

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2020 年度
修 士 論 文

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

2021 年 1 月 18 日提出
指導教員 佐藤 淳 准教授

永渕 飛鳥
Nagabuchi, Asuka

目次

第 1 章	序章	10
1.1	建築分野におけるガラスと溶着技術	10
1.2	想定するガラス溶着法と課題	11
1.3	ガラス溶着に関連する技術	13
1.4	用語定義	14
1.5	既往研究での成果と本研究の目的	15
1.6	本論文の研究手法と論文構成	18
第 2 章	ガラスの性質と残留応力	19
2.1	ガラスの組成	19
2.2	ガラスの強度	19
2.3	ガラス転移	20
2.4	粘弾性	20
2.5	残留応力発生メカニズム	21
2.6	残留応力低減因子	24
2.6.1	軟化幅	24
2.6.2	アニール時温度分布操作	25
2.6.3	温度勾配	26
2.7	残留応力の観察	26
2.7.1	光弾性	26
2.7.2	歪検査器	26
2.7.3	等傾線画像	27
2.7.4	等色線画像	28
2.7.5	鋭敏色画像	29
第 3 章	数値解析による温度分布操作の予備検討	30
3.1	解析の目的	30
3.2	解析方法	30
3.2.1	ガラス板のモデル化	30
3.2.2	温度入力	31
3.2.3	数値解析アルゴリズム	33
3.3	解析条件	36

3.4	解析結果	36
3.5	考察	39
第 4 章	温度分布操作の実験	41
4.1	実験の目的	41
4.2	実験方法	41
4.2.1	試験体	41
4.2.2	実験装置	42
4.2.3	溶着手順	46
4.2.4	温度測定方法	48
4.2.5	残留応力算出方法	49
4.3	実験内容	52
4.4	実験結果	56
4.5	考察	60
4.5.1	小型炉の構成と温度分布	60
4.5.2	温度分布形状と残留応力比較	62
4.5.3	遅延割れの生じる残留応力の値	64
4.5.4	溶着部の透明度	64
第 5 章	走行型炉の開発	66
5.1	走行型炉の設計	66
5.1.1	走行型炉の全体構成	66
5.1.2	炉本体の設計	67
5.1.3	駆動部の設計	73
5.1.4	制御システム	74
5.2	溶着実験	78
5.2.1	目的	78
5.2.2	実験方法	78
5.2.3	主応力度算出方法	83
5.2.4	実験内容	85
5.2.5	実験結果	88
5.2.6	考察	91
第 6 章	溶着線長さの検討	100
6.1	溶着線長さと残留応力の関係	100
6.1.1	解析条件	100
6.1.2	解析結果と考察	102
6.2	溶着線の長いガラス板への残留応力低減法の適用	107
第 7 章	総括	109
7.1	本論文での成果	109

7.2 今後の課題	110
参考文献	111
謝辞	113
付録 実験結果詳細	114

目次

1.1	接合部の溶着によるシームレスなガラス面の実現	11
1.2	ガラスドームイメージ	11
1.3	逐次溶着を行う走行型炉のイメージ	12
1.4	ガラス溶着の熱工程	13
1.5	溶着により一体化したガラス板	13
1.6	用語定義	14
2.1	冷却速度とガラス転移	20
2.2	マクスウェルモデル	21
2.3	応力緩和現象	21
2.4	ガラス転移点以上から冷却する場合	23
2.5	ガラス転移点以下から冷却する場合	23
2.6	ガラス転移点付近から冷却する場合	23
2.7	溶着実験での幅方向温度分布の例	24
2.8	温度分布操作	25
2.9	直交ニコル法	27
2.10	等傾線画像の例	27
2.11	円偏光法	28
2.12	等色線画像の例	28
2.13	偏光色図（出典：[1], P20）	28
2.14	鋭敏色法	29
2.15	エッジ部の主応力状態の判別 ^[1]	29
2.16	鋭敏色画像の例	29
3.1	解析モデル-支持条件と領域分割	31
3.2	各領域の温度取得方法	32
3.3	解析フローチャート	35
3.4	解析モデル名称	36
3.5	各解析モデルの最大主応力度（引張）分布比較	40
4.1	試験体加熱前突合せ部の様子	41
4.2	小型炉外観	42
4.3	小型炉 - アイソメ図	42

4.4	小型炉 - 平面図、断面図	43
4.5	ハロゲンポイントヒーター設置の様子	45
4.6	小型炉における溶着部付近温度履歴 ($X = \pm 40 \text{ mm}$ での値の平均)	46
4.7	局所加熱時溶着線付近の温度分布	47
4.8	熱電対設置の様子	48
4.9	熱電対配置図 (奥行 $400 \text{ mm} \times$ 幅 600 mm の試験体)	48
4.10	等傾線画像撮影時の光学軸	50
4.11	主応力線図作成手順	51
4.12	主応力度とせん断応力度	52
4.13	微小領域での平面応力状態	52
4.14	せん断応力差積分法	52
4.15	各試験体に施す温度分布操作	53
4.16	小型炉 - 2 段階目アニール時断面図 (L-SA, H-SN1,H-SN2)	54
4.17	小型炉 - 2 段階目アニール時断面図 (H-SA1,H-SA2)	55
4.18	解析と実験の温度分布比較 (L-SA)	61
4.19	各試験体の最大主応力度 (引張) 分布	63
4.20	各試験体の主応力度比較	63
4.21	試験体母材別の最大主応力度と遅延割れ有無	64
4.22	溶着部の様子	65
5.1	走行型炉-全体図	66
5.2	走行型炉-ユニット構成	67
5.3	走行型炉-奥行方向断面図	67
5.4	アニールユニット-幅方向断面図	68
5.5	予熱・局所加熱ユニット-図面	69
5.6	覗き窓から見た様子	70
5.7	アニールユニット-図面	71
5.8	徐冷ユニット-図面	72
5.9	駆動部の様子	73
5.10	駆動部-図面	74
5.11	PC 側 XBee	75
5.12	Arduino 側 XBee	75
5.13	走行型炉の制御ネットワーク	76
5.14	X-CTU 画面でのデータの送受信の様子	76
5.15	制御基板回路図	77
5.16	走行型炉	78
5.17	セットアップ- 概要	79
5.18	セットアップ- 写真	80
5.19	局所加熱の様子	80
5.20	ハロゲンポイントヒーターの冷却	80

5.21	分割停留方式における冷却装置の動き	81
5.22	主要な工程での奥行方向断面	82
5.23	熱電対の配置例	83
5.24	試験体表裏の温度測定用の熱電対の配置	91
5.25	ガラス板表裏での温度差	92
5.26	温度等高線図比較 - R3、L-SA（解析）、L-SA（実験）	94
5.27	温度分布例 - R3	95
5.28	各試験体の最初の割れが生じた工程	96
5.29	主応力場の推移 - L-SA（実験）	97
5.30	主応力場の推移 - R2	98
6.1	解析モデル-温度入力用の領域分割	101
6.2	解析モデル-支持条件	101
6.3	溶着線長さと主応力場の様子	102
6.4	溶着線長さと残留主応力度	103
6.5	主応力場の時間経過（溶着線 1600 mm の場合）	105
6.6	局所加熱終了時の溶着線の変位	106
6.7	溶着線の長いガラス板を溶着する際の冷却機構の動き	107

表目次

1.1	流通上のフロート板ガラス最大寸法 ^[2]	10
1.2	走行型炉開発検討事項一覧	12
1.3	既往研究での溶着成功の最大寸法と局所加熱方法	16
1.4	奥行寸法増大に伴う残留応力の増加 ^[3]	17
2.1	建築用板ガラスの主成分（ソーダ石灰ガラス） ^[4]	19
2.2	フロート板ガラスの許容応力と平均破壊応力 $[N/mm^2]$ ^[4]	19
2.3	フロート板ガラスの特性温度 ^{[5][6]}	21
3.1	解析でのガラス諸係数 ^[7]	30
3.2	式 (3.2) の係数の値 ^[7]	33
3.3	解析モデル一覧	36
3.4	解析結果（L-SN、H-SN）	37
3.5	解析結果（L-SA）	38
4.1	カンタル線詳細	44
4.2	ハロゲンポイントヒーター詳細	44
4.3	熱電対詳細	48
4.4	実験で用いた歪検査器（写真出典：[1], P30）	49
4.5	試験体一覧（温度分布操作の実験）	52
4.6	実験結果（H-SN1、H-SN2）	57
4.7	実験結果（H-SA1、H-SA2）	58
4.8	実験結果（L-SA）	59
4.9	溶着部の透明度	65
5.1	各熱工程に要する時間と各ユニット奥行き方向寸法	68
5.2	ステッピングモーター詳細	73
5.3	モータードライバ詳細	73
5.4	XBee 詳細	75
5.5	熱工程上の温度取得時点	84
5.6	試験体一覧	85
5.7	冷却機構 - C、R1	86
5.8	冷却機構 - R2、R3	87

5.9	実験結果 - C、R1	89
5.10	実験結果 - R2、R3	90

第 1 章

序章

1.1 建築分野におけるガラスと溶着技術

建築において最も一般的に使用されている透明板ガラスは、フロート法により製造されるフロート板ガラスである。フロート板ガラスは工場にて連続した帯状のガラスとして成形されるため、幅方向の寸法は製造機械の都合上 3m 程度に制限される。長さ方向については原理的にはどれだけ長いガラスも製造可能であるが、工場から建設現場への運搬の都合上やはり制限がある。以下の表 1.1 に流通上のガラス板の最大寸法の一例を示す。

表1.1: 流通上のフロート板ガラス最大寸法^[2]

呼び厚さ [ミリ]	最大寸法 [mm]
3	2438×1829
5	3658×2438
6	4267×2921
8	7620×2921
10	7620×2921
12	10160×2921
15	10160×2921
19	10160×2921

ガラスは脆い材料であるため、一般にはサッシに嵌め込んで窓として用いられる。はめ殺しの開口部ならコンクリートや金属フレームにサッシを用いずにガラスをはめることも可能であり、例としてジッパーガスケットによりガラスを固定する構法が挙げられる。カーテンウォール全面をサッシ枠を用いずにガラス面のみで連続させる構法としては SSG 構法 (Structural Sealant Glazing)、DPG 構法 (Dot Point Glazing) が有名である。前者は構造シーラントでガラスを室内側の支持材に接着するもので、熱線反射ガラスを用いて全体をハーフミラーにし、支持部材を見せないようにするのが一般的である。後者はガラスの隅部に穴を空け、変形追従性を持つメカニカルな支持金物で点支持する方法である。似た方法として、ガラスに穴を空けず、端部を金物で挟み込む MPG 構法 (Metal Point Glazing) がある。いずれの構法もガラスの連続性を追求したものであるが、依然目地は完全には消失していない。また、ガラス支持のための構造体が必要であり、ガラスリブやテンショントラスなど、透明性を高めた構造体も使用されるが、ファザードの透明度を損なう要素であること

に変わりはない。ガラス支持の構造体を不要とするには、ガラス自体が構造材として使用できることが前提となる。ガラス板同士をエッジ部で突合せ、大判のガラス面を製作する場合、SSG 構法などで使用されるシリコーンシーラントによりガラス板同士を接着する方法が考えられるが、接合部の応力集中や経年劣化が想定され、構造材としては使用しづらい。ガラス板同士の接合部は十分に応力伝達ができ、屋外の紫外線や温度変化でも劣化しないものであることが求められる。

そこで、鉄の溶接のように、ガラス板同士の接合部を再加熱し溶着して一体化することを考える。溶着により、応力を伝達でき劣化の生じない、二次部材の不要な極めて透明度の高いガラス面の実現が可能となる（図 1.1）。この技術はガラス板同士を同一面内で接合するだけではなく、角度をつけて接合することにも応用でき、シームレスなガラスの多面体やドーム（図 1.2）といったガラス構造の展開の可能性も秘めている。



図1.1: 接合部の溶着によるシームレスなガラス面の実現

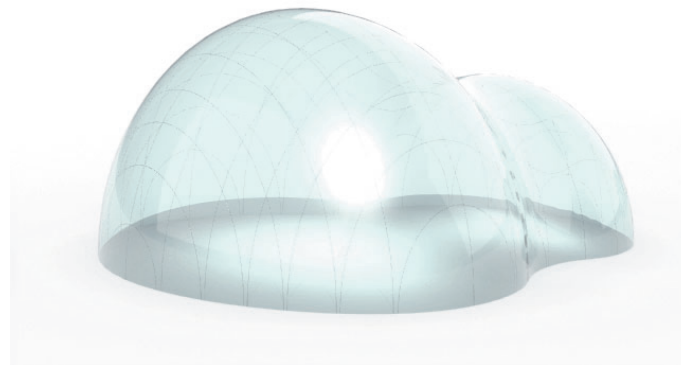


図1.2: ガラスドームイメージ

1.2 想定するガラス溶着法と課題

1.1 で述べたようにガラスの寸法には製造・運搬の都合上制限があるため、目地のない大きなガラス面を実現するには、運搬されたガラス板を建設現場で溶着できる装置が必要となる。そのような装置の一つとして、接合するガラス部材全体が入る大きい溶着用の炉を用いることが考えられるが、炉が大きくなるほど温度の制御や現場での設置が困難になり、コスト面でも適切ではない。そこで本研究では、図 1.3に示すような、建設現場にて接合するガラス部材の目地を、走査しながら逐次的に溶着していく小型の走行型炉の開発を目標とす

る。走行型炉は加熱を担うユニットと冷却を担うユニットで構成され、炉が通過した部分のガラスは溶着されているというものである。このような装置では炉内はガラスが溶融するほどの高温になるのに対し、炉外はガラスが外気と触れているためほぼ常温である。この温度差がガラス内部に伸縮量の違いをもたらし、割れや溶着後の残留応力の原因となる。溶着法においては、この温度差に伴う残留応力が根源的な課題である。

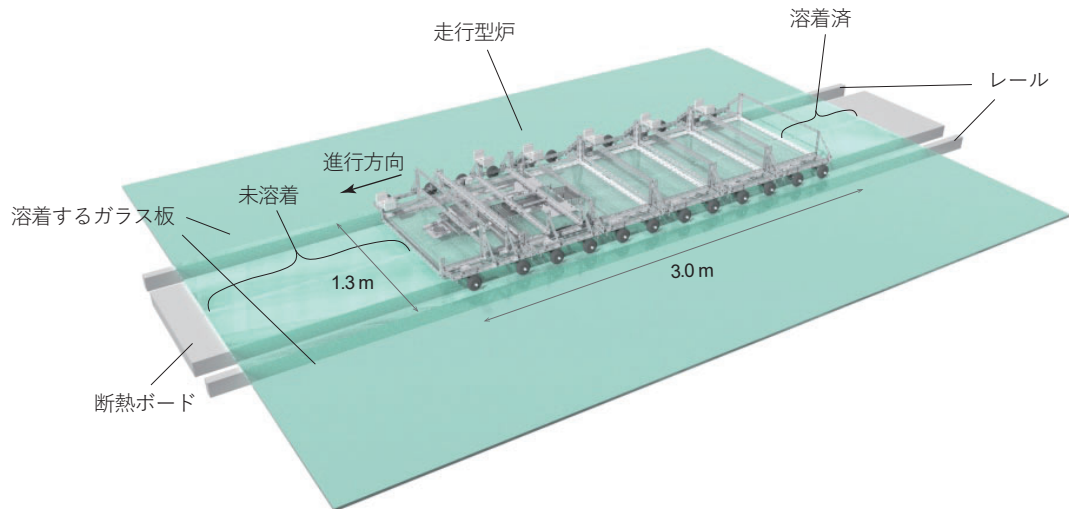
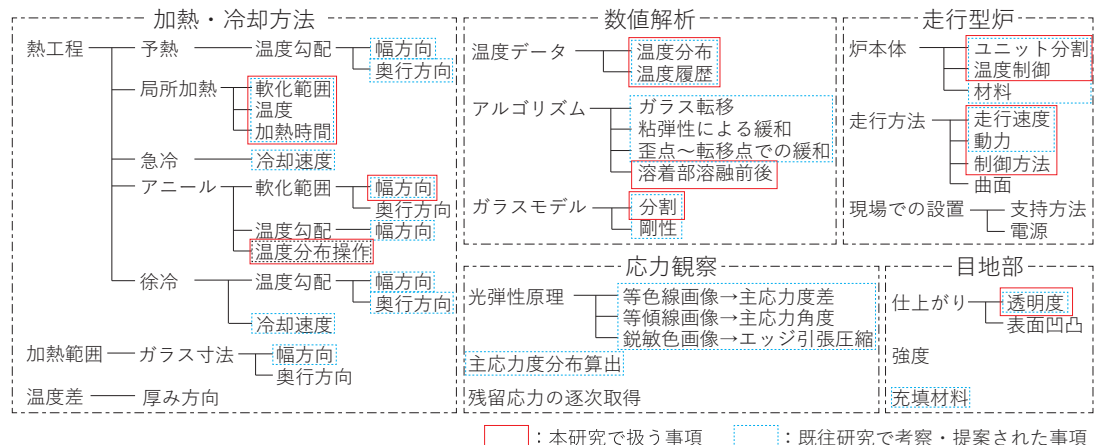


図1.3: 逐次溶着を行う走行型炉のイメージ

走行型炉の開発にあたり、現時点で想定される検討項目をまとめると表 1.2 のようになる。本研究では残留応力を低減できるような加熱・冷却方法を検討し、それを実装した走行型炉の設計、製作を行う（表中赤い実線で囲まれた項目に該当）。

表1.2: 走行型炉開発検討事項一覧



1.3 ガラス溶着に関連する技術

ガラス工芸やガラス製造の分野では、残留応力の小さいガラスを制作、製造するために慎重な温度管理が行われている。特に冷却過程において、ガラス内部に温度差が生じないように冷却速度を調整している。ガラス溶着に関する既往研究では、ガラス工芸で使われている熱工程をもとに、図 1.4に示すような加熱手順が提案されている。相転移を起こす 550°C まで加熱する予熱、溶着部周辺が溶融する 800°C 付近まで加熱する局所加熱、そこから 550°C まで冷却する急冷、550°C で温度保持するアニール、常温までゆっくりと冷却する徐冷の 5 段階を踏む。本研究で溶着による一体化に成功したガラス板の例を図 1.5に示す。

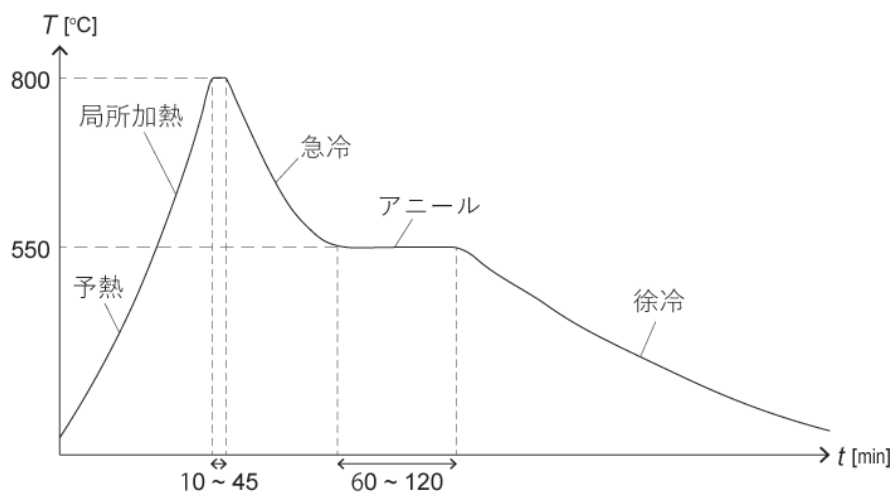


図1.4: ガラス溶着の熱工程



図1.5: 溶着により一体化したガラス板

1.4 用語定義

本論文で用いる用語を以下のように定義する。

- 方向の呼称と座標軸

溶着するガラス面において溶着線と並行な方向を奥行方向、溶着線と垂直な方向を幅方向と定義することにする（図 1.6）。また、ガラス面上の位置を示すため幅方向を x 軸、奥行き方向を y 軸とする。 y 軸は溶着線と重なるようにとる。本論文では面内の温度変化を注視し、厚み方向については扱わない。

- 温度分布

ガラス面内の二次元の温度の分布を表す。溶着の熱工程に合わせて温度分布は刻々と変化していく。本論文では特にアニール時の温度分布に着目する。

- 温度勾配

温度勾配を単純化して捉えるため、ガラス面上の二点の距離に対する一次元的な温度差を温度勾配として表す。温度勾配が大きいほどガラスの一時的な面内応力は大きくなる。

- 軟化幅

ガラスは結晶体とは異なり、ガラス転移点と呼ばれる温度（2.3 に後述）を境に物性が急激に変化する。そこで、ガラス転移点以上の温度ではガラスは軟化していると見なし、その領域の幅を軟化幅と呼ぶことにする。

- アニール域

ガラス板の温度分布において、ガラス転移点付近の温度の領域はアニールが行われるとして、アニール域と定義する。本論文ではアニール域の形状に着目する。

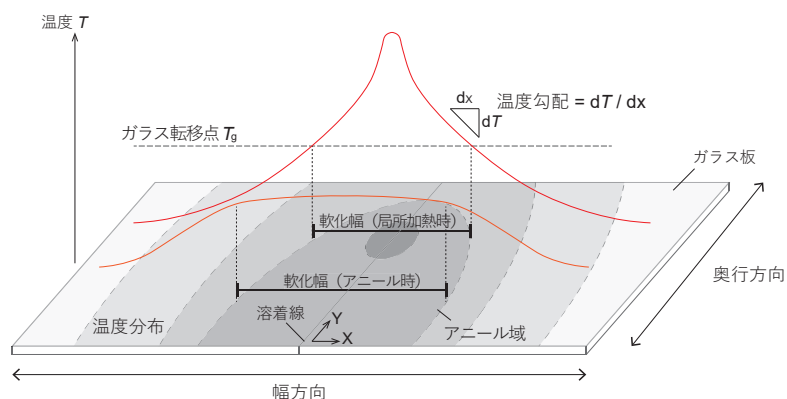


図1.6: 用語定義

1.5 既往研究での成果と本研究の目的

フロート板ガラスの溶着法に関する既往研究とその主要な成果を以下に記す。

「普通板ガラスの縁部の局所加熱による溶着性状」(タンブンチュウ,2012)^[8]

ガラス溶着の手法に関する基礎研究で、150 mm×150 mm（公称厚 8 ミリ）のガラス板を用いて、溶着に必要な加熱・冷却方法、実験用溶着炉が模索された。自作した炉を用いた溶着実験によって、局所加熱と全体加熱の併用によるガラス板の溶着が可能であると示された。

「局所加熱によるガラス板の溶着法における温度勾配条件」(滝口雅之,2013)^[9]

150 mm×150 mm（公称厚 8 ミリ）のガラス板を用いて、全体アニールと局所アニールのひずみ緩和を比較する実験が行われた。鋭敏色法を用いた試験体のひずみ検出と割れ発生の分析がなされ、局所アニールでの溶着可能性が示唆された。

「局所加熱によるガラス板溶着法における温度勾配条件と熱応力解析手法の提案」(西村祐哉,2015)^[10]

150 mm×300 mm（公称厚 8 ミリ）のガラス板を用いた実験で、溶着に適した幅方向の温度勾配条件が模索された。局所加熱時の軟化範囲を狭めても溶着が可能であることが示された。また、ガラスを二次元のメッシュに置換したモデルを用いた残留応力の数値解析手法が提案された。

「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」(滝口雅之,2016)^[11]

150 mm×300 mm（公称厚 8 ミリ）のガラス板を用いた実験と熱粘弾性解析により、幅方向の温度勾配と残留応力の分布の関係についての分析が行われた。アニール時の軟化範囲が狭いと溶着部が残留応力のピークとなり、大きいと軟化範囲境界付近でピークとなる傾向が見られた。また、アニール時の軟化範囲が狭いほうが温度勾配が緩やかとなり、残留応力が小さくなることが示唆された。

「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」(西村祐哉,2017)^[1]

幅方向の温度勾配と残留応力値の関係を明らかにするために、150 mm×300 mm、450 mm、600 mm（公称厚 8 ミリ）のガラス板において温度勾配をパラメータとした溶着実験が行われた。結果、残留応力の最大主応力度・最小主応力度ともに温度勾配に比例することがわかった。また、数値解析アルゴリズムに時間に依存するガラスの応力緩和現象を反映し、熱粘弾性解析の精度を上げた。

「局所加熱によるフロート板ガラスの溶着法における電気炉を用いた温度条件の制御法」(藤本月穂,2017)^[12]

150 mm×450 mm（公称厚 8 ミリ）のガラス板を用いた実験により、溶着部の透明性を高める加熱・冷却方法が検討された。局所加熱に電熱線ヒーターのみを使用し、850℃以下の温度で 10 分程度の加熱を行うと失透を避けられることがわかった。

「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」(張耕嘉,2018)^[3]

走行型炉で溶着を行う際に生じる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ため、走行型炉の温度変化を再現した小型炉を用いて、400 mm×450 mm（公称厚 8 ミリ）と 600 mm×450 mm（公称厚

8 ミリ) のガラス板で溶着実験が行われた。温度勾配は幅方向、奥行き方向のいずれも小さいほうが残留応力は小さくなること、試験体奥行き方向の寸法が大きくなるほど残留応力は大きくなることが示された。また、現場で大判のガラス板を溶着できるような走行型炉の構成や駆動方法が提案された。

「フロート板ガラスの溶着法における温度分布制御による残留応力の低減法」(永渕飛鳥,2018)^[13]
幅方向にのみ温度勾配があるという条件のもと、試験体奥行き寸法の増大に伴う残留応力の増加を低減するようなアニール時の温度分布制御の検討が行われた。400 mm×450 mm のガラス板モデルの熱粘弾性解析と 300 mm×400 mm (公称厚 8 ミリ) のガラス板の溶着実験により、軟化範囲を奥行き方向に分割するような温度分布のアニールを行うことが有効であると示唆された。

「ガラス板溶着工程における熱粘弾性挙動の高精度化」(森永魁,2020)^[7]
温度条件からガラス板に発生する残留応力を算出する数値解析アルゴリズムにおいて、応力緩和の開始温度を歪点とすること、ヤング率、緩和時間 τ の温度依存性を高精度に反映することにより数値解析の再現精度を上げた。

表1.3: 既往研究での溶着成功の最大寸法と局所加熱方法

論文タイトル	溶着成功の最大寸法 [mm]	局所加熱方法
「普通板ガラスの縁部の局所加熱による溶着性状」	-	ガスバーナー
「局所加熱によるガラス板の溶着法における温度勾配条件」	150×150	ガスバーナー
「局所加熱によるガラス板溶着法における温度勾配条件と熱応力解析手法の提案」	150×300	ガスバーナー
「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」	150×300	ガスバーナー
「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」	150×600	ガスバーナー
「局所加熱によるフロート板ガラスの溶着法における電気炉を用いた温度条件の制御法」	150×450	電熱線ヒーター
「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」	-	電熱線ヒーター
「フロート板ガラスの溶着法における温度分布制御による残留応力の低減法」	-	電熱線ヒーター

