

真空チェンバアクリル製天板強度について

有本靖

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

2007年2月28日

概要

アルファ線源を格納する入射真空チェンバの天板は 20 mm 厚のアクリル製である。この天板の強度を簡単なモデルを用いて計算した。その結果、2 本の SUS の梁をアクリル板の下へ設置することでアクリルの許容断面応力以下 (安全係数 3) となることが確かめられた。この SUS の梁の強度も計算し強度的に問題ないことが確かめられた。

1 真空チェンバ概要

真空チェンバの寸法図を示す。チェンバ本体は直方体であり、本体のチェンバにビームダクトが取り付けられている。本体の天板は 20 mm 厚のアクリル製、天板以外はすべて SUS 製である。このアクリル製天板の強度計算を行なう。

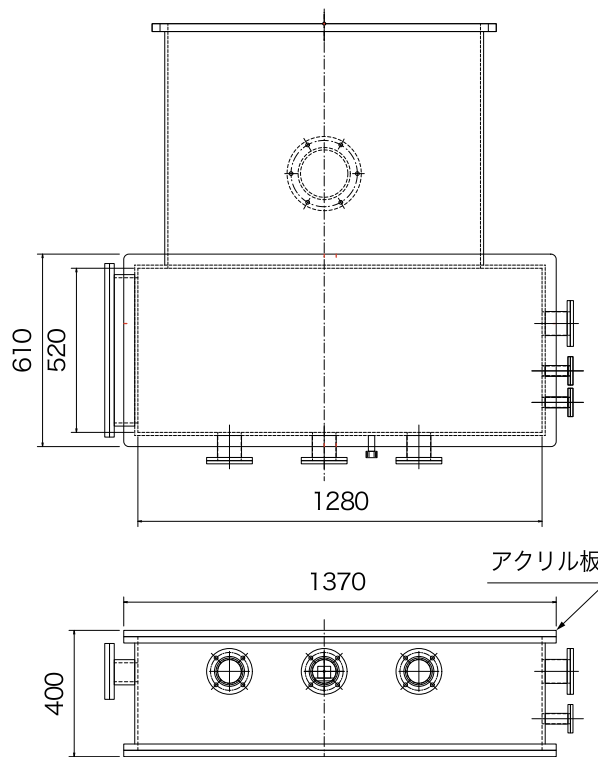


図 1: 真空チェンバ寸法図

2 アクリル板強度計算

今回の設計では、このアクリル板の最大応力が許容応力以下であれば強度的に問題ないとみなす。許容応力はアクリルの破断応力の 1/3(安全ファクター 3) とする。アクリルの破断応力は 76 MPa であるので、許容応力は

$$\sigma_{\text{allow}} = 25.3 \text{ MPa} \quad (1)$$

である。4 辺固定支持のモデル (図 2) で考えた場合、長方形板の最大応力は以下の式で書ける。

$$\sigma_{\text{max}} = \beta \frac{pa^2}{h^2} \quad (2)$$

ここで、 β は最大応力係数と呼ばれ、長方形板の長い辺と短い辺の比の関数となっている。この β は”機

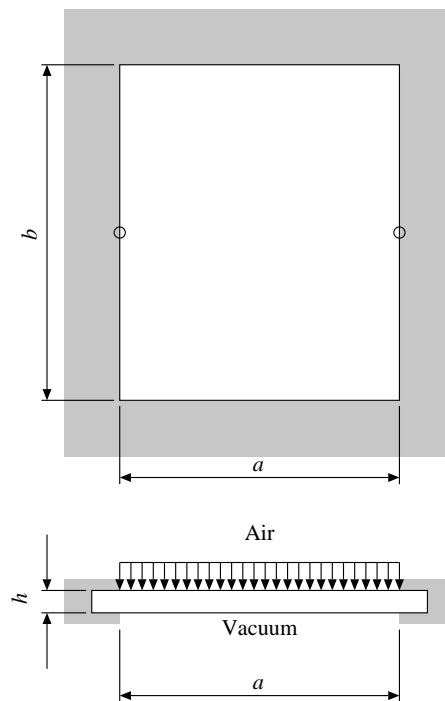


図 2: 4 辺固定支持板

械工学便覧 A4 編材料力学”のグラフの値を用いた。また、 p, a, h はそれぞれ、板面に加えられる圧力 (今回の場合、大気圧)、板の短い方の辺の長さ、板厚である。 $p = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $a = 0.52 \text{ m}$ 、 $h = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $\beta = 0.5$ の場合、

