している。Figure 1 に平板ビーム窓と本研究で提案する球殻ビーム窓の比較図を示す[1]。この球殻ビーム窓を実現するために、バルク材からの削り出し法を中心に製造が行われてきた。一方で、ビーム窓材には比強

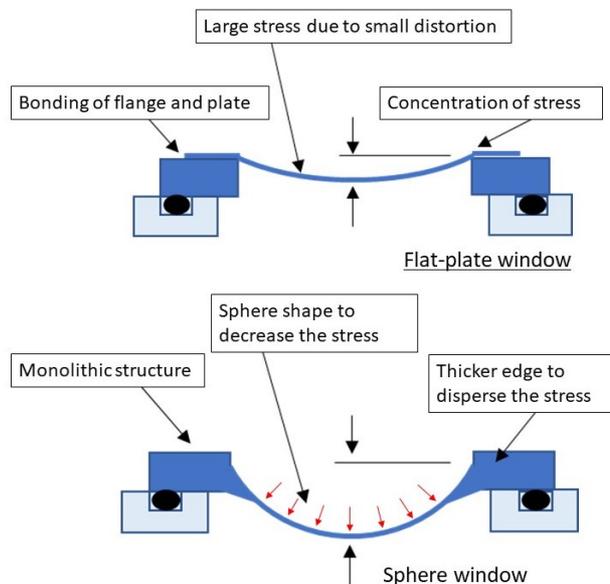


Figure 1: Models of the flat-plate window and the sphere window [1].

度の高い材料が望ましく、耐熱性能も高く、強度も高いチタン合金は有望な材料と考えられるが、チタン合金として広く普及している Ti-6Al-4V 合金は加工性が良くないため、大口径の薄い球殻形状の製造や端部で厚みを増やし、フランジと一体化した構造の製造技術は確立して

[#] shunsuke.makimura@kek.jp

いるとは言い難い。Ti-6Al-4V 合金への応用も目覚ましい積層造形法は、レーザーまたは電子ビームによって粉末を熔融させ、従来の加工法では実現できないような任意な形状を製造できる。本研究では、任意の形状を製造できる Ti-6Al-4V 合金の積層造形法の利点を生かし、球殻ビーム窓を製造する。

2. 積層造形によるビーム窓の製造

現在は、JIS VG250A, JIS VG200A の真空フランジに取り付けられる Ti-6Al-4V 合金製のビーム窓の開発を進めている。このビーム窓はそのまま COMET 施設でのビームラインに採用される。本研究では、真空封止を行うフランジ部とボルト締結するフランジ押さえ部を分割した回転フランジ方式を採用した。この場合、フランジと一体化された球殻ビーム窓のみを積層造形で製造することができ、積層造形装置のワークスペースを有効に活用でき、造形に利用する粉末量も節約できる。また、フランジ部の表側と裏側の両方を研磨すれば、凹面と凸面のどちらでも真空封止を行うことが出来る。Figure 2 に実際に製造した回転フランジ方式の球殻ビーム窓を示す。球殻部の厚みは直径 260 mm の範囲は厚み 0.5 mm とし、その外側の直径 269.5 mm の範囲を徐々に厚みを増やしている。フランジ部の厚みは 10 mm として設計した。金属 O リングを締結できるような呼び径と数のボルトを採用してい

るが、実際のビーム運転では線量も低いのでゴム O リングで真空封止を行っている。窓の耐圧性能は凹面側加圧 0.9 MPa を目指している。凸面側加圧は、真空と大気の差圧であれば 0.15 MPa で十分であるが、解析上は凹面凸面側のどちらも 1 MPa の耐圧を実現可能である。

本研究ではレーザー積層造形と電子ビーム積層造形の二種類の手法で試作機の製造を行い、比較を行った。レーザー積層造形は、レーザー径を小さくできるため、薄い膜を製造しやすい。一方で、熔融された粉末が凝固する際に熱収縮が起き、既に積層造形された領域に残留応力が蓄積する。この残留応力が積層造形の途中で解放され、積層ずれが起きる可能性が懸念される。そのため、途中で残留応力が解放されにくい形状の検討が必要である。それに対して、電子ビーム積層造形の場合は、粉末が熔融される直前に、電子ビームを広げて、ワーク全体に照射することによって積層造形された領域を予備加熱することが出来るため、残留応力の発生を抑制することが出来る。一方で、レーザー径と比較して電子ビーム径が大きいため、積層造形できる厚みが大きくなってしまいう課題があり、積層造形後の研磨工程に手間がかかる。どちらの積層造形手法でも、製造した造形物は、未熔融な欠陥や空孔（以後、空孔など）が残存することが知られている。また、造形物の表面には熔融しきれなかった粉末が、そのまま残存しており、破壊の起点となる[2]。そのため、積層造形後のビーム窓では、熱間等方圧加工法 (Hot Isostatic Pressing: HIP) 法によって空孔などを消失させ、その後、未熔融粉末を除去するために積層造形物の表面を研磨している。球殻部は流体研磨、バレル研磨、ブラスト研磨の比較試験を行い、効



