

# 金属積層造形法によって製造するアルミ合金製ビーム窓の耐圧および座屈解析 PRESSURE RESISTANCE AND BUCKLING ANALYSIS OF ALUMINUM ALLOY BEAM WINDOWS MANUFACTURED BY METAL LAYERING METHOD

井上薫<sup>#A)</sup>, 栗原謙太<sup>B)</sup>, 牧村俊助<sup>A)</sup>, 高橋正和<sup>B)</sup>, 長澤豊<sup>B)</sup>,  
尾ノ井正裕<sup>B)</sup>, 深尾祥紀<sup>A)</sup>, 吉田誠<sup>A)</sup>

Kaoru Inoue<sup>#A)</sup>, Kenta Kurihara<sup>B)</sup>, Shunsuke Makimura<sup>A)</sup>, Masakazu Takahashi<sup>B)</sup>, Yutaka Nagasawa<sup>B)</sup>,  
Masahiro Onoi<sup>B)</sup>, Yoshinori Fukao<sup>A)</sup>, Makoto Yoshida<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> Metal Technology Co. Ltd.

## Abstract

In the beamline composed of superconducting electromagnets used in the Hadron Experimental Facility and the COMET experiment at J-PARC, regions where helium leakage could occur are isolated by beam windows as a precaution against serious accidents involving helium leakage into the beamline. Beam windows are made of thin, low-density materials to minimize beam loss, while also being required to withstand the pressure increase caused by the vaporization of leaked liquid helium. KEK has been developing a manufacturing method for spherical beam windows using additive manufacturing in collaboration with Metal Technology Co., Ltd. As a result, large-diameter, thin, and high-pressure-resistant beam windows made of Ti-6Al-4V using additive manufacturing have been installed in the beamline of the COMET experimental facility. Following this, development began on beam windows made of aluminum alloy (AlSi10Mg) for use in cryogenic environments. The overall report on the development of aluminum alloy beam windows using additive manufacturing will be presented by Mr. Kurihara from Metal Technology Co. Ltd. In this presentation, we report the results of pressure resistance and buckling performance analyses of aluminum alloy beam windows fabricated via additive manufacturing, conducted using ANSYS.

## 1. はじめに

J-PARC のハドロン実験施設では、メインリングより取り出された陽子ビームをハドロン実験ホールの二次粒子生成標的に照射し、生成された $\pi$ 中間子や $K$ 中間子等の二次ビームを複数の実験エリアに輸送する。ビーム窓は標的周辺環境の隔離、ビームライン領域の隔壁、二次粒子取出し口など様々な目的で使用されている。ビーム窓には、輸送する粒子のロス低減のため、低密度かつ薄い材料で大口径であることが求められる。次世代粒子加速器では、高い磁場を得るため、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。しかし、電磁石の液体ヘリウム配管が破損するなどの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な事故が懸念される。そのため、COMET 実験で使用されているビーム窓には、漏洩した液体ヘリウムが気化した際の高い圧力上昇に耐える必要がある。

これまで高エネルギー加速器研究機構(KEK)は、金属技研株式会社との共同研究で積層造形法による球殻型ビーム窓の製造法の開発を進めており、Ti-6Al-4V による積層造形法で製造した大口径、薄型、高耐圧のビーム窓開発の実績がある[1]。現在は引き続き、低温中で使用されるアルミ合金・AlSi10Mg 製のビーム窓の開発に着手している。本発表では、有限要素解析ソフト・ANSYS を用いて解析した、ビーム窓の耐圧および座屈性能の解析結果を報告する。

