

局所加熱によるガラス溶着法における 残留応力の低減法と数値解析アルゴリズム

Reduction Method and Simulation Algorithm of Residual Stress in Locally Fused Glass Plates

学籍番号 47-166748
氏名 西村 祐哉 (Yuya Nishimura)
指導教員 佐藤 淳 准教授

1. 概要

1.1 背景—ガラス溶着法の提案

現在のフロート板ガラスの製造及び運搬上の制約から建築に使用可能な寸法には上限があり、ガラス同士の接合部には目地が発生する。目地の無い、より透明度の高いガラス表現を実現するために、接合部周辺のみを局所的に加熱することで大判ガラス板を一体化するガラス溶着法の開発を目指す。

1.2 目的—温度勾配と残留応力の関係

溶着法では接合部付近を局所的に加熱するため、ガラス面内に温度分布が存在し冷却後に残留応力が生じる。これまでに、アニーリングと呼ばれる温度保持工程での応力緩和による溶着の可能性、及びアニーリング終了時でのガラス転移点(後述)以上の領域(図1での軟化範囲)の必要性について提言がなされている^[1]。本研究では温度勾配 S というパラメータを導入し、アニーリング終了時での溶着線に垂直な方向の温度勾配と残留応力値の関係を明らかにすることを目的とする。

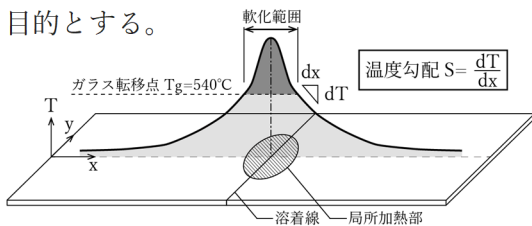


図1 温度勾配と軟化範囲

1.3 手法—実験と解析

溶着線と直交する方向での温度勾配を変化させた実験を行い、温度勾配と残留応力値の関係を明らかにする。さらに、ガラスの緩和現象を考慮した増分解析手法を提案する。最後に、残留応力状態について実験との比較を行い、解析の妥当性を検証する。

2. ガラスの特性

2.1 ガラス転移

溶融ガラスの冷却に伴って内部構造の変化が遅くなり、平衡状態から離れてしまう現象をガラス転移と呼び、その時点での温度をガラス転移点 T_g と呼ぶ。ガラスの物性はガラス転移点を境に大きく変化する。

2.2 粘弾性・緩和現象

ガラス転移点以上の温度においてガラスは粘弾性体であり、緩和現象を示す。様々な緩和機構が提案されているが、ここでは最も支配的とされる粘性流動による緩和を扱う^[2]。温度 T で時間 t だけ保持した場合に、応力度 σ は式(2.1)のように緩和される。

$$\sigma = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sigma_0 = \xi_{(T,t)} \cdot \sigma_0 \quad (2.1)$$

ここで、 ξ を上式のように定義し、緩和係数と呼ぶ。 τ は緩和時間と呼ばれ、本論文で扱うガラスに関しては式(2.2)で表される。

$$\tau = 3.42 \times 10^{\left\{ \frac{\sinh\left(\frac{2.68 \times 10^3}{T}\right) - 11}{1} \right\}} \quad (2.2)$$

3. 溶着実験

3.1 実験方法

溶着部周辺のみを局所的に加熱するため、図2のように試験体の一部は炉外に露出した状態で溶着を行う。試験体の溶着線長さは150mm、厚みは8mmに統一している。溶着線に垂直な方向の温度勾配を変化させるため、試験体幅を300mm、450mm、600mmと変化させ、さらに炉内外に勾配のついた断熱材を追加した。

図3に示す溶着の熱工程は、熱割れを避けるための予熱、溶着部を溶融させる局所加熱、ガラス転移点までの冷却過程である急冷、定温保持過程のアニーリング、徐冷から成る。加熱方法は、予熱とアニーリングには電熱線ヒーターを使用し、局所加熱には手動ガスバーナーもしくは電熱線ヒーターを使用した。冷却後、歪検査器により光弾性画像を取得し、せん断応力差積分法を用いて残留応力状態を算出した。ここでは溶着で一体化できた17体（本論文9体、既往研究より8体）の試験体を考察の対象とした。

