

ガラス基板寸法が反りへ及ぼす影響に関する調査

Study of Influence on Warpage of Glass Sheet Dimensions

大神聡司*

Satoshi Ogami

近代社会では様々な製品が精密化されているが、ガラス製品も例外ではない。特に電子部材用途の場合、ガラス基板の反り品質が重要で、用途に応じて様々な方法で評価される。その中でも一般的な平置き反りについて、ガラス寸法拡大効果を調査した。材料力学を考慮した代数幾何的手法を適用したところ、実際のガラスの寸法拡大効果を定性的かつ定量的に説明できた。この結果、有限要素法等の数値シミュレーションに比べてはるかに少ない労力で、様々な条件の寸法拡大効果が計算できるようになり、現象理解による反り抑制方針や品質管理指針を立てられるようになった。

Tolerances are getting tight for many products in modern society, and glass products are not an exception. In particular, the flatness quality of the glass substrate is important in the case of electronic component applications, and it is evaluated in different ways depending on the application. In this report, the effect of enlargement of glass sheet dimensions on warpage was investigated when the glass is set on a flat table as a general way. Applying algebraic geometry base on a material mechanics, the effect of an actual glass warpage could be explained and predicted quantitatively and qualitatively. As a result, the size expansion effect of the various conditions could be easily calculated with a little effort compared with Finite Element Method (FEM), hence the policy for less warpage and guidelines for the quality control are successfully developed.

*旭硝子株式会社 先進機能ガラス事業本部 品質技術室 技術営業グループ 主席
Deputy Manager of Technical Sales & Marketing Gr., Quality & Technical Sales Div., APMG Div., Asahi Glass Co., Ltd.

1. Introduction

AGC旭硝子は半世紀に渡り、フロート法で板ガラスを製造している。ソーダ石灰ガラスから始まった生産は、現在では無アルカリガラスやアルミノシリケートガラス等数多くの種類に、用途も建築用途から電子部材用途へと展開している。

近代社会では、様々な製品が精密化されており、部材にも高性能・高品質を求められる。ガラスも例外ではなく、特に電子部材用途の場合は要求性能と要求品質が高い。中でも反り品質が重要とされており、用途に応じて様々な方法で評価されている。

一般的に基板寸法で反りを測定すると、基板のサイズが大きいため測定時間が長く、製造条件へのフィードバックが遅れて品質管理レベルを上げられないという課題がある。これに対して、小さい寸法の反り値を代表値として素早く高い頻度で測定し、その結果を直ちにフィードバックすると、高い反り品質が達成できるため、小さい寸法から大きい寸法の反り値を精度良く予測する手法は品質管理上重要な技術である。

反り値は、評価方法や把持方法によって違いが生じる。ガラスの据え付け向きに着目すると、縦置きか平置きかで大別できる。ガラスを地面に対して垂直に設置し、ガラスの自重と反りの向きが直交する縦置きの場合は、ガラスが自重で座屈するような薄板でなければ、反りは自重にほとんど影響されない。一方、定盤等の上に設置する平置きの場合、ガラスの自重と反りの向きが平行なので反りは自重に影響される。このような理由により、平置きの場合はどのような反り値になるのか予測されており、一般的には有限要素法等の数値シミュレーションが用いられていた。しかしながら、ガラス寸法ごとにメッシュを作り直したり、特別なソフトが必要だったりするため時間とコストがかかってしまう課題がある。

本稿では、フロート法で製造したときのガラスが縦置きと平置きされたときの反りを、材料力学を考慮した代数幾何的手法で明らかにしたので報告する。

2. Experimental

2.1 Preparation for comparison

Table 1に示す色々な寸法の板について反り評価を行った。同一処理したガラスは同じロット名称とした。

Table 1 Sample list.

Sample	Lot	Dimension(mm)	Measured range(mm)
A-S	Lot A	□100×1.3	□60
A-L	Lot A	600×400×1.3	□300
A-LL	Lot A	1220×735×1.3	□500
B-S	Lot B	□100×0.73	□60 (FT-17) □90 (SURFCOM)
B-L	Lot B	750×650×0.73	750×650
B-LL	Lot B	1300×1200×0.73	1300×1200

Table 2 Dragontrail Glass property.

