

局所加熱によ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

Design of Self-moving Kiln and Temperature Distribution along Seam of Locally Fused Glass Plates

学籍番号 47-166813
氏 名 張 耕嘉 (KenChia Chang)
指導教員 佐藤 淳 准教授

1. 序

1. 1 背景

フロートガラスの運搬と製造には制限があるため、大判ガラスの工場から現場への運搬は困難であり、大規模なガラス構造物を造る際、ガラスの接合が必要になるが、現行のガラス接合技術では、不透明な目地が生じる。鉄の溶接のようなガラス溶着技術が可能になれば、透明な目地を作れると考えられる。

1. 2 目的

現場で大規模なガラスを溶着する際、ガラスの入る、巨大な溶着炉を用いることが考えられる。しかし、炉が大きくなる程、温度の制御や現場への設置が難しく、コストも高くなるため、本研究では、小型の走行型溶着装置を提案する。走行型溶着装置を実現するために、走行型炉の温度変化を小型溶着装置で再現し、実験によって、幅方向と奥行方向の温度勾配と残留応力の関係を明らかにする。

1. 3 手法

走行型溶着装置が稼動する状況を想定した温度、溶着装置にを用いて、温度変化を再現し、幅方向と奥行方向の温度勾配を変化させた、実験を行う。また、走行型溶着装置の設計では、モックアップの製作により、設計の妥当性を検証する。

2. ガラスの性質

2. 1 ガラス転移

ガラス転移点はガラス転移が起きる温度であり、ガラスの温度がガラス転移点以下になると、ガラス分子の流動性がなくなり、固体になる。また、ガラスの冷却速度によって、ガラス転移点が変わる。本研究で扱うソーター石灰ガラスの転移点 T_g は、 550°C である。

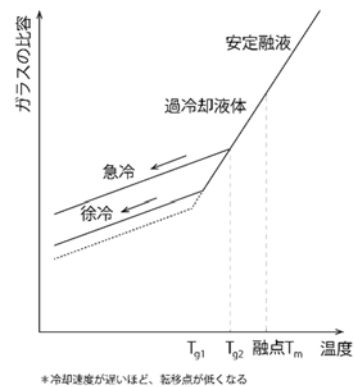


図1 ガラスの比容-温度関係

2. 2 部分加熱による残留応力

ガラスに不均一な熱処理を行う場合、熱膨張によって各部分に起こるガラスの伸縮度合いが異なるため、温度差のある部分にひずみが生じる。ガラスが転移点以上の温度帯から冷却される場合、温度差によるひずみが固定され、残留ひずみとなる。常温まで冷却場合には、残留ひずみによる残留応

力が発生し、この残留応力がガラス強度を上回ると、ガラスが割れる。

3. 溶着実験

3. 1 実験手法

実験装置は、ヒーターと断熱材の配置が異なる、ルームタイプと貫通タイプの2種類とする。ルームタイプでは、炉内空間を壁で分割し、各室内を均一に加熱あうる。室と室の間に生じる温度差に応じて、図2のような温度勾配を付ける。連続タイプでは、炉内空間を一体とし、ヒーターの操作によって、図3のように緩やかな奥行方向温度勾配を付けることとする。

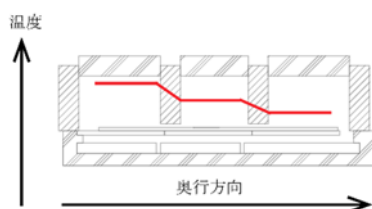


図2 ルームタイプ 奥行方向温度分布

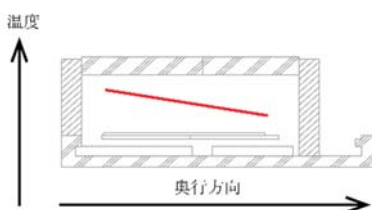


図3 連続タイプ 奥行方向温度分布

実験中に行う熱工程では、予熱、局所加熱、冷却、アニール、徐冷段階の順番で進める。溶着実験の各熱工程の温度勾配、走行型装置に対応する位置関係、各熱工程の奥行方向温度勾配を図4に示す。走行型溶着装置が進行する時に生じる温度変化を、試験体に幅方向と奥行方向の温度勾配を変化させることで再現し、各熱工程での適切な温度勾配を明らかにする。なお、試験体サイズは400mmx450mmと600mmx450mmとする。