<sup>#</sup>inoueka@post.kek.jp

## 2. ビーム窓の発生する応力と座屈解析

### 2.1 球殻形状ビーム窓に発生する応力

ビーム窓には隔離する雰囲気、すなわち真空圧力と大気間の差圧や雰囲気ガス、冷媒圧力の差圧などが負荷される。通常、平板ビーム窓への応力は、金属製の平板状の薄板を溶接やロウ付けでフランジに固定して製造する。ビーム窓には、隔離する雰囲気の違いによる差圧が一樣に付加されて、たわみが生じて曲率半径を有する球殻形状に変形する。一樣な内圧を受ける球殻に発生する応力 $\sigma$ は、板厚が十分に小さければ、集中した曲げ応力ではなく、厚み方向にも平面方向にも一樣な引張応力が発生する。ビーム窓に発生する応力を確認するため有限要素法解析・ANSYS を用いて解析をおこない、以下の結果が得られた。平板ビーム窓では、0.2 MPa の応力条件下で端部に 200 MPa の応力が発生する。一方、球殻ビーム窓への応力は、0.9 MPa の応力条件下で端部に 320 MPa の応力が発生する。この解析結果より、球殻構造は応力を低減することができ、端部は厚みをもたせることで、応力が低減することが証明された。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ているビーム窓を開発する。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の実験である Phase  $\alpha$  では、Ti-6Al-4V の球殻形状のビーム窓を導入し、Phase 1 では、Phase  $\alpha$  で導入した Ti-6Al-4V の球殻形状のビーム窓を引き続き使用する。しかし、円筒状のソレノイド電磁石内部にビーム窓を挿入し、使用する。こ

の場合、ビーム窓の有効開口を大きくする必要があるため、これまでに開発したフランジ型ではなく、溶接型が好ましい。導入予定であるビーム窓は、アルミ製ビームダクトに溶接するためのアルミ合金製ビーム窓を開発している。Phase 1 で使用されるビーム窓には、以下のことが求められる。超伝導電磁石を冷却する液体ヘリウムが (LHe) ラインに致命的な故障が発生した場合、真空中への液体ヘリウム蒸発による急激に上昇した圧力を逃がす安全装置が作動するまで、ビーム窓は過剰な圧力に耐えなければならない。その耐圧基準は、0.3 MPa と仮定した。さらに球殻ビーム窓では逆圧となる凸面からの差圧が加わった場合に発生する圧縮応力によって、座屈が発生する懸念がある。座屈とは、細長いものを圧縮した時に過大な変形が発生することで現象である。Figure 1 に Ti-6Al-4V 製ビーム窓に座屈試験後のビーム窓の状態を示す。Ti-6Al-4V 製ビーム窓の座屈試験では、凸面側に印加した場合、0.15 MPa で座屈が発生した。COMET 実験では、0.1 MPa 以上の圧力の負荷が想定されているので、座屈の解析が急務となる。

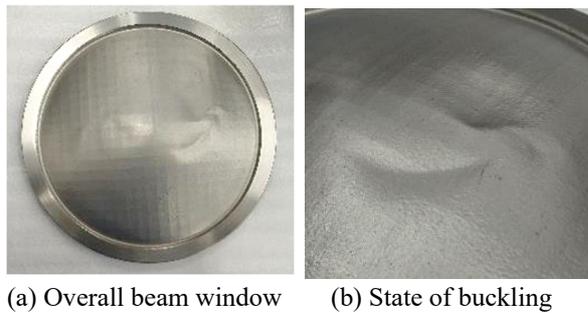


Figure 1: Buckling behavior of the Ti-6Al-4V beam window.

## 2.2 有限要素法・ANSYS による座屈解析

有限要素法・ANSYS とは、構造解析や熱流体解析など用途によって、複数の物理現象を解析するソフトである[2]。今回の座屈解析には、有限要素法・ANSYS を用いて解析を進めた。解析条件を Table 1 に解析モデルの形状を Fig. 2 に示す。モデル形状および寸法は、 $\phi 250$ 、 $t$ (厚み)=0.5 mm となる。断面モデルを Fig. 3 に示す。解析条件は、材料は AlSi10Mg、解析時に必要となる固定面は Fig. 4 に示す 3 箇所を固定し、圧力は Fig. 5 に示すようには 0.15 MPa を凸面側に一様に圧力を負荷させ、

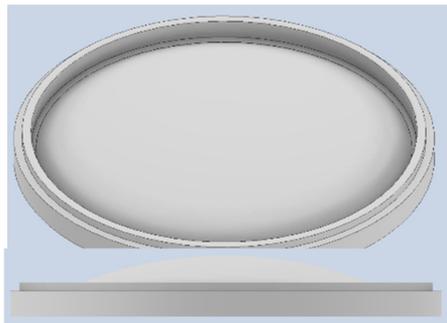


Figure 2: Shape of the analytical model.

