

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

Relationship between Temperature Gradients and Residual Stress of Locally Fused Glass Plates

学籍番号 47146805

氏 名 滝口 雅之 (Masayuki TAKIGUCHI)

指導教員 佐藤 淳 准教授

1 序

1.1 背景と目的

フロート板ガラスは運搬上・製造装置上の制限のため、一般に入手可能な最大サイズは幅約 3m×長さ約 10m で、建築で大面積のガラスを使用する際には現状、継ぎ目が生じている。そこで現場で、ガラス板同士の接合部だけを局所的に加熱・軟化させ、一体化することが可能となれば、「大判ガラス」、「継ぎ目のない多面体や曲面ガラスシェル」などのガラスの透明性を活かした新たな構造体が考えられる。この工法をガラス溶着と呼び、先行研究により予熱や温度保持による応力緩和などの熱処理を適切に行えば溶着が可能であることを示唆した [1][2][3]。しかし、図 1 のような溶着中に生じる温度勾配によって生じた残留応力でガラス板が破断することがあり、その残留応力性状は把握されていない。そこで、本研究は、溶着可能な局所加熱と冷却のプロセスを明らかにすることを目的とし、特に温度勾配と残留応力との関係に着目し分析を行った。

1.2 ガラス性質と軟化温度

ガラスは一般にガラス転移点 T_g と呼ばれる温度で大きく物性値が変化し、ガラス転移点 T_g 付近では応力緩和などの粘弾性挙動を示す。この T_g 付近で温度保持し応力

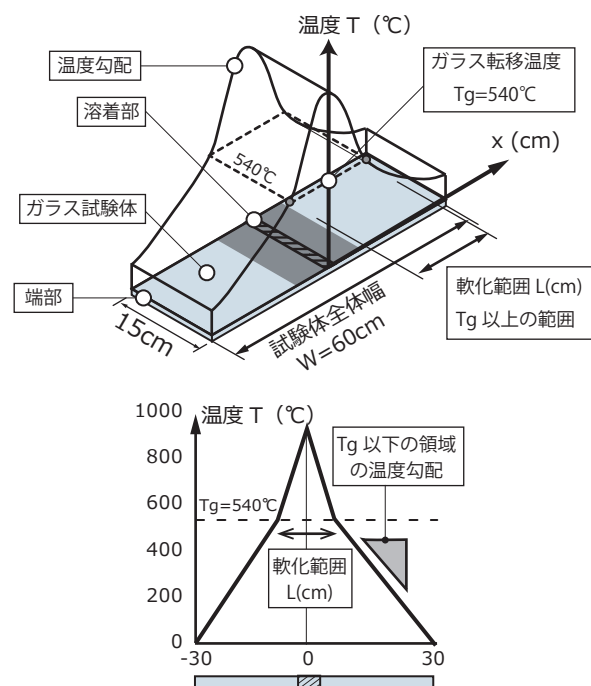


図 1：ガラス溶着時に生じる温度勾配と軟化範囲 L の関係

緩和する作業をアニーリングという。ガラス転移点 T_g を 540°C とし、この温度以上でガラスは軟化しているとみなす。

1.2 温度勾配と軟化範囲の定義

本研究では、温度勾配とはガラス試験体の短手方向を平均化した x 方向の温度分布を指す。図 2 はガラス溶着における板面内の温度履歴を示す。問題を簡単にするため、温度履歴において特徴的な温度点である局所加熱時とアニーリング時の軟化範囲に着目する。図 1 のように局所加熱時の軟化範囲、アニーリング時の軟化範囲をそれぞれ L_F 、 L_A (cm) として温度勾配を代表するパラ

メータとする。

1.3 検討手順

温度勾配を変えて溶着実験を行い、溶着の可否や割れなかった試験体の残留応力を取得し、残留応力分布の特徴を把握する。ただし、平面応力状態を仮定し、板厚方向の応力は無視した。また、ガラスの温度依存性を単純化した熱粘弾性解析を実験の温度データをもとに行い、解析による残留応力と実験結果を比較し、解析の妥当性を検証する。そして、この粘弾性解析手法を用いて、軟化範囲を変えた時の残留応力の変化を分析し、溶着可能となる温度勾配を探索した。