Item	Value
Young's modulus	74 (GPa)
Density	2.48(g/cm ³)

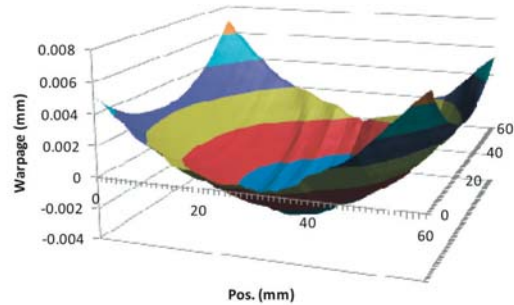


Fig.1 Warpage of □100×1.3mm (Sample A-S).

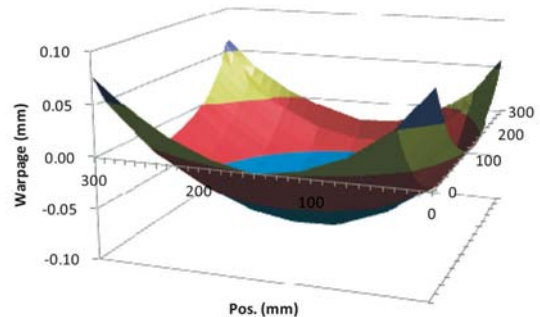


Fig.2 Warpage of 600×400×1.3mm (Sample A-L).

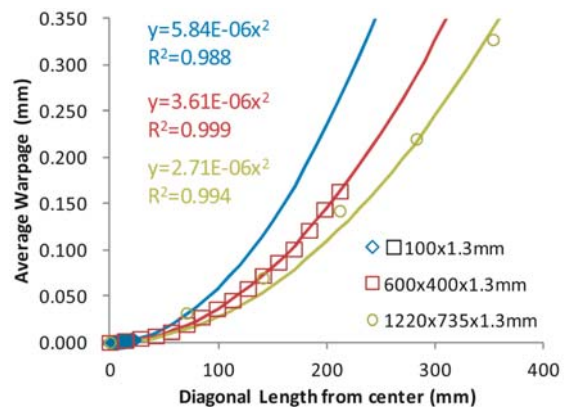


Fig.3 Comparison of average warpage from center (Sample A-S,A-L,A-LL).

2.2 Measurement method and result of vertical setting

縦置きの反り測定は以下の方法で行った。□100mm以下に切断されたガラスを縦置きにして、斜入射干渉法フラットネステスターFT-17 (Nidek社製) で、中心□60mmの反りを測定した。600×400mmおよび1220×735mmに切断したガラスは、縦置きにして、レーザー測定器LKシリーズ (Keyence製) にて面内□300mmおよび□500mmの変位測定を行った。

その結果、これらのガラスの反り量はFig.1、Fig.2のような面内分布を示し、どちらも中心から4角に向かって反りが大きくなっている。中心の変位を

ゼロとすれば、変位は中心からの距離の2乗に比例していることと、Sample A-SとSample A-L、A-LLの近似曲線の差は寸法が大きくなるにつれて大きくなる様子がわかる (Fig.3)。Sample A-SとA-Lのサンプルを多数準備し、Sample A-Sの比例定数からSample A-Lの反りを予測して比較すると、±50ミクロン程度の誤差範囲であった (Fig.4)。

2.3 Measurement method and result of horizontal setting

平置き反り測定は以下の方法で行った。まずガラスの凸を下向きになるように平らな定盤に置くと、4角が反り上がるので、この反りを測定した (Fig.5)。Sample B-Sは、SURFCOM (東京精密) で、中心□90mmの対角を測定し、Sample B-L、B-LLはシッケネスゲージにて4角を測定した。

この結果、Sample B-L、B-LLは、B-Sの縦置き反り値から導かれる式 (4) の曲線から大きく外れて小さい値となった (Fig.6)。これが、自重による影響である。

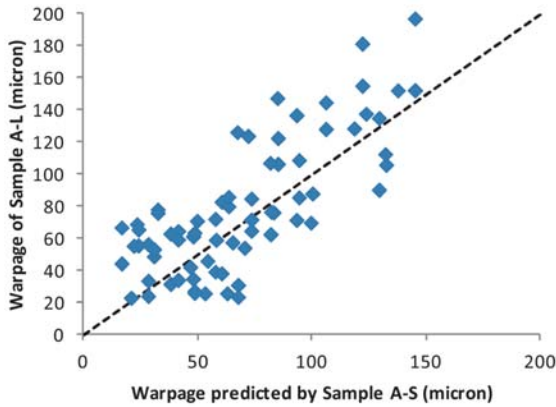


Fig.4 Predicted Warpage vs. Actual Warpage (N=75)

