

CT スキャンを用いたヴァイオリン内部形状の計測*

横山 真男[○] (明星大学)

Measurement of the internal shape of violin using computed tomographic scanning

Masao YOKOYAMA

ABSTRACT

The analysis of old violin has been carried out using micro-computed tomography scanner in the last years. It is expected that this technique may provide new knowledge of the structure of violin. In this study, the three-dimensional geometries of old Italian violins were acquired using a micro-computed tomography scanner. As for the analysis of the internal shape of violin, the comparison between the shape of rib and the form which Stradivari had used and the modeling of the internal arch were conducted in this study.

Keywords: Violin, Micro CT scan, Form, Stradivari, Visualization.

1. はじめに

なぜ、ストラディヴァリの研究をするのか。

弦楽器の製作者や研究者たちが、アントニオ・ストラディヴァリのようなオールド・イタリアンのヴァイオリンの振動解析や音響解析をする目的はいろいろある。最も大きなモチベーションは、やはり、オールド・イタリアンの楽器の音色がなぜ人を魅了するのかを解明したい、また、それらのような音がだせる楽器を作る方法を見つけたい、といった夢がそこにあるからであろう。

ヴァイオリンの研究の歴史は、19世紀中ごろのフランスのヴァイオリン製作者である J.B. ヴィヨームの頃には始まっていた¹⁾。イタリアのクレモナ市を中心として活躍したアマティや、ストラディヴァリ、ガエルネリといったヴァイオリンの製作に携わった一族 (family) らによって作られた楽器がヨーロッパで人気を博し始めた頃にあたる。例えば、超絶技巧と卓越した表現力でヨーロッパを席卷したヴァイオリニストのパガニーニが愛用した“*Il cannone*” (ガエルネリ・デル・ジェズ作、とても大きな音がでたことからキャノン砲のニックネームがついた) のほか、ヴィオッティ、クロイツェル、ヨアヒム、サラサーテといった歴史的に名高いヴァイオリニストがオールド・イタリアンの楽器を所有してきた。今日、そういった有名な演奏家によって愛用された楽器にはニックネームがついている。

さて、その後の近代的な解析は 1970 年代頃から行われ、それらは Hutchins¹⁾, Woodhouse²⁾ などにより書籍や論文にまとめられている。他にも、実験によるモード解析 (Moral and Jansson³⁾, Schleske⁴⁾) や音響解析 (Wang⁵⁾, Schleske⁶⁾) などに代表されるように多くの研究がなされてきた。21 世紀になると、コンピュータの処理性能の向

上のおかげで、有限要素法や境界要素法を用いた数値シミュレーションによる解析が進んでいる (Gough⁷⁾)。また、レーザースキャナや CT スキャナによる 3 次元のジオメトリデータによる数値解析も行われてきている (Pellozzi et al.⁸⁾, Bissinger⁹⁾, Yokoyama¹⁰⁾)。

2. ヴァイオリンの CT スキャンによる解析

本研究では、東京都産業技術総合研究所にあるマイクロ CT スキャナを用いて、ストラディヴァリ作のヴァイオリンを 2 本計測した。Fig.1 は都産技研でのスキャンの様子で、楽器を図のように斜めになるように発泡スチロールの台座に載せ、1 回転するようにしてスキャンした。精度については、本研究のようにヴァイオリン全体 (テールピースからスクロールまで) を含む撮影の場合、カメラと楽器の距離を離さなければならないため、精度は 0.1mm となった。



Fig. 1 Stradivari's violin 1708 in micro CT scanner.

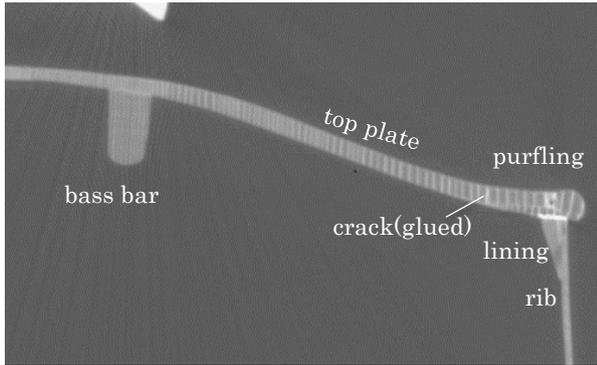


Fig. 2 Cross section by micro CT scanner.