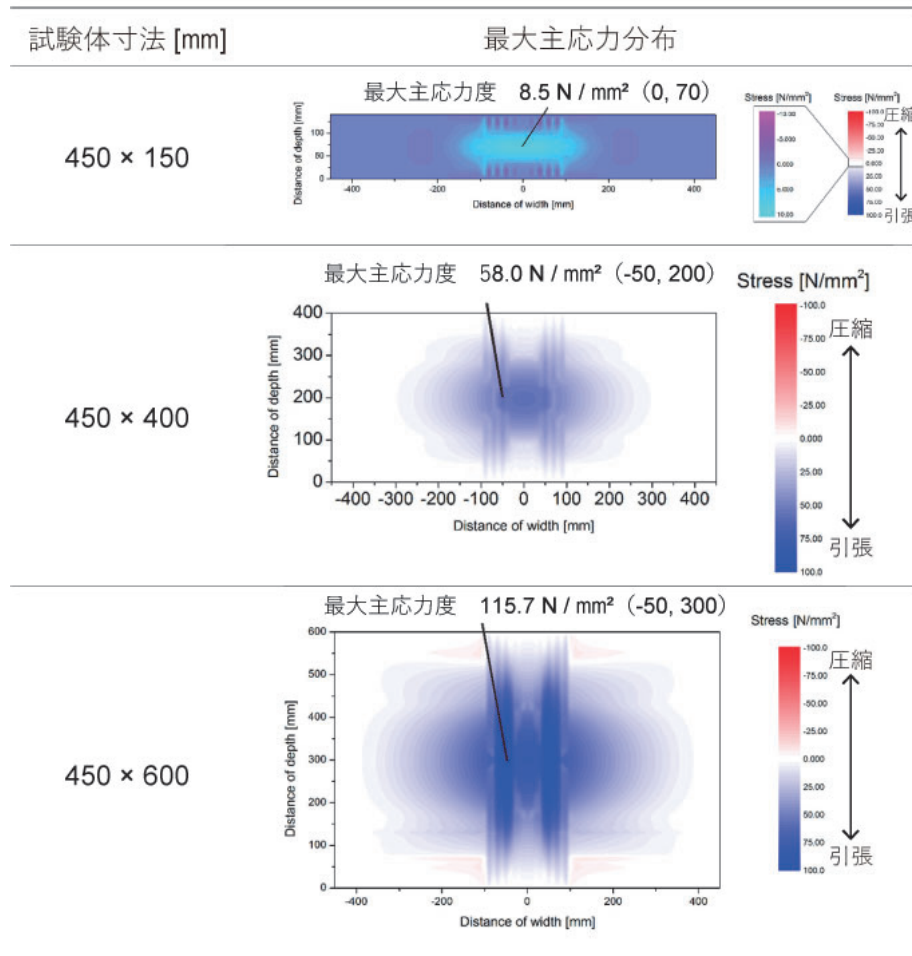
これらの既往研究により、ガラス板の幅方向の温度勾配、軟化範囲と残留応力の関係については十分な考察がなされているが、走行型炉による逐次溶着を想定した実験では溶着に成功しておらず、逐次溶着における加熱・冷却方法の考察は十分にはなされていない。逐次溶着における熱工程と残留応力の関係を検討するうえでは、幅方向・奥行き方向の 2 次元の温度分布がガラスの面内応力に影響してくる。既往研究で溶着に成功している奥行き寸法 150 mm では、2 次元的な温度分布を試すには小さすぎるため、より奥行き寸法の大きいガラス板で検討を行う必要がある。

一方、ガラス板の奥行き寸法の増大に伴って残留応力が増加してしまうことが報告されており^[3] (表 1.4)、奥行き寸法が 150 mm を超える試験体を溶着するためには残留応力の上昇を抑えるような工夫が求められる。筆者^[13]によって、残留応力の増加を低減するようなアニール時の温度分布制御方法が数値解析を用いて示され

たが、2枚のガラス板の突合せ部を一度に溶着する想定であり、逐次溶着を想定した検討は行われていない。

そこで本研究では、試験体の奥行寸法を 400 mm として、逐次溶着を想定してアニール時の温度分布を変化させた数値解析と据え置き型の小型炉を用いた実験を行い、残留応力の低減に有効な温度分布操作を明らかにすることを第一の目的とする。続いて、有効と思われる温度分布操作を再現できるような加熱・冷却を行う走行型炉の設計・製作を第二の目的とする。

表1.4: 奥行寸法増大に伴う残留応力の増加^[3]



1.6 本論文の研究手法と論文構成

本論文の研究手法を下記に示す。

残留応力低減に有効な温度分布操作を検討するにあたり、初めに、既往研究^[7]で提案されている数値解析アルゴリズムを用いて、アニール域の形状が異なる場合での残留応力を算出し、有効な温度分布操作の見当をつける。

続いて、逐次溶着の温度分布推移に近い炉内温度環境を再現できるような据え置き型の小型炉を製作する。小型炉を用いて解析同様の条件で温度分布操作を探る溶着実験を行う方法を提案するとともに、温度分布操作の妥当性を検証する。

さらに、逐次溶着を行う走行型炉の設計・製作を行う。製作した走行型炉を用いた温度分布の再現実験を通して、走行型炉への温度分布操作の実装を試みる。

最後に、溶着線長さと残留応力の関係を明らかにするため溶着線の長さをパラメータとした数値解析を行う。

上記の研究手順に則り本論文を下記の構成とする。

- 1 章 ガラス溶着技術の背景、既往研究の成果と本論文の目的
- 2 章 ガラス溶着に関連するガラスの性質、残留応力の発生メカニズム、低減因子、観察技術
- 3 章 数値解析による温度分布操作の検討
- 4 章 小型炉を用いた実験による温度分布操作の検討
- 5 章 走行型炉の設計、温度分布操作の再現実験
- 6 章 数値解析による溶着線長さと残留応力の関係の検討
- 7 章 本論文での成果と今後の課題

第 2 章

ガラスの性質と残留応力

2.1 ガラスの組成

ガラスには組成の違いによりホウケイ酸ガラス、石英ガラス、鉛ガラスなど多くの種類があるが、本研究で扱う建築用板ガラスの大部分はソーダ石灰ガラス ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$) である。現代のソーダ石灰ガラスは、容器ガラスと板ガラスに代表される硬質ソーダ石灰ガラスと、より熱膨張率の大きい蛍光灯用ガラスなどの軟質ソーダ石灰ガラスに大別されるが、硬質ソーダ石灰ガラスの組成では $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 系の各成分の一部が他の酸化物で置換されている。建築用板ガラスに用いられる硬質ソーダ石灰ガラスの組成を表 2.1 に示す。

表2.1: 建築用板ガラスの主成分 (ソーダ石灰ガラス)^[4]

SiO_2	CaO	MgO	Na_2O	Al_2O_3
69-74%	5-14%	0-6%	10-16%	0-3%

2.2 ガラスの強度

低温におけるガラスの破壊様式は、塑性的変形をほとんど示さずに臨界応力のもとで急激に破壊する脆性破壊である。脆性固体の破壊は引張応力によって原子間の結合が切断されることによって起こる。原子間作用力から見積もられるガラスの理論強度は約 $29,420 \text{ N/mm}^2$ であるが、実用的な強度としては $49\sim 98 \text{ N/mm}^2$ 程度である。この差はガラス表面上に応力集中源となる極めて微小な傷が存在していることに起因する。この傷はグリフィスフローと呼ばれ、製造過程や使用過程で外的に生じるものである。そのほか、ガラスの品種、寸法、保存取り扱い状況、荷重速度・時間などの要因によってもガラスの強度は変わる。フロート板ガラスの許容応力と平均破壊応力の一例を表 2.2 に示す。

表2.2: フロート板ガラスの許容応力と平均破壊応力 [N/mm^2]^[4]

呼び厚さ [ミリ]	短期許容応力		長期許容応力		平均破壊応力	
	面内	エッジ	面内	エッジ	面内	エッジ
2,3,4,5,6,8	24.5		9.8		54.9	
10,12	22.1	17.7	8.8	6.9	51.0	35.3
15,19	19.6		7.8		48.1	

2.3 ガラス転移

通常の物質は冷却時に融点において結晶化が生じ固化するが、ガラスは結晶化しないまま温度の下降とともに流動性を失う。その過程でガラスの性質が急激に変化することが知られており、ガラス転移と呼ばれる。例として図 2.1 に比容の温度依存性を示す。ガラスは融点 T_m においては性質の変化を示さず、過冷却液体として冷却され、ガラス転移点 T_g において粘度が急激に上昇し、液相からガラス相へと相転移する。ガラスの転移点は冷却速度によってわずかに変化するため、ガラス転移点のことをガラス転移範囲と呼ぶこともある。

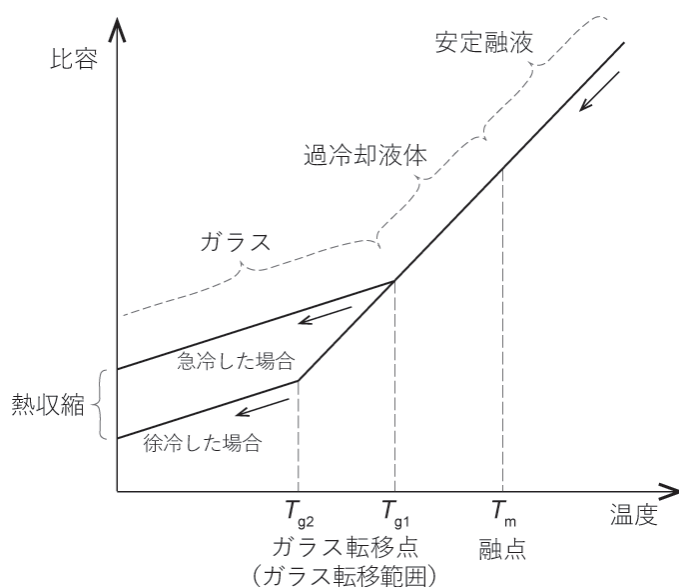


図2.1: 冷却速度とガラス転移

2.4 粘弾性

ガラスは原子が規則的に配列した結晶と異なり分子が動きうるため粘性を持つ。また、分子の動かない短時間では結晶と同程度の弾性を示す。そのためガラスは粘弾性体として扱われる。粘弾性体に一定の応力を加えると歪は時間とともに増加する。一方、一定の歪を与えた場合、応力は時間とともに減少する緩和現象を示す。

ガラスの粘弾性挙動を記述する方法として、弾性を表すスプリングと粘性を表すダッシュポットを直列に結合させたマクスウェルモデルが挙げられる (図 2.2)。このモデルに応力度 σ が作用し、スプリングとダッシュポットにそれぞれ歪 ϵ_s 、 ϵ_d が生じた場合、次式が成立する。

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\epsilon_s}{dt} + \frac{\epsilon_d}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.1)$$

ここに、 t は経過時間 [s]、 E は弾性係数 [Pa]、 η は粘度 [Pa·s] を示す。歪は一定なので、

$$\sigma = -\frac{\eta}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.2)$$

$t = 0$ での応力度を σ_0 として微分方程式を解いて、

$$\sigma = e^{-t \frac{E}{\eta}} \cdot \sigma_0 = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sigma_0 \quad (2.3)$$

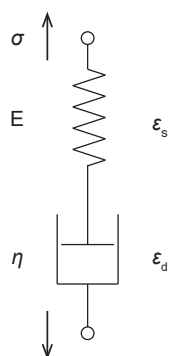


図2.2: マクスウェルモデル

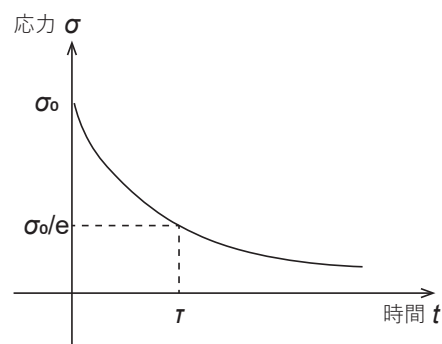


図2.3: 応力緩和現象

上式は応力緩和を表している。 τ を緩和時間と呼び、 $t = \tau$ のとき応力は初めの $1/e$ となる（図 2.3）。

式（2.3）が示すように、応力緩和には粘度が影響している。ガラスの粘度は、高温の液体状態から常温の固体状態に至るまで連続的に変化する。ガラスの製造過程においては粘度の管理が重要であり、いくつかの特定点が定義されている（表 2.3）。溶融したガラスを成形後に歪が残らないよう冷却するためには、粘度が程よい大きさの転移点付近で一定時間温度保持したのち、歪点までゆっくりと冷やす必要がある。歪点以下の温度に達して以降は、それ以上粘性流動による歪は生じないため比較的急速に冷却することは可能である。しかしその過程でのガラスの温度差による一時的な歪による割れには注意しなければならない。

表2.3: フロート板ガラスの特性温度^{[5][6]}

	温度 [°C]	粘度 [(log)Pa·s]	定義
軟化点	730	7.6	ガラスが加熱により自重で変形を起こし始める温度
転移点	550	13.0	昇温中に熱膨張係数が急に大きくなる温度
徐冷点	545	13.4	数分間保持すると歪が消失する温度
歪点	505	14.6	歪の消失が辛うじて可能な温度

2.5 残留応力発生メカニズム

ガラス製品の溶融、成形後や、一度室温まで冷却したガラスを再度加熱した後では、ガラスに歪が生じないようゆっくりと冷却が行われる。ガラス全体が常温になった時点で生じている歪を残留歪（永久歪）といい、残留歪による応力を残留応力という。ガラス表面に引張の残留応力が存在するとガラスの破壊強度は低下するため、残留応力は小さいことが望ましい。ここでは例として、ガラス板を冷却する際の板厚方向の温度分布と応力の発生状態について述べる。図 2.4、図 2.5、図 2.6はガラス板を高温から一定速度で冷却した際のガラス内部の温度分布と応力の関係を示したものである^[14]。

ガラスを転移点より高い温度から冷却する場合（図 2.4）、転移点以上では応力緩和が瞬時に起こり、温度差があっても応力は存在しない。さらに、転移点以下で冷却が進んでも厚み方向の温度分布が保たれている限り応力は生じない。しかし、ガラス全体が常温になり温度差がなくなった時点で、冷却途中の温度差に比例した残留応力が生じる。

一方、図 2.5のようにガラスを転移点より低い温度から冷却する場合、ガラスの内部に温度差が生じると伸縮量の違いにより応力が発生するが、温度差がなくなると応力も消失する。この応力に伴う歪は一時歪と呼ばれる。

また、ガラスを転移点付近から冷却する場合（図 2.6）、相対的に温度の低いガラス表面から先行して相転移が起こり、ガラス内部に一時歪が生じる。冷却が終了しガラスの温度差がなくなると一時歪とは逆方向の歪が発生する。一時歪は結果として残留歪を打ち消すような働きをしている。

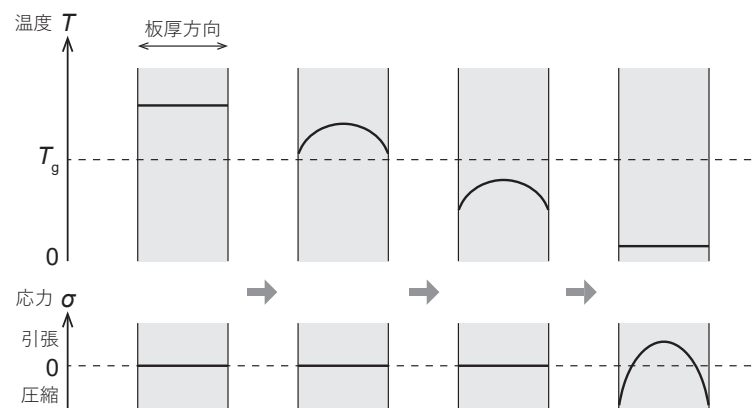


図2.4: ガラス転移点以上から冷却する場合

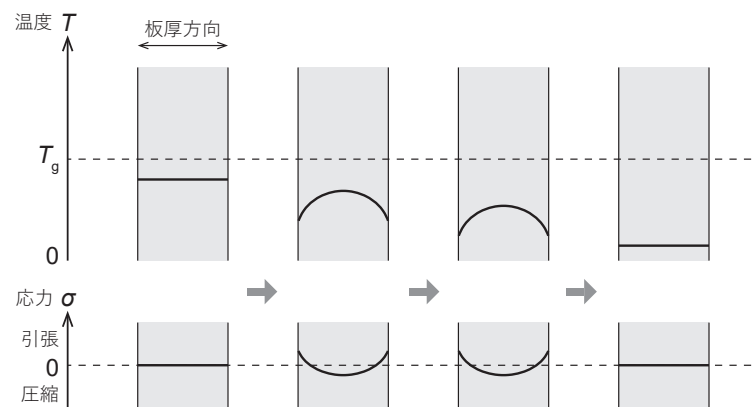


図2.5: ガラス転移点以下から冷却する場合

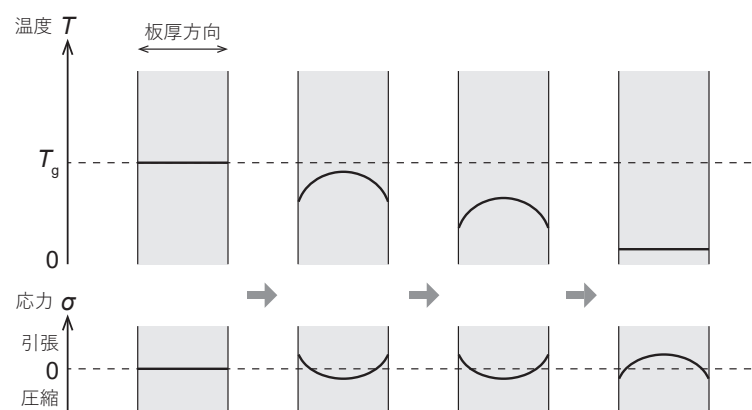


図2.6: ガラス転移点付近から冷却する場合

2.6 残留応力低減因子

2.6.1 軟化幅

滝口の既往研究^[11]では、アニール時の軟化幅が局所加熱時の軟化幅より小さいと溶着部の応力緩和が十分に行われないために割れが生じやすいことが報告されている。また、既往研究^[3]の溶着実験で、電熱線ヒーターを用いて局所加熱を行っている事例では、ヒーターの性質上溶着部を 800°C 程度まで加熱すると溶着部から離れた領域の温度も同時に上昇し、局所加熱時の軟化幅がアニール時の軟化幅を超えてしまいやすいことが分かっている。そこで本研究では局所加熱用に、溶着部付近の狭い領域のみ 800°C 程度まで加熱できるハロゲンポイントヒーターを使用した。これにより、局所加熱時の軟化幅をアニール時の軟化幅より小さく抑えることが可能になった。本研究の据え置き型の炉を用いた実験では予熱終了からアニール段階までの、転移点付近での温度保持は炉内の同じ場所に設置した電熱線ヒーターを使用しているため、その間ハロゲンポイントヒーターの照射部を除いて炉内温度環境は大きく変わらず、局所加熱時とアニール時の軟化幅は同程度であった。参考に本研究の溶着実験での、局所加熱終了時、アニール時の幅方向の温度分布の例を図 2.7 に示す。

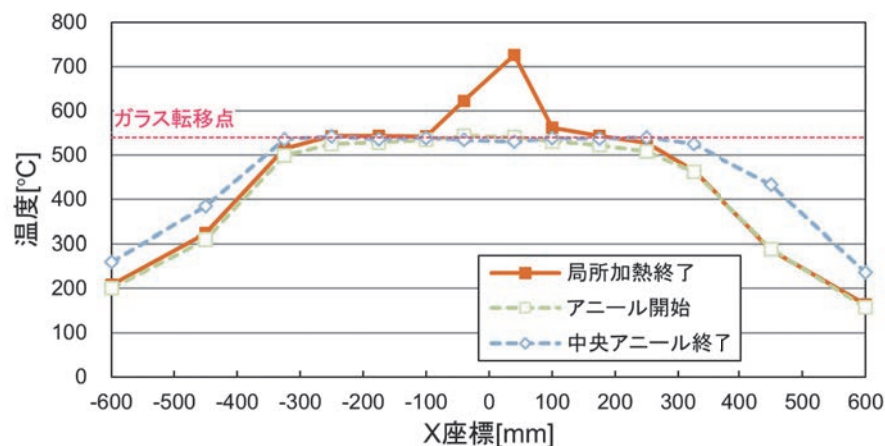


図2.7: 溶着実験での幅方向温度分布の例

2.6.2 アニール時温度分布操作

冷却後にガラス板に発生する残留応力はアニール終了時の温度分布の影響が大きい。既往研究では、この性質に着目し、アニール工程において溶着線中央部付近から先に冷却を開始しアニール域を奥行方向に分割するように段階的にアニールを終了していく方法により、残留応力を低減できる可能性があると指摘されている^[13]。しかし、この方法は奥行寸法が 400 mm のガラス板を、溶着部を一様に加熱し溶着する場合におけるものであり、走行型炉による逐次溶着にそのまま適用することはできない。これは先に冷却を行った溶着線中央の低温域が、炉の移動に伴い再度アニール域に含まれてしまうためである（図 2.8 (a)）。そこで本研究では、アニール時に先に冷却を開始した低温域が、走行型炉が移動しても再加熱されることなく徐冷工程に移行する温度分布操作方法として、アニール域が馬蹄形状の馬蹄形方式（図 2.8 (b)）と、アニール域を奥行方向に分割する低温域が、徐冷に移行するまでその場に留まり続ける分割停留方式（図 2.8 (c)）の 2 つを考案した。馬蹄形方式は、アニール域の形状を馬蹄形に温度保持できる加熱・冷却装置を備えた走行型炉がゆっくりと進んで逐次溶着を行うことで再現できる。分割停留方式は、走行型炉のアニールを行う部分に、炉の上を逆の速度で移動可能な、局所的に冷却を行う装置を設置することで再現可能である。走行型炉への分割停留方式の実装の詳細は 5 章で述べる。

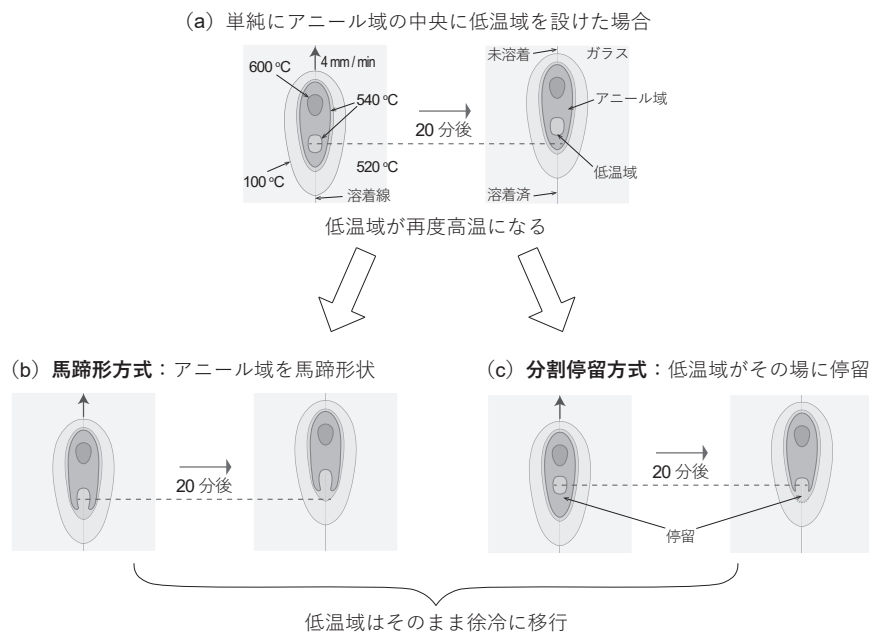


図2.8: 温度分布操作

2.6.3 温度勾配

西村^[10]により、幅方向のみに温度勾配のある試験体については、残留応力の最大主応力度、最小主応力度はともにアニール終了時の最大温度勾配に比例することが明らかにされている。また、張^[3]により、幅方向と奥行方向両方に温度勾配が存在する場合、奥行方向の最大温度勾配が $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 程度であれば、最大主応力度には幅方向の最大温度勾配のみ影響することが報告されている。本論文では 2.6.2 で述べたようにアニール時の温度分布を操作するが、その際残留応力への影響は温度勾配よりもアニール域の形状のほうが支配的であるとして、本論文で温度勾配と残留応力の関係の検討は行わない。ただし、実験で使用する小型炉や走行型炉の設計は、幅方向、奥行方向ともに温度勾配が必要以上に大きくならないよう注意した。

2.7 残留応力の観察

2.7.1 光弾性

光が方解石や水晶などの透明結晶をはじめとする光学的異方体に入射した際、振動方向が互いに直角な二つの平面偏光に分かれる現象のことを複屈折と呼ぶ。分かれた二つの光は正常光、異常光と呼ばれ、それぞれの屈折率を $n_1, n_2 (n_1 > n_2)$ とすると、厚さ t の物質を通過するとき二つの光の間に生じる光路差は

$$R = t(n_1 - n_2) \quad (2.4)$$

で表され、レタデーション (retardation) と呼ばれる。

ガラスは光学的に等方体とされるが、応力が働くと Si-O-Si の結合間の距離や角度が変化し、結合の分布が等方的でなくなるため複屈折が生じる。屈折率は応力に比例して変化するが、光弾性定数 C を用いて

$$n = n_0 + C \cdot \sigma \quad (2.5)$$

と表されるので、このときレタデーションは

$$R = Ct(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.6)$$

となる。ここで、 σ_1 、 σ_2 はそれぞれガラス中の最大主応力度、最小主応力度（引張を正）に対応。

一般に、ガラスのような光学的に等方な弾性体が、応力が加わり等方性が崩れることで複屈折を起こす性質は光弾性と呼ばれる。溶着後のガラス板は、残留応力が存在し光弾性を示すが、残留応力の計測を行うために光弾性を利用した方法が滝口^[11]、西村^[1]によって提案されている。本研究では西村と同様、光弾性測定器を用いて残留応力測定を行った。

2.7.2 歪検査器

ガラス工業では、品質管理のためガラス製品内の歪の有無、応力の強弱を調べるのに「歪検査器」と呼ばれる光弾性測定器が用いられている^[15]。歪検査器は偏光板をはじめとする光学素子から構成され、光弾性効果を受けた試料の透過光を使って観察を行う。光学素子の配置、被検試料の角度などで検査器の機能は規定される。本研究ではガラス試験体の残留応力の分布と大きさを測定するため、試料面内の主応力角度を得られる直交ニコル法、主応力度差を得られる円偏光法、試料エッジ部に沿った方向の主応力の正負判別を可能にする鋭敏色法の 3 つの方法を適用した。

2.7.3 等傾線画像

面光源と観察用カメラの間に、2枚の偏光板を互いの透過軸が直交するように設置すると、カメラまで光は届かずに視野は黒くなる。偏光板のうち、光源側のものは偏光子、観測側のものは検光子と呼ばれる。内部応力のあるガラス試験体を偏光子と検光子の間に挿入すると、複屈折により光が検光子を透過し、応力状態を観察できるようになる（図 2.9）。この観察方法を直交ニコル法といい、直交ニコル法で撮影した画像を等傾線画像と呼ぶ。

