

フロート板ガラスを逐次溶着する走行型炉の開発における残留応力低減法

Residual Stress Reduction Method in the Development of a Self-Moving Kiln for Sequential Welding of Float Glass Plates

学籍番号 47-196742

氏 名 永渕 飛鳥 (Nagabuchi, Asuka)

指導教員 佐藤 淳 准教授

1. 序

1.1. 背景と目的

建築用フロート板ガラスは製造と運搬の都合上寸法に制限があるが、これらを溶着し一体化できれば、シームレスなガラスドームといったガラス構造の展開が期待できる。そこで、建設現場でガラス接合部を局部的に加熱し、逐次溶着していく走行型炉の開発を目指す。

溶着の際、冷却過程でガラス内温度差が誘発する残留応力は、溶着線が長いほど増加することが報告されており^[1]、これまで据え置き型炉で溶着線長さ 150 mm まで成功している。また残留応力は主に、ガラスを転移点 (550°C) に保持しひずみ緩和を行う工程終了時の温度分布の影響を受ける^[2]。この工程での転移点付近 (540-560°C) の領域 (図 3、アニール域) に着目し残留応力低減に有効な温度分布操作を探り、走行型炉開発に組み込むことを本研究の目的とする。

1.2. 研究手法

既往の数値解析手法^[3]を用いて異なるアニール域形状での残留応力を予想し、低減に有効な温度分布操作の見当をつける。そして据え置き型の小型炉を用いて解析同様の条件で実験を行う方法を提案するとともに、その操作の妥当性を検証する。最後に

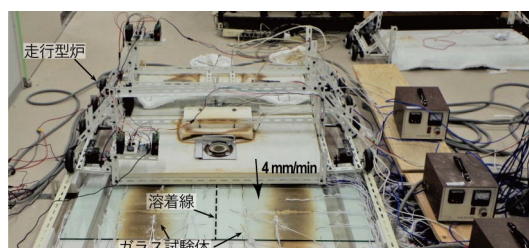


図 1 製作した走行型炉

走行型炉 (図 1) の試作、実験を行い温度分布操作の実装を試みる。

2. ガラスの性質、熱工程

ガラスは冷却過程で転移点に近づくと粘度が徐々に上がり流動性が減少する。転移点で一定時間温度保持することでガラス内に生じたひずみを緩和する処理をアニールと呼ぶ。溶着の熱工程は予熱 (~550°C)、局所加熱 (~800°C)、急冷 (~550°C)、アニール (550°C 保持)、徐冷 (~常温) からなる。

3. 数値解析による温度分布操作の検討

3.1. 解析方法

本解析ではガラスの粘性流動による応力緩和を反映した熱粘弾性解析手法^[3]を用いた。ガラス板を線材の平面格子に置換したモデル (図 2) で 20 mm 四方の領域ごとに、

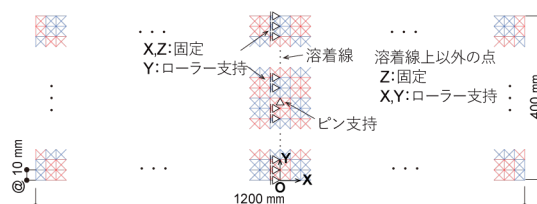


図 2 線材モデル

熱工程の主要な段階での温度を入力した。

3.2. 解析条件

奥行 400 mm × 幅 600 mm のガラスを 2 枚並べたモデルに温度分布操作を施した。残留応力低減にはアニール域を断続的に分割して低温域を設けることが有効であると予想し、走行型炉で再現可能な方法としてアニール域を馬蹄形状にする馬蹄形方式(図 3(a))、低温域のみその場に留まる分割停留方式(図 3(b))を試みた。

3.3. 解析結果と考察

解析条件・結果の例を表 1 に示す。各モデルの最大主応力度(引張)はすべてガラス

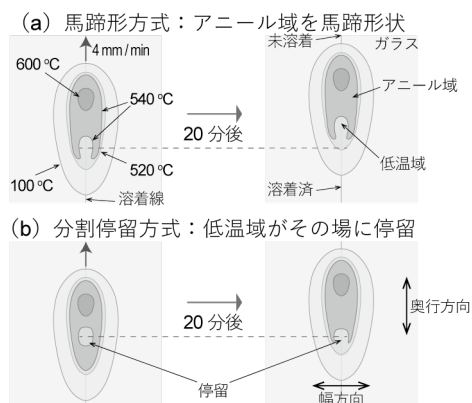
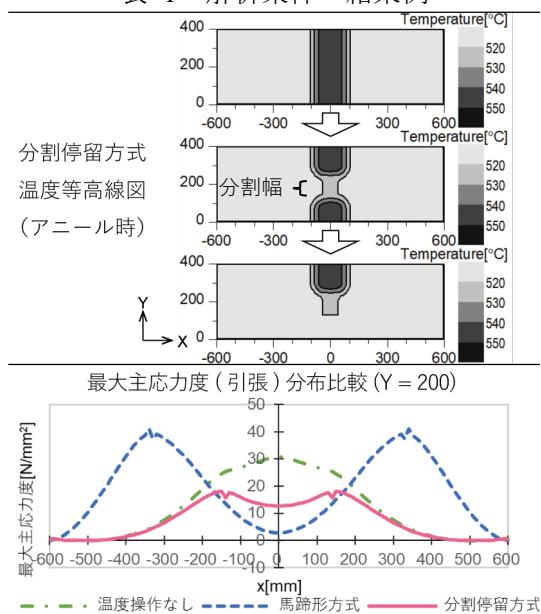