Fig.2のように、マイクロCTスキャンによって内部の詳細を観察することができる。魂柱やバスバーなどのパーツの形状の他に、木目やクラック(割れ)も詳細に観察できる。そして、ポリゴンデータとして計算機に取り込むことで、Fig.3のように楽器本体の内部に視点をおいた観察も可能である。図中の右に立っている棒が魂柱で、その左上部にバスバー、さらに左上部の曲線状の穴はf字孔である。さらに、奥の壁にブロックが見えるが、そこには釘を打った跡が見える。これは当時の製作方法であるが、ネックを釘で固定していたことによる跡である。なお、CTスキャンしたデータは撮影時のノイズにより多くの断片やゴミを含んでいるので、図のように観察する前にCADソフト等を用いてそれらを取り除く必要がある。

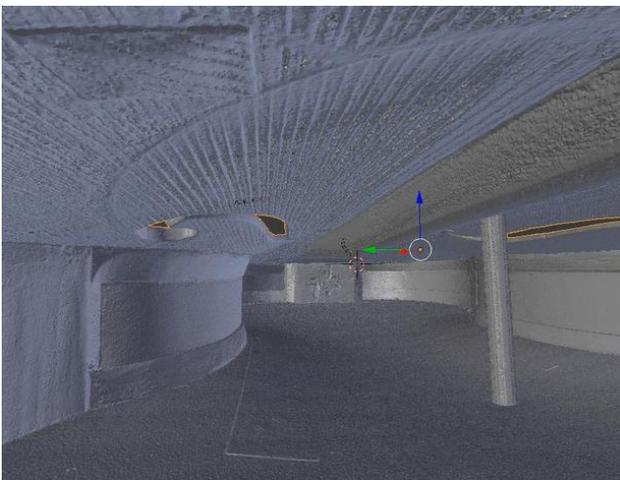


Fig. 3 Inside of Stradivari's violin 1708 by micro CT scanner.

3. CTスキャンによる楽器内部の解析

3.1 ストラディヴァリのフォームとの比較

近年、ヴァイオリン製作および研究の分野で、CTを用いたオールド・ヴァイオリンの内部形状の観察が世界的に進められている。CTスキャナは有益な情報を得られるツールとして盛んに用いられるようになってきた。その解析例の一つに、ヴァイオリンの断面と製作に使われる

フォーム(内型)の比較がある(Fig.4)。ヴァイオリンの製作ではFig.4右図のような型に沿って横板(rib)を曲げて、6か所のブロックに接合してその輪郭を成形する。Fig.4右図は、クレモナ市にあるヴァイオリン博物館に保存されているストラディヴァリが使用したフォーム¹¹⁾の画像と、今回CTスキャンをした1719年製のストラディヴァリを、横板に水平な面で重ねた図である。ストラディヴァリはTable 1^{11,12)}に示すように複数のフォームを使って製作した。この1719年製のヴァイオリンはmodel Gのフォームとよく一致していることが分かる。(左の1708年の楽器については、寸法からmodel S(1703)とほぼ一致するが詳細な画像が手元にないため重ねられていない)。

このように、フォームとの比較は楽器が製作者の真作であることの一つの証拠になる。もちろん、フォームは後に多くの製作者がコピーで製作しているので、フォームと同じだから真作とは言えないが、少なくともどのフォームに当てはまらないという楽器は贋作と疑われることになるだろう。

なお、Table 1は各フォームの寸法であるが、MBからQまでは、ストラディヴァリの師であるニコロ・アマティから独立し始めの頃に使われていたものとみられる。TやQは小さいサイズで、製作された数も少なく子供や小柄な人のために作る時に使われたとされている¹²⁾。製作年が分かっているのはPG以下の6つであるが、1705年のPは初期のPにとってかわったもので、Bは1692年6月に長いモデルが作られたが、すぐに12月には短いものにとって代わった。Gは少し大きいもので、1710年以降のヴァイオリン用に作られたとみられている¹¹⁾。

3.2 内部のアーチ形状の解析

次に、ヴァイオリン本体のアーチ形状の解析について述べる。本研究では、マイクロCTスキャナで得た3次元ジオメトリデータより内部のアーチの形状についてモデル化を試みた。ヴァイオリンのもつ独特の起伏(アーチ)は各楽器それぞれ異なり、形状的にも音色的にもその個性を見せる。ストラディヴァリの師であるニコロ・アマティらの一族のころの楽器のアーチは、アーチの高さが高く、楽器の外周であるエッジ付近の裾で絞られる形状の傾向がある。他にも、現ドイツのミッテンヴァルトやマルクノイキルヒェンで活躍したクロッツやシュタイナーなども高く急峻なアーチの傾向がある。一方、これらの後の時代にあたるストラディヴァリはそのアーチの高さを少し下げ、楽器の周縁部(エッジ)の絞りが滑らかになっている。これらの形状の違いは音量や音色に影響する。