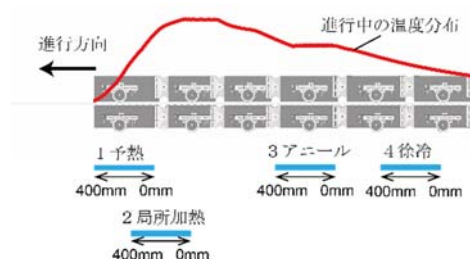


図4 実験の各熱工程と走行型炉の対応

3. 2 実験結果による考察

本論で行った実験では、試験体が全部割れるという結果であったが、実験データの分析により分かったことを示す。

予熱段階で割れた試験体は3体であり、予熱の加熱範囲と最大温度勾配関係を図5に示す。図5より、予熱段階での最大温度勾配は、ほぼ同じ領域に集中しており、100°C以上に加熱した範囲が狭い場合に、ガラスの割れが発生している。一定の温度勾配に対して、100°C以上に加熱する範囲が広ければ、順調に局所加熱段階に入る。

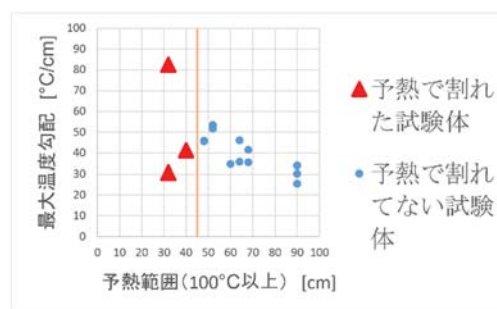


図5 予熱段階加熱範囲と最大温度勾配

局所加熱時の最高温度は、目地の溶着具合と透明度に直接的に影響する。実験結果とを比較すると、既往研究の試験体と比較すると、局所加熱時の最高温度を800°C付近に30分から45分保持した場合は、2枚のガラスが一体化し、目地もほぼ透明である。

3. 3 解析方法

ガラス板をガラスの厚みは考慮せず、10mm 間隔の格子材と斜め材で構成する二次元線材モデルに置換し、熱弾性解析を行う。解析モデルは図 6 のように、細かいセクションに分割し、各セクションに異なる温度を入力することで、実験の温度勾配を再現する。解析の温度データは、実験中のいくつかの特異温度点を抽出し、実験の温度履歴と近似するものを使用する。解析の流れを図 7 に表す。解析によって、異なる温度変化による残留応力を予測することが出来る。

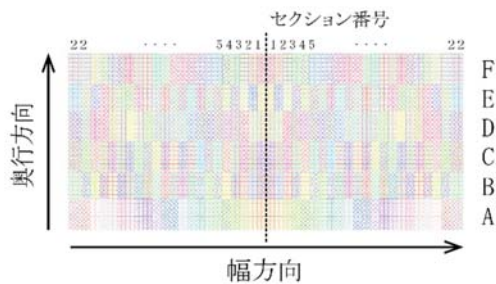


図 6 解析モデルの方向とセクション

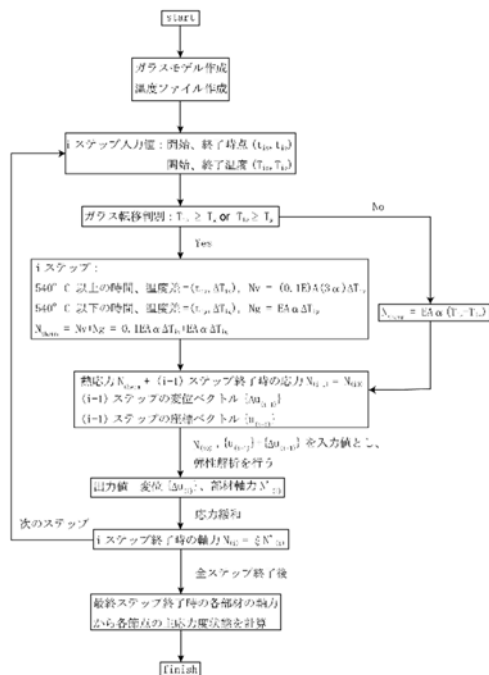


図 7 熱弾性解析のフローチャート

3. 4 解析による試験体の寸法の考察

モデルの寸法を変化させ、同じ温度データを入力して解析を行うことで、試験体の寸法と残留応力の関係を明らかにする。図 8 に、解析モデルの幅方向と奥行方向の寸法と解析で得られた最大主応力度の関係を表す。図 8 から、解析モデルの幅方向寸法を長くした場合には、応力の変化はない。一方、奥行方向の寸法を変化させた場合には、最大主応力度も大きくなる。同じ温度履歴で溶着を行う場合、試験体の奥行方向の寸法が残留応力に影響することが分かった。