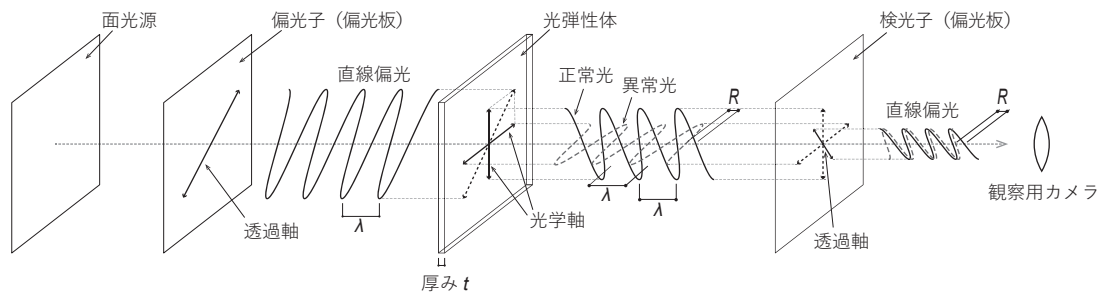


図2.9: 直交ニコル法

光源には様々な波長の光が含まれている。ある波長 I_0 は、光源での光の振幅を A_0 として次式で表される。

$$I_0 \propto A_0^2 \quad (2.7)$$

偏光子の透過軸と試験体の主応力方向のなす角度が θ ($0^\circ \leq \theta < 90^\circ$)、複屈折による正常光と異常光の位相差が δ であるとき、この光の強度は、

$$I \propto A_0^2 \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} = A_0^2 \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{R}{\lambda} \pi \quad (2.8)$$

で与えられる^[1]。よって、 $\theta = 45^\circ$ のときに透過する光の強度は最大となり、また、 $\theta = 0^\circ$ のとき、透過する光はなく黒く見える。試験体の面内では主応力角度は連続的に変化するため、黒く見える部分は線状に存在する（図 2.10）。この線は等傾線と呼ばれ、等傾線上では主応力角度が θ で一定である。この性質により、試験体を偏光板に対して少しずつ回転して観察する手順を繰り返すことで試験体の面内の主応力角度を得ることができる。

等傾線画像では、式（2.8）において $R = 0$ 、すなわち内部応力が存在しない場合にも黒くなる。周囲の様子から判別できることが多いが、等色線画像と比較することで内部応力の有無を判断できる。

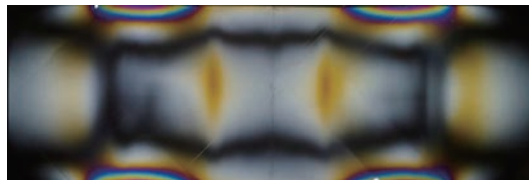


図2.10: 等傾線画像の例

2.7.4 等色線画像

図 2.9のように、直交ニコル法における光学素子の配置に加え、偏光子と試験体の間、試験体と検光子の間に 4 分の 1 波長板を挿入した状態での観察方法は円偏光法と呼ばれる。4 分の 1 波長板は、入射する偏光を 4 分の 1 波長分の光路差を持つ 2 つの直交する偏光に分解する役割を果たし、その光学軸が互いに直交、かつ偏光子、検光子の透過軸に対して 45 度の角度となるように配置される。

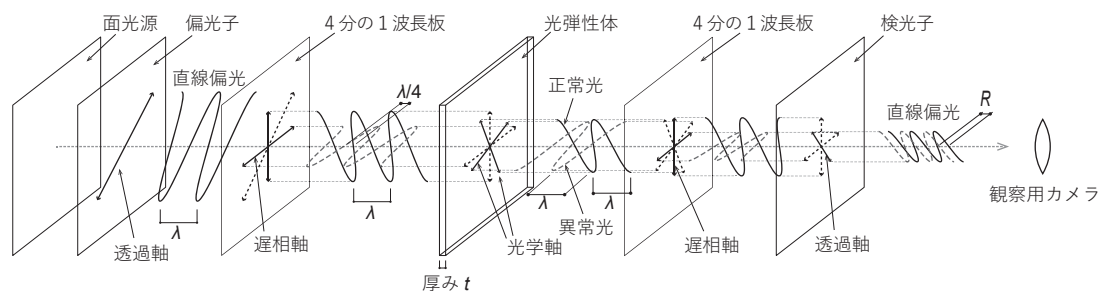


図2.11: 円偏光法

円偏光法において透過できる光の割合は次式で表される^[1]。

$$\frac{I}{I_0} \propto \sin^2\left(\frac{R}{\lambda}\pi\right) = \sin^2\left(\frac{Ct(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda}\pi\right) \quad (2.9)$$

これは観測される光の強度が試験体の主応力角度には寄らないことを意味している。すなわち、試験体を歪検査器に対して回転させても干渉縞のパターンは変わらない。したがって、円偏光法でレタデーションを観測できれば、主応力角度が不明でも主応力度差を求められる。また、式 (2.9) が示すように、検光子を透過する光の割合は波長に依存するため、円偏光法で撮影した等色線画像は図 2.12のように着色が生じる。レタデーションと観察される色彩の対応を示す偏光色図（図 2.13）と等色線画像をもとに、試験体のレタデーションを取得する。

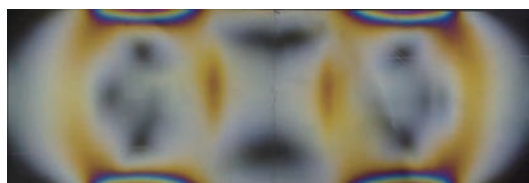


図2.12: 等色線画像の例

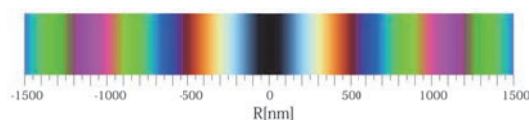


図2.13: 偏光色図（出典：[1], P20）

2.7.5 鋭敏色画像

直交ニコル法での光学素子の配置に加え、偏光子と検光子の間に 550nm 付近の波長に対する 1 波長板（鋭敏色板）を挿入し、透過光を観測する方法は鋭敏色法と呼ばれる（図 2.14）。

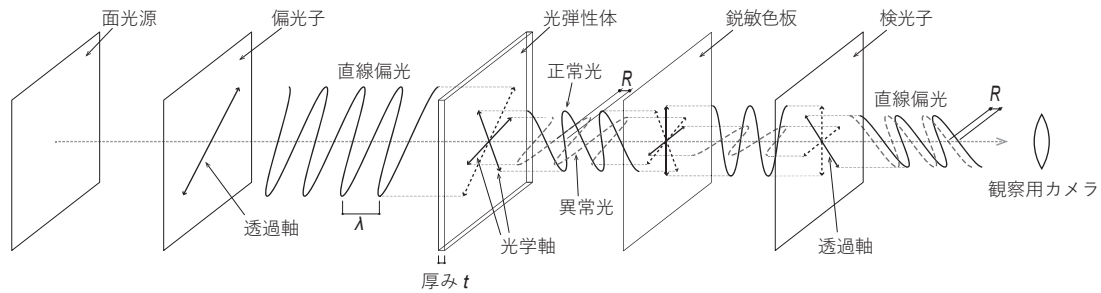


図2.14: 鋭敏色法

鋭敏色法では、3 原色において波長が 550 nm に近い緑は透過できず、赤と青のみ透過するため赤紫色の干渉色が観察される。直交ニコル法では基準となる $R = 0$ 付近の色の変化が分かりにくく小さな主応力度差を検出しづらいのに対し、鋭敏色法は色の変化が明瞭な $R = 550$ nm 付近を基準とするため、色の変化から R の正負を判別しやすい。鋭敏色法で撮影された画像を鋭敏色画像と呼ぶが、鋭敏色画像の試験体エッジ部に沿った方向の主応力の正負は、図 2.15 に示すような干渉色と鋭敏色板の光学軸の関係に従って判別する。鋭敏色画像の例を図 2.16 に示す。

干渉色の変化	赤紫→青→水色→…	赤紫→橙→白→…
進相軸方向	圧縮 → ←	引張 ← →
遅相軸方向	引張 ↑ ↓	圧縮 ↓ ↑

遅相軸 ↑ ↓

進相軸 ← →

鋭敏色板の光学軸

図2.15: エッジ部の主応力状態の判別^[1]

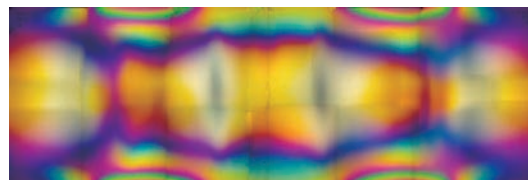


図2.16: 鋭敏色画像の例

第 3 章

数値解析による温度分布操作の予備検討

3.1 解析の目的

残留応力低減に有効なアニール時の温度分布操作の予備検討を本解析の目的とする。奥行 400 mm × 幅 600 mm のガラス板 2 枚の解析モデルに 2.6.2 で述べた温度分布操作を適用し、既往研究^[7]で提案されている熱粘弾性解析アルゴリズムを用いてアニール域の形状の残留応力への影響を観察する。

3.2 解析方法

3.2.1 ガラス板のモデル化

数値解析ではガラス板を 10 mm ピッチの格子材と斜め材からなる二次元の格子状線材モデルに置換する (図 3.1)。ただし、溶着部において母材は初めから一体化しているものとしてモデル化している。

線材の物理的性質、有効幅等の設定は既往研究^[7]で用いられているものと同様とした (表 3.1)。モデルの支持条件としては、図 3.1 に示すように、溶着線上の節点のうち中心をピン支持、その他の点を Y 方向のローラー支持としている。溶着線上にない節点はすべて X、Y 方向のローラー支持とした。

表3.1: 解析でのガラス諸係数^[7]

ヤング係数 (最大値) E [kN/mm ²]	73.012
線膨張係数 α [1/°C]	90×10^{-7}
比重 ρ [kg/m ³]	0
ポアソン比 ν	0.23
ガラス転移点 [°C]	550
歪点 [°C]	508
格子材有効幅 [mm]	4.847
ブレース材有効幅 [mm]	5.749

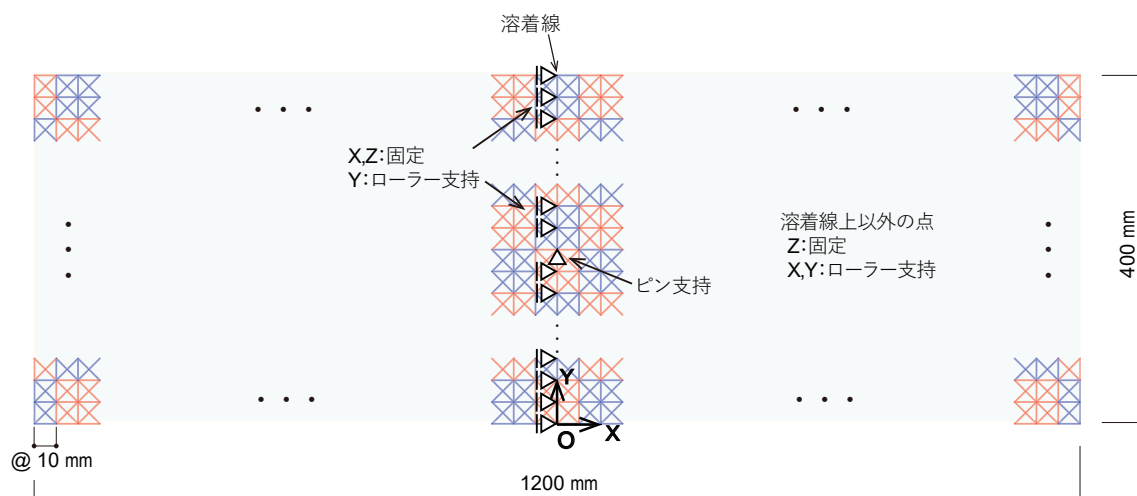


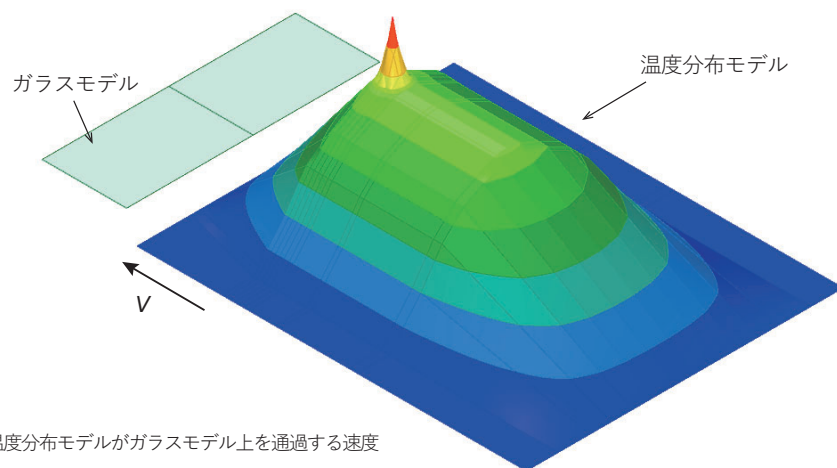
図3.1: 解析モデル-支持条件と領域分割

3.2.2 温度入力

溶着の熱工程でガラス板に生じる温度分布を再現するため、解析モデルを適当な領域に分割し、領域ごとに温度を入力する。同一の領域に属する部材は同じ温度変化をするというモデルになっている。本解析では図 3.1 に示すように格子 4 マス分で一つの領域として分割した。端部のマス目が余る部分は 2 マスを一領域とした。

溶着開始から終了までは 10 時間程度要するが、一連の温度履歴をいくつかのステップに分割し、ステップ開始時（もしくは終了時）の温度分布を解析の入力値として与える。

逐次溶着における温度分布の変化を数値解析に再現するために、3 次元 CAD ソフトウェア Rhinoceros のプラグインである Grasshopper を用いて温度分布モデルを作成した。温度分布モデルは温度を Z の値とする 3 次元のサーフェイスであるが、このモデルをガラスモデル上を一定の速度で通過させ、主要な段階における各領域の温度の取得を行う（図 3.2）。ここで各領域の温度は、領域の中心点での温度とする。温度取得のステップの刻み方としては、応力緩和が生じ温度分布変化を精度よく反映する必要のある局所加熱開始～アニール終了段階においては 10 分刻み、その他の工程においては 50 分刻みとしている。温度分布モデルの通過速度を 4 mm/min とすると、温度分布モデルの移動距離はそれぞれ 40 mm、200 mm となる。温度分布モデルの形状は既往の実験データをもとに走行型炉で再現されうる温度分布を予想し、恣意的に定めた。



温度分布モデルがガラスモデル上を通過する速度
 局所加熱開始～アニール終了：10 分ごとに 40 mm
 その他の工程：50 分ごとに 200mm

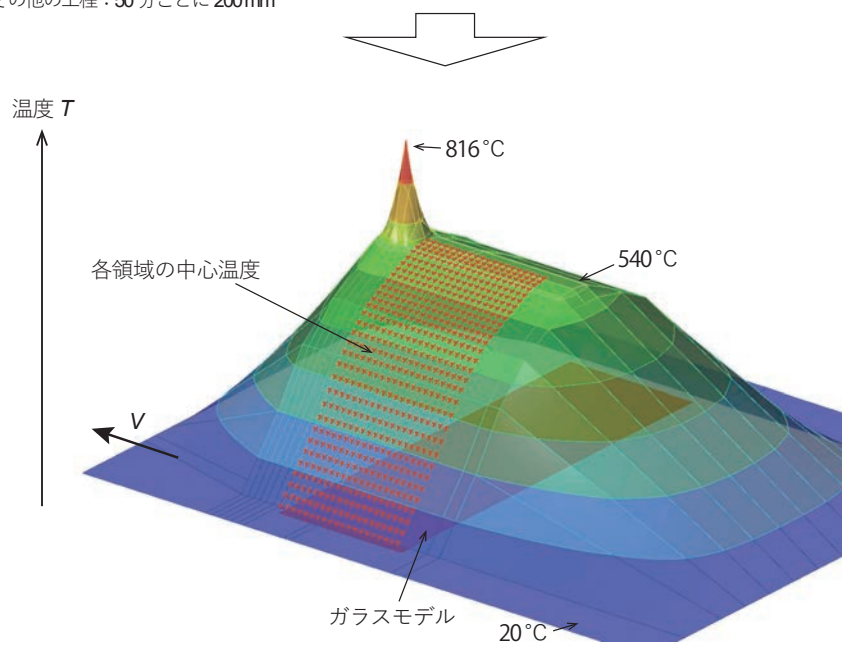


図3.2: 各領域の温度取得方法

3.2.3 数値解析アルゴリズム

本解析に用いる数値解析アルゴリズムは、西村^[1]によって提案され、森永によって熱粘弾性挙動の高精度化が行われたもの（参考文献^[7]中「E. 緩和式」に該当）を使用する。解析は、各部材の軸力および変位をステップごとに増分的に更新していく形で行われる。解析のフローチャートを図 3.3、i ステップ目で行われる計算を下記に示す。

I. 熱応力計算

まず、熱応力による、応力の変化量 $\Delta\sigma$ を計算する。ヤング率 E 、線膨張係数 α の温度依存性を考慮し、ステップ開始時刻を t_{is} 、終了時刻を t_{ie} として、 $\Delta\sigma$ は

$$\Delta\sigma = \int_{t_{is}}^{t_{ie}} E(t)\alpha(t)dt \quad (3.1)$$

で求められるが、計算手法上はステップ前後の温度差を 100 等分し、それぞれの温度でのヤング率及び線膨張係数を算出して疑似的に積分を行っている。用いたヤング率の関数とその係数を式 (3.2)、表 3.2 に示す。ただし T は温度 [°C]、各係数の値はヤング率の関数を実測値に近似させる際に求められた値である^[7]。なお、線膨張係数については、ガラス転移点以上では 3 倍になるとしている。

$$E = \begin{cases} 6820 & (T < 24) \\ 6820 - 2(T - 24) & (24 \leq T < 426) \\ g(\sum_{i=1}^5 f(\frac{(T-24)}{680}, w_i, s_i) \cdot W_i, b) & (426 \leq T < 808) \\ 0.001 & (808 \leq T) \end{cases} \quad [\text{kg/mm}^2] \quad (3.2)$$

$$f(x, w, s) = \frac{1}{1 + e^{w(x-s)}}$$

$$g(x, y) = \frac{1}{1 + e^{x+y}}$$

表3.2: 式 (3.2) の係数の値^[7]

$w_1 = -13.786,$	$w_2 = -14.764,$	$w_3 = -18.503,$	$w_4 = 10.815,$	$w_5 = -10.760$
$s_1 = 1.525,$	$s_2 = 1.281,$	$s_3 = 0.823,$	$s_4 = 0.080,$	$s_5 = 1.481$
$W_1 = 68.946,$	$W_2 = 39.967,$	$W_3 = 5.127,$	$W_4 = -7.161,$	$W_5 = 25.47$
$b = -2.207$				

続いて式 (3.1) で得られた $\Delta\sigma$ に断面積 A を掛けた値と前ステップ終了時に引き継がれた軸力 $N_{remain(i-1)}$ を合わせて暫定の軸力 $N_{therm(i)}$ を求める。

$$N_{therm(i)} = N_{remain(i-1)} + \Delta\sigma \cdot A \quad (3.3)$$

II. 線形解析

I では熱応力による部材ごとの軸力が得られたが、この段階では節点は拘束されているものとしている。そこで節点での力の釣り合いを反映するため線形解析を行う。前ステップから引き継いだ節点座標ベクトルを $\{u_{i-1}\}$ 、節点の変位ベクトルを $\{\Delta u_{i-1}\}$ として現在の節点座標ベクトル $\{u_i\}$ は、

$$\{u_i\} = \{u_{i-1}\} + \{\Delta u_{i-1}\} \quad (3.4)$$

全体剛性マトリクスを $[K_i]$ 、各部材の軸力 $N_{therm(i)}$ を等価節点荷重に変換した荷重ベクトルを $[F_i]$ とすると、

$$\{F_i\} = [K_i]\{\Delta u_i\} \quad (3.5)$$

より変位ベクトル $\{\Delta u_i\}$ が求まる。得られた $\{\Delta u_i\}$ をもとに各部材に変形を反映し、各部材の軸力 $N_{linear(i)}$ を求める。

III. 応力緩和

以上の過程によりモデル全体での熱応力を考慮した軸力状態が得られたが、最後に各部材に着目し、応力緩和を反映した計算を行う。ステップ内では軸力が一定の速度で変化していくとの仮定のもと、瞬間ごとに軸力自身に比例した速度で緩和が行われると考える。 $\Delta N = N_{linear(i)} - N_{remain(i-1)}$ 、 $\Delta t = t_{ie} - t_{is}$ とすると、緩和を反映後の軸力 $N_{remain(i)}$ は次式で与えられる^[7]。

$$N_{remain(i)} = N_{remain(i-1)} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} + \Delta N \cdot \frac{\tau}{\Delta t} \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}) \quad (3.6)$$

上式は緩和時間 τ が一定という条件でのものであるが、 τ の温度依存性を反映させるためステップを時間変化が 10 分以下に収まるようさらに細分化して増分的に計算を行う。

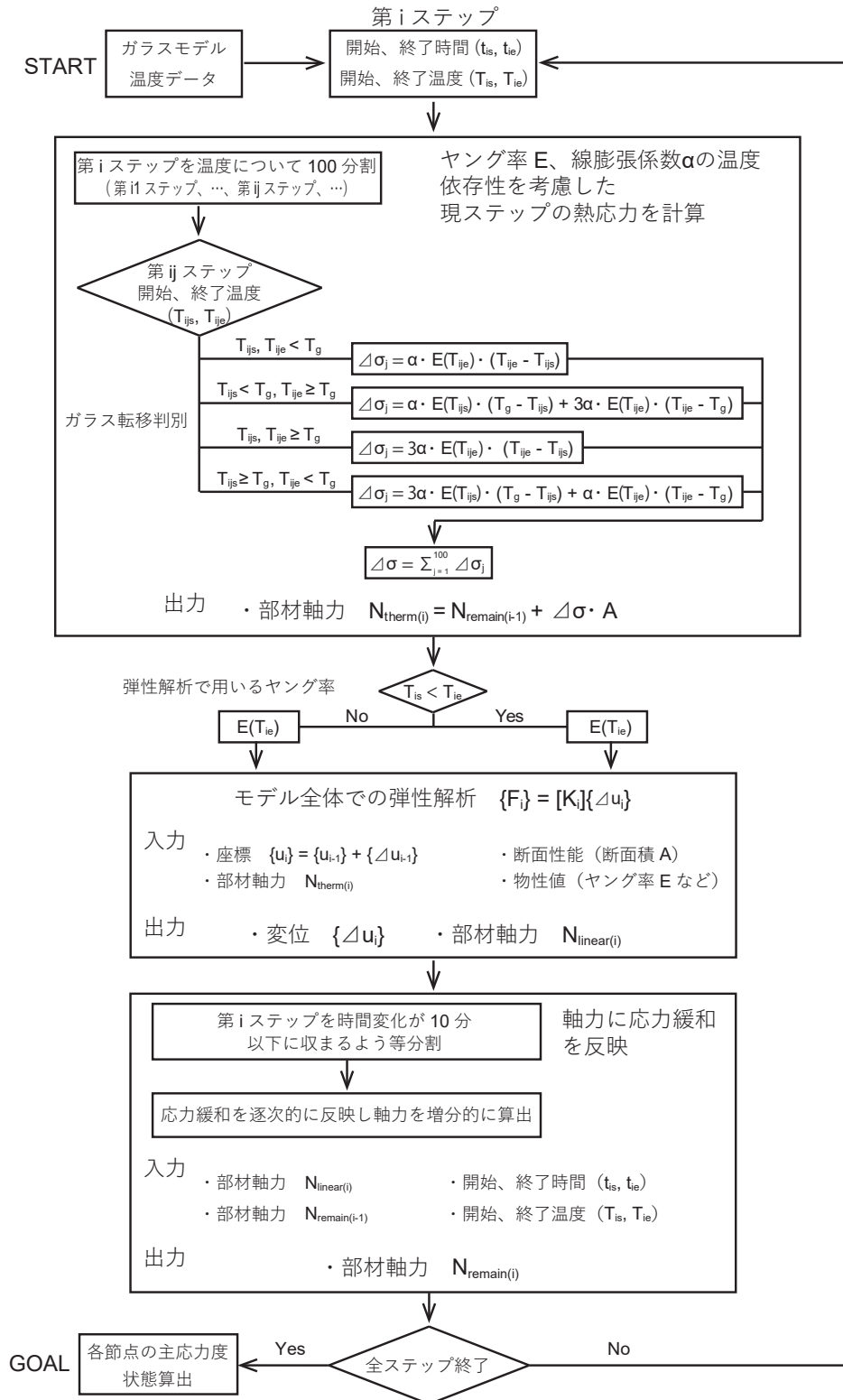


図3.3: 解析フローチャート

3.3 解析条件

前節に記した方法のうち、温度入力の際において温度分布モデルの形状をパラメータとして解析を行い残留応力を算出する。温度分布モデルの種類としては、直線状のアニール域の形状になにも操作を施さないモデル、アニール域の形状を馬蹄形にしたモデル（2.6.2の馬蹄形方式に該当）、アニール域の中央をへこませて断続的とし、かつへこんだ部分がガラス面の同じ場所に停留し続けるモデル（2.6.2の分割停留方式に該当）を準備した（表3.3）。各モデルの名称は、アニール域の形状とアニール域に分割を設けるかにより図3.4のように定めた。

表3.3: 解析モデル一覧

解析モデル名称	温度分布操作	試験体寸法 [mm]
L-SN	温度分布操作なし	400 × 600 × 8
H-SN	馬蹄形方式	400 × 600 × 8
L-SA	分割停留方式	400 × 600 × 8



図3.4: 解析モデル名称

3.4 解析結果

L-SN、H-SN の解析結果を表 3.4、L-SA の解析結果を表 3.5に示す。

表3.4: 解析結果 (L-SN、H-SN)