3 ガラス溶着実験

3.1 実験手順

図 2 (a) のような温度勾配を調整できる溶着炉を自作し、長さ 300mm、幅 150mm、板厚 8mm のフロート板ガラス試験体を 2 枚設置してガラス溶着実験を行った。図 2 (b) の平面図のように、実験中は試験体の端部を約 20mm 炉外に露出させて低温とする。炉内の温度勾配の調整は、図 2 (c) のように 3 台のヒータと炉内断熱材によって行った。作業工程は主に、予熱、バーナーでガラス板を一体化する局所加熱、 T_g に保持して溶着部の熱ひずみを除去するアニーリング、冷却の 4 つからなる。溶着後、割れた試験体は破面からクラック起点や破壊応力度を推定する。一方、割れなかった試験体は、光弾性画像（等色線画像、等傾線画像、鋭敏色画像）を撮影し、せん断積分法を用いて残留応力の主応力度と主応力角度を算出した。

3.3 軟化範囲と溶着結果

軟化範囲 L_F と L_A の散布図に溶着の結果を

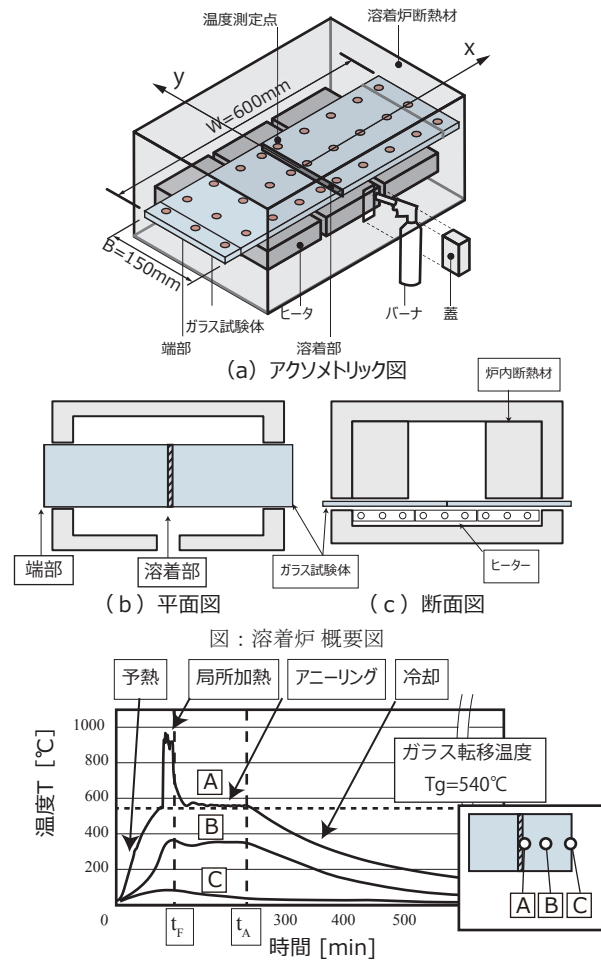


図 2：温度履歴と温度勾配取得時間 t_F と t_A

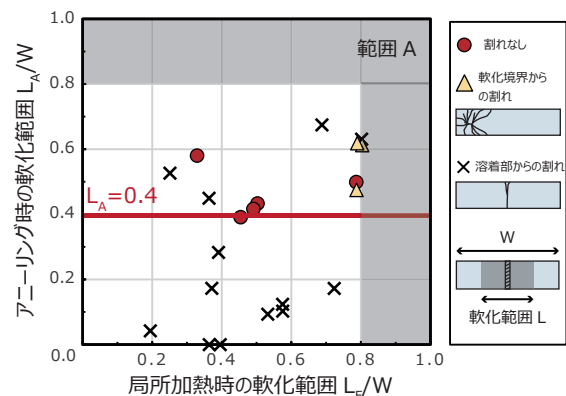


図 3：軟化範囲 L_F, L_A とクラック起点の相関

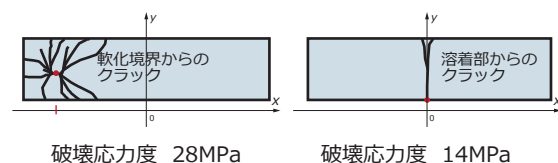


図 4：残留応力によるクラックの
主な起点位置と破壊応力度

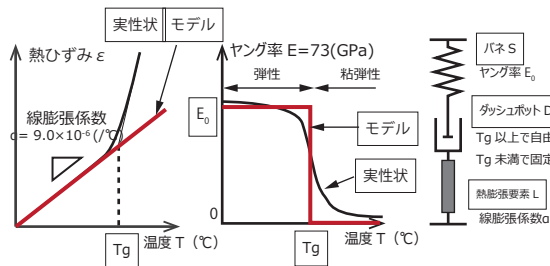


図5：ガラスの温度依存性と粘弾性モデル

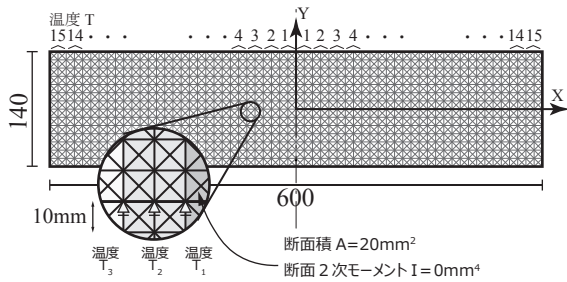


図6：ガラス試験体の線材モデル

プロットしたものを図3に示す。