$$\sigma_{\text{max}} = 0.5 \times 1.01 \times 10^5 \times 0.52^2 / (2 \times 10^{-2})^2 \quad (3)$$

$$= 0.0341 \times 10^9 \text{ Pa} = 34.1 \text{ MPa} \quad (4)$$

となる。この値は破断応力よりは小さい (半分以下) が、許容応力よりは大きいため補強が必要である。

そこで、アクリル板の面積を 3 等分するように SUS の梁を 2 本加えることにする (図 3)。この場合、 $a = 0.427 \text{ m}$ 、 $h = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $\beta = 0.4$ となり、

$$\sigma_{\text{max}} = 0.4 \times 1.01 \times 10^5 \times 0.427^2 / (2 \times 10^{-2})^2 \quad (5)$$

$$= 0.0184 \times 10^9 \text{ Pa} = 18.4 \text{ MPa} \quad (6)$$

となり、これは許容応力以下となり、強度的には十分と考えられる。

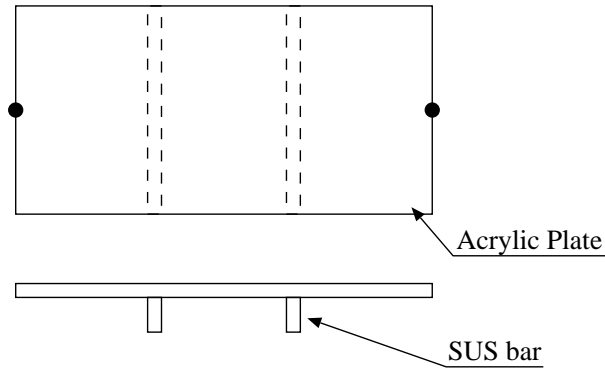


図 3: SUS 梁の取り付け配置図

また、この時の最大たわみ量は以下の式で表わされる。

$$\delta y_{\max} = \alpha \frac{pa^4}{Eh^3} \quad (7)$$

ここで α 及び E はそれぞれ、たわみ係数及びヤング率である。 α は a, b の比率の関数となっており、工学便覧を参考にすると

$$\alpha = 0.02 \quad (8)$$

である。また、アクリルのヤング率は $E = 3.20 \times 10^9$ [Pa] である。これらの値を用いると

$$\delta y_{\max} = \frac{2 \times 10^{-2} \times 1.01 \times 10^5 \times 0.4267^4}{3.20 \times 10^9 \times (2 \times 10^{-2})^3} \quad (9)$$

$$= 0.00262 \quad [\text{m}] = 2.62 \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

となる。

3 SUS 梁強度計算

次にこの梁の強度について考える。この梁がたわみ過ぎるとアクリル板の強度を 4 辺固定支持モデルで記述出来なくなる。

SUS 梁で仕切られた各領域へかかる大気圧はアクリル板にかかる全大気圧の 1/3 である。またこの各領域で大気圧は SUS 梁と外枠で支えられており、この 1 つの梁にかかる真空力はこの 4 辺の長さを足し合わせた長さに対する梁の長さの割合になると考えられる。この場合について、単純梁 (図 4) モデルでたわみ量を計算する。単純梁の最大たわみは