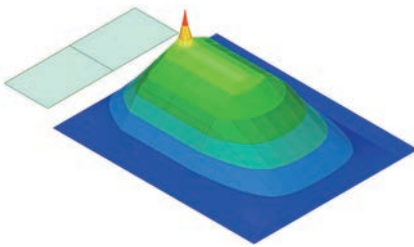
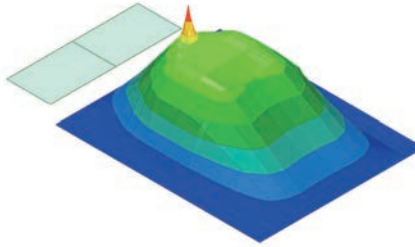
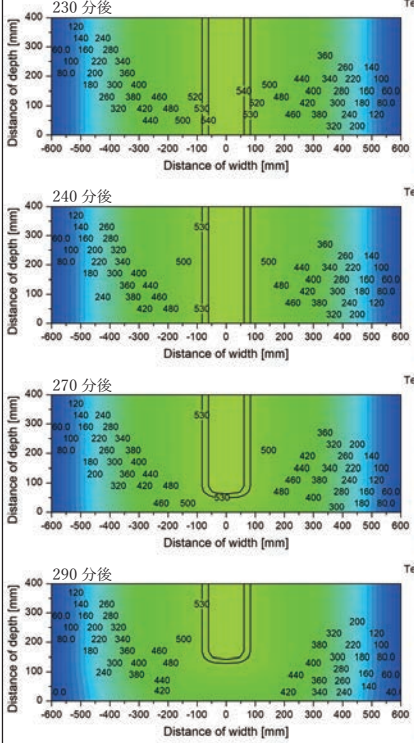
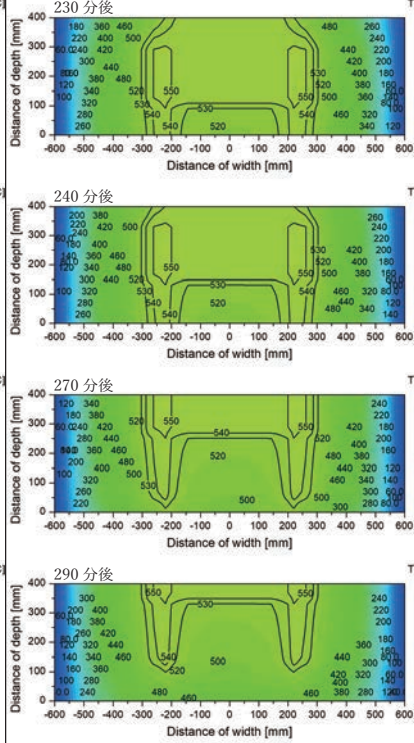
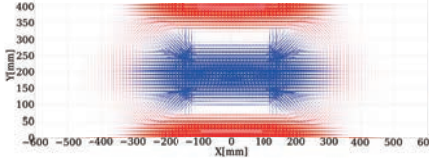
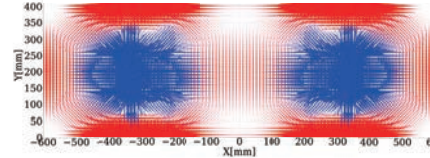
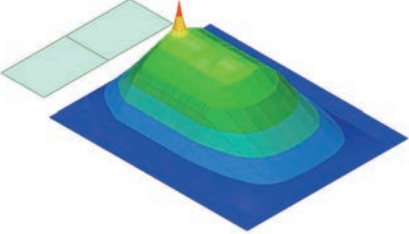
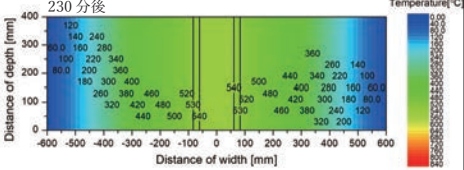
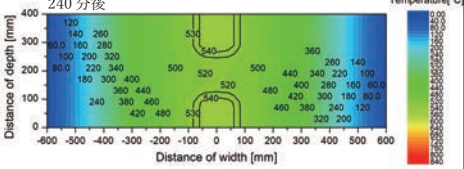
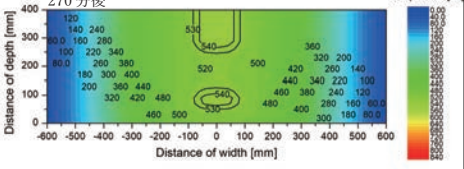
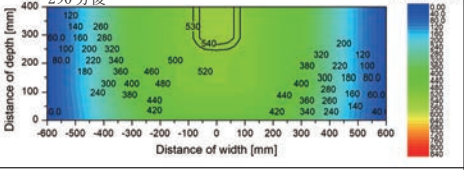
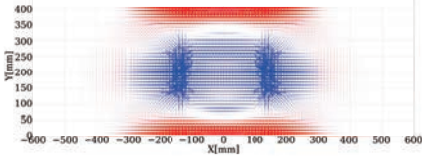
解析モデル 名称	L-SN (温度操作なし)		H-SN (馬蹄形方式)	
温度分布 モデル				
温度等高線図 (アニール時)				
主応力場				
最大主応力度 [N/mm ²] (引張)	左 30.7 (X = 0, Y = 200)	右 30.6 (X = 10, Y = 200)	左 41.0 (X = -340, Y = 200)	右 41.0 (X = 340, Y = 200)
最小主応力度 [N/mm ²] (圧縮)	-40.1 (X = 0, Y = 10)	-40.0 (X = 10, Y = 10)	-60.1 (X = -320, Y = 10)	-60.1 (X = 320, Y = 10)

表3.5: 解析結果 (L-SA)

解析モデル 名称	L-SA (分割停留方式)	
温度分布 モデル		
温度等高線図 (アニール時)	<div><div><div>230 分後</div></div><div><div>240 分後</div></div><div><div>270 分後</div></div><div><div>290 分後</div></div></div>	
主応力場	<div><div>引張 →</div><div>→ 引張 ← 圧縮</div></div>	
最大主応力度 [N/mm ²] (引張)	左 18.0 (X = -150, Y = 200)	右 18.0 (X = 150, Y = 200)
最小主応力度 [N/mm ²] (圧縮)	-36.2 (X = 0, Y = 10)	-36.0 (X = 10, Y = 10)

3.5 考察

ガラス板の割れは一般に引張応力に起因することを踏まえると、最大主応力度（引張を正とする）の値は小さいほうが望ましい。各解析モデルの幅方向、奥行方向の断面で見た時の最大主応力度の分布を図 3.5 に示す。奥行方向の最大主応力度分布に着目すると、いずれのモデルにおいても、ガラス板面上の最大主応力度は、ガラス板の奥行の中心線上（ $Y = 200$ ）にピークが現れた。 $Y = 200$ での幅方向の最大主応力度の分布に着目すると、解析モデル L-SN（温度分布操作なし）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、H-SN（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。アニール域境界付近で引張応力の増大が確認されるという結果は、既往研究で行われた溶着実験の結果の傾向^[1]と合致している。また、L-SA（分割停留方式）では L-SN の主応力度分布の山の頂が凹んだような台地上の分布となり、溶着線付近の引張応力が低減されることが確認できた。以上より、ガラス板面全体でみたときの最大主応力度のピークを小さく抑えるには、分割停留方式が効果的な温度分布操作でありうるといえる。

また、溶着線上の最大主応力度に着目すると、H-SN ではほとんど応力が見られず、L-SA では L-SN の半分程度まで応力度が低下していることがわかる。溶着部の強度が母材の強度より小さい可能性を考慮すると、溶着部に生じる引張応力はできるだけ小さいことが望ましい。溶着部に発生する引張応力をわずかなものとするという意味では馬蹄形方式の温度分布操作が有効であるといえる。

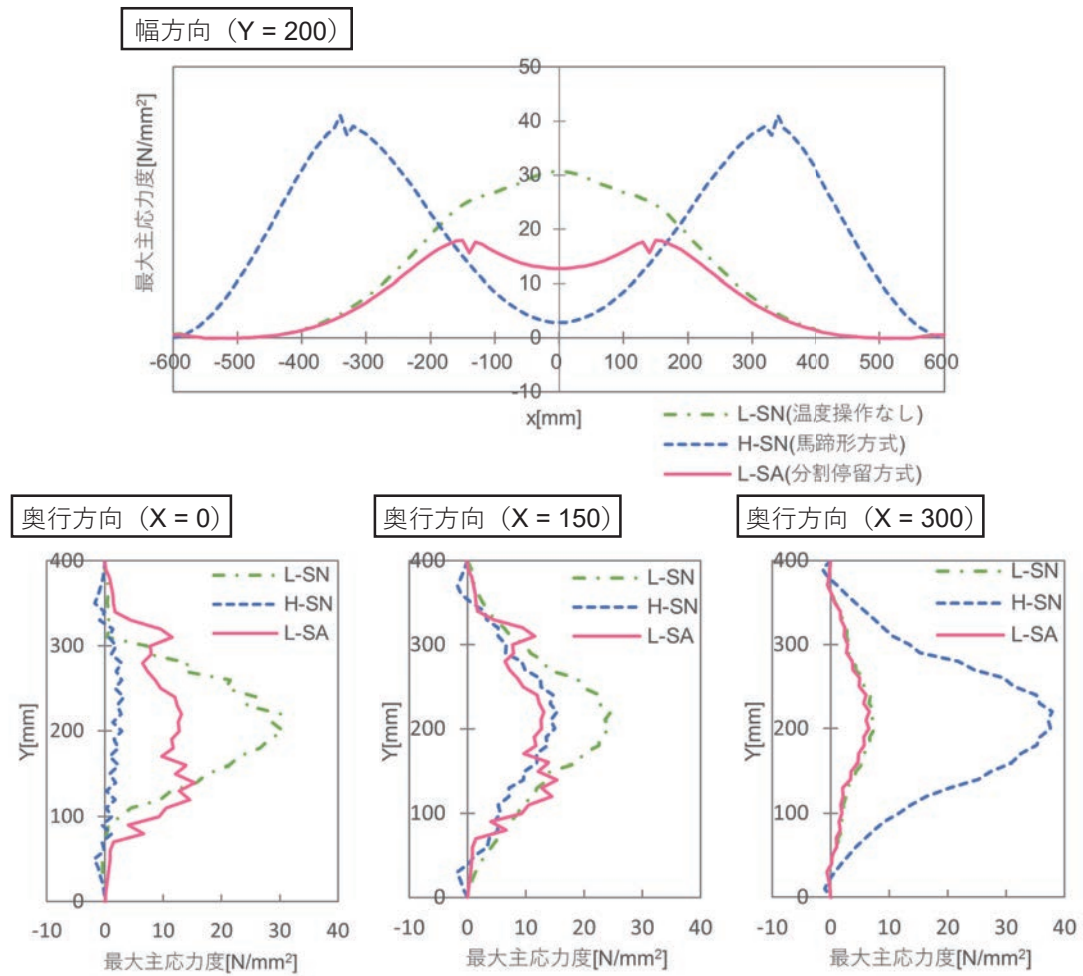


図3.5: 各解析モデルの最大主応力度（引張）分布比較

第 4 章

温度分布操作の実験

4.1 実験の目的

本章での実験の目的は、走行型炉による逐次溶着の温度推移に近づけた熱工程のもと、残留応力の低減に有効なアニール時の温度分布操作を見つけることである。実験は断熱ボードで自作した据え置き型の小型炉を用いて行った。

4.2 実験方法

4.2.1 試験体

ガラス試験体には奥行 400 mm× 幅 600 mm（公称厚 8 ミリ）のフロート板ガラスを用いた。ガラス板エッジ部の微細なキズによる強度低下を避けるために、小口に糸面加工が施されたものを使用した。

建設現場での溶着を想定すると、施工誤差により溶着するガラス板間に隙間がある可能性がある。これに対応するため、ガラスの突合せ部には 1.5 mm の隙間を設け、1.0 - 2.0 mm のガラスカレットを充填した（図 4.1）。カレットは溶着線を十分に覆うように設置しているが、これはガラスが溶けて隙間が充填されていく過程で板厚を母材と同等かそれ以上に保つためである。ガラスカレットは母材と同じガラスを砕いて作成した。

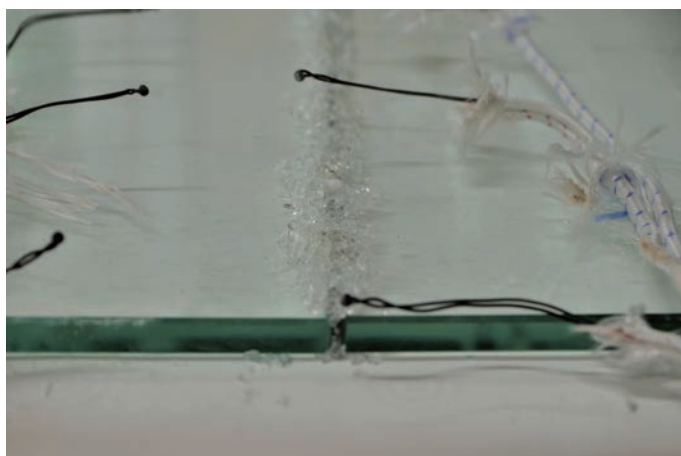


図4.1: 試験体加熱前突合せ部の様子

4.2.2 実験装置

本章の実験では、内部に電熱線ヒーターを設置した、断熱ボードで構成される小型炉を製作し、使用した(図 4.2、図 4.3)。既往研究により炉の上部の形状を変えることで試験体の温度分布を操作できることが分かっている^[3]。熱工程の各段階において意図した温度分布を再現するために、短冊状に分割した小型炉上蓋と炉の側壁との間に高さ調整用のブロックを噛ませて上蓋の勾配を調整し炉内の空間形状を変化させる操作と、一部の上蓋を冷却機能を持たせた上蓋に交換する操作を行うことを試みた。主要な工程における意図する温度分布と小型炉の断面を図 4.4に示す。各段階の詳細な操作方法については 4.2.3 に後述する。



図4.2: 小型炉外観

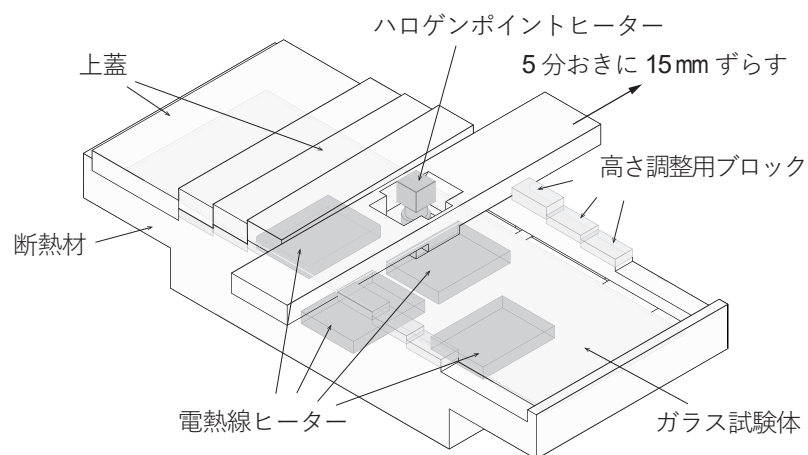
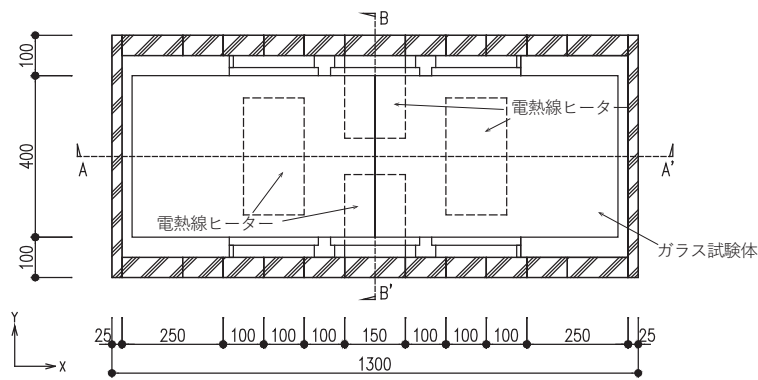
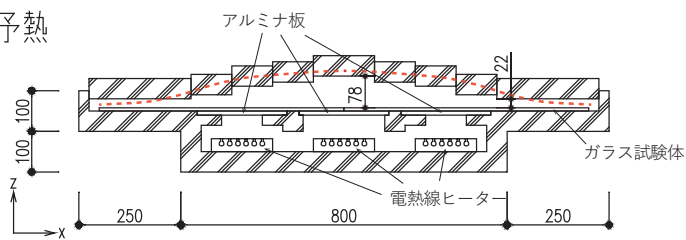


図4.3: 小型炉 - アイソメ図

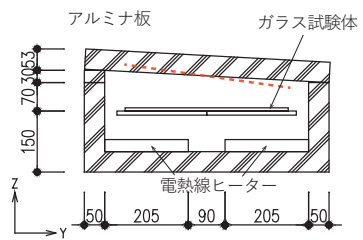


炉内平面図

予熱

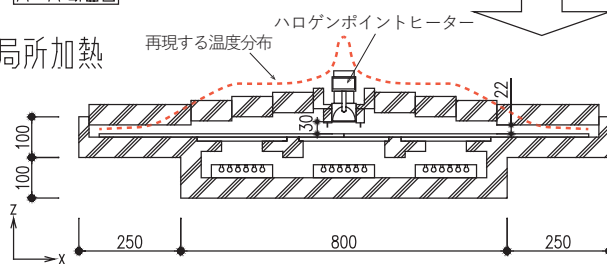


A-A'断面図

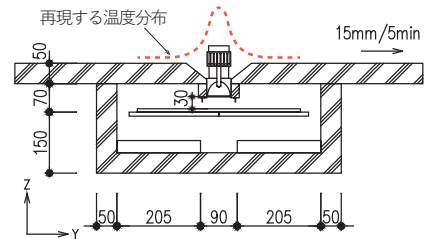


B-B'断面図

局所加熱

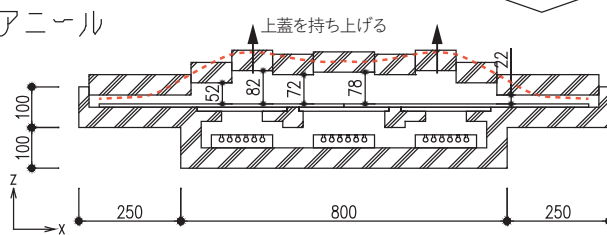


A-A'断面図

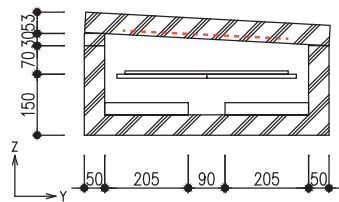


B-B'断面図

アニール

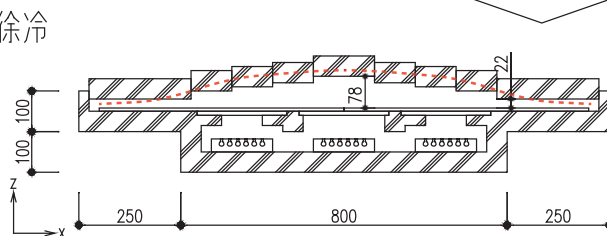


A-A'断面図

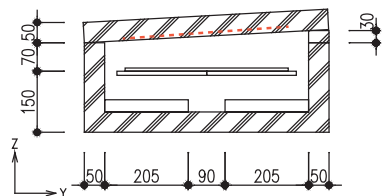


B-B'断面図

徐冷



A-A'断面図



B-B'断面図

図4.4: 小型炉 - 平面図、断面図

加熱には、以下の 2 種類のヒーターを使用した。

・電熱線ヒーター

電熱線ヒーターはニクロム線などの電気抵抗の大きい電熱線に電流を流して発熱させるヒーターのことを指す。本実験では電熱線としてカンタル線を用い、角熱板に通して使用した。使用したカンタル線の詳細を表 4.1 に示す。電熱線は温調器と接続されており、電流値は温調器によって制御される。制御方式は温調器と接続された熱電対の測定温度が設定温度以下になると電流が流れ、設定温度以上になると電流が止まる ON-OFF 制御としている。

表4.1: カンタル線詳細

線径 [mm]	1.6
単位抵抗値 [Ω/m]	0.7212
最高使用温度 [$^{\circ}\text{C}$]	1400
メーカー	坂口電熱株式会社

・ハロゲンポイントヒーター

ハロゲンヒーターはハロゲンランプの光を凹面鏡で集光し高温加熱を行うタイプのヒーターである。ハロゲンランプは、ハロゲンガスを封入した石英管の中にタングステン製のフィラメントを挿入した構成となっている。集光形態により、点集光型、線集光型、リング型などの種類があるが、本実験では点集光型のハロゲンポイントヒーターを使用した。ハロゲンランプによる光加熱の特徴として下記のもの挙げられる。

- ・放射エネルギーへの変換効率が高い
- ・ヒーター自身の温度の立ち上がりが極めて早い（約 1 秒）
- ・1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上まで加熱できる
- ・加熱対象の色や表面状態によって熱吸収量が大きく変化する

ヒーターの出力は、専用の手動電源コントローラーで制御する。本実験で使用したハロゲンポイントヒーターの詳細を表 4.2 に示す。使用時の注意事項として、ランプベース部が 180 $^{\circ}\text{C}$ を超えないよう冷却する必要がある、冷却ファン搭載型のものを用いた。

表4.2: ハロゲンポイントヒーター詳細

型式	HPH-60FA/f30/36v-450w/P2m
焦点距離 f[mm]	30
焦点径 [mm]	8
最高加熱温度 [$^{\circ}\text{C}$]	1400
電圧ー電力-寿命	36v-450w-150h
メーカー	ヒートテック株式会社

ハロゲンランプの光の波長域は約 1 μm をピークとする 0.4 - 2.5 μm である。一方、ガラス板の約 1 μm の波長に対する吸収率は 0.2 μm 程度であるため、単純な熱吸収量は小さい。しかしガラス試験体の下に設置さ

れたアルミナ板は反射率が高く、ランプの光が集光鏡、アルミナ板間を何往復もすることにより加熱効率を高めることができる。さらに図 4.5 のように径 80 mm、幅 10 mm のステンレスの反射枠を集光鏡の下部に設置し、集光率を上げることを試みた。

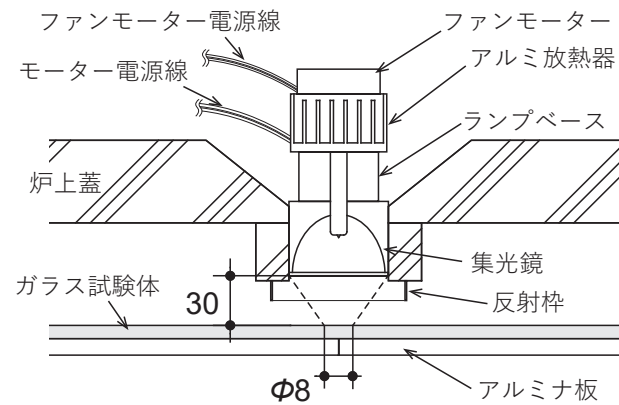


図4.5: ハロゲンポイントヒーター設置の様子

4.2.3 溶着手順

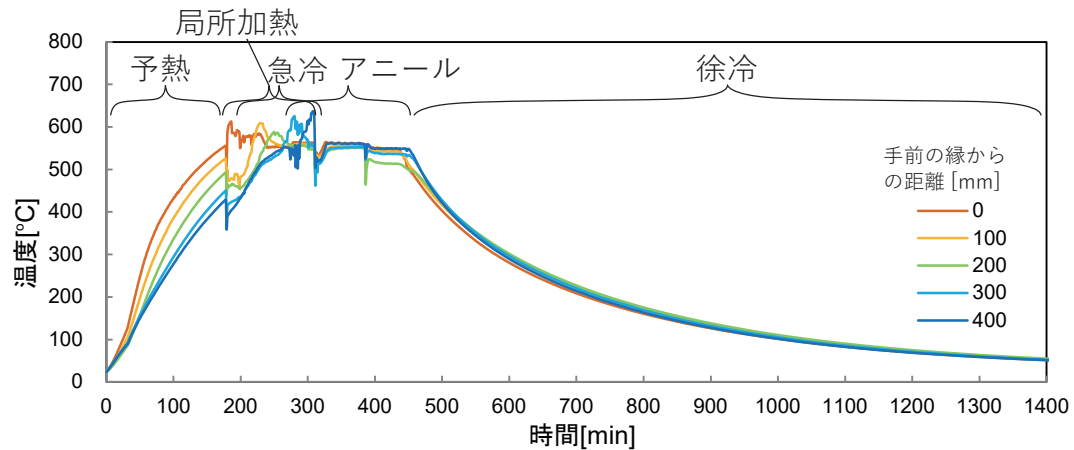


図4.6: 小型炉における溶着部付近温度履歴 (X = ±40 mm での値の平均)

ガラス溶着法における熱工程は、1.3 で述べたように、予熱、局所加熱、急冷、アニール、徐冷の 5 つの工程からなる (図 4.6)。各工程における操作を以下に示す。

I. 予熱

ガラス板を局所的に、かつ急激に加熱すると一時歪により簡単に割れてしまう。そのためハロゲンポイントヒーターを用いた局所加熱を行う前に、電熱線ヒーターを用いて、溶着部付近が歪の緩和が可能となる温度に達するまで予備的な加熱を行う必要がある。本実験では予熱完了の温度を 550°C とした。張の既往研究^[3]では予熱段階で 100 度以上の温度となる試験体上の領域を予熱範囲として、予熱範囲の幅が 48 cm より小さい場合は、一時歪により試験体が割れる可能性が高いことが示唆されている。走行型炉による逐次溶着の温度分布に近づくため、加熱開始時に炉の手前の電熱線ヒーターのみに 16A の電流を流し始め、手前側の炉内空間が大きくなるよう上蓋に傾斜をつけることで、奥行方向に温度勾配をつける。

II. 局所加熱

ハロゲンポイントヒーターを用いて試験体の溶着部をガラスの軟化点以上まで加熱する。藤本の既往研究^[12]により、溶着部の失透を避けるためには局所加熱時の最高温度を 850°C 以下にするとよいことが分かっている。図 4.5 のような配置のもと、ハロゲンポイントヒーターで加熱した際の溶着部近辺の温度分布の測定結果の一例は図 4.7 に示す通りであり、失透は避けられる。

ハロゲンポイントヒーターがガラスを溶融できる範囲は $\phi = 30 - 40$ mm 程度の円であるが、ヒーターを 5 分同じ場所に保持したのち溶着線に沿って試験体の手前から奥へ 1.5 cm もしくは 2 cm 動かすという操作を繰り返し、溶着線全体の溶融を行う。ヒーターを動かす速度が 5 分おきに 1.5 cm であれば、これは走行型炉が 3 mm/min で動いていることに相当し、5 分おきに 2.0 cm であれば 4 mm/min で走行していることに相当する。ハロゲンポイントヒーターで局所加熱を行っている間も電熱線ヒーターは炉内温度を保持するよう稼働しておく。

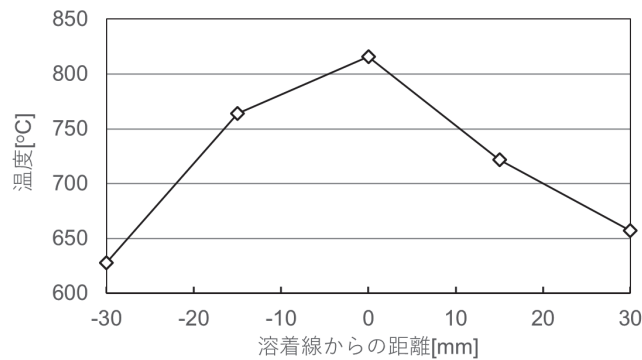


図4.7: 局所加熱時溶着線付近の温度分布

III. 急冷

失透を避けるためには急冷の過程が短い方が望ましいが、ハロゲンポイントヒーターが通過し光の照射がなくなった部分は短時間で自然と転移点付近まで温度が低下していくため問題はない。ハロゲンヒーター通過後に温度が下がりすぎないように電熱線ヒーターで転移手点付近に保持しておく。急冷が完了した場所から順次アニール工程へと移行する。

IV. アニール

電熱線ヒーターを用いて試験体の温度を 550°C に保持し、ガラスの内部構造を安定化させる。はじめの段階では広範囲を 1 時間程度 550°C に保持し、次の段階で部分的に冷却を行い、意図した領域で 1 時間程度アニールを続ける。ヒーターの出力と上蓋の冷却機構、上蓋の勾配を操作して、アニール域が溶着線に沿って進行していく走行型炉の温度変化を再現する。

V. 徐冷

自然冷却により、試験体全体を常温まで冷却する。歪点以下の温度では、冷却速度は残留応力に影響しない。しかし、冷却速度に差が生じ温度差が大きくなると一時歪により割れる可能性があるため、均一に冷えるよう注意する必要がある。