Figure 2: A picture of the beam window with a rotatable flange. Arrangement of both concave (up) and convex (middle) is available. The falling prevention groove is prepared on the side.

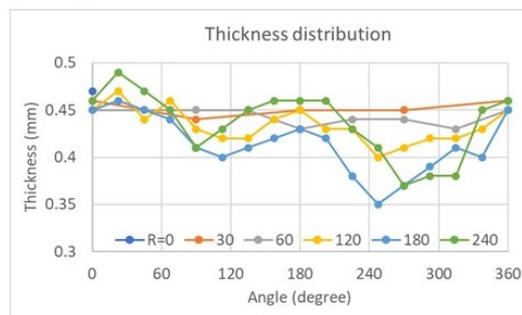
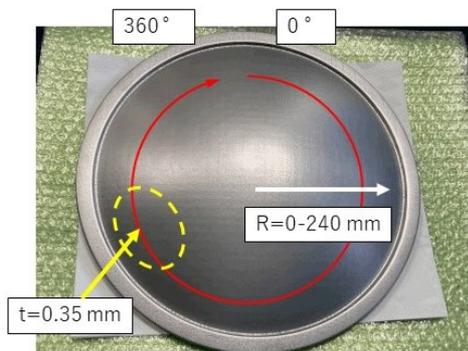


Figure 3: Thickness distribution of beam window after polishing. Some area is thinner than the average of the thickness.

率的に安価に研磨を実現可能なブラスト研磨を採用した。ブラスト研磨では研磨剤を球殻部に均一に吹き付けることによって研磨を行うため、研磨前の厚み分布が研磨後にも反映される。Figure 3 にマイクロメーターで計測した典型的な研磨前後の厚み分布を示す。研磨後にも元の厚みの不均一性が残っており、この例では、一部に 0.35 mm と薄い箇所が存在している（最大厚みは 0.48 mm）。窓部分の表面粗度は Ra=3 程度に仕上げている。

3. 積層造形によるビーム窓の評価

製造した球殻ビーム窓は、耐圧容器に取り付け、耐圧試験とヘリウムリーク試験を行うことが出来る。耐圧試験では安全性を考慮し、非圧縮性流体である水を圧力媒体として 0.9 MPa までの試験を実施している。レーザー積層造形によって JIS VF250A-SLM、JIS VF200-SLM、電子ビーム積層造形によって JIS VF250A-EBM、JIS VF200-EBM をそれぞれ二枚ずつ製造し、試験を行った。どの場合でも、凹面側加圧の場合は 0.9 MPa の加圧でも大きな変形もなく気密を保つことが出来た。一方で、凸面側加圧では解析と大きく異なる挙動を示した。Figure 4 で示すように、解析上は差圧 0.15 MPa で発生するミーゼス応力は 50 MPa (降伏応力 888 MPa@100 °C)と十分に弾性変形の範囲であるはずであったが、最初に試験を行った JIS VF200A-SLM で局所的な変形が進行して設計値よりもはるかに小さな差圧 0.075 MPa でも弾性変形領域を超えてしまい、除荷後に元の形状に戻らなくなってしまった。JIS VF250A-SLM に関しても差圧 0.075 MPa で局所的に変形が進行した。電子ビーム積層造形で製造した二種類の径では、わずかに耐圧性能が向上し、0.15 MPa となったが、やはり設計値よりは、かなり小さな値で局所的な変形が観測された。最初の JIS VF200A-SLM を除いて注意深く圧力の負荷を行ったため、圧力を除荷した後に局所的な変形はなくなり、元の

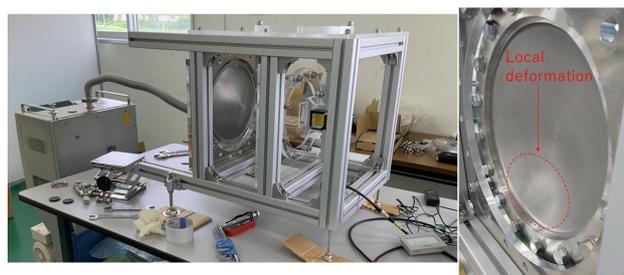


Figure 5: Testing apparatus for helium leakage test and proof pressure test (left) and the observed local deformation on the beam window (right).