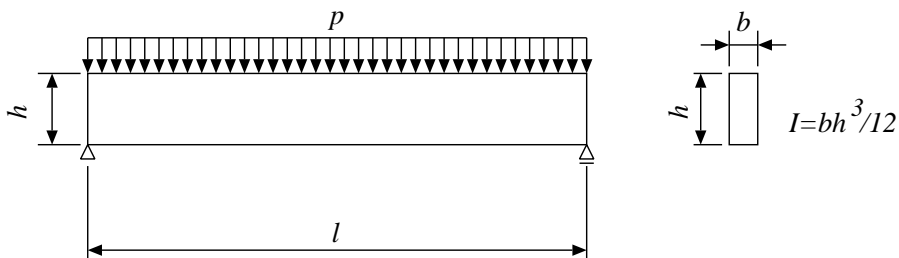


図 4: 単純梁

$$y_{max} = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EI} \quad (11)$$

と書ける。ここで p は単位長さ当り梁にかかる荷重である。 l 、 E 、 I はそれぞれ梁の長さ、ヤング率、断面二次モーメントであり、 $l = 0.52$ m、 $E = 19.7 \times 10^{10}$ Pa (SUS304)、 $I = 2.08 \times 10^{-7}$ m⁴ となっている。 pl は 1 本の梁にかかる全荷重であり、この値は

$$pl = \frac{Sp_{air}}{3} \frac{2l}{c} = \frac{0.52[\text{m}] \times 1.28[\text{m}] \times 1.01 \times 10^5[\text{Pa}]}{3} \cdot \frac{2 \times 0.52}{1.89} = 0.123 \times 10^5[\text{N}] \quad (12)$$

となる。ここで S 、 p_{air} 、 c はそれぞれアクリル板が真空力を受ける部分の面積、大気圧、及び SUS 梁で区切られた領域を囲む四辺の長さを足したものである。一方、梁の断面積を $b \times h = 0.02$ [m] x 0.05[m] とすると、梁の断面二次モーメントは

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (13)$$

$$= 0.02[\text{m}] \times 0.05^3[\text{m}^3]/12 \quad (14)$$

$$= 2.08 \times 10^{-7} \quad [\text{m}^4] \quad (15)$$

となる。従って、

$$y_{max} = \frac{5}{384} \frac{0.123 \times 10^5 \times 0.52^3}{19.7 \times 10^{10} \times 2.08 \times 10^{-7}} \quad (16)$$

$$= 0.549 \times 10^{-3} \quad \text{m} \quad (17)$$

$$= 0.549 \quad \text{mm} \quad (18)$$

このたわみ量ならば、この SUS の梁による四辺固定支持モデルで近似可能と考えられる。

また、単純支持梁の最大応力は

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I} \frac{h}{2} \quad \text{:最大曲げ応力} \quad (19)$$

$$M_{max} = \frac{pl^2}{8} \quad \text{:最大曲げモーメント} \quad (20)$$

と書ける。これらの式を使うと今回の SUS 梁の場合は

$$M_{max} = 0.123 \times 10^5 \times 0.52/8 = 0.00800 \times 10^5 = 0.800 \times 10^3 \quad (21)$$

$$\sigma_{max} = \frac{0.800 \times 10^3 \times 0.05}{2.08 \times 10^{-7} \times 2} = 0.00962 \times 10^{11} \quad \text{Pa} = 96.2 \quad \text{MPa} \quad (22)$$

となる。

一方、SUS304 の許容曲げ応力は 129 MPa である。この梁の最大応力は 129 MPa より小さいので強度的には十分であると考えられる。

4 SUS 梁のたわみが加わった場合のアクリルの最大応力

四辺固定支持モデルでは、長辺の中心が最大応力となる (図 2 の白抜き丸印)。この辺の片側の高さが下がった場合、対辺にモーメント荷重が重畳され最大応力は増加することが推測される。従って、アクリル板を SUS 梁で支えた場合、SUS 梁のたわみが加わることで図 3 の黒丸印で示した位置の最大応力が増加する。この時の応力は近似的に

$$\sigma'_{max} = \frac{\delta y_0 + \delta y'}{\delta y_0} \sigma_{max} \quad (23)$$

と書ける。ここで δy_0 、 $\delta y'$ はそれぞれ梁がたわまない時のアクリル板の最大たわみ量、梁がたわんだ場合に重畳される (最大たわみ量が発生する位置での) たわみ量である。 δy_0 は式 10 より、

$$\delta y_0 = 2.62 \quad \text{mm} \quad (24)$$

一方 $\delta y'$ は式 18 の値と、最大たわみ発生点が SUS 梁で 3 分割した領域の中心であることから、

$$\delta y' = \frac{0.549}{2} \text{ mm} = 0.2745 \text{ mm} \quad (25)$$

となる。従って、

$$\sigma_{\max} = \frac{2.62 + 0.2745}{2.62} \times 18.4 [\text{MPa}] = 20.3 \text{ MPa} \quad (26)$$