図 3 温度分布操作

表 1 解析条件・結果例

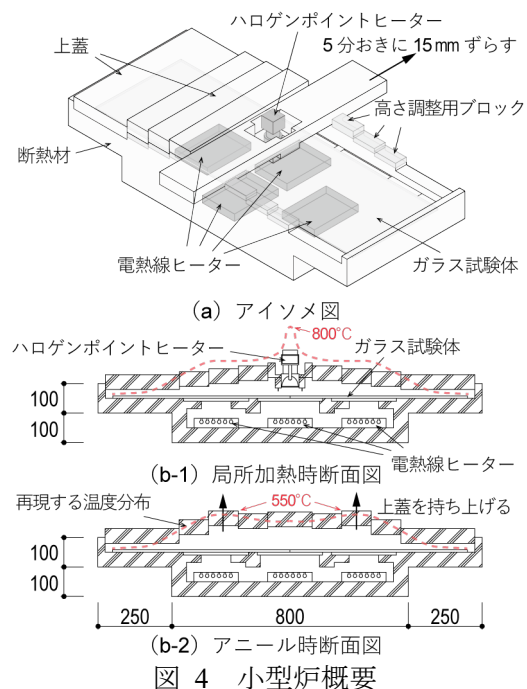


板の奥行の中心線上($Y = 200$)でピークとなった。 $Y = 200$ での幅方向の最大主応力度分布に着目すると、温度分布操作なしのモデルでは溶着線($X = 0$)付近に引張応力の山状の分布が見られたが、馬蹄形方式では溶着線から離れた場所に、より大きな山状のピークが 2 つできる分布となった。分割停留方式では溶着線付近の引張応力は半分程度まで低減されることが確認できた。引張応力の上昇が最も緩やかな分割停留方式は残留応力の低減に有効な温度分布操作の可能性があると見える。

4. 小型炉を用いた温度分布操作の実験

4.1. 実験方法

奥行 400 mm × 幅 600 mm で 8 ミリ (公称厚) のフロート板ガラス 2 枚を短辺同士で突合せ、隙間に充填したカレットを熔融していく。逐次溶着の熱工程を再現するため、炉内温度が熱工程の各段階に適するよう上蓋形状、ヒーターの出力を操作した(図 4)。局所加熱時にはハロゲンポイントヒーターを溶着線に沿って動かし溶着部を逐次的に



溶融した。冷却後、歪検査器で撮影した光弾性画像をもとに残留応力値を算出した。

4.2. 実験結果と考察

実験結果を表 2 に示す。馬蹄形方式の試験体 H-SN2 は溶着終了から 5 - 7 日経過後、左の母材中央部で引張による遅延割れが発生した。分割停留方式の試験体 L-SA は残留応力が大幅に低減され、遅延割れはなかった。L-SA の最大主応力度は、既往研究^[2]で成功した奥行き寸法が 150 mm の試験体のうち最小のものの最大主応力度と同じオーダーであり、溶着長さに伴い上昇する残留応力を低減するうえで有効な温度分布操作であることが実験でも示された。また、数値解析による予想ともよい一致が見られる。さらに馬蹄形のアニール域に分割停留方式を施した試験体 H-SA1 でも L-SA ほどではないが残留応力の低減が見られ、遅延割れはなかった。