球殻形状に戻った。これらのビーム窓は実際にビームラインに設置する実機とその予備も兼ねていたもので、これ以上の圧力負荷は行わなかった。それぞれの条件に対して二種類の球殻ビーム窓を製造したが、同じ条件で、同じ挙動を示したので、積層造形する方法に挙動が影響されていると推測できる。この局所的な変形が進行した理由は、解析では軸対称モデルであるが、試作機では、厚みと曲率が不均一であったためと考えている。実際に、薄い箇所から局所的な変形が発生する傾向にあった。電子ビーム積層造形で製造したビーム窓は凸面側加圧でも 0.1 MPa 以上の耐圧を備えているため、凹面側も凸面側もヘリウムリーク試験を実施できた。どの場合も、ヘリウムリークディテクタによって $3.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$. 以下であることを確認できた。Figure 5 に耐圧試験時の写真を示す。

COMET 実験では、0.1 MPa 以上の圧力の負荷が想定されるのは一方向だけで、その反対方向は真空と大気の差圧 0.1 MPa であるため、電子ビーム積層造形で製造した球殻ビーム窓をそのまま使用できると判断し、ビームライン上に設置した。これらのビーム窓は 2023 年 1 月のビーム運転に使用される。

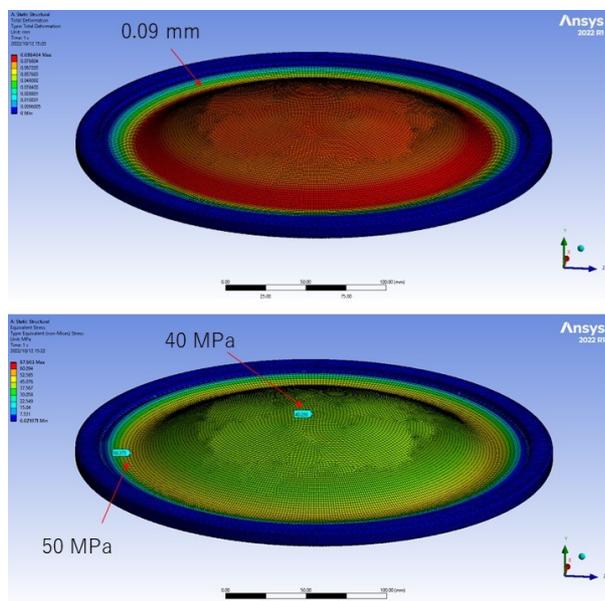


Figure 4: Displacement (UP) and equivalent stress (down) in 0.15 MPa differential pressure through FEM simulation.

4. まとめと今後の計画

次世代の超伝導電磁石を中心とした加速器真空において耐圧が高く、低密度で薄い材料で大口径なビーム窓を製造する事が望まれる。本研究では積層造形による球殻ビーム窓の開発を進めている。JIS VF250, JIS VF200 規格に相当する回転フランジ式ビーム窓をレーザー積層造形、電子ビーム積層造形で製造した。凹面側加圧では、期待通りの 0.9 MPa の耐圧試験をクリアしたが、凸面側加圧では、厚みと曲率の不均一性が原因と予想される局所的な変形によってレーザー積層造形では 0.075 MPa、電子ビーム積層造形では 0.15 MPa の耐圧となった。電子ビーム積層造形では、凹面側も凸面側も差圧 0.1 MPa の条件下でヘリウムリーク試験をクリアした。電子ビーム積層造形で製造した球殻ビーム窓は、ビームラインに設置された。

今後は、凸面側加圧での耐圧性能を向上させるために解析手法や積層造形する形状の検討、レーザー積層造形、電子ビーム積層造形で製造した試料に関して引張試験を行い、その違いを確認する。また、回転フランジ方式以外にもロウ付け用の球殻ビーム窓やレーストラック型のビーム窓などの開発を進める。

謝辞

本研究は KEK 共同研究(金属技研)(2016 年度～)「次世代陽子加速器における標的・ビーム窓に関する共同研究」、JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽) 21K18632、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学分野)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Makimura *et al.*, “大口径・薄板・耐圧を実現する金属積層造形による Ti-6Al-4V 合金製ビーム窓の開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, PASJ2021 IPP003.
- [2] H. Masuo *et al.*, “Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing”, International Journal of Fatigue 117 (2018) 163–179.