以上の熱工程を経て常温に戻った時点で、ガラス試験体を炉から取り出し、歪検査器を用いて残留応力を観察する。

4.2.4 温度測定方法

試験体の温度は熱電対を使用して測定した。本実験で用いた熱電対の詳細を表 4.3に示す。熱電対で測定した温度はデータロガーを用いて記録した。熱電対がなるべく試験体の実際の温度に近い値を測定できるように、熱電対の先端がガラス試験体表面から 0 - 5 mm の範囲に位置するようにした（図 4.8）。また、溶着部付近はガラスが溶融し熱電対が内部に埋め込まれる可能性があるため、溶着線から 40 mm 以上離れた位置に温度測定地点を設けた。奥行 400 mm× 幅 600 mm の試験体の、実験での熱電対の配置を図 4.9に示す。図中 □ で囲まれた番号の熱電対は温調器と接続しヒーターの制御基準とした。

表4.3: 熱電対詳細

熱電対タイプ	セラミック編組被覆熱電対線 (K タイプ)
導体外径 [mm]	0.65
仕上がり外径 [mm]	2.2×3.3
常用限度温度 [°C]	650
加熱使用限度温度 [°C]	850

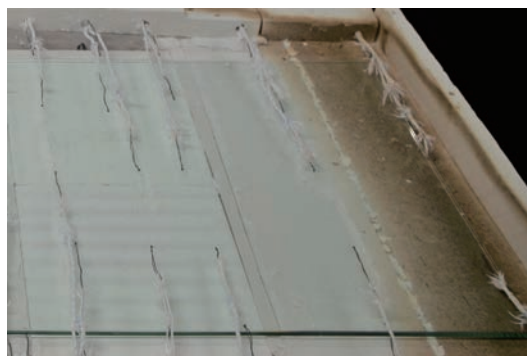


図4.8: 熱電対設置の様子

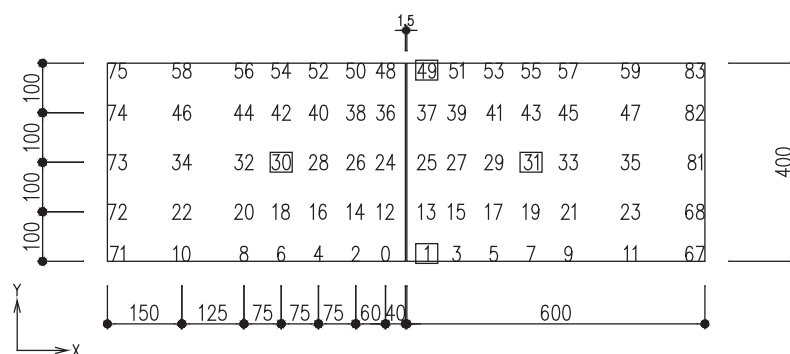

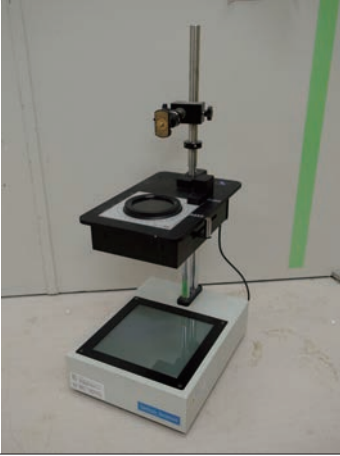


図4.9: 熱電対配置図（奥行 400 mm× 幅 600 mm の試験体）

4.2.5 残留応力算出方法

2.6 で述べたように、実験後の試験体の残留応力の観察には歪検査器を用いる。本実験では以下の 2 種類の歪検査器（表 4.4）により、主応力状態の算出に必要な等傾線画像、等色線画像、鋭敏色画像を取得した。

表4.4: 実験で用いた歪検査器（写真出典：[1], P30）

名称	大型歪検査器	LSM-7000LE
メーカー	西村、張の自作	株式会社ルケオ
写真		
光源	LED 白色光	白色 LED 3000K
撮影範囲 [mm]	1000×1000	176×132
観察方法	直交ニコル法、円偏光法	鋭敏色法
取得画像	等傾線画像、等色線画像	鋭敏色画像

撮影した等色線画像をもとに、光弾性定数 $C = 2.56[\text{nm}/\text{mm} \cdot \text{N}/\text{mm}^2]$ 、厚み $t = 8[\text{mm}]$ として試験体の残留応力の主応力度差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) を算出した。また、鋭敏色画像をもとに、ガラスエッジ部のエッジと水平方向の主応力の正負を判別した。続いて、試験体エッジ部ではエッジと垂直方向の応力成分が 0 になることに注意して、主応力度差と、エッジと水平方向の主応力の正負からエッジ部の主応力度を得た。

等傾線画像は、試験体を偏光板の透過軸に対して時計回りに $\theta = [0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 87.5^\circ]$ 回転させて 12 種類の画像を撮影した（図 4.10）。ここで試験体の局所座標における主応力角度 θ は反時計回りを正としている。

得られた 12 枚の等傾線画像から等傾線を抽出し等傾線図を作成した。等傾線上の点では主応力角度は θ であるが、最大主応力角度は θ もしくは $\theta + 90^\circ$ である。そこで、等傾線図とエッジ部の応力の正負をもとに主応力線図を描き、最大主応力角度を判断した。主応力線図作成の流れを図 4.11 にまとめた。

ここまでの過程で得られた主応力度差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) と最大主応力角度 θ をもとに最大主応力度 σ_1 と最小主応力度 σ_2 を求めるにあたり、せん断応力差積分法を用いた^[16]。せん断応力差積分法を適用するにあたり、奥行 400 mm× 幅 600 mm の試験体について 20 mm 間隔のグリッドとした。グリッドの交点でのせん断応力度は、

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin 2\theta \quad (4.1)$$

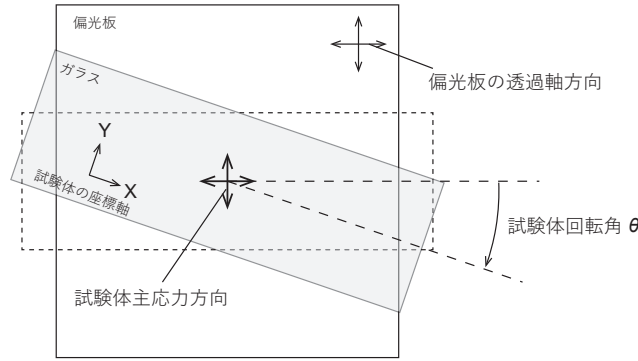


図4.10: 等傾線画像撮影時の光学軸

ここに、 σ_1 は主応力度のうち引張を正として大きいほうの値とする。平面応力状態において、図 4.12に示す応力度 σ_x 、 σ_y と σ_1 、 σ_2 の間には以下の式が成り立つ。

$$\sigma_x + \sigma_y = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4.2)$$

$$\sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos 2\theta \quad (4.3)$$

グリッド交点周りの微小領域における力の釣り合いより（図 4.13）、

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy = 0$$

$dy = dx$ より、式 (4.4) は、

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (4.5)$$

x について積分して、

$$\sigma_x = \sigma_{x0} - \int_0^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \cdot dx \simeq \sigma_{x0} - \sum_{x=0}^x \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \cdot \Delta x \quad (4.6)$$

ここで σ_{x0} は積分開始点としたガラスエッジ部での σ_x であり、自由端のため $\sigma_{x0} = 0$ である。また、 $\Delta y = 2\Delta x$ なので、

$$\sigma_x = -\frac{1}{2} \sum_{x=0}^x \Delta \tau_{xy} \quad (4.7)$$

よって、例えば図 4.14中の σ_{xi} は

$$\sigma_{xi} = \sigma_{xi-1} - \frac{1}{2}(\tau_A - \tau_B) \quad (4.8)$$

で求められる。

σ_x が得られたので、式 (4.3) から σ_y 、式 (4.2) から $\sigma_1 + \sigma_2$ が求まる。

$$\sigma_1 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) - (\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \quad (4.10)$$

であるから、最大主応力度 σ_1 、最小主応力度 σ_2 が得られる。

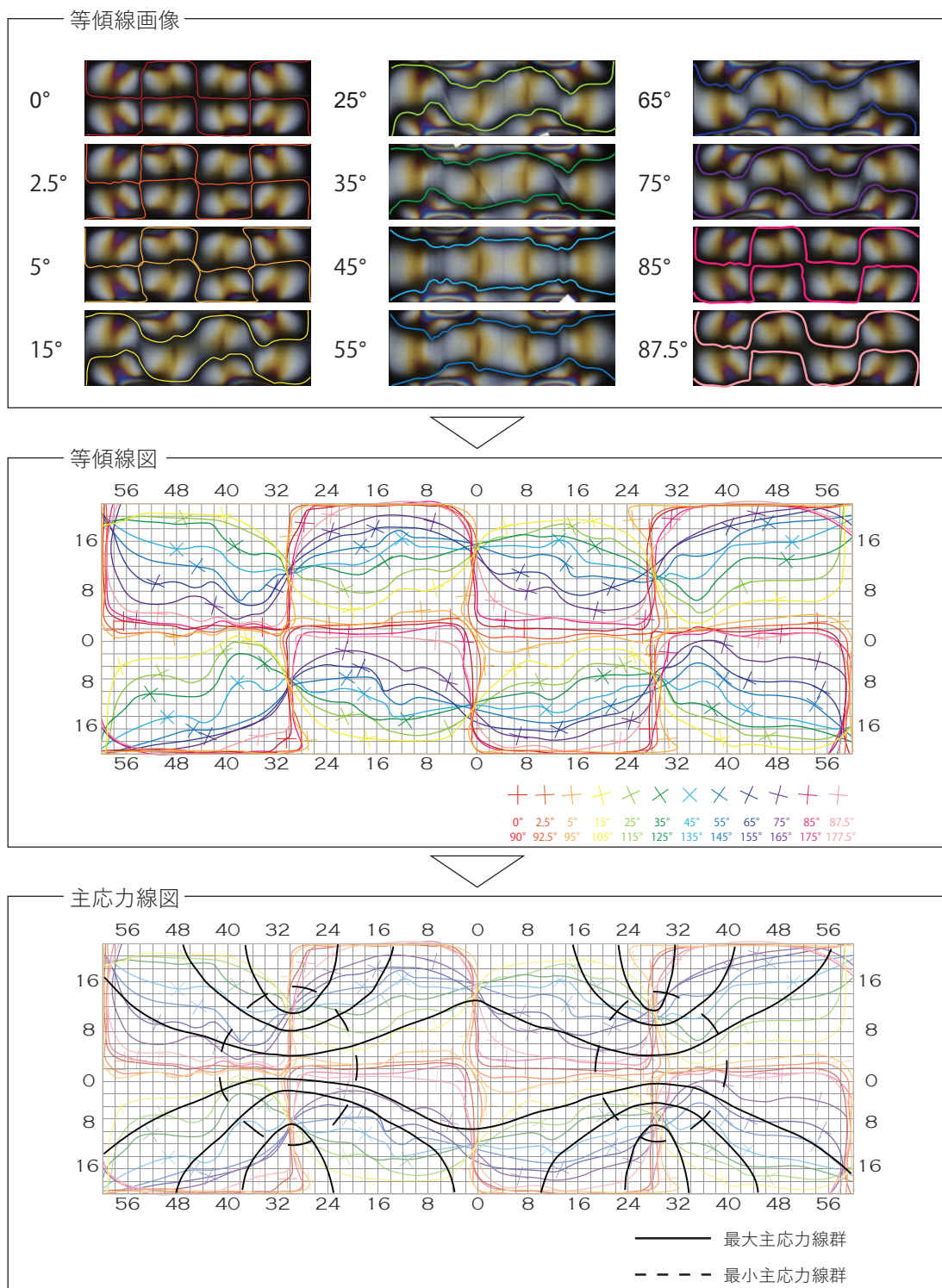


図4.11: 主応力線図作成手順

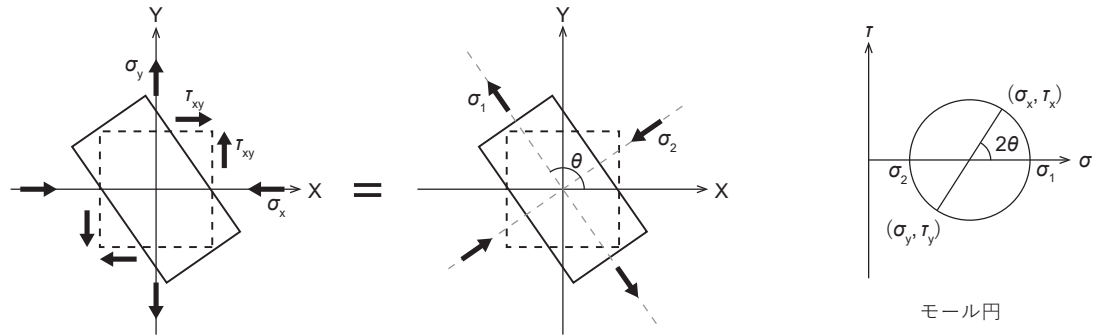


図4.12: 主応力度とせん断応力度

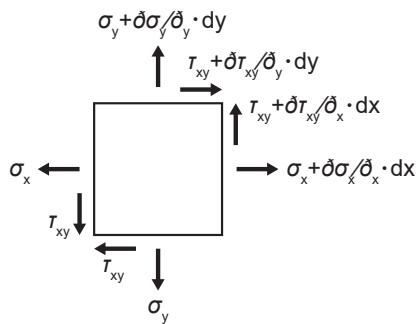


図4.13: 微小領域での平面応力状態

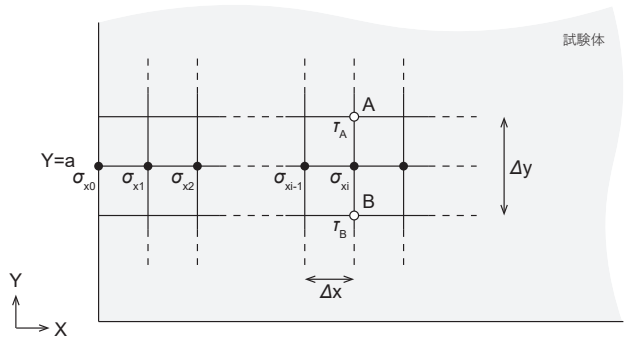


図4.14: せん断応力差積分法

4.3 実験内容

アニール時の温度分布操作として、馬蹄形方式、分割停留方式、馬蹄形方式に分割停留方式を適用した方式の大きく分けて3種類を行い、残留応力を比較して有効な温度分布操作の検討を行った。本実験で扱う5つの試験体の名称を表4.5に記す。命名は3章の解析モデルの命名方法に従った。

表4.5: 試験体一覧（温度分布操作の実験）

試験体名称	試験体寸法	実験日
H-SN1（馬蹄形方式）	400 × 600 × 8	2020/5/28
H-SN2（馬蹄形方式）	400 × 600 × 8	2020/6/5
H-SA1（馬蹄形＋分割停留）	400 × 600 × 8	2020/6/19
H-SA2（馬蹄形＋分割停留）	400 × 600 × 8	2020/7/21
L-SA（分割停留方式）	400 × 600 × 8	2020/7/13

馬蹄形方式はH-SN1、H-SN2の2体行ったが、H-SN2では馬蹄形のアニール域の軟化幅をH-SN1より大きくし、残留応力への影響を観察した。また、馬蹄形方式に分割停留方式を適用した試験体はH-SA1、H-SA2

の2体であるが、アニール段階において小型炉で意図する温度分布を再現するために異なる冷却方法を用いている。各試験体について、再現を試みたアニール時の温度分布操作を図4.15、温度分布操作を行うための2段階目のアニール時の小型炉の構成を図4.16、4.17に示す。

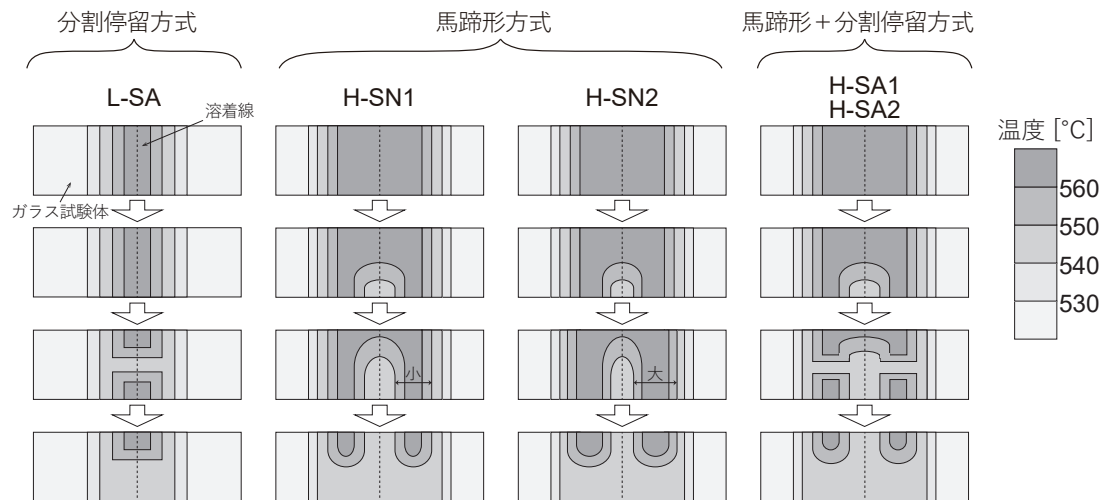
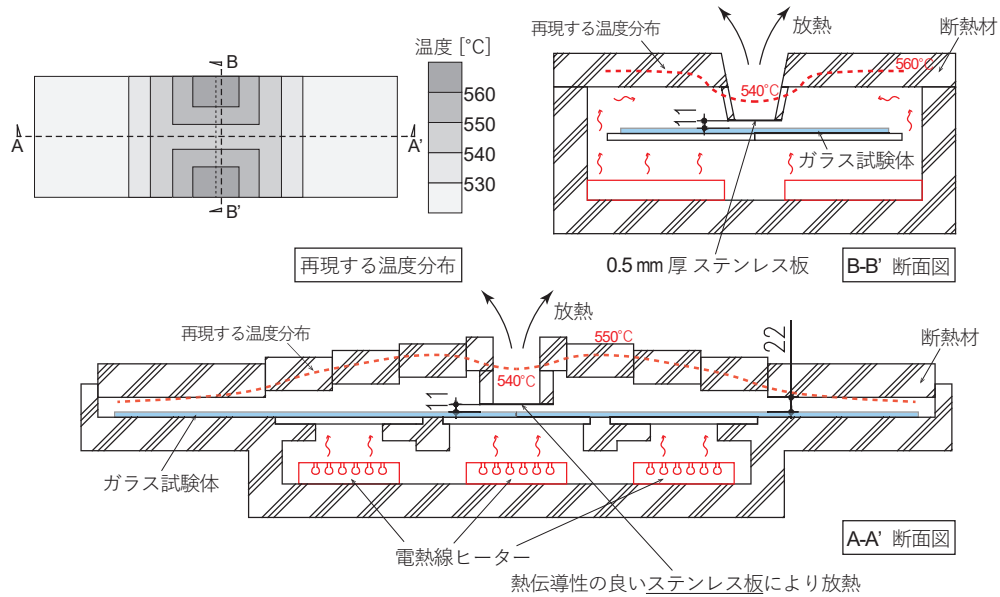


図4.15: 各試験体に施す温度分布操作

H-SA1 では馬蹄形のアニール域の奥行方向に延びている部分を分割するように冷却するため、冷却を行う場所の上蓋の断熱材を 10 mm 厚として炉外への放熱量を増やすことを試みた。H-SA2、L-SA ではアニール域を分割する場所の上蓋を 0.5 mm 厚のステンレス板として、炉内のステンレス板直下の空気の熱を炉外に放熱することで、間接的にガラス板を局所的に冷却することを試みた。

L-SA



H-SN1, H-SN2

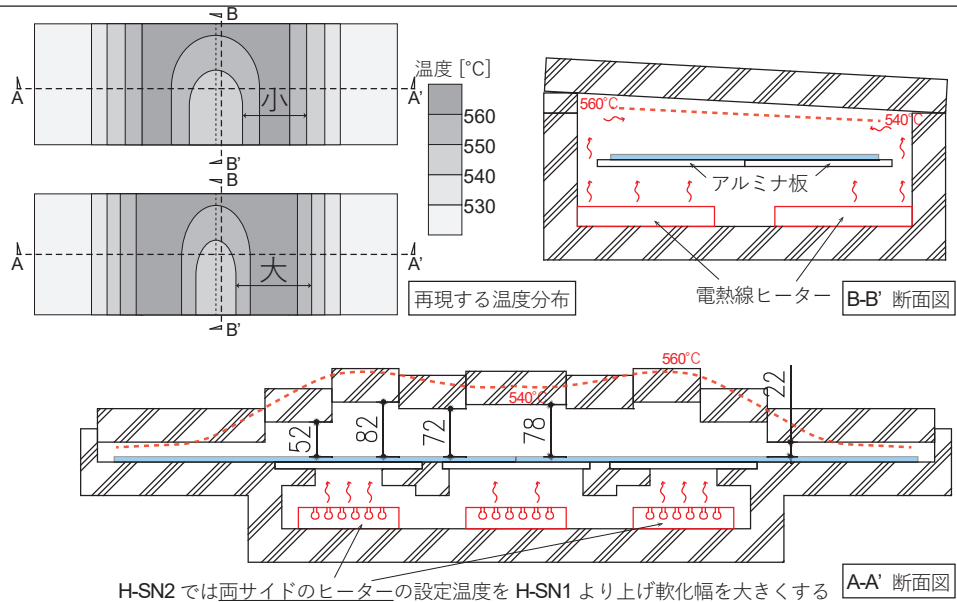
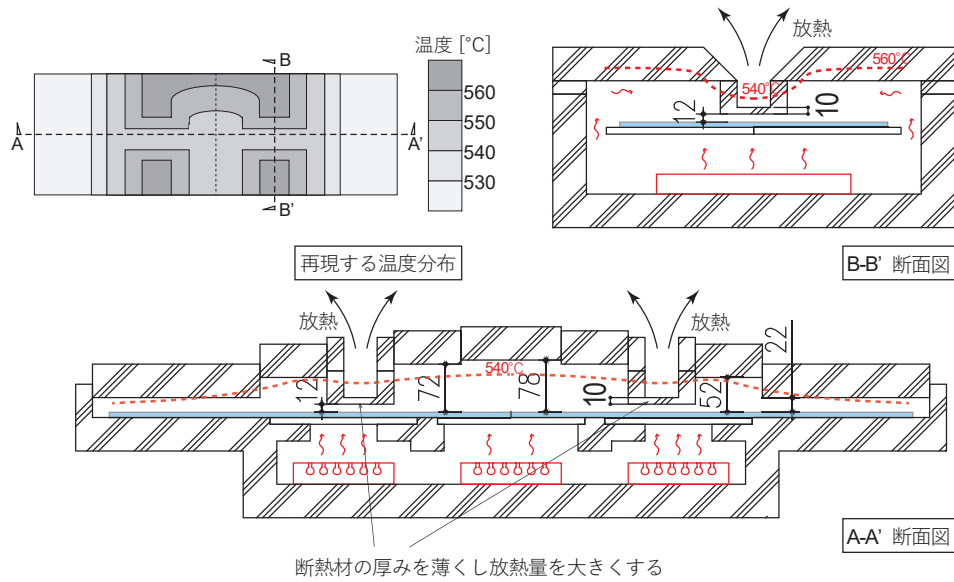


図4.16: 小型炉 - 2 段階目アニール時断面図 (L-SA, H-SN1,H-SN2)

H-SA1



H-SA2

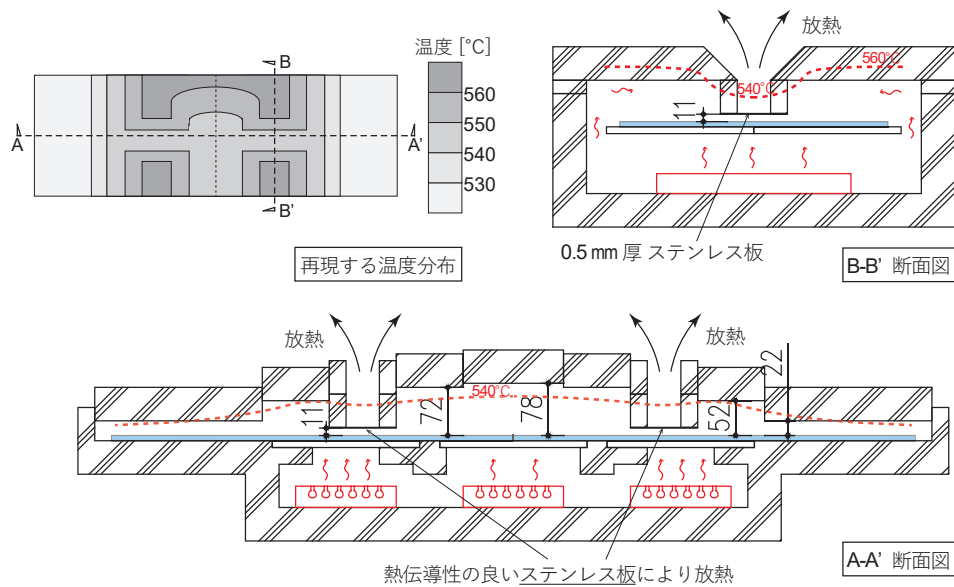


図4.17: 小型炉 - 2段階目アニール時断面図 (H-SA1,H-SA2)

4.4 実験結果

各試験体の主な実験結果を表 4.6、表 4.7、表 4.8に示す。各試験体の詳細結果は付録に記載する。

表4.6: 実験結果 (H-SN1、H-SN2)

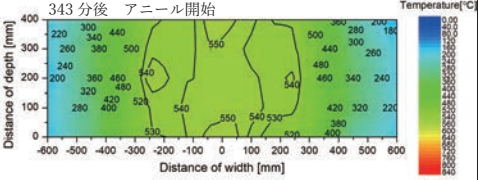
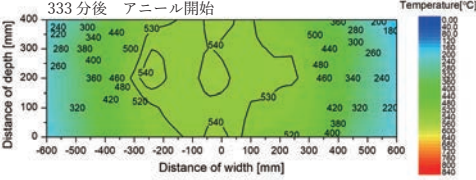
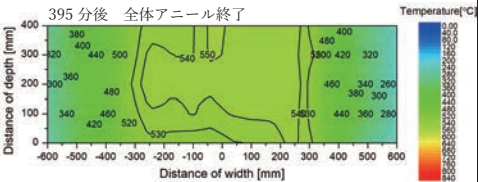
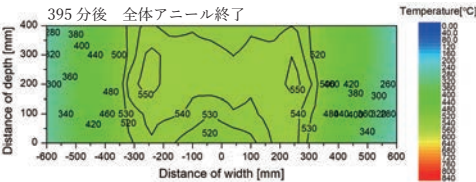
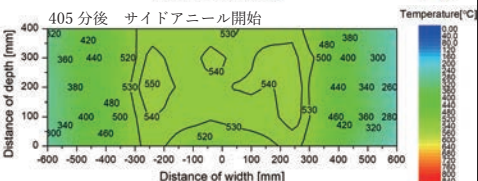
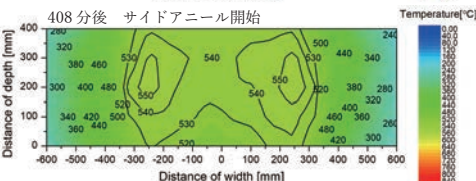
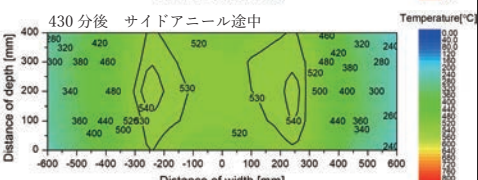
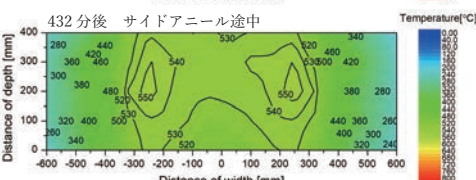
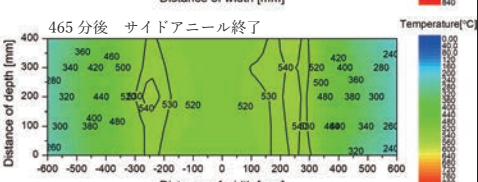
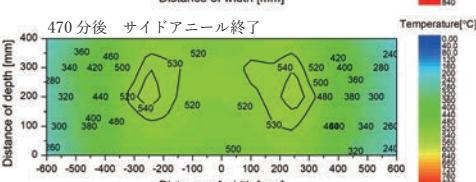