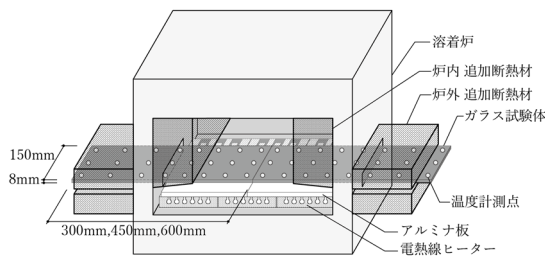


図2 溶着炉概要図

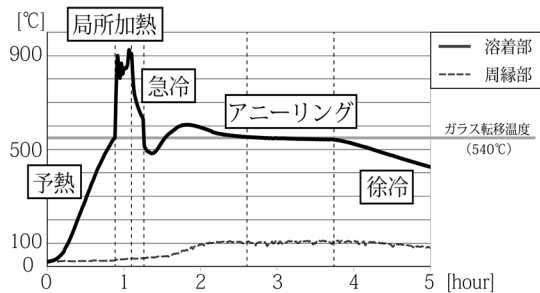


図3 温度履歴図と溶着熱工程

3.2 温度勾配と残留応力の関係

アニーリング終了時の温度勾配 S と残留応力の最大・最小主応力 $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ の関係を図4に示す。温度勾配と残留応力には正の相関が確認され、最小二乗法による比例定数はそれぞれ0.763と0.395となった。

3.3 残留応力分布

残留応力の最大・最小値の分布位置とアニーリング終了時の軟化範囲境界の関係を図5に示す。局所加熱時の軟化範囲がアニーリング終了時よりも広いものを除くと、概ねアニーリング終了時の軟化範囲境界に分布していることが分かる。

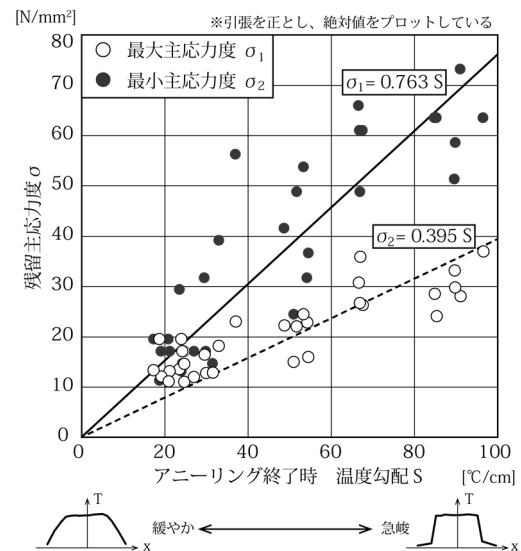


図4 実験結果

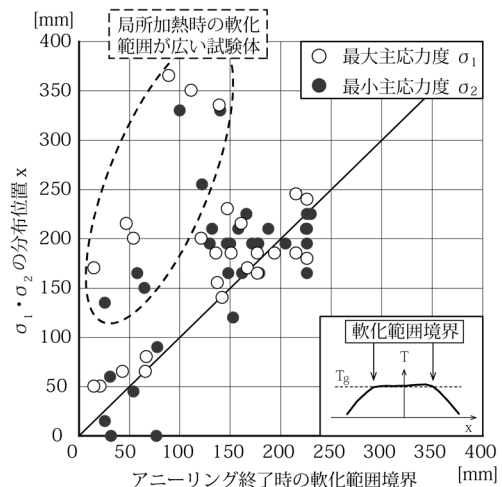


図5 軟化範囲と残留応力分布

4. 熱応力解析

4.1 モデル化

図6に本解析でのモデル化を示す。ガラスのモデル化は格子とブレースで置換した二次元モデルとする。部材の曲げ・ねじり剛性は見込まず、せん断剛性と軸剛性が実際のガラス板と一致するよう有効幅を定めた。

ガラスの機械的性質の温度依存性については、ガラス転移点で不連続に変化するよようなモデルとした。また、応力緩和には式(2.1)を適用した。

温度入力の方は、溶着線に対して左右対称かつ溶着線方向は一定とし、格子2マス毎に分割した各領域に実験での温度データを与える。また、増分解析のための温度履歴のステップ分割は、熱工程上の特異点を含むように行った。