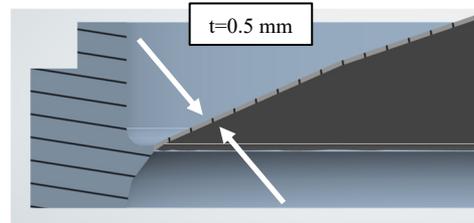
ビーム窓の静的構造解析と座屈解析をおこなった。

Table 1: Analysis Conditions Using Ansys

材料	AlSi10Mg
固定	3 箇所
圧力	0.15 MPa



(a) Beam window cross-section



(b) Thickness of the beam window

Figure 3: Beam window thickness.

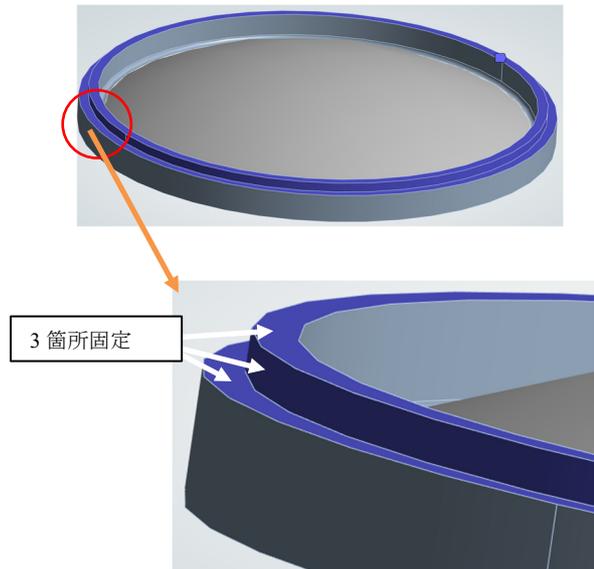
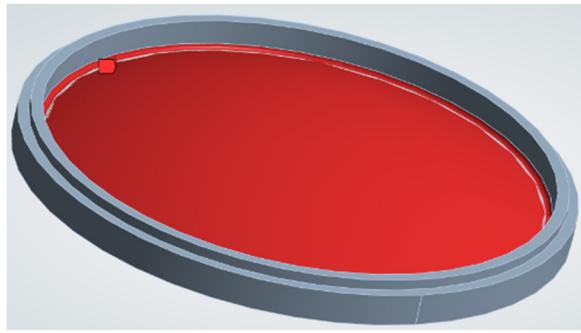


Figure 4: Fixed points of the beam window.

## 3. 有限要素法・ANSYS による解析

### 3.1 ANSYS による静的構造解析結果

はじめに ANSYS による静的構造解析をおこなった。静的構造解析とは、構造物や部品などの静的な荷重による変位、応力、歪みおよび力を求めるために使用する。ここで述べる静的とは、荷重と構造の応答が時間に対して変化がないか、クリープ解析のように時間に対して応答が非常にゆっくりした変化であることを意味する。静的



Uniform pressure is applied to the entire convex side

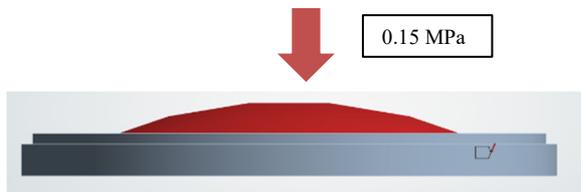


Figure 5: Pressure conditions.