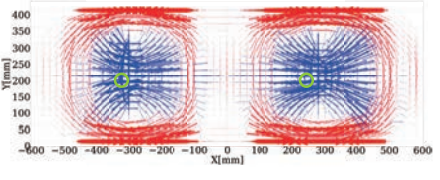
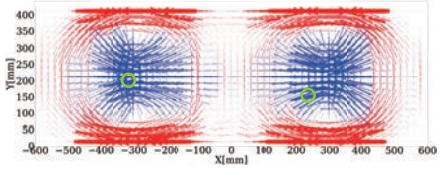
試験体名称	H-SN1(馬蹄形方式)		H-SN2(馬蹄形方式)	
温度等高線図 (アニール時)	343 分後 アニール開始 		333 分後 アニール開始 	
	395 分後 全体アニール終了 		395 分後 全体アニール終了 	
	405 分後 サイドアニール開始 		408 分後 サイドアニール開始 	
	430 分後 サイドアニール途中 		432 分後 サイドアニール途中 	
	465 分後 サイドアニール終了 		470 分後 サイドアニール終了 	
試験体写真				
割れ有無	加熱から 5 - 7 日後に割れ		加熱から 5 - 7 日後に割れ	
主応力場				
最大主応力度 [N/mm²] (引張) 最小主応力度 [N/mm²] (圧縮)	左	右	左	右
	30.7 (X = -320, Y = 200) -61.0 (X = -280, Y = 0)	27.9 (X = 260, Y = 200) -63.5 (X = 280, Y = 0)	27.5 (X = -320, Y = 200) -63.5 (X = -300, Y = 400)	27.4 (X = 240, Y = 160) -65.9 (X = 300, Y = 0)

表4.7: 実験結果 (H-SA1、H-SA2)

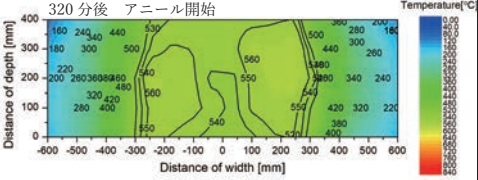
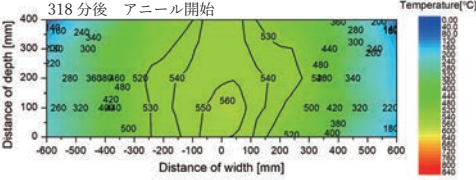
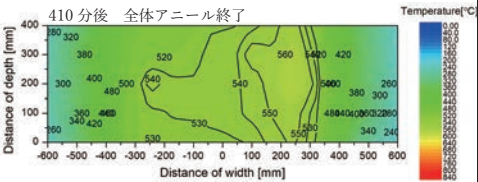
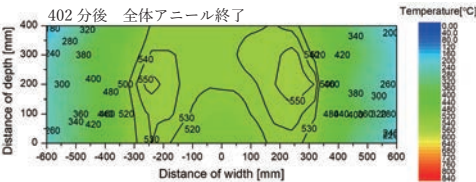
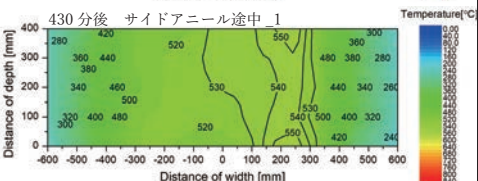
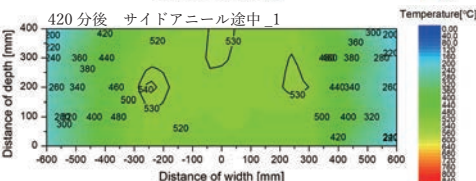
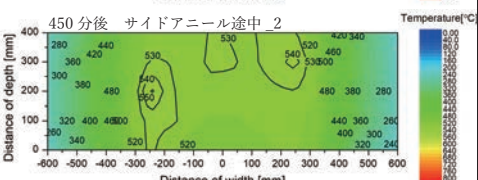
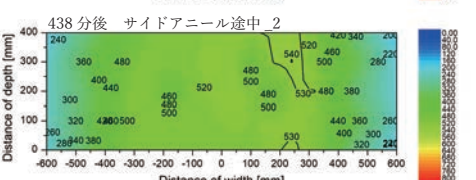
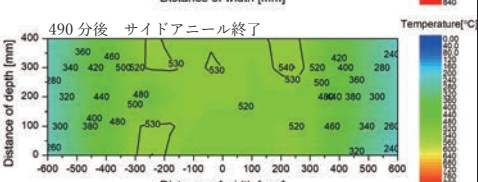
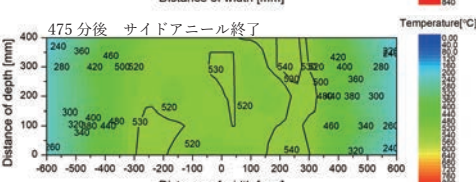


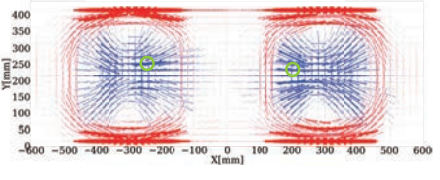
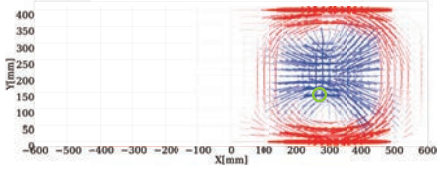
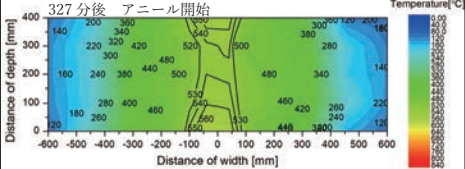
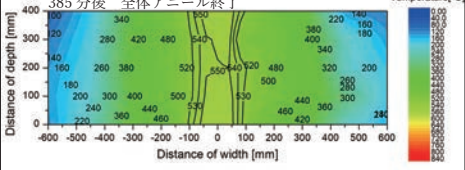
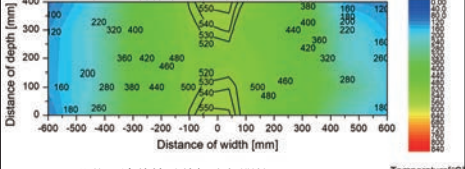
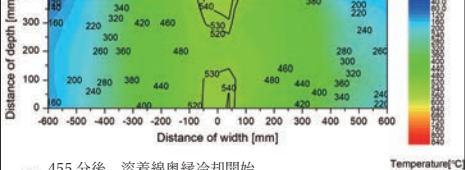
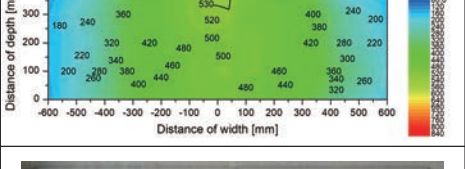

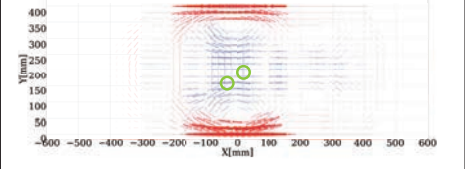
試験体名称	H-SA1(馬蹄形+分割停留方式)		H-SA2(馬蹄形+分割停留方式)	
温度等高線図 (アニール時)	320 分後 アニール開始 		318 分後 アニール開始 	
	410 分後 全体アニール終了 		402 分後 全体アニール終了 	
	430 分後 サイドアニール途中_1 		420 分後 サイドアニール途中_1 	
	450 分後 サイドアニール途中_2 		438 分後 サイドアニール途中_2 	
	490 分後 サイドアニール終了 		475 分後 サイドアニール終了 	
試験体写真				
割れ有無	割れなし		左：徐冷中に割れ 右：加熱から5-7日後に割れ	
主応力場				
最大主応力度 [N/mm²] (引張)	左 23.4 (X = -240, Y = 240)	右 23.0 (X = 200, Y = 220)	左 —	右 28.5 (X = 280, Y = 140)
最小主応力度 [N/mm²] (圧縮)	-56.2 (X = -300, Y = 400)	-56.2 (X = 280, Y = 400)	—	-61.0 (X = 300, Y = 400)

表4.8: 実験結果 (L-SA)

試験体名称	L-SA(分割停留方式)	
温度等高線図 (アニール時)	<div>327 分後 アニール開始</div>  <div>385 分後 全体アニール終了</div>  <div>388 分後 溶着線中央冷却開始</div>  <div>439 分後 溶着線手前縁冷却開始</div>  <div>455 分後 溶着線奥縁冷却開始</div> 	
試験体写真		
割れ有無	割れなし	
主応力場		
最大主応力度 [N/mm ²] (引張)	左 11.2 (X = -40, Y = 160)	右 11.8 (X = 20, Y = 200)
最小主応力度 [N/mm ²] (圧縮)	-43.9 (X = -20, Y = 0)	-43.9 (X = 0, Y = 0)

4.5 考察

4.5.1 小型炉の構成と温度分布

小型炉は走行型炉による逐次溶着の温度分布と同じ温度分布を再現できるよう設計したが、ここでは、分割停留方式に則った解析モデル L-SA（解析）で入力された温度分布と、実験で同じく分割停留方式の再現を行った L-SA（実験）の測定値である温度分布を比較し、小型炉による温度の再現程度を確認する。L-SA（解析）と L-SA（実験）の主要な段階の温度等高線図を図 4.18 に示す。

加熱を開始してからガラス板の最高温度が原点付近で 300°C に達する予熱途中の段階では、溶着線上 ($X = 0$) に着目すると L-SA（解析）では $Y > 200$ の領域では 20°C であるが L-SA（実験）では $Y = 400$ で 160°C 付近となっており、奥行方向の温度勾配が小さくなっている。

局所加熱開始～終了段階では概ね解析の温度分布と近い温度分布が再現されている。ただし、端部 ($X = \pm 400$) では、解析では 40°C 付近で一定であるのに対し、実験では 160°C 付近まで温度が徐々に上昇していくことがわかる。

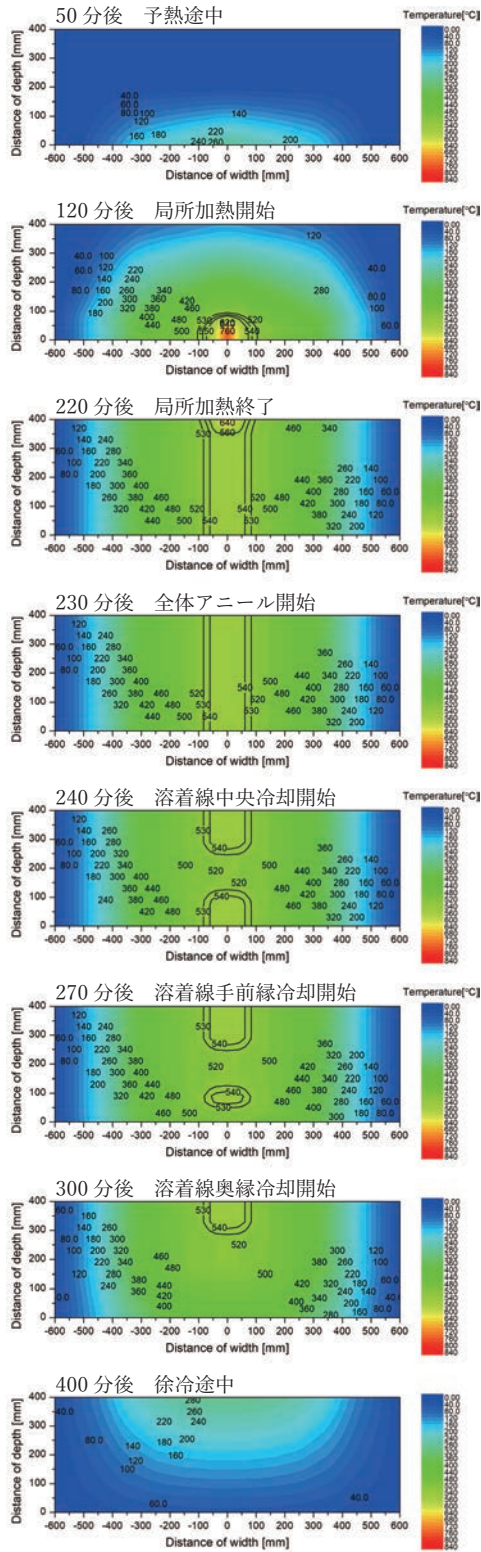
また、全体アニール開始～溶着線奥縁冷却開始においては、L-SA（実験）では温度にムラが見られるもののアニール域の形状は L-SA（解析）と近く、分割停留方式が再現できている。局所加熱段階と同様この段階でも端部の温度は 200°C 付近まで上昇しており、解析の温度分布と比較し幅方向の温度勾配が緩やかとなっている。

徐冷途中では、解析では手前の縁 ($Y = 0$) から冷却されていく温度分布であるが、実験ではガラス板周縁部から冷却が進み、中央付近が最高温度となるような温度分布となっている。

以上より、予熱段階や徐冷段階などの奥行方向に急な温度勾配が想定される走行型炉の温度分布を、小型炉で精度よく再現することは難しいといえる。また、アニール時の温度分布操作に関しては、ステンレス板を用いた冷却機構とヒーターの制御により、分割停留方式を再現できるとわかった。

小型炉におけるガラス板の加熱のされ方として、炉の底に設置された電熱線ヒーターにより昇温した空気との接触で生じる対流熱伝達と、同じく電熱線ヒーターにより加熱されたアルミナ板からの熱伝導の 2 つが考えられる。主に前者の伝熱形態を理由として、小型炉での急な温度勾配の再現が困難であり、また一方では、炉内空気の熱を部分的に逃がすことによるガラス板の局所的な冷却が可能であると推測される。

L-SA（解析）



L-SA（実験）

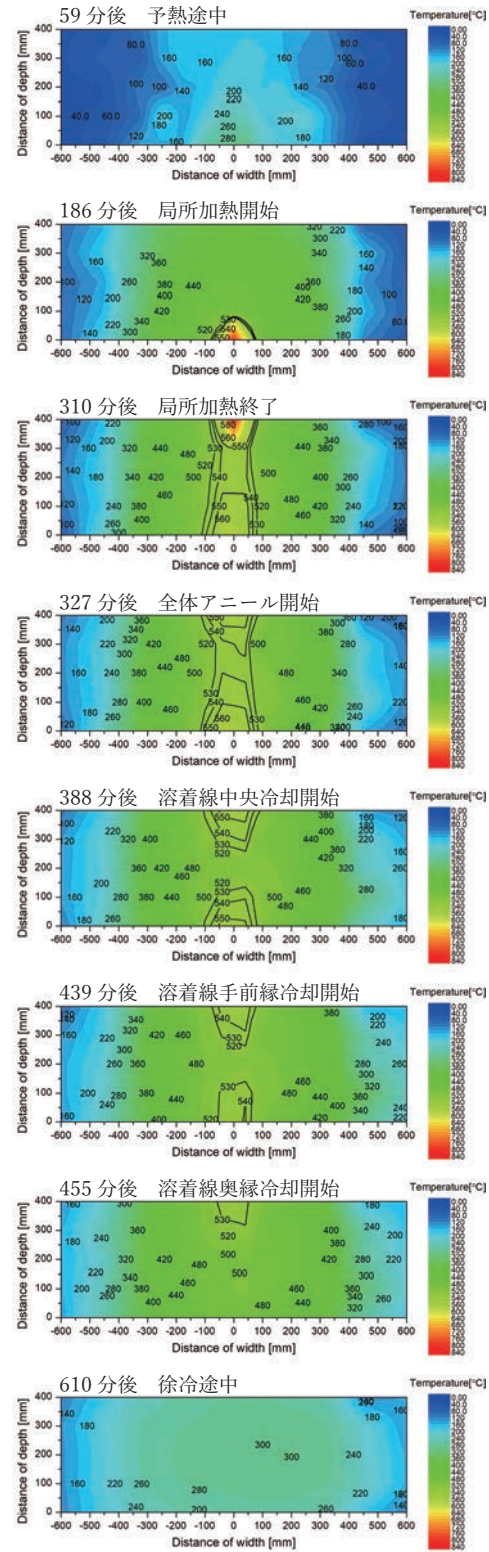


図4.18: 解析と実験の温度分布比較（L-SA）

4.5.2 温度分布形状と残留応力比較

各試験体の幅方向、奥行方向の主要な断面で見た時の最大主応力度の分布を図 3.5 に示す。ここで馬蹄形のアニール域に分割停留方式を適用した試験体 H-SA2 は試験体左半分が徐冷中に割れてしまったため、残留応力を観察できた右半分における最大主応力度の値を用いている。

数値解析の結果と同様、馬蹄形方式の試験体 H-SN1、H-SN2 では馬蹄形のアニール域の外縁付近の、溶着線から離れた領域で 2 つの引張応力の山が見られ、分割停留方式の試験体 L-SA では試験体中央に向かってなだらかな台地状の引張応力の分布が観察された。また、馬蹄形方式＋分割停留方式の試験体 H-SA1、H-SA2 も馬蹄形方式の試験体と同様の場所に引張応力のピークが見られたが、馬蹄形方式と比べ上昇は緩やかであった。このことから、奥行方向に連続するアニール域を断続的に分割する手法は、溶着線から離れた場所においても引張応力の増大を抑制する効果があることが示された。

また、馬蹄形方式の H-SN2 では、馬蹄の端部のアニールを行う段階（サイドアニール）において H-SN1 よりも軟化幅が大きくなるよう温度保持を行った。しかし、明確な軟化幅の差を小型炉の操作で再現できなかったためか、両試験体の最大主応力度の分布に大きな違いは見られなかった。

馬蹄形方式＋分割停留方式の試験体 H-SA1、H-SA2 は馬蹄形のアニール域の分割にあたり異なる冷却方法を用いたが、安定した冷却を行うことができず、表 4.7 に示すように、両試験体ともに意図した温度分布操作の再現度が低く、アニール時の温度分布のばらつきが大きくなった。しかしながら、最大主応力度の分布は両試験体で似ており、アニール時の 20°C 程度の温度変動の残留応力への影響は小さい可能性がある。

続いて、ガラス板全体で見た時の各試験体の引張応力の最大値に着目する。各試験体の最大主応力度（引張）の最大値と最小主応力度（圧縮）の絶対値の最大値を図 4.20 に示す。割れの原因となる最大主応力度は、分割停留方式の試験体 L-SA が最も小さく、次いで馬蹄形に分割停留方式を適用した H-SA1 が小さい値となった。残りの H-SN1、H-SN2、H-SA2 はいずれも 30 N/mm² 前後でありあまり差がなかった。既往研究で奥行寸法が 150 mm を超える試験体ではすべて徐冷終了前の段階で割れが発生していることを踏まえると、本実験での試験体は H-SA2 を除き徐冷終了前には割れていないため、いずれの温度分布操作も多少は残留応力低減の効果があるといえる。特に、L-SA は最大主応力度が 11.8 N/mm² であるが、これは既往研究で溶着した奥行 150 mm の試験体のうち最も残留応力の小さかった（^[1]中の試験体 LG-5）の最大主応力度 12.1 N/mm² と同じオーダーである。ここで残留応力は奥行寸法に従って大きくなることを考慮すると、最大主応力度は、何も温度操作を施さない場合と比較して大幅に低減されたと考えられる。

以上より、残留応力を低減する温度分布操作方法としては、馬蹄形方式、馬蹄形方式＋分割停留方式よりも分割停留方式が有効であることが確かめられた。

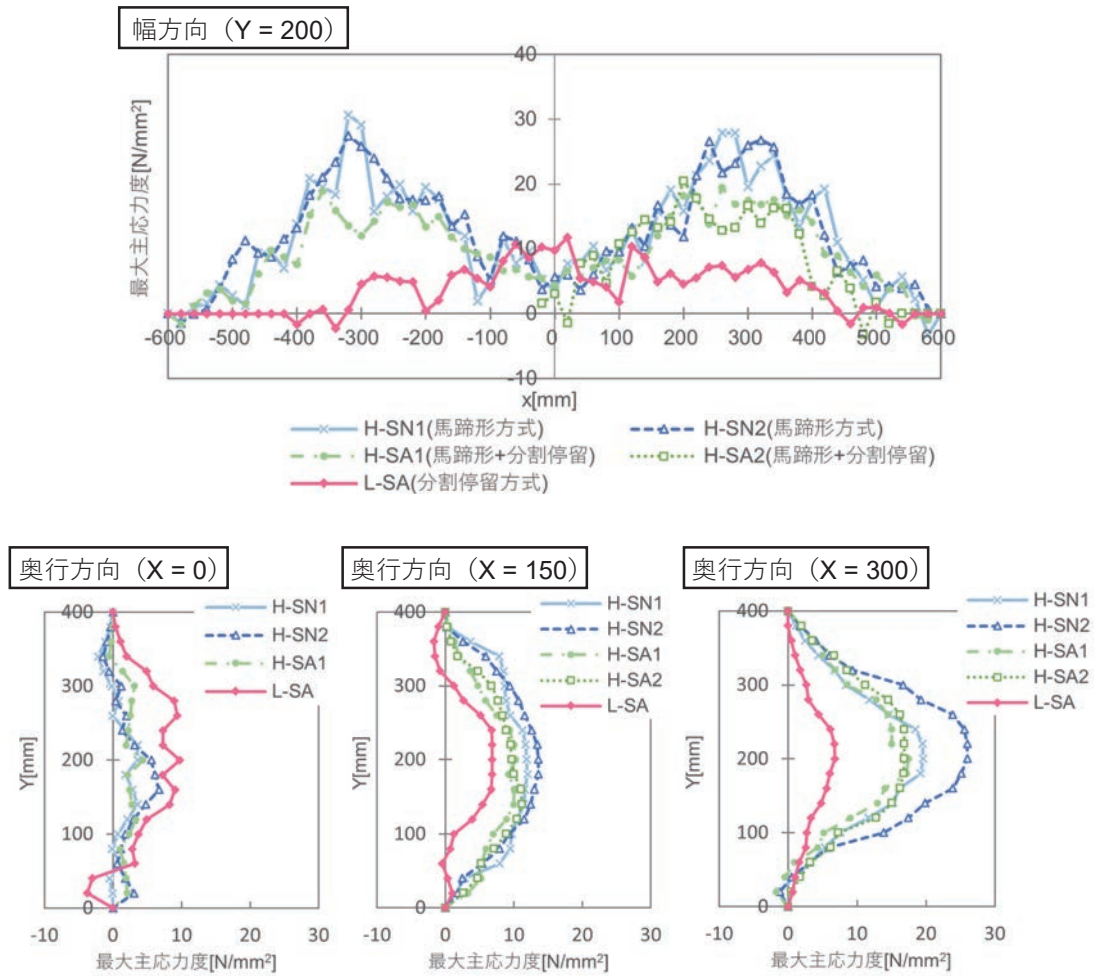


図4.19: 各試験体の最大主応力度（引張）分布

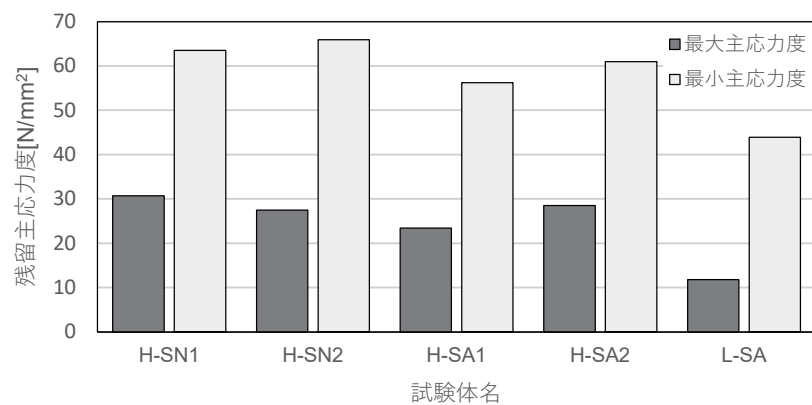


図4.20: 各試験体の主応力度比較

4.5.3 遅延割れの生じる残留応力の値

冷却が終了しガラス板の温度が常温に戻った後で、ガラスが残留応力に耐えきれなくなり発生する割れを遅延割れと呼ぶ。本実験では H-SN1 の左側、H-SN2 の左側、H-SA2 の右側で、溶着終了後 5～7 日後に母材中央付近から遅延割れが発生した。徐冷終了から 2 日以内に試験体の残留応力観察を行っているため、遅延割れした試験体の割れる前の最大主応力度は算出してある。割れた試験体において、観察した遅延割れの起点と算出した最大主応力度のピークの地点は近接していることが確認できた。遅延割れのあった試験体は馬蹄形方式もしくは馬蹄形方式に分割停留方式を適用したものであるため、主応力場を見ると溶着線付近の応力は小さく、左右の母材で主応力が独立して生じている傾向がある。そこで各試験体を左右の母材に区別して捉え、最大主応力度と遅延割れ発生 の関係を明らかにする。

図 4.21 に各試験体の左右の母材別の最大主応力度と遅延割れの有無を示す。最大主応力度 $27\sim 28\text{ N/mm}^2$ を境界として遅延割れ発生の有無が決められている。よって、溶着したガラス板の最大主応力度が 27 N/mm^2 以下であれば遅延割れは生じないといえる。ただし、左側で遅延割れが発生した試験体 H-SN1、H-SN2 は右側では遅延割れは生じていないが、試験体の片側が割れることによる応力の解放が反対側の残留応力にも働いたため、本来遅延割れの生じる最大主応力度から低下し割れが生じなくなったという可能性も考えられる。