なお、アーチの形状は楽器の表面と内部では若干異なる。というのも、板の厚みは均一ではなく、表板/裏板共に中央部がやや厚く周縁部にむけて徐々に薄くなる。板の厚みは製作者や楽器によって異なるが、例えば表板が2.5 mm、裏板で3.5 mmなど基本的に裏板の方が厚みがある。

Fig.5 に CT スキャンから得られた 1708 年製の本体内側のアーチの形状を示す (y-z 平面、表板長方向に対する横断面)。図中の右に示すように upper-bout、center-bout、lower-bout の 3 か所の断面図である。本体の外側のアーチ形状の計測は容易であるが、内側は CT スキャンでないと難しい。内側のアーチはドーム状の形状をしており、おおよそ 2 次関数もしくは 4 次関数のように見える。図の赤線は多項式近似の曲線であるが、2 次関数よりは 4 次関数に近い(1719 年製も同様)。多項式近似の決定係数(R²)を計算すると、Fig.6 に示すようにどちらのヴァイオリンも 4 次関数の決定係数が大きいことから、ヴァイオリンの y-z 平面の断面は 4 次関数でモデル化できると言える。

次に、Fig.7 に内部アーチの x-z 平面 (表板長方向) を示す。1708 年の楽器はアーチが高いが、1719 年のアーチは低い。なお、アーチの高さについては時代ごとの大まかな傾向があり、ストラディヴァリの初期はアマティの影響があり高めのアーチで、やがて徐々に高さを下げてきたとされる。今回の 1708 年と 1719 年の楽器は黄金期にまたがる時期に製作された楽器であるが、アーチの特徴が互いに大きく異なる楽器である。

さらに、Fig.8 は 4 次の多項式近似による 4 次係数と 2 次係数を、表板と裏板でそれぞれ比較したものである。アーチの急峻さを表しており値が 0 に近いほど平坦なアーチを示している。表板は正方向に凸なので 2 次係数は負になり、裏板はその逆である。

アーチが高いとその分だけアーチの傾斜は急になる。f 字孔のある中央部(c-bout)は幅が狭いため急な傾斜になる。やはり、1708 年製のアーチは高いのでこの値が大きい。また、2 次係数が大きいことは、アーチの形状が丸みを帯びていることにも関係する。再び Fig.5 の(a)(b)を見ると、4 次の近似曲線(a)ではヴァイオリンのエッジ部になだらかに接合されるためにアーチの傾斜はやや直線的になる。一方、2 次の近似曲線(b)ではアーチの上部に丸みを帯びるようになることが分かる。よって、今回のストラディヴァリのように低くなだらかで直線的なアーチでは、upper-bout や lower-bout で 4 次の近似式に近い、中央部の駒や魂柱のある c-bout 付近では丸みを帯び 2 次の近似式に近い。以上、ヴァイオリンのアーチの形状は、4 次の近似式でモデル化でき、長さ方向(x)の位置によるアーチ形状は、2 次および 4 次の項の係数の比で表現できることが分かった。

3. おわりに

本研究では、マイクロ CT スキャンを用いたオールド・ヴァイオリンの内部形状の解析において、製作時に使われたフォームとの形状の一致およびアーチの形状のモデ

ル化について検討を行った。今後は、内側のアーチのモデルによる力学的意味(強度など)や音響放射との関連を数値シミュレーションによって解析を行う予定である。また、他のオールド・ヴァイオリンで著名な製作者であるアマティ・ファミリーやガアルネリ・ファミリーの楽器との比較検証も行いたい。