となる。この値はアクリルの許容応力よりも小さいので問題ないと考えられる。

5 SUS 梁支えのボルト強度

SUS 梁は図 5 に示されるように M6 ボルトで固定された支持治具によって支えられている。SUS 梁にかかる荷重はすべてこの支持治具にかかる。この治具は M6 ボルトで SUS チェンバに固定されており、治具とチェンバ壁との摩擦力で支えるようになっている。

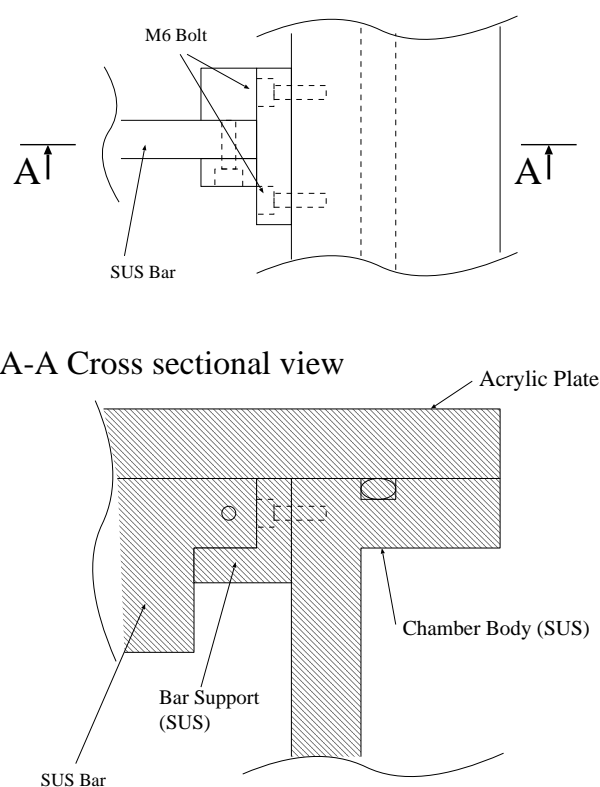


図 5: SUS 梁支持治具の構造

このボルトの締め付け力が SUS 梁を支持出来るかどうかを見積もる。

用いるボルトは鉄製で、強度区分は 12.9 のものである。この時の、保証荷重応力は

$$\sigma = 120 [\text{kgf/mm}^2] \times 0.9 \times 0.85 \quad (27)$$

$$= 91.8 \text{ [kgf/mm}^2] \quad (28)$$

である。ここで 0.85 という数字は安全のための係数である。

M6 ネジの有効断面積は

$$S = 20.1 \text{ mm} \quad (29)$$

であるのでボルトの軸力は

$$f = S\sigma \quad (30)$$

$$= 91.8[\text{kgf/mm}^2] \times 20.1[\text{mm}^2] \quad (31)$$

$$= 1845 \quad [\text{kgf}] \quad (32)$$

となる。静止摩擦係数を

$$\mu = 0.2 \quad (33)$$

とすると、ボルト 1 本当りで支持出来る力(ボルト軸に対し垂直方向の力)は

$$F = \mu f = 1845 \times 0.2 = 369 \quad \text{kgf} \quad (34)$$

となる。SUS 梁は 1 本当りボルト 4 本で支えられているので、上記の値を 4 倍すると

$$nF = 4 \times 369 = 1480 \quad \text{kgf} \quad (35)$$

となる。

式 (12) より SUS の梁への荷重は 1 本当り 0.123×10^5 [N]= 1250 [kgf] である。式 (35) の力はこれよりも大きい。従ってこのボルトで SUS 梁の支持は十分可能である。

ここで用いた静止摩擦係数は大気中のもので小さめに見た値である。また真空中の場合は静止摩擦係数は増大することが期待される。さらにアクリル板でも大気圧は支えられていることを考慮すると、ここで得られた力は十分に安全側に見積られた値と考えられる。

(2007.3.16. 書式改訂)