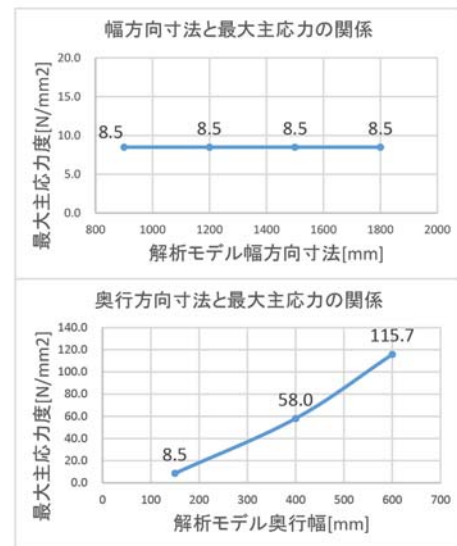


図 8 試験体寸法と最大主応力度の関係

3. 5 解析による温度勾配の考察

既往研究では、アニール終了時の幅方向の温度勾配が小さければ、試験体の残留応力も少ないことを証明した。本論文では、幅方向奥行方向の両方ともに温度勾配を付けて、実験を行った。実験の温度データで解析を行った結果と実験の局所加熱段階の最大温度勾配の比較を、図 9 に表す。奥行方向の最大温度勾配が大きいほど、残留応力に対する影響も大きくなる。

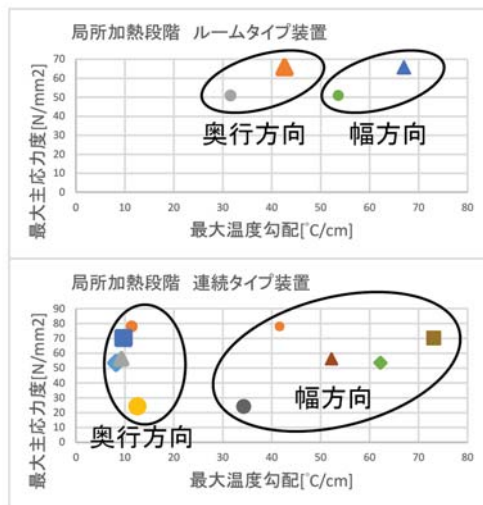


図 9 局所加熱時最大温度勾配と解析で得られた最大主応力度の関係

4. 走行型溶着装置

4. 1 装置の構成

走行型溶着装置は、駆動部と炉本体二つの部分で構成する。装置を上下に分割して、ガラスを挟み込み、進行させながら溶着を行う。

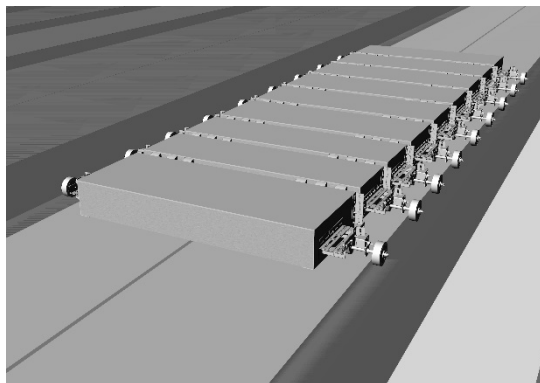


図 10 走行型溶着装置イメージ

4. 2 駆動部

走行型装置を低速に進行させるために、ステッピングモーターを用い、電子部品によって、モーターの回転を制御し、装置の進行速度を制御する。また、フレーム、車軸と車輪を配置することで、装置の重量を支える。

4. 3 温度制御

溶着実験によって、温度勾配を制御するには、ヒーターと炉内空間の配置が最も重要である。実験で得られた適切な温度履歴を走行型装置で再現するために、溶着部の断熱材とヒーターを図 11 のように配置する。ヒーターの温度を制御することで、想定した温度勾配を再現する。

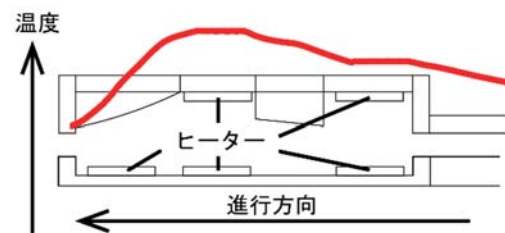


図 11 走行型溶着装置の溶着部形状

5. 結論

奥行方向の温度勾配と幅方向の温度勾配はいずれも、小さい方が残留応力に対する影響はすくない。また、試験体の奥行方向寸法が長くなるほど、同じ温度履歴で実験を行った場合にも、残留応力が大きくなるので、適切な温度勾配を再検討する必要がある。

走行型溶着装置に関しては、モックアップによって、装置の可能性を示したが、現場での溶着を実現するには、実大装置で検討する必要がある。

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] 西村祐哉 他、局所加熱によるフロート板ガラス溶着法における温度勾配条件と熱応力解析手法の提案、東京大学新領域創成学科修士論文、2017
- [3] Boyce Lundstrom and Daniel Schwoerer、Glass Fusing Book One、1986