謝辞 貴重な楽器を解析に提供していただいた株式会社文京楽器様に感謝の意を表す。

参考文献

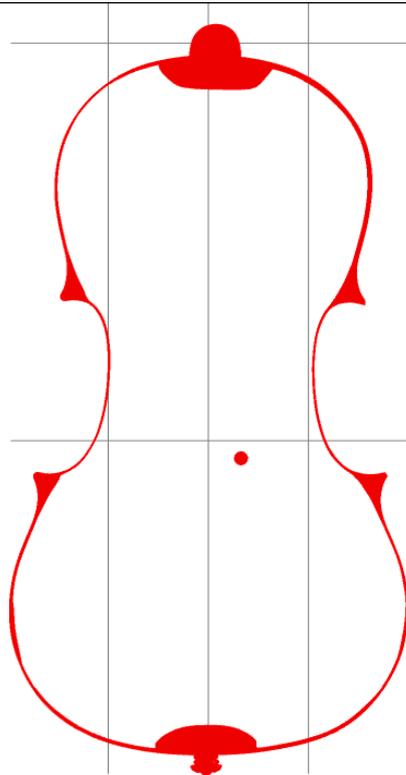
- 1) Hutchins, C.M. and Benade V., "Research papers in violin acoustics, 1975-1993: with an introductory essay, 350 years of violin research" Vol. 1. The Acoustical Society of America (1997).
- 2) Woodhouse J., "The acoustics of the violin: a review." Reports on Progress in Physics 77.11 (2014): 115901.
- 3) Moral, A. J., and Jansson, E. V. "Input admittance, eigenmodes and quality of violins." Report STL-QPSR (1982): 2-3.
- 4) Schleske, M. "Empirical tools in contemporary violin making: Part I. Analysis of design, materials, varnish, and normal modes." Catgut Acoust. Soc. J. (Series II) 4 (2002): 50-64.
- 5) Wang, L. M. and Burroughs, C. B. "Directivity patterns of acoustic radiation from bowed violins." (1999).
- 6) Schleske, M. "Empirical tools in contemporary violin making: Part II. Psychoacoustic analysis and use of acoustical tools." CAS Journal 4.6 (2002): 43.
- 7) Gough, C. E. "A violin shell model: vibrational modes and acoustics" The Journal of the Acoustical Society of America 137.3 (2015): 1210-1225.
- 8) Pezzoli, M., De Lucia, R. R., Antonacci, F., and Sarti, A. "Predictive simulation of mechanical behavior from 3D laser scans of violin plates." Proceedings of International Conference on Acoustics 2019 (2019).
- 9) Bissinger, G. and Oliver, D. "3-D laser vibrometry on legendary old Italian violins." Sound and Vibration 41.7 (2007): 10-15.
- 10) Yokoyama M., De Lucia, R. R., Antonacci, F. and Sarti A. "Influence of orthotropic properties on vibration of violin top plates." Proceedings of International Conference on Acoustics 2019 (2019).
- 11) Sacconi, S. F. "The Secrets of Stradivari," Libreria Del Convegno, 1979.
- 12) "Stradivari's moulds: Variations on a theme," The Strad, 2020. <https://www.thestrad.com/lutherie/stradivaris-moulds-variations-on-a-theme/9969.article>.

Table 1 Measurements of Stradivari's forms of violin (mm) ^{10,11}

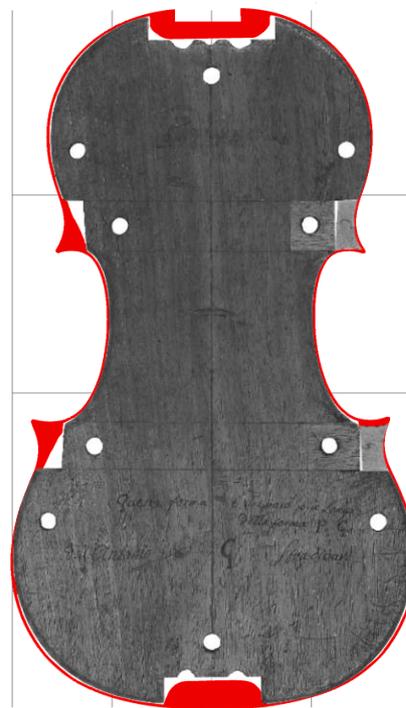
Model letter on form	Year	Length with-out block	Length with block	Upper bouts	Center bouts	Lower bouts
MB(Modello Buono)		339	343	155.5	101.5	193.2
P (Prima)		342	346	161	102	196
S (Seconda)		342	346	157	103.9	196.2
T (Terza)		334	340	151	98	190
Q (Quarta 7/8, size)		325.5	331	145	96	183
PG(Piu Grande?)	1689	344.5	348	161	106	200
SL	1691	344	350	154.5	100	195.5
B lunga	1692	348	353.5	154.5	103.2	194.8
B accorciata	1692	342	347.5	154.5	103.5	195.5
S (Seconda)	1703	340.5	345	155	98.5	195
P (Prima)	1705	343.5	348	161	102	200
G (Grande? after 1710)		347	350.5	161.5	103	201