5. 分割停留方式の走行型炉への実装

5.1. 走行型炉の構成

走行型炉は予熱・局所加熱/アニール/徐

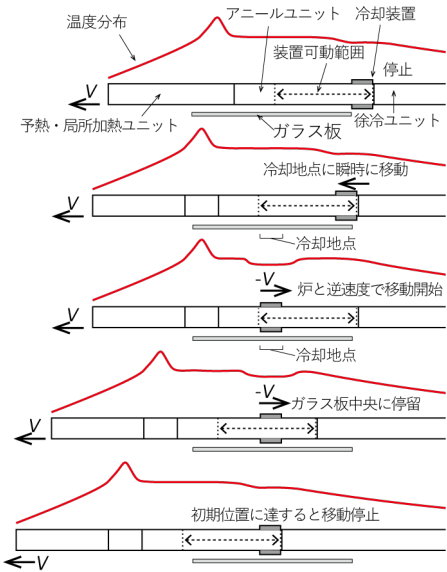


図 5 分割停留方式の実装

冷の役割を担う 3 つのユニットからなる (図 6)。各ユニットに設置したステッピングモーターにより毎分 4 mm でガラス板上方を通過し逐次溶着を行う。各ユニット中央には加熱冷却を行うヒーターが設置されている。アニールユニットの冷却装置は放熱のため一部が炉外に露出している薄い金属板、ヒーターからの輻射伝熱を遮る断熱材などで構成される。装置が走行型炉と逆

表 2 小型炉実験条件・結果

試験体名称	H-SN2 (馬蹄形方式)	L-SA (分割停留方式)	H-SA1 (馬蹄形+分割停留)
温度等高線図 (アニール時)			
試験体写真			
	加熱から 5 - 7 日後に割れ	割れなし	割れなし
主応力場			
	最大主応力度 (引張) : 27.5 N/mm ²	最大主応力度 (引張) : 11.8 N/mm ²	最大主応力度 (引張) : 23.4 N/mm ²

5.2. 走行型炉を用いた実験

試験体 R2 の冷却装置は放熱を担う熱伝導性の良い銅板、その上の 10 mm 厚の断熱材、断熱材の温度上昇を緩和する熱反射率の高いステンレス板の覆いから構成される。結果としてアニール域の分割は見られたものの分割幅は小型炉の L-SA と比較して小さく、またガラス板縁部が転移点以下となり緩和が不十分で徐冷段階で試験体は割れた。この実験を再現する数値解析を行ったところ、最大引張応力度が 43.1 N/mm^2 と大きめの値を示すことが確認された。

走行型炉の加熱はヒーターからの輻射伝熱の要素が大きく、ヒーターで昇温した空気からの熱伝達が主要素であった小型炉よりも加熱ムラが大きくなりやすいことが要因と考えられる。

6. 総括

本研究では、アニール時の温度分布操作に着目した数値解析と据え置き型の小型炉の実験から溶着線が 400 mm ならば、残留応力低減には分割停留方式が有効であるこ

表 3 走行型炉実験条件・結果例

試験体名称 R2 (分割停留方式)

アニールユニット断面図 (中央冷却時)

上：奥行方向
下：幅方向

温度等高線図 (アニール時)

割れた工程 徐冷段階

とを示した。また、走行型炉への実装の過程で、分割停留方式を再現できるアニールユニットの構成を提案した。今後の課題として、意図した温度分布をより精密に再現できる走行型炉の加熱・冷却方法の設計、溶着線長さに依存しない残留応力低減法の考案が挙げられる。

主要な参考文献

- [1]張耕嘉,“局所加熱におけるガラス溶着法における走行型炉の設計とその進行方向の温度分布”, 東京大学新領域創成科学研究科修士論文, 2018
- [2]西村祐哉,“局所加熱によるガラス板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”, 東京大学新領域創成科学研究科修士論文, 2017
- [3]森永魁,“ガラス板溶着工程における熱粘弾性挙動の高精度化”, 東京大学工学部卒業論文, 2020

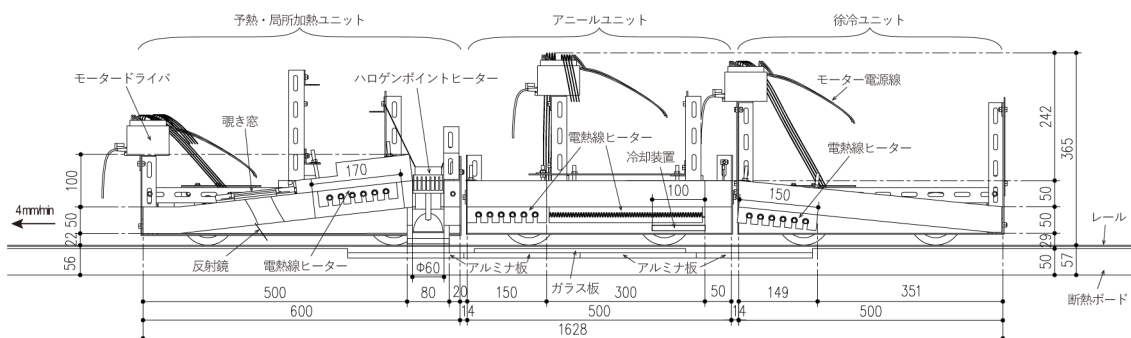


图 6 走行型炉断面图