構造解析に使用できる荷重として、外部集中荷重、圧力、静的な慣性力(重力加速度および角速度)、零でない強制変位、温度(熱歪み)などがある。今回の静的構造解析では、全変形量、相当応力(ミーゼス応力)、最大主応力、最小主応力の結果を得た。全変形量は、Fig. 6 に示すように凸面側に最大・最小変形が発生しており、最大変形量は0.092 mmと小さな変形量となった。変形は、凸面側に一様に負荷されている応力と同じように全体的に生じていることが分かる。相当応力(ミーゼス応力)の結果をFig. 7 に示す。解析より、最大値は凹面側の端部付近で、94.58 MPa との結果となった。また、端部付近・円周上で最大値に近い応力が発生していることが解析の結果で得られた。

次に第一主応力は、Fig. 8 に示すように最大値は凹面側の端部近傍となり、最大値は引張方向で 27.7 MPa となった。一方で第三主応力の最小値は、Fig. 9 に示すように凹面側の端部近傍で圧縮方向で 117.1 MPa となった。この解析結果より、端部近傍の面では、凹面側で引張応力と圧縮応力が同時に作用していることが分かる。

### 3.2 ANSYS による固有値座屈解析

次に ANSYS による固有値座屈解析をおこなった。解析条件は静的構造解析と同様で、全変形量を求めた。解析結果をFig. 10 に示す。解析結果より、ビーム窓の変形は、凸面側の頂点と端部の中央付近で円周上に変形量が大きく、最大値は 1.09 mm となった。この解析結果は Ti -6Al-4V 窓で実際に発生した座屈の箇所と、ほぼ同じであり、固有値座屈解析で再現性があることが分かる(Fig. 1)。また、座屈が発生する目安となる荷重係数は 1.82 となった。理論上、荷重係数が 1 以下になると座屈が発生する。しかし、チタン窓の解析で、0.15 MPa では荷重係数が 3.04 で座屈は起こらないはずであったが、実際には起きてしまった。よってチタン窓よりも解析上、座屈の起きやすいアルミニウム合金の場合も試験的に確認する必要がある。ただ、He の漏洩時には、凹面側か

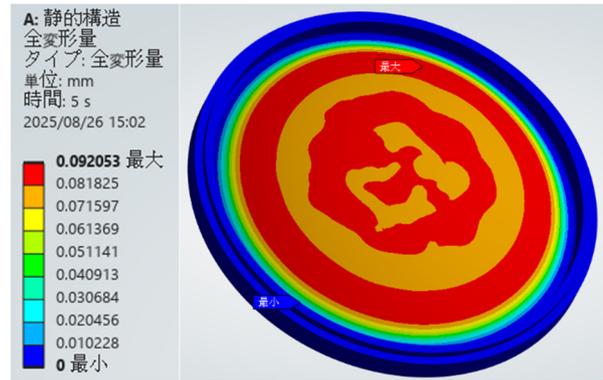
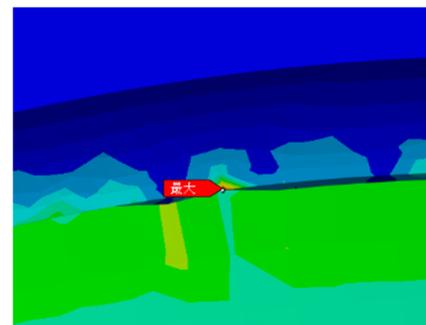
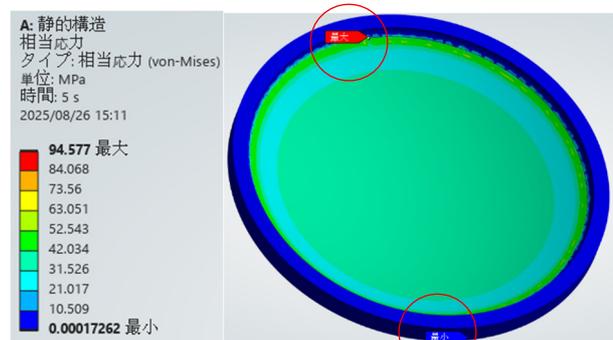


Figure 6: Results of total deformation analysis.



Maximum value location (Concave side)

Figure 7: Analysis results of von-Mises stress.