図3の左下ほど軟化範囲が狭いことを表す。割れていない試験体の位置は $L_A=0.4$ より上側にあり、 L_A が0.4より小さい場合は全ての試験体で溶着部からの割れとなり、溶着部に残留応力が発生していることがわかる。軟化範囲が大きくなり範囲Aに近づくともクラックの起点が軟化範囲境界となり、温度勾配によって残留応力のピークの位置が変化することがわかった。

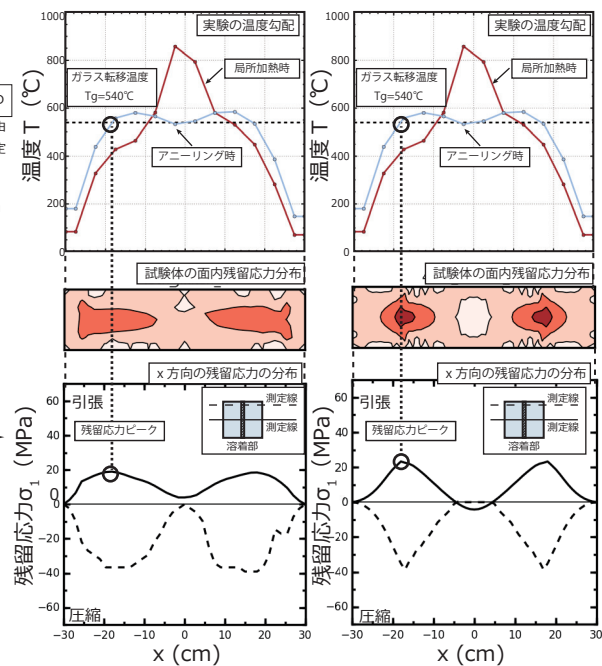
3.4 クラック起点による破壊応力度の違い

割れた試験体の破面から推定したクラックの起点と破壊応力度について図4に示す。溶着部の破壊応力度はカレットの溶け残りによる応力集中のため、ガラス面内の半分の値となっており、より高温で溶着部を溶かすことができる加熱方法に改善する必要がある。

4 熱粘弾性解析の手法

4.1 モデル化と解析手順

溶着による残留応力を再現する増分の熱粘弾性解析について述べる。ガラスの温度依



(a) 実験値

(a) 解析値

図7：実験値と解析の残留応力の対応

存性を単純化し、図5のように線熱膨張係数 α を一定、そして、ある i ステップの温度 $T(i-1)$ 、 $T(i)$ がともに T_g 以上である場合、粘弾性体とみなしヤング率は0、それまでの応力は応力緩和され0とする。それ以外の場合は、弾性体とする。この温度変化の熱応力と前ステップの軸力を等価節点力として剛性マトリクスを解き、軸力を求める。次のステップへ軸力を引き継ぎ、ステップを繰り返す。最終ステップ終了時の軸力が線材の残留応力とし、その後、節点ごとに主応力度と主応力角度を求める。試験体は図6のように軸力のみ負担する線材の格子とブレース材でモデル化した。部材の温度 T は x 方向に对称に15の領域に分割し、実験の温度履歴から抽出した温度をそれぞれ入力した。