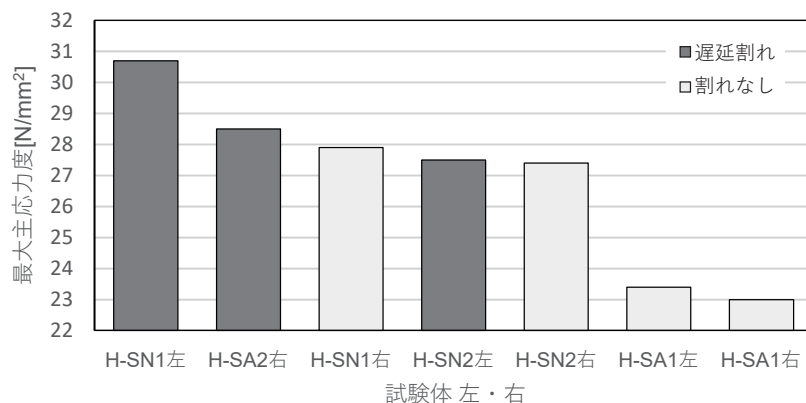





図4.21: 試験体母材別の最大主応力度と遅延割れ有無

4.5.4 溶着部の透明度

既往研究ではガスバーナーと電熱線ヒーターを用いて局所加熱を行った際の、失透を避けられる最高加熱温度と保持時間の検討がなされている^{[12][3]}。本論文では局所加熱にハロゲンポイントヒーターを用いたときの溶着部の透明度を高める方法について検討を行った。

局所加熱によりガラスが溶融した状態で一定時間保持しておく、溶融したガラスが接地しているアルミナ板に張り付いてしまうことがある。あらかじめアルミナ紙をガラスとアルミナ板の間に敷いておくとガラスとアルミナ板の一体化を避けられることが分かっている。アルミナ紙の有無とハロゲンポイントヒーターを動かす速度が異なる条件における溶着部の様子を表 4.9 に示す。

表4.9: 溶着部の透明度

試験体名称	H-SN2	H-SA1	L-SA
ヒーター移動速度	15 mm / 5 min	15 mm / 5 min	20 mm / 5 min
アルミナ紙	有	無	無
溶着部写真			

ガラス板の下にアルミナ紙を敷きヒーターを 5 分おきに 15 mm ずつ動かして溶着を行った試験体 H-SN2 は、アルミナ紙を敷かなかった他の 2 体の試験体よりも溶着線が明確に視認できた。これは、ハロゲンポイントヒーターでガラス板に光を照射している際に、ガラスの下がアルミナ板であれば反射がよく起こり加熱効率が高いが、アルミナ紙では反射率が小さく、加熱が不十分であったためカレットの一部が溶け残ったことが原因だと考えられる。

試験体 L-SA ではハロゲンポイントヒーターを 5 分おきに 20 mm の速度で動かしたが、5 分おきに 15 mm ずつ動かした試験体 H-SA1 と比較し、溶着部の透明度は多少低下した。なお、アルミナ紙を敷いていない H-SA1、L-SA とともに、アルミナ板との溶着は見られなかった。

以上より、溶着部の透明度を高くするには、ガラス板を直接アルミナ板の上に設置し、ハロゲンポイントヒーターを 5 分おきに 15 mm ずつ動かすことが適切であるといえる。透明度の高かった H-SA の溶着部の拡大写真を図 4.22 に示す。



図4.22: 溶着部の様子

第 5 章

走行型炉の開発

現場で並べられた 2 枚の大判のガラス板上を、溶着線に沿って移動しながら逐次的に目地部を溶着していく走行型炉の構成案が張によって提案されている^[3]。本章では、既往研究や小型炉の実験で得られた知見から、張の走行型炉案の一部を更新し、走行型炉を製作した。さらに、製作した走行型炉を用いて実際に溶着実験を行い、装置の改善を行った。

5.1 走行型炉の設計

5.1.1 走行型炉の全体構成

走行型炉は、ガラスの加熱・冷却を行う機能を持つ炉本体と、炉が溶着線に沿って移動するための駆動部から構成される。張の走行型炉の案では溶着するガラス板を挟むように上下の炉が同期を取りながら溶着していく構成であったが、本研究では断熱ボードの上に溶着するガラス板を設置し、その上を走行型炉が通過していく形式とした（図 5.1）。

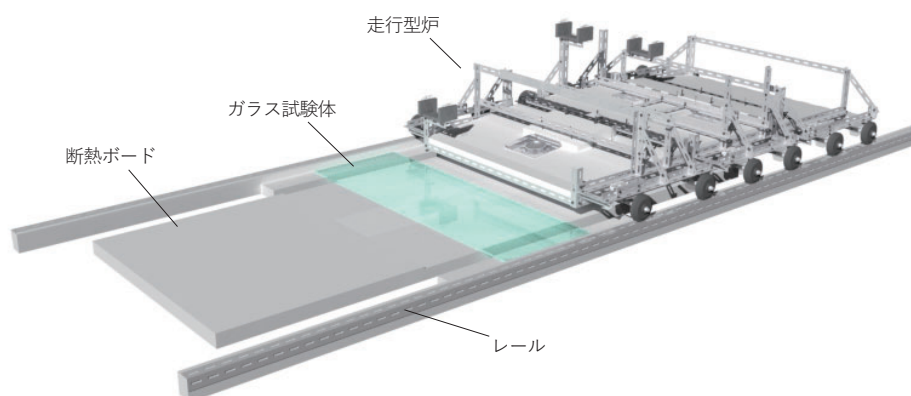


図5.1: 走行型炉-全体図

5.1.2 炉本体の設計

既往研究では、炉の本体はドームなどでの曲面ガラスの溶着にも対応できるよう、複数のユニットに分割し、ユニット間に回転機構を設けて走行型炉全体が曲がれるような構成が提案されている。本研究でもこれに倣い、炉本体を、予熱・局所加熱の機能を担う予熱・局所加熱ユニット、アニールを行うアニールユニット、徐冷を行う徐冷ユニットの3つのユニットで構成した(図5.2)。熱工程のうち急冷段階はハロゲンポイントヒーターの特性上短時間で行われるため急冷用のユニットは設けていない。

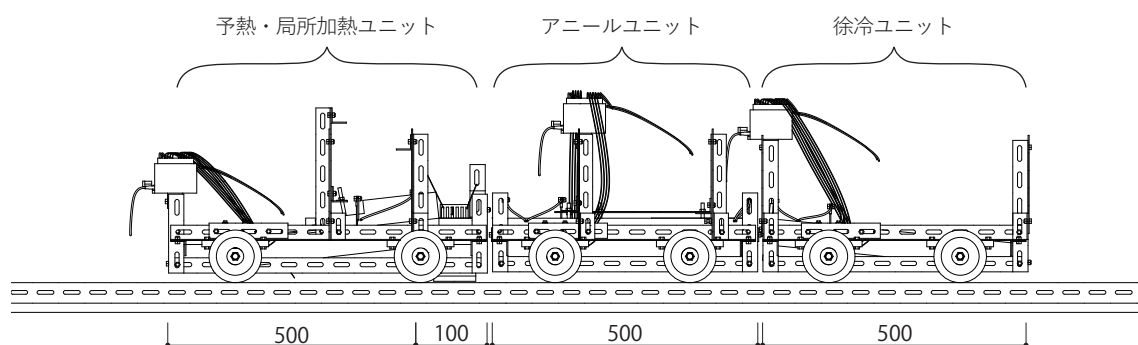


図5.2: 走行型炉-ユニット構成

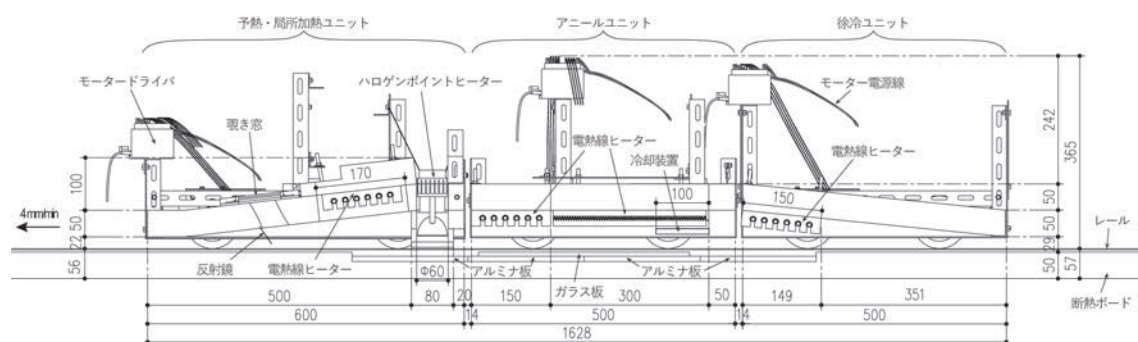


図5.3: 走行型炉-奥行方向断面図

走行型炉の奥行方向の断面図を図5.3に示す。各ユニットの奥行方向の寸法は、走行型炉の走行速度 V に各熱工程に要する時間をかけた値におおよそ定まる。ただし、ヒーターや断熱ボードなどの炉の構成部品の納まり上、多少異なる。4章の小型炉の実験で、ハロゲンポイントヒーターによる逐次的な加熱のペースを5分ごとに15 mmもしくは20 mmとしていたが、ここでは後者の速度で走行型炉を動かすこととする。すなわち $V = 4 \text{ mm/min}$ である。各熱工程に要する時間は、既往研究^[3]と小型炉での実験を参考に定めた。各熱工程にかかる時間と、熱工程に対応する各ユニットの奥行方向寸法を表5.1にまとめる。徐冷段階では奥行方向寸法は本来2 m程度必要である。しかし、実験の都合上、徐冷ユニットが試験体上部に達した時点で走行を停止し、その状態で常温まで試験体を冷却するとし、奥行方向寸法を500 mmに抑えた。

各ユニットの幅寸法は、張の案と同様加熱範囲が900 mmとなるよう設計した。試験体上に設置する熱電対と干渉しないよう、炉の周縁部とガラス面の間に25 mmの隙間を設けた。加熱効率を上げるためには炉内の

表5.1: 各熱工程に要する時間と各ユニット奥行き方向寸法

熱工程	必要な時間 [min]	奥行き方向寸法 [mm]
予熱・局所加熱	110, 10	500 (予熱部), 100 (局所加熱部)
アニール	120	500
徐冷	500 (70°C まで冷却する場合)	500

熱い空気を逃がさないようこの隙間を小さくすることが望ましいが、炉の内外で急激な温度差が生じると一時歪により割れる可能性があるため注意が必要である。本研究で溶着を試みるガラス板の幅方向の寸法は 600 mm であるが、走行型炉のトレッドはガラス板 2 枚分の幅より大きいため、各ユニットは試験体より外側に設けたレールの上を走行することとした。例としてアニールユニットの幅方向断面を図 5.4 に示す。

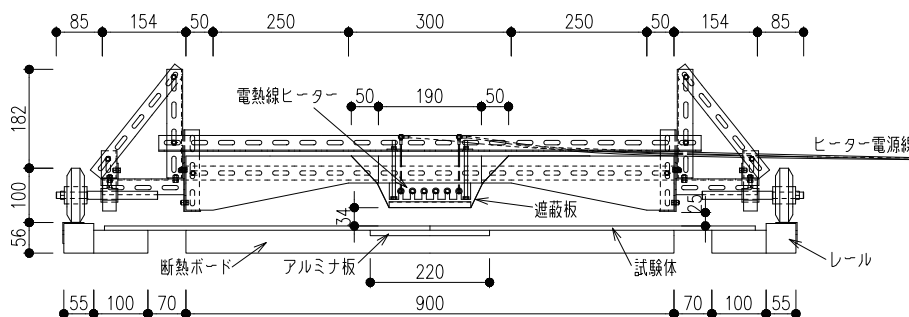


図5.4: アニールユニット-幅方向断面図

各ユニットの炉内温度分布の制御は、ヒーターの配置・出力調整と炉内空間の形状操作により行うことができる。ガラス面において、ヒーター直下の部分は主にヒーターからの輻射熱伝達によって加熱される。その他の部分は主に加熱された空気からの対流熱伝達によって加熱される。よってヒーター直下と周縁部の温度勾配が緩やかになるようにするには、炉の周縁部からヒーター設置部に向かって徐々に炉内空間が大きくなるような形状にすることが有効であると考えられる。各ユニットの詳細を以下に示す。

I. 予熱・局所加熱ユニット

予熱・局所加熱ユニットの図面を図 5.5 に示す。

予熱・局所加熱ユニットは進行方向に向かって前方の予熱を担う予熱部、後方の局所加熱を担う局所加熱部からなる。予熱部はユニットが試験体上方を走行していくにつれ温度が常温から 550°C まで緩やかに上昇するような温度分布を再現する必要がある。そこで試験体のある点の温度が、予熱部のヒーターが真上に差し掛かった時点で 550°C に達することを想定し、予熱部後方に電熱線ヒーターを設置した。さらに奥行・幅両方向にヒーターに向かって炉内空間が大きくなるよう傾斜を設けた。

局所加熱部は予熱部で 550°C に達したガラスを、温度が下がることなく 800°C 付近まで急速に加熱することが要求される。局所加熱にはハロゲンポイントヒーターを用いるが、ハロゲンポイントヒーターの伝熱形式はほぼ輻射熱伝達による加熱のみで照射範囲外の部分は加熱できないという特徴がある。そのため予熱部の電熱線ヒーターとハロゲンポイントヒーターの間隔は 30 mm 程度に抑えた。

予熱・局所加熱ユニットには局所加熱時にハロゲンポイントヒーターの焦点が溶着線からずれていないか確

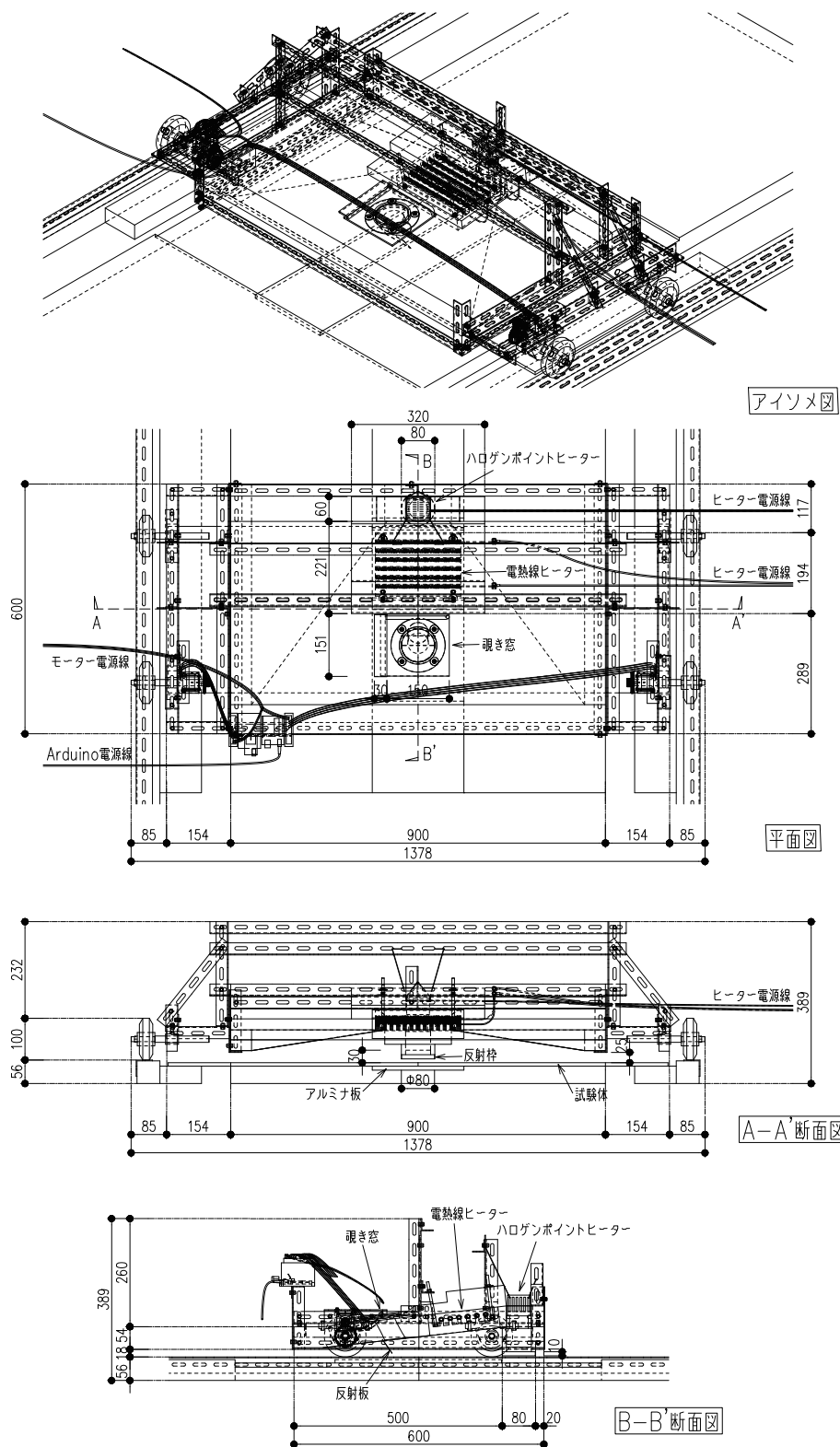


図5.5: 予熱・局所加熱ユニット-図面

認できるよう、覗き窓を設けた。覗き窓は予熱部中央付近に位置し局所加熱部から離れているが、炉内にステンレスの反射板を設置し鏡として使用することで局所加熱の様子を観察できる仕様とした（図 5.6）。



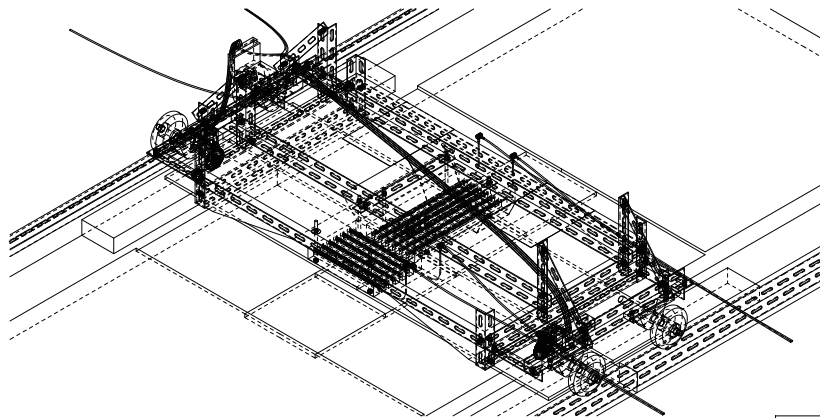
図5.6: 覗き窓から見た様子

II. アニールユニット

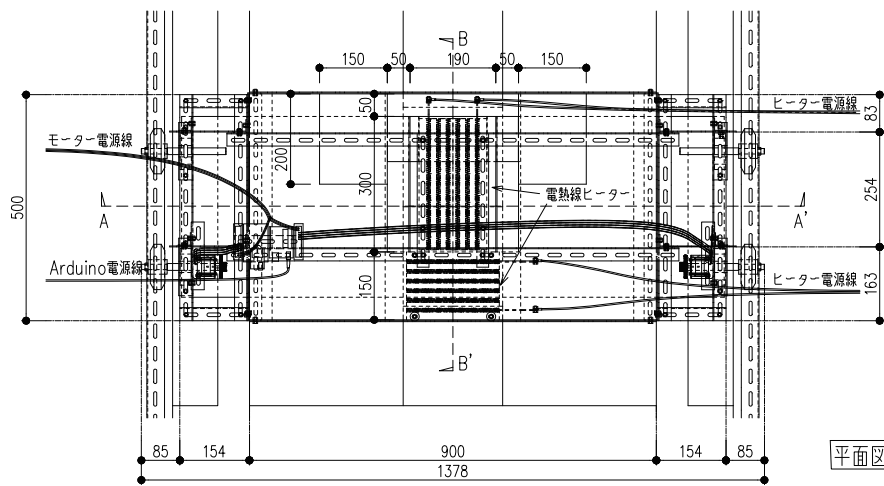
アニールユニットの図面を図 5.7に示す。アニールユニットで再現を試みる温度分布は、小型炉の実験で最も残留応力の低減が行われた L-SA の試験体と同様とした。すなわち、初めの 60 分間で溶着線を中心線とする帯状の領域にアニールを行い、次の 60 分間で奥行き方向にアニール域を分割するように溶着線を中心部を転移点から少し低温にした状態でアニールを行う設計とした。溶着部一帯を 550℃ に温度保持するために電熱線ヒーター 2 台を炉内中央部に並べた。温度勾配を緩やかにするため、外縁からヒーター設置部に向かうにつれ炉内空間が大きくなるよう幅方向に傾斜を設けた。局所加熱終了後、ガラスの温度が転移点以下まで下がることなくアニール工程に移行させるため、ユニット前方の縁にヒーターの端が位置するようにした。また、中央で分割されたアニール域を再現するために局所的に冷却を行う装置を設置した。冷却装置の詳細については後述する。

III. 徐冷ユニット

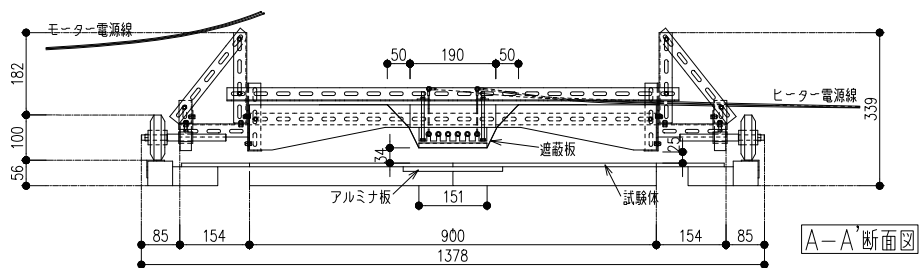
徐冷ユニットの図面を図 5.8に示す。徐冷段階ではアニール工程を経て 550℃ の温度であるガラスを、急な温度勾配が生じることなく常温まで冷却することが求められる。そこで、ユニット前方に電熱線ヒーターを設置し、ヒーターの出力をアニールユニットよりやや小さめに設定し、試験体上方のユニットがアニールユニットから徐冷ユニットに切り替わる際に連続的に冷却が行われるようにした。また、ユニット内の温度勾配が緩やかになるよう、奥行・幅両方向にヒーターに向かって炉内空間が大きくなるよう傾斜を設けた。



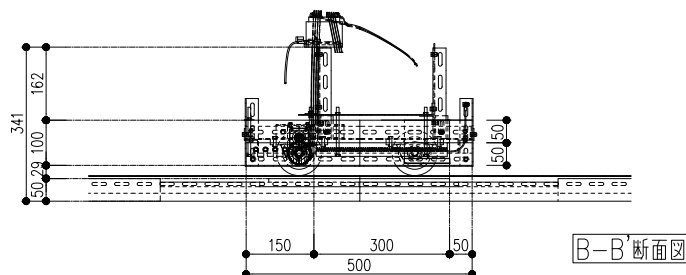
アイソメ図



平面図

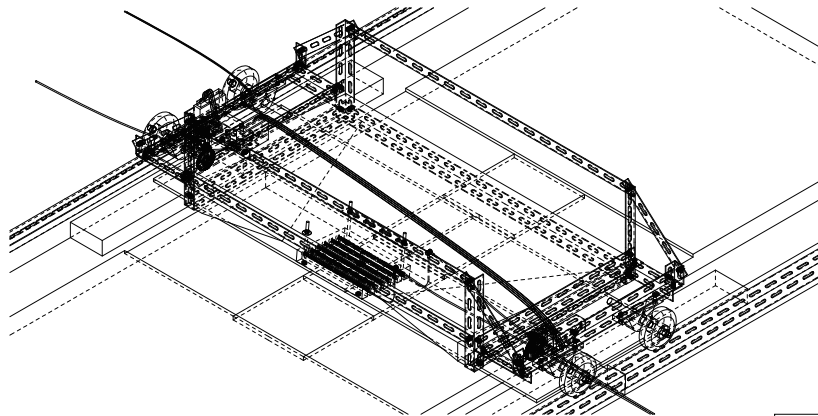


A-A'断面図

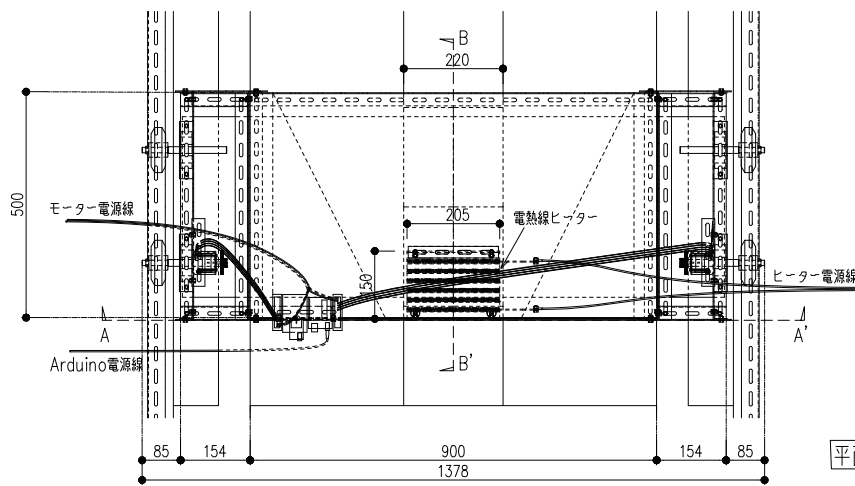


B-B'断面図

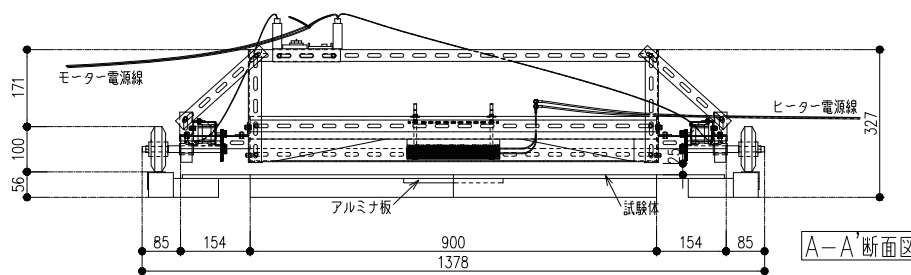
図5.7: アニールユニット-図面



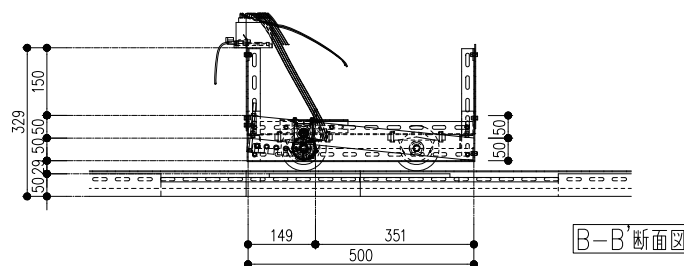
アイソメ図



平面図



A-A'断面図



B-B'断面図

図5.8: 徐冷ユニット-図面

5.1.3 駆動部の設計

駆動部は、炉本体を支持するフレームと、車輪を回転させるモーター類、PCからの無線通信による指示に従いモーターの制御を行う制御基板から構成される（図 5.9）。制御基板は熱に弱いため、ユニットのヒーター設置部から離れた位置に設置している。