4.2 解析方法

図7に解析のフローチャートを示す。各ステップでガラス転移点以上の場合には応力緩和を行い、最終ステップ後の応力を溶着に伴う残留応力とみなした。

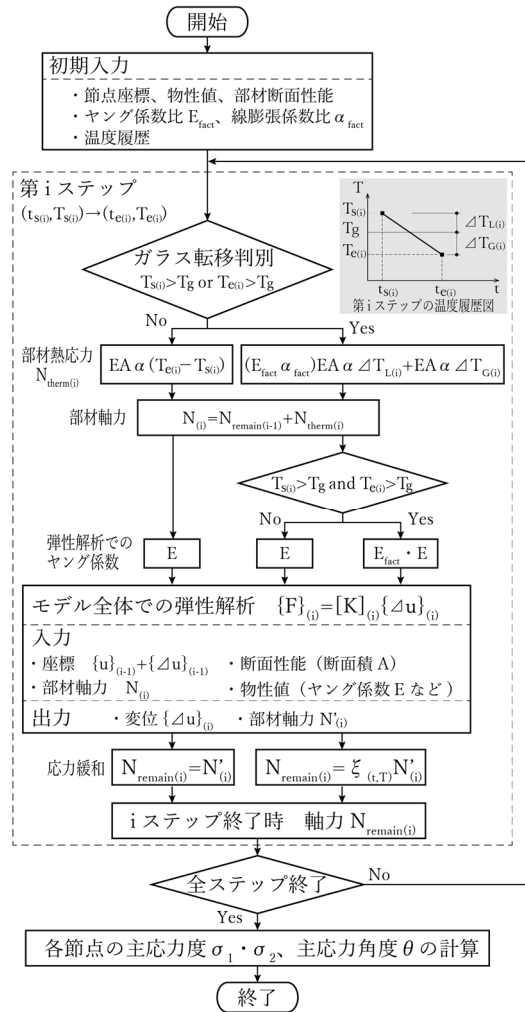


図7 解析フローチャート

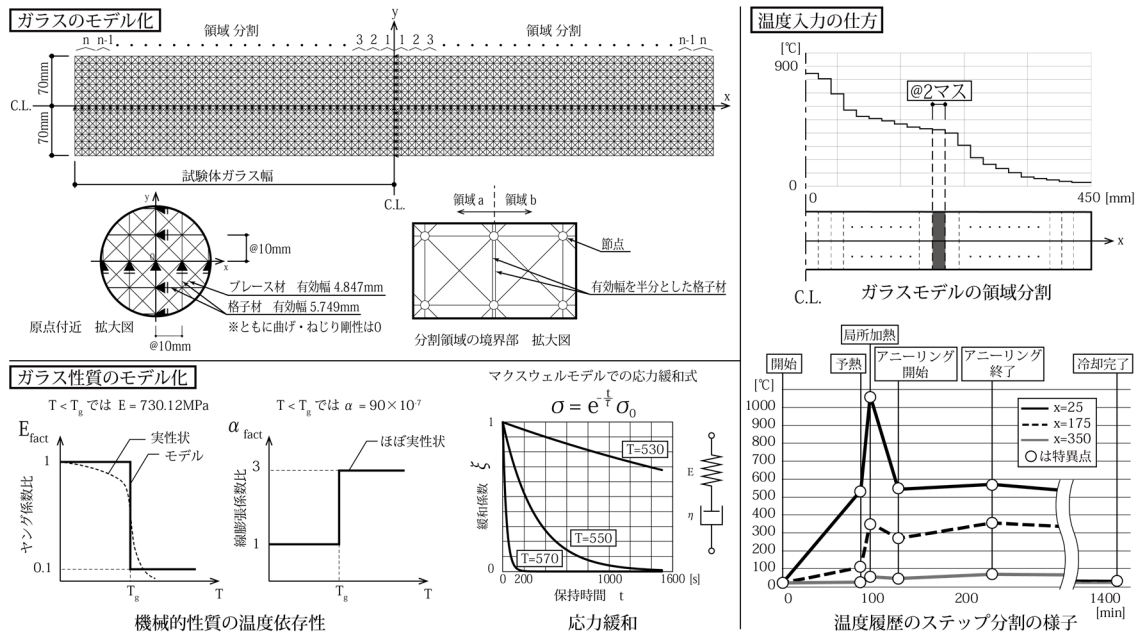


図6 解析におけるモデル化

4.3 解析結果

図8では溶着線方向及び溶着線に垂直な方向の残留応力度 $\sigma_x \cdot \sigma_y$ について、x軸上とy軸上での分布を示す。 σ_x の分布は良い一致が見られるが、 σ_y の分布は実験値と比べて解析値のピークが大きい。原因としては、ガラス性質モデルでの温度依存性における不連続性、及び温度入力のための領域分割が一方向のみであることが挙げられる。