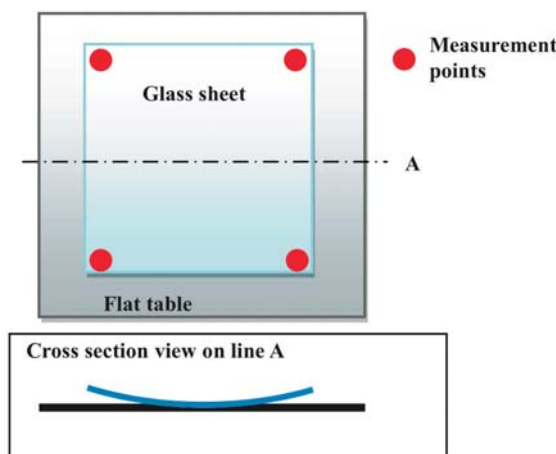


Fig.5 Schema of horizontal setting and measurement point.

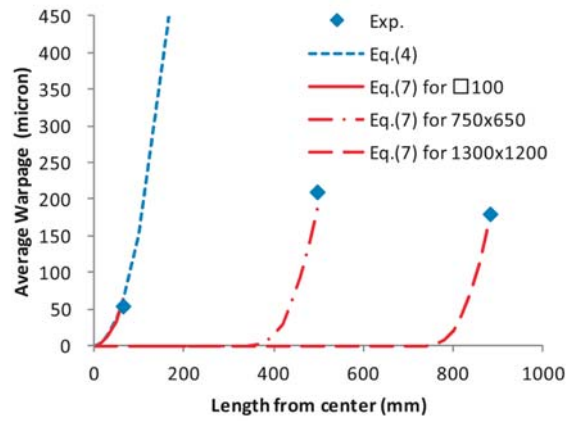


Fig.6 Comparison of average warpage from center (Sample B-S,B-L,B-LL).

3. Algebraic geometry Analysis

3.1 Assumption of Analysis

代数幾何的手法の座標系をFig.7に示す。中心から対角に向かう方向の中心からの距離をxとし、xでの反り値y(x)を求めることとする。縦置きしたときの反り値をy_v(x)、平置きにした時の反り値をy_h(x)として代数幾何的計算により反り値を求めた。縦置き反りは、一様なガラス両面の状態差起因の力だけを、平置きはそれに加えて重力が働くことを前提条件とした。

3.2 Solution for Vertical setting

ガラス両面の状態差により、単位長さ当たりM₀のモーメントが働くこととすると、任意の位置xにおける反りのモーメントM_s(x)は、式(1)で表わせる。

$$M_s(x) = M_0 L(x) \quad \text{式(1)}$$

よって縦置き反りy_v(x)は下記の式(2)で表わせる¹⁾。

$$\frac{d^2 y_v(x)}{dx^2} = \frac{M_s(x)}{EI(x)} \quad \text{式(2)}$$

このとき、Eはヤング率、I(x)は断面二次モーメントで、下記の式(3)で表わせる。

$$I(x) = \frac{t^3 L(x)}{12} \quad \text{式(3)}$$

ここで、tは板厚で、M₀は単位長さ当たりの応力差におけるモーメントでロットごとに実験的に求めた。

この式(2)、(3)と境界条件(at x=0, dy/dx=y_v=0)から微分方程式(2)の解は式(4)で表わせる。つまり、縦置きにしたときに対角の二次関数に比例していた理由はこの式で説明できる。また、表裏で一様な応力差が原因で反っていることを考慮すれば、M₀は板厚とその応力差の積に比例することが予想され、同様に製造されたガラスであれば、反りy_vは

板厚の2乗に反比例することが示唆される。

$$y_v = \frac{6M_0}{Et^3} x^2 \quad \text{式(4)}$$

3.3 Solution for Horizontal setting

平置きにした場合、式 (1) に自重によるモーメントの項を追加する必要があるので、 $y_h(x)$ は下記の式 (5) で表わせる。

$$\frac{d^2 y_h(x)}{dx^2} = \frac{M_s(x) - M_w(x)}{EI(x)} \quad \text{式(5)}$$

ここで $M_w(x)$ は、 x での自重によるモーメントで、下記式 (6) で表わせる。

$$M_w(x) = \int_x \rho \cdot g \cdot t \cdot L(\xi) \cdot \xi \cdot d\xi \quad \text{式(6)}$$