4.2 実験値との比較

図7に実験の温度勾配と測定線における解析値と実験値の残留応力度の比較を示す。

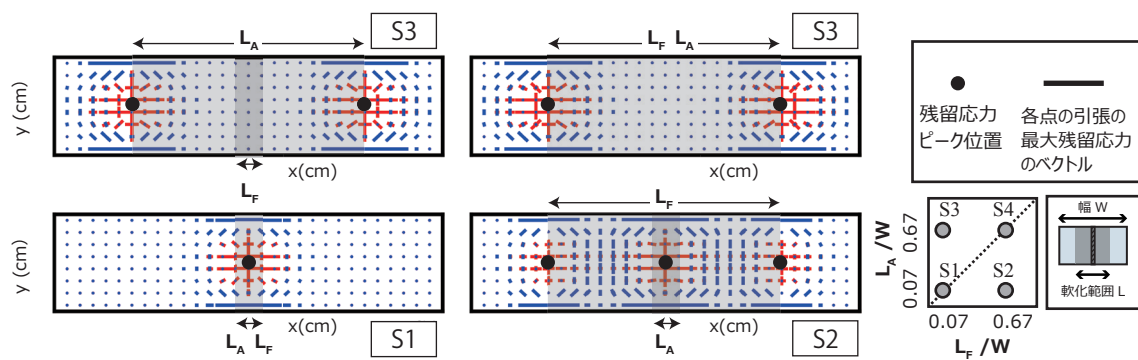


図 8：軟化範囲 L と引張残留応力度のピーク位置の変化

実験値のピーク位置は、どちらもアニーリング時のガラス転移温度 T_g とほぼ一致しており、軟化範囲の境界で割れやすいことが解析結果からも示された。実験値に対し解析の残留応力度のピーク値は 1.0 ～ 1.4 倍ほど大きい値で軟化境界に集中する傾向が見られたが、残留応力分布パターンは概ね再現できており、良い対応が見られたといえる。

4.3 解析による残留応力の分布の予想

実験で検証できなかった温度勾配も含めて軟化範囲の異なる温度履歴を作成し、それを入力として粘弾性解析を行い残留応力度の変化を検討した。入力した温度履歴の軟化範囲 L_F, L_A と残留応力の分布の解析結果のうち一部を図 8 に示す。アニーリング時の軟化範囲 L_A が小さいと十分に応力緩和が行われず、溶着部が残留応力度のピークとなるが、軟化範囲が大きくなるとともに端部側へと残留応力度のピーク位置が移動し、またピークの値は急激に増大する傾向があり、軟化範囲境界が割れる可能性が高くなることがわかる。この傾向は、図 3 の実験結果において軟化範囲が大きい時に軟化範囲境界で割れたことと一致したが、軟化範囲の大きい試験体であっても溶着部からクラックが発生するものもあった。溶着部残留応力度の最大値をみると、軟化範囲が小さい図 8 の左下ほど小さくなる傾向が

あり、これは軟化範囲が小さいほどガラス転移温度 T_g 付近の温度勾配がゆるやかになるためだと考えられる。

5 総括

本研究では、溶着可能な温度条件を把握することを目的として、温度勾配と残留応力との関係について実験と解析によって検討を行った。解析では実験での残留応力の分布を概ね再現できた。また、温度勾配条件のパラメトリックスタディにより、クラック起点が変化する様子が確認でき、解析の結果では軟化範囲が小さいほど残留応力度の最大値は小さくなることが示された。このことから軟化範囲が狭い方が温度勾配は緩やかになり、残留応力が小さくなるという予測が得られた。ガラスのサイズが大きくなっていくとさらに温度勾配は緩やかとなるため、溶着の可能性は高まると考えられる。また、実際に軟化範囲が小さいほうが残留応力を小さくできるのかについては温度勾配の実験による残留応力値のサンプルを増やし検証していく必要がある。

参考文献

- [1] タンブンチュウ 他；普通板ガラスの縁部の局所加熱による溶着性状，日本建築学会大会，2012
- [2] 滝口雅之 他；ガラス板溶着法における局所加熱の温度勾配条件，日本建築学会大会，2014
- [3] 西村祐哉 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条件と熱応力解析手法の提案，東京大学工学部建築学科卒業論文梗概集，2015