No1. 1708
 L = 341.0mm (Top: -153.5, Bottom: 187.5)
 WL = 196.0 mm (Lower: -98.4 – 97.6)
 WC = 101.1mm (Center: -51.9 - 49.2)
 WU= 154.6mm (Upper: -79.4 – 75.2)
 ⇒ Model S

No2. 1719
 L = 345.8mm (Top: -156.2, Bottom: 189.6)
 WL = 199.9 mm (Lower: -100.8 – 99.1)
 WC = 101.7mm (Center: -50.5 - 51.2)
 WU= 160.0mm (Upper: -78.9 – 81.1)
 ⇒ Model G



Stradivari 1708



Stradivari 1719

Fig. 4 Outline of the rib superimposed on the form, Stradivari 1708 and 1719. (Photo by reference¹⁰)

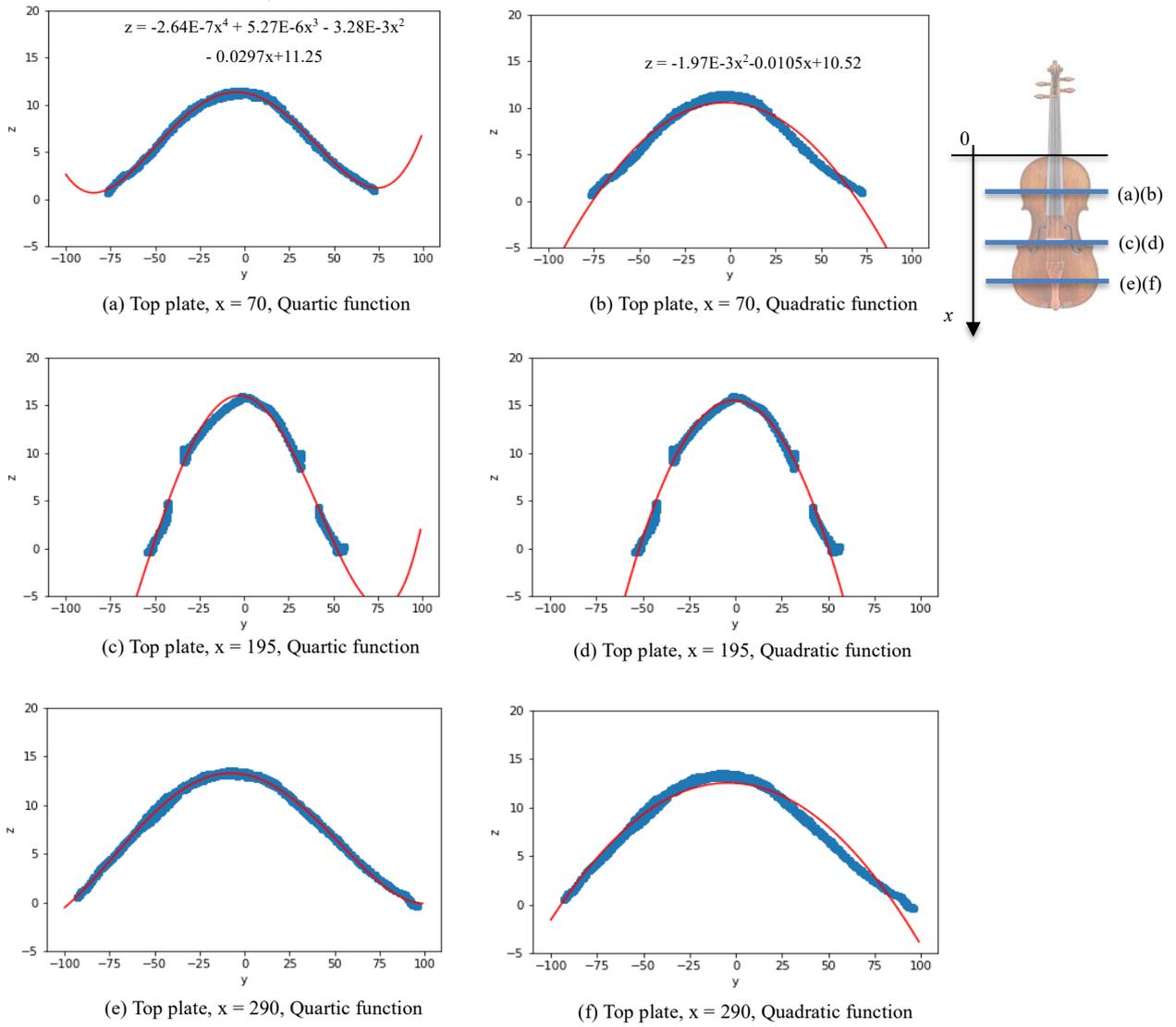


Fig. 5 Shapes inside of arch of top plate of Stradivari 1708

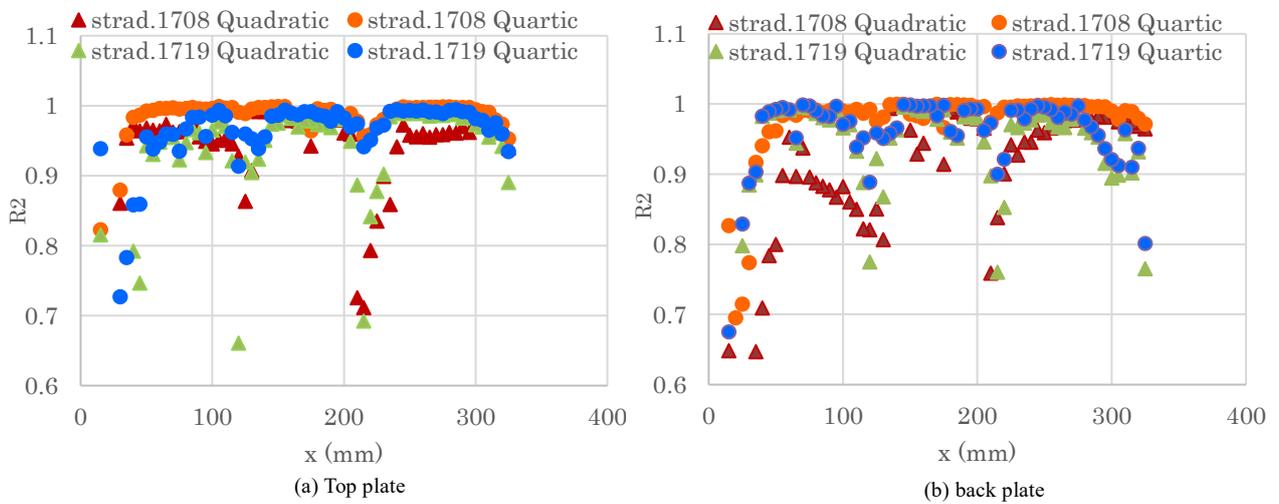


Fig. 6 Coefficient of determination of the polynomial approximation.

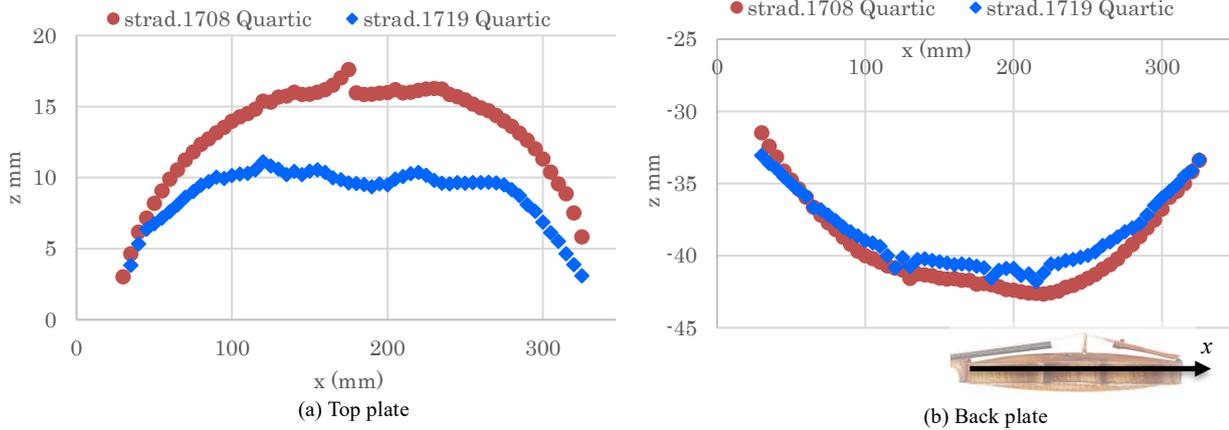


Fig. 7 Estimation of the inside of arch in the y-z plane by the polynomial approximation.