ここで、 ρ は密度、 g は重力加速度、 t は板厚である。この積分と距離の関係から、Fig.7で示した任意の点から先の部分の面積 A とその面積の重心までの距離 L_G を使って表わすことで計算を容易にできる。また、平置きの場合、 $y_h(x)$ がマイナスになることは無いので、 $M_s = M_w$ となる x まではゼロで、 $M_s > M_w$ となるとき反りが発生することに着目し、 $M_s = M_w$ となる x を x_0 としたときに、 $X = x - x_0$ と置換すると、式 (5) の右辺は下記の式 (7) で表わせる。小片サイズでの反りを縦置きで測定できれば、式 (4) から M_0 が得られるので、境界条件 (at $X=0, y_h = dy/dX=0, y \geq 0$) を設定することで、式 (7) の微分方程式が解け、 $y_h(x)$ を得ることができる (Fig.8)。このとき、ヤング率 E と密度 ρ は、Table 2の値を用いた。

$$\frac{d^2 y_h(X)}{dX^2} = \frac{12}{Et^3} \left(M_0 - \frac{\rho g t A(X) L_G(X)}{L(X)} \right) \quad \text{式(7)}$$

Sample B-Sの□60mmの反り値から算出した M_0 である72.1mNを用いて、Sample B-S, B-L, B-LLの $y_h(x)$ を求めると、Fig.6のような反りの傾向を示した。平置きにした実験値は、B-Sまでは式 (4) と同じ傾向を示したものの、板のサイズが大きくなるにつれて、重力の項が大きくなり、式 (7) の解と良く一致する傾向を示した。このように式 (7) で予測した反りと実際の反りを板厚も変えていくつか比較したところ、 ± 100 ミクロン程度の誤差であった (Fig.9)。

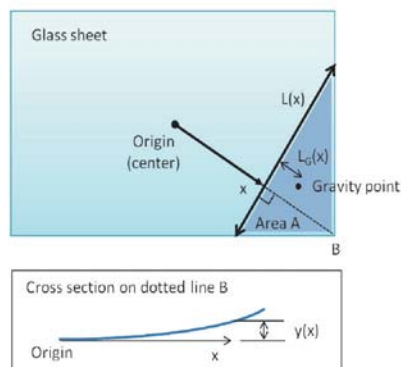


Fig.7 Coordinate of Glass sheet

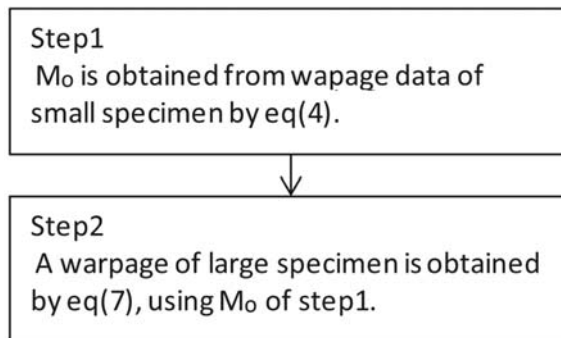


Fig.8 Steps for warpage prediction

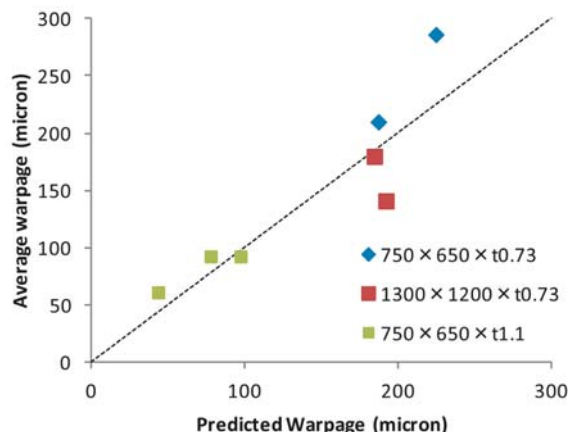


Fig.9 Predicted Warpage vs. Actual warpage (N=7)

5. Conclusion

本稿では、一般的な有限要素法とは異なり、材料力学を元にした代数幾何的手法で反りを求めた。誤差は ± 100 ミクロン程度あるが、傾向性が無いことから本質的に小片から大きいガラスの反りを予測するために発生している誤差と想定される。

また、本稿の方式は、微分方程式を解くだけであり、有限要素法に比べて、①特別なメッシュ作成知識が不要で表計算ソフトでも解を導出でき、②数式からどの項がどれだけ影響しているか本質的な理解ができるといった利点がある。

以上より、本手法は製品設計だけでなく、反り抑制方針や品質管理指針を立てる上で多くの人に活用されている。

—References—

加藤正名ら, 材料力学, p94 (1988)