ら 0.3 MPa の圧力がかかるので、これに対する解析と結果より、議論をおこなわなければならない。

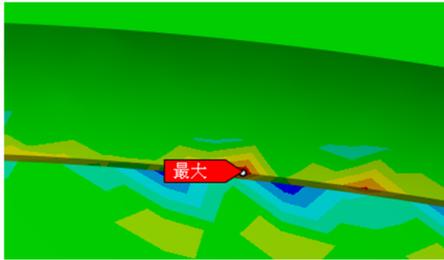
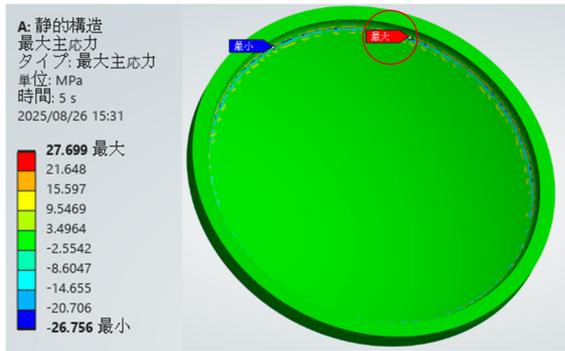
## 4. まとめ

ビーム窓の耐圧・座屈の性能を有限要素法・ANSYS で解析をおこない、ビーム窓の凹凸両面に作用する応力および座屈・荷重係数を求めることに有効な手段である。しかし、解析の結果や信頼性は慎重に判断する必要がある。

凹面側に発生する相当応力(ミーゼス応力)の最大値 94.58 MPa はビーム窓の材料となる AlSi10Mg の引張強度 160 MPa を超えないので、十分な耐圧性能を有している。

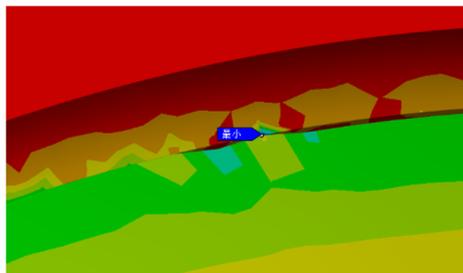
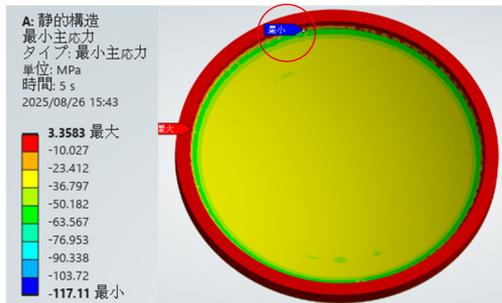
凸面側から圧力 0.15 MPa の座屈解析結果は、荷重係数は 1.82 となり、計算上は座屈は起きない結果となった。

今回の解析結果より、計算上は座屈は発生しない結



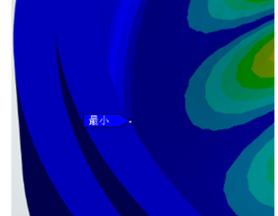
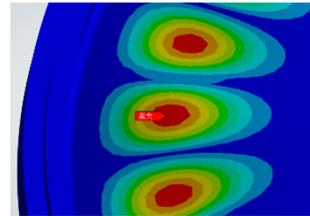
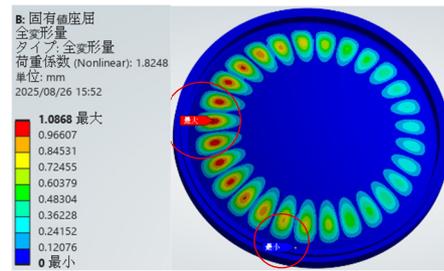
Maximum value location (Concave side)

Figure 8: Analysis results of first principal stress.



Minimum value location (Concave side)

Figure 9: Analysis results of the third principal stress.



(a) Maximum value location (b) Minimum value location

Figure 10: Analysis results of eigenvalue buckling.

果となったが、同圧力でのチタン合金の荷重係数は3.04だったが、試験で実際に座屈が起きてしまった。アルミニウム合金でも試験的に確認をする必要がある。

He 漏洩時は、ビーム窓の凹面だけに加圧がかかるので、耐圧基準を0.3 MPaと仮定した条件での解析を進めている。

## 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] <https://www.cybernet.co.jp/ansys/>