図9に示す残留応力分布の様子は、実験値と良く対応している。図10に示す最大・最小主応力度の比較では温度勾配が急峻な場合に実験値との差異が大きい。これは、炉外に設置された熱電対での測定値とガラス温度の差異が大きく、解析上の温度勾配が急峻になるためと考えられる。

5. 総括

本論文では、局所加熱によるガラス溶着法において面内の温度分布に着目し、実験を通して温度勾配と残留応力に間に比例関係があることを明らかにした。

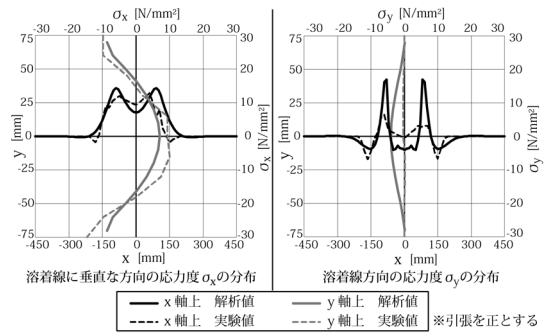


図8 xy軸上での残留応力度分布(試験体LG-6)

また、ガラスの粘弾性を考慮した増分解析手法を提案し、実験結果との比較において残留応力分布の良い対応がみられることを確認した。一方で、ガラス性質と温度入力のモデル化に改善すべき点がみられた。今後の課題として、解析での温度入力にガラスの熱伝導を考慮した温度場を用いることで、温度測定上の差異をし、解析の精度を向上させることが挙げられる。

主要な参考文献

- [1] 滝口雅之 他、局所加熱によるフロート板ガラスの溶着法における温度勾配と残留応力の関係、東京大学新領域創成学科修士論文、2016
- [2] 岸井貫、徐冷域におけるガラスの歪の緩和と粘性係数、東芝レビュー、1957

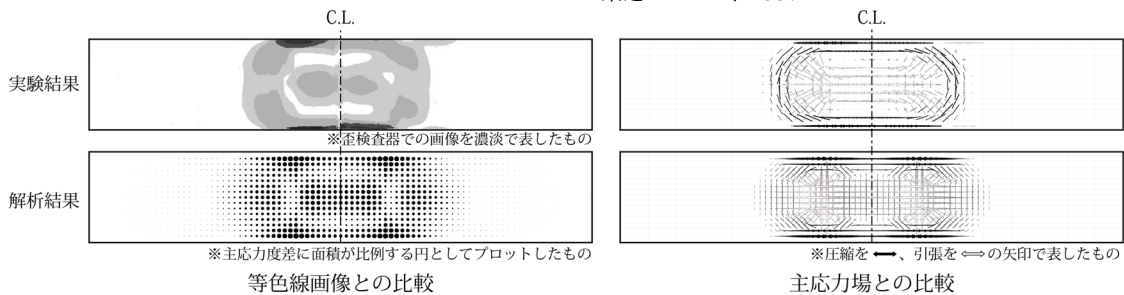


図9 残留応力分布の比較(試験体LG-6)

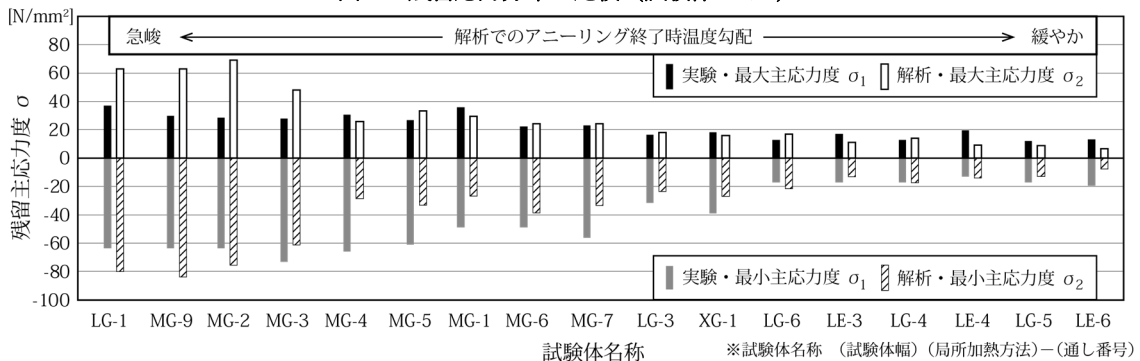


図10 最大・最小主応力度の比較

M: 300mm G: ガス溶着
L: 450mm E: 電気溶着
X: 600mm