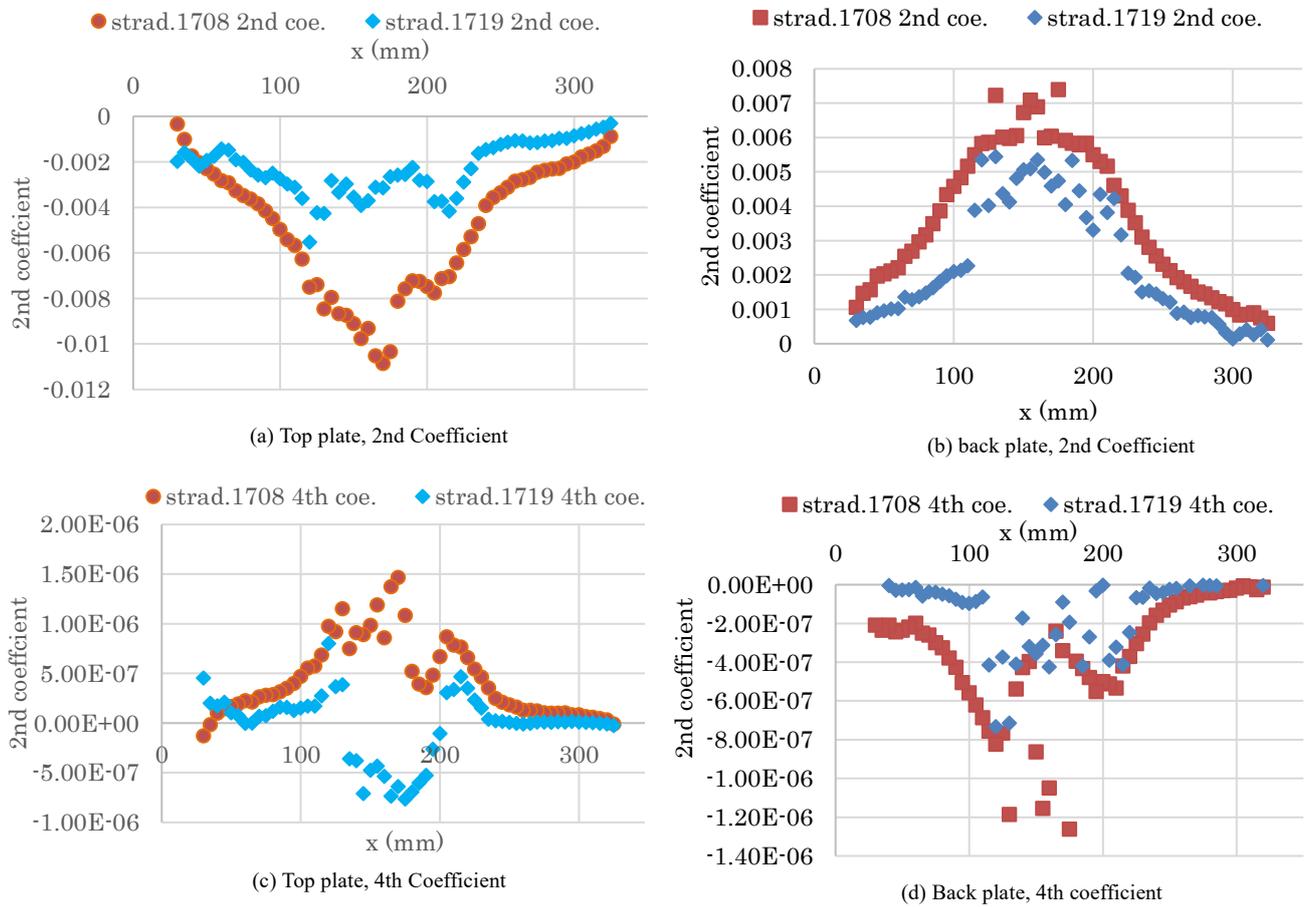


Fig. 8 2nd and 4th coefficients of the quartic approximation function, which indicates the steepness of arch.