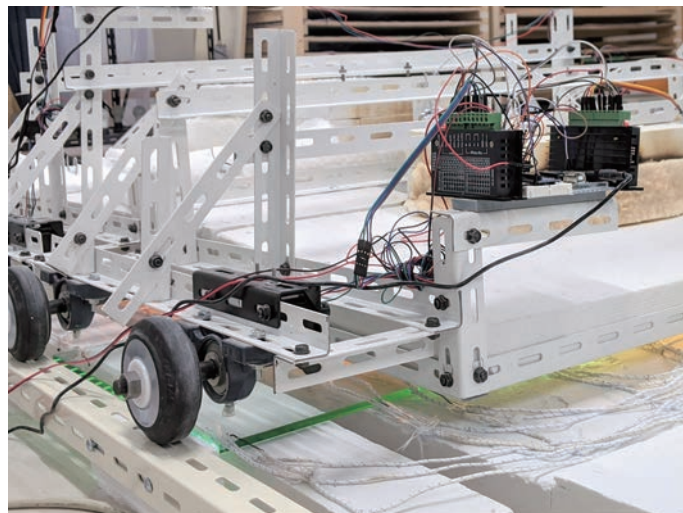


図5.9: 駆動部の様子

走行型炉は毎分 4 mm 程度の速度で動かすため、使用するモーターは回転速度を高精度に制御できる必要がある。そこで本装置では、電力信号を与えることで正確に回転し続けるステッピングモーターを採用した。ステッピングモーターは 3D プリンタなどの精度が要求される機械によく用いられている。本装置で使用したステッピングモーターの諸元を表 5.2に示す。

表5.2: ステッピングモーター詳細

型式	NEMA17
メーカー	Quimat
種類	バイポーラ型
軸径 [mm]	5
軸長 [mm]	20
ステップ角度 [°]	1.8
ステップ精度 [%]	5
保持トルク [N·m]	0.59

表5.3: モータードライバ詳細

型式	TB6600
メーカー	DFRobot
入力電流 [A]	0 - 5.0
出力電流 [A]	0.5 - 4.0
マイクロステップ	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32

ステッピングモーターはモータードライバを経由してマイクロコンピュータで制御する。本装置ではモータードライバに TB6000、マイコンボードに Arduino UNO を使用した。制御方法の詳細については後述する。モータードライバの諸元を表 5.3に示す。モーターは各ユニットの前輪に設置した。モーター回転軸に取り付

けたギアと車軸側のギアをかみ合わせることでステッピングモーターの動力を車輪に伝達している（図 5.10）。

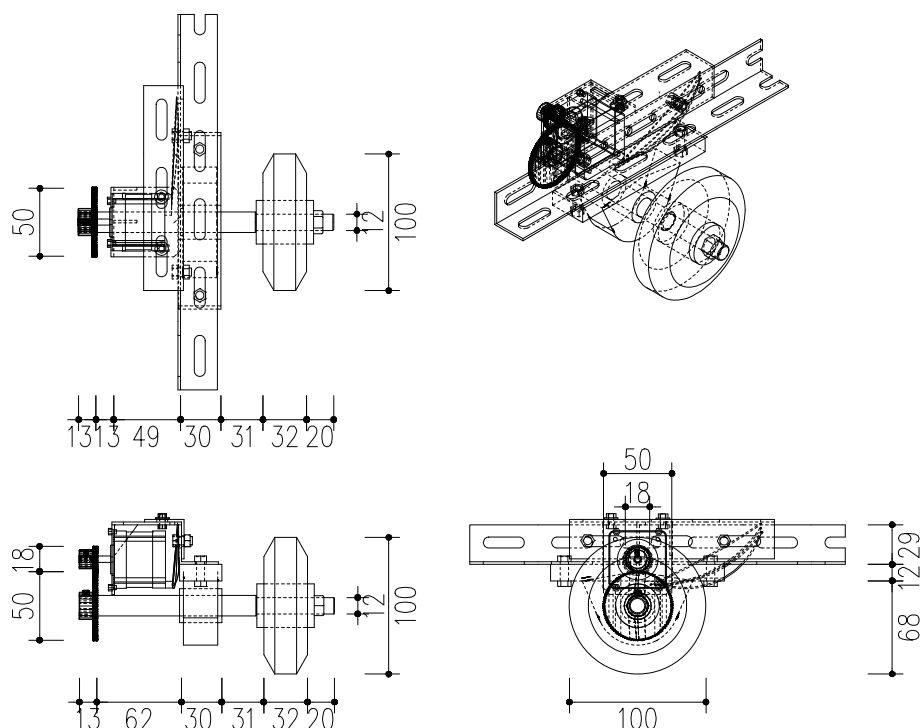


図5.10: 駆動部-図面

5.1.4 制御システム

現場で大判のガラス板を溶着することを想定すると、走行型炉の速度制御を遠隔で行えることが望ましい。よって無線通信によりパソコンからモーターの回転を操作できるシステムを設計した。走行型炉の制御は、無線モジュールを利用してパソコン、Arduino 間で通信を行う工程と、Arduino からモータードライバを介してステッピングモーターを制御する工程からなる。以下、各工程について述べる。

I. PC-Arduino 間無線通信

パソコン、マイコン間で行う無線通信規格の種類としては WiFi や Bluetooth が代表的であるが、本研究では複数台の機器と同時接続してのデータ送受信が手軽に行える ZigBee を採用した。また、ZigBee 規格に対応した無線モジュールとして XBee を使用した。XBee はセンサーネットワークの構築に使用されることが多いが、ステッピングモーターの遠隔制御に用いる方法も提案されている^[17]。本装置で用いた XBee の諸元を表 5.4 に示す。

XBee は通信を行うパソコン側とマイコン側に一台ずつ必要である。パソコンの USB ポートとの接続には USB インタフェース基盤（株式会社秋月電子通商製）を使用した。USB インタフェース基盤は接続ピンのピッチを 2 mm から 2.54 mm に変換するブレイクアウトボードとしても使える。そこでマイコン側では XBee を搭載した USB インタフェース基盤をブレッドボードに差し込み、Arduino ボードと配線することで接続した。それぞれの XBee の接続の様子を図 5.11、5.12 に示す。

表5.4: XBee 詳細

名称	XBee ZB (S2C)
メーカー	Digi International
データレート	RF250 Kbps、シリアル最大 1 MBps
室内/都市部レンジ	最大 60 m
室外/RF 見通しレンジ	最大 1200 m
周波数帯域	2.4 GHz
シリアルデータインタフェース	UART SPI



図5.11: PC 側 XBee

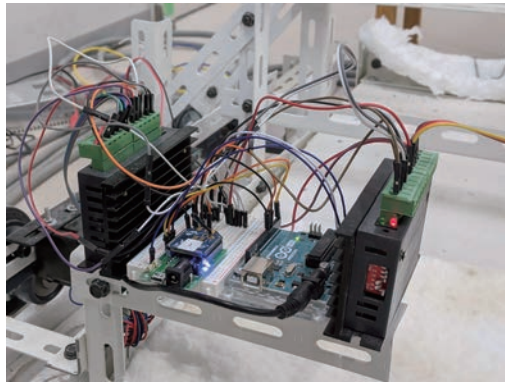


図5.12: Arduino 側 XBee

XBee を用いてネットワークを構築する際、それぞれの XBee には、コーディネーター、ルーター、エンドデバイスの 3 種類の役割のいずれかが割り当てられる。コーディネーターはネットワークの中にただ一つ存在し、ネットワーク形成やアドレス配布などを行う。ルーターは既存のネットワークへ参加し、情報の送受信を行える。離れているデバイス間の中継地点にもなる。エンドデバイスはルーターの機能縮小版であり、中継機能はないが、省電力である。本研究では、パソコン側の XBee をコーディネーター、マイコン側の XBee をルーターとした。ルーターの XBee は各ユニットに 1 台ずつ搭載されているが、同時に 3 台のユニットを走行させる場合でもコーディネーターとルーターが 1 対 1 の通信を行いルーター同士は直接通信しない。このネットワークポロジはスターネットワークと呼ばれる。走行型炉制御におけるスターネットワークを図 5.13 に示す。

XBee には「AT」と「API」の 2 つの動作モードがある。API モードはネットワーク内の任意のモジュール間で通信が即時可能であるなど XBee の持つ機能をフルに活用できるが、送信するすべてのデータを API フレームというフォーマットに収めなければならない、使用の難易度が高い。一方の AT モードは 1 対 1 通信に向いており、シリアル・ポートでユーザーが準備したデータを XBee を介してそのまま送受信できる透過モードと、AT コマンドというデータ列を用いて直接 XBee に対して設定確認や変更などを行うコマンドモードがある。ここでは AT モードの透過モードを使用した。各 XBee の設定と PC 側 XBee からのデータ送信はソフトウェア X-CTU、Arduino の設定はソフトウェア Arduino IDE によって行った。モーターの遠隔制御の方式としては、Arduino にあらかじめ、受信したテキストデータに対応するステッピングモーターの制御コードを書き込んでおき、X-CTU の画面上でテキストを入力すると、2 台の XBee を介してデータの送受信が行われ、ステッピングモーターが Arduino のプログラムに従った動きをする、という方式をとった。コーディネータ

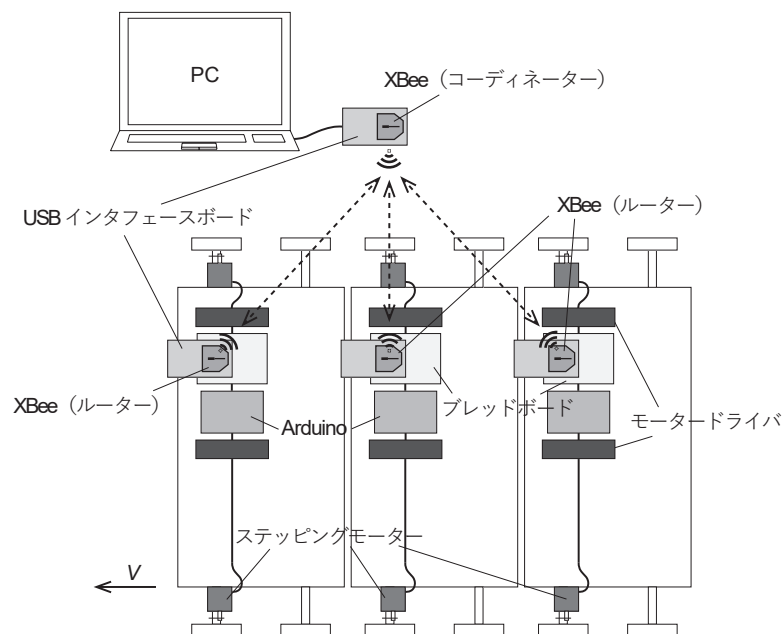


図5.13: 走行型炉の制御ネットワーク

ーから3台のルーターにデータを送信した際の X-CTU のウィンドウを図 5.14に示す。図中青文字がキーボードで入力してコーディネーターが各ルーターへ送信したデータ、赤文字が各ルーターがデータを無事受信できた際にコーディネーターに送るようあらかじめ設定しておいたデータである。3 台とも受信できていることが確認できる。

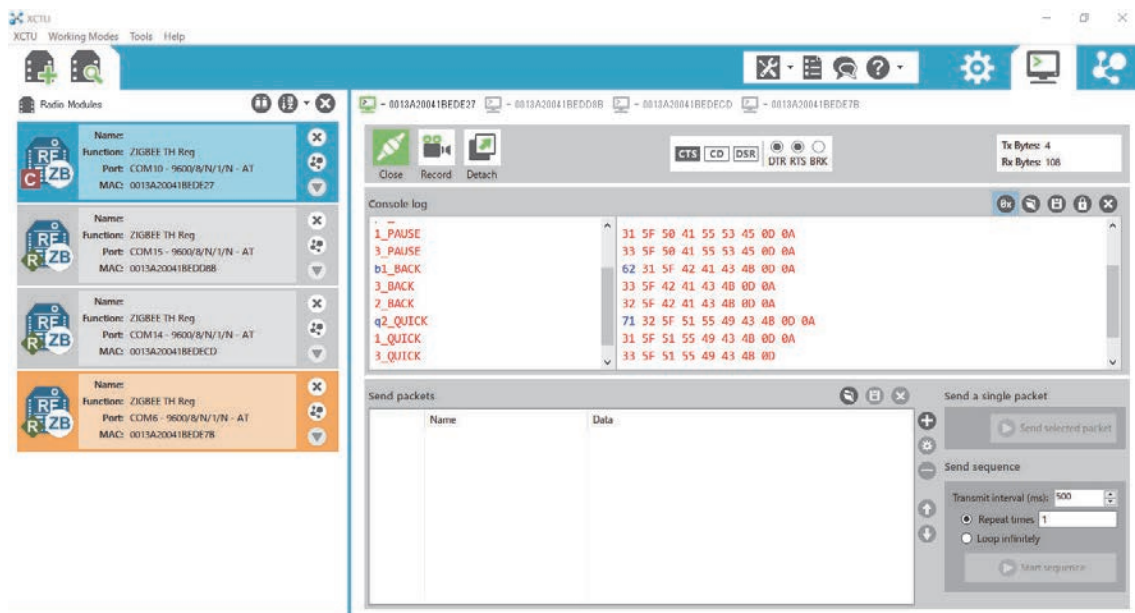


図5.14: X-CTU 画面でのデータの送受信の様子

II. Arduino によるステッピングモーター制御

ステッピングモーターは入力されたパルス数に応じたステップ角度で動く。使用しているステッピングモーターの基本ステップ角度は 1.8° であるが、マイクロステップと呼ばれる駆動方法を用いることでより細かいステップ角度で動かせる。ステッピングモーターに接続されたモータードライバでは、DIP スwitch の切り替えによりモーターのマイクロステップを設定できるが、ここではマイクロステップを設定できる最大値の 32 とした。ステップ角度は $1.8^\circ/32 = 0.05625^\circ$ となる。モータードライバは Arduino と接続し、Arduino からパルス信号を受け取る。各ユニットの 2 組のモータードライバ、ステッピングモーターを Arduino1 台で制御する。Arduino では、Arduino IDE を用いてパルスの時間間隔を設定することでモーターの回転速度を変更できる。Arduino とモータードライバ、ステッピングモーターの回路図を図 5.15 に示す。

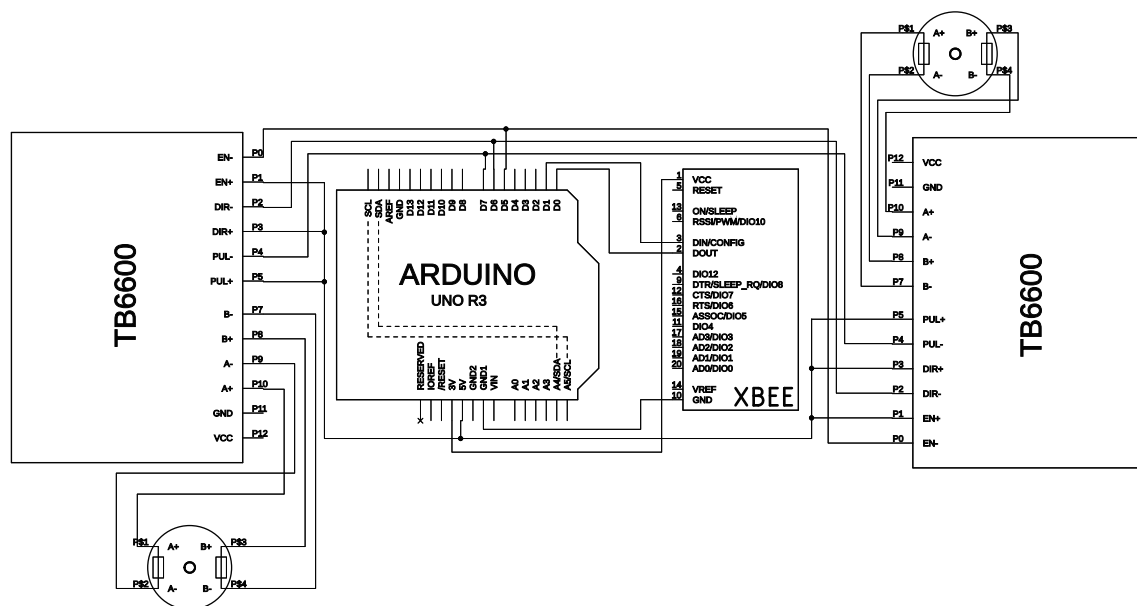


図5.15: 制御基板回路図

5.2 溶着実験

5.2.1 目的

製作した走行型炉（図 5.16）を用いて溶着実験を行い、設計意図通りの熱処理を行うことができるのか検証する。実験と設計の修正を繰り返しながら各ユニットの構成の改善を試みる。

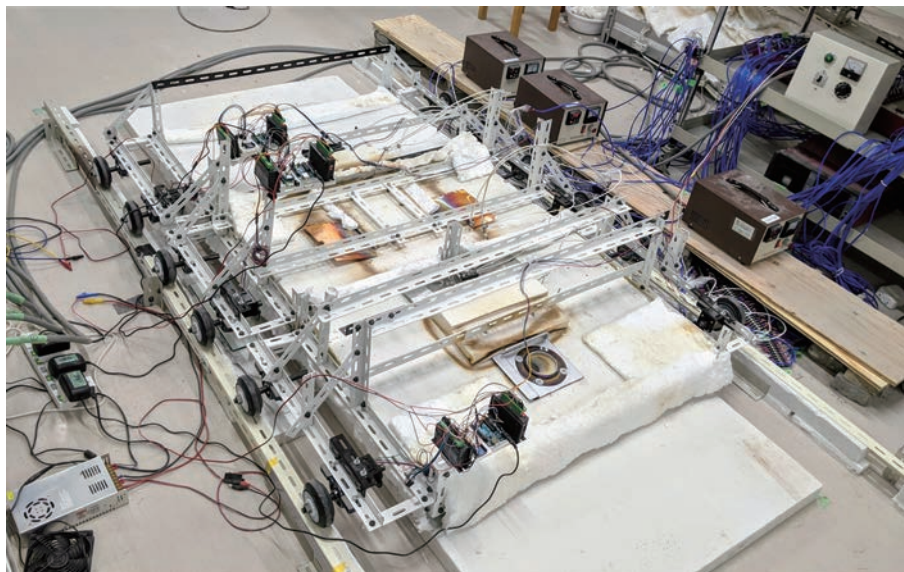


図5.16: 走行型炉

5.2.2 実験方法

セットアップ

本実験のセットアップの概要と写真をそれぞれ図 5.17、図 5.18に示す。断熱ボードの上に試験体を設置し、試験体の外側に設置されたレールの上を走行型炉が走行していく。本実験でのガラス板の寸法は小型炉の実験と同様、奥行 400 mm× 幅 600 mm（公称厚 8 ミリ）とした。ハロゲンポイントヒーターが通過する範囲の試験体の下にはアルミナ板を敷いた。ヒーター類、温度測定器は小型炉の実験と同じものを使用した。レールの長さの都合上、実験開始時から 3 つのユニットすべてをレールに配置しておくことはできないため、はじめは予熱・局所加熱ユニットとアニールユニットのみ配置した。この時点では予熱・局所加熱ユニットの先端がガラス板の縁に位置している。

溶着手順

走行型炉を 4 mm/min で走行させ、試験体に小型炉の実験と同様の熱工程で加熱・冷却を行う。主要な工程での走行型炉の奥行方向断面を図 5.22に示す。各ユニットが試験体上に通過し始める時点で、ユニットの炉内は意図した温度環境になっている必要がある。そこで電熱線ヒーターによる炉内空気の加熱には時間を要するため、各ユニットが試験体上に差し掛かる 100 分程度前にはあらかじめヒーターに電流を流し始めた。高温

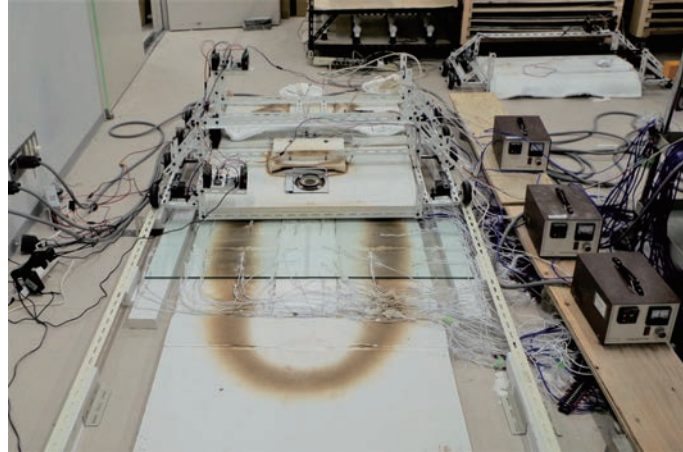


図5.18: セットアップ- 写真

II. 局所加熱

ハロゲンポイントヒーターの集光鏡がガラス板の縁に差し掛かる時点でハロゲンポイントヒーターに 36V の電流を流し始めた。ハロゲンポイントヒーターによる加熱は、特にガラスの縁部の開始時点ではガラスが溶けるまでに時間を要する。そのため、ヒーターの焦点が溶着の開始点に達した時点で炉の走行を 15 分程度停止し、ユニット側面の隙間から、カレットの溶融具合を確認しながら溶着を行った (図 5.19)。局所加熱中の炉の走行速度は、4 mm /min もしくは 3 mm /min とした。ハロゲンポイントヒーターの集光鏡がガラス板の上を通過し終わった時点でヒーターの電流を停止し、炉の走行速度を 4 mm /min とした。

局所加熱の途中、アニールユニットの末端とガラス板の縁の距離が 400 mm 程度になった時点で徐冷ユニットをアニールユニット後方に連結し、徐冷ユニットのヒーターに電流を流し始めた。

ハロゲンポイントヒーター使用時にはランプベース部が 180°C を超えないよう注意しなければならない。温度の監視はランプベース部近くに設置した熱電対によって行った。走行型炉では図のようにヒーターに備えつきのファンとは別にもう 1 台ファンを追加し、冷却を行った。これによりランプベース部の温度は 180°C 以下に抑えられることが確認できたが、念のためヒーター設置部周辺の断熱材を熱伝導性の良いアルミ板で覆い、保冷剤を設置しての冷却も追加で行った。

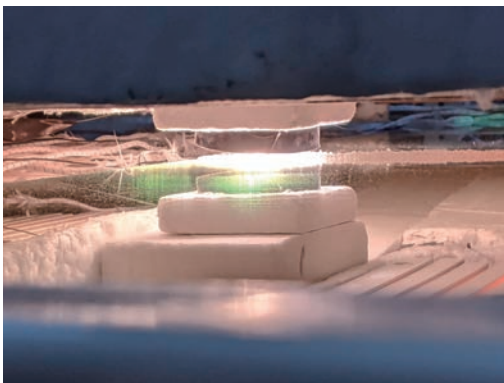


図5.19: 局所加熱の様子

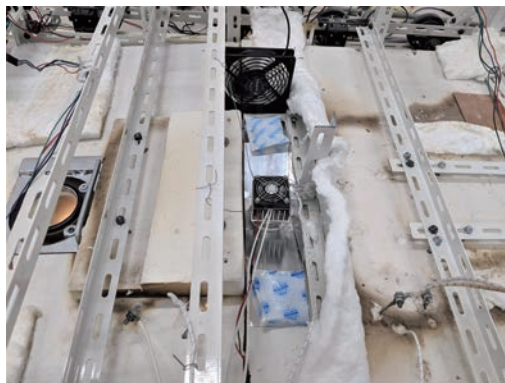


図5.20: ハロゲンポイントヒーターの冷却

III. アニール

アニール工程は溶着線全体を帯状にアニールを行う段階と部分的に低温域を設けてアニールを行う段階からなる。試験体のうちアニールユニットが差し掛かり始めた領域からアニール開始となる。初めの段階では冷却装置をアニールユニットの後方に待機させておき（図 5.21中①）、2 台の電熱線ヒーターの制御によって溶着線全体を 550℃ に温度保持した。続いて、アニールユニットの先端が試験体の前方の縁に達した時点で（図 5.21中②）、冷却装置を溶着線の中央まで移動させ、その場で 5 分間保持した（図 5.21中③）。以降、冷却装置が初期位置に戻るまでの 50 分間、冷却装置を 5 分おきに 20 mm ずつ炉の走行と反対方向に動かしていき、溶着線の中央付近が 520℃ 程度に保持されるようにした（図 5.21中④）。アニールユニット後方に戻った冷却装置はその後動かさず、炉の走行に合わせるものとした（図 5.21中⑤⑥）。

徐冷ユニットについては、アニール工程の進展に伴いユニットの先端が試験体後方の縁に差し掛かり始めた時点で、溶着線後方の温度が 520℃ 程度になるようヒーターの電流を調節した。

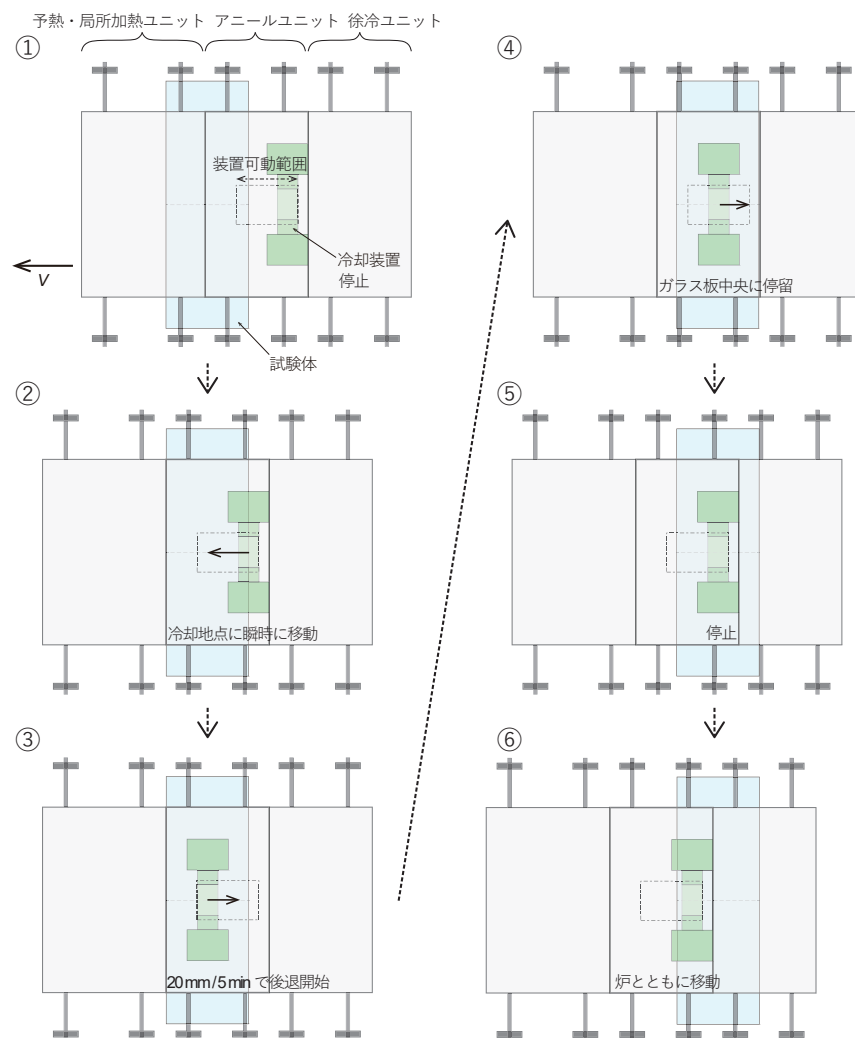


図5.21: 分割停留方式における冷却装置の動き

IV. 徐冷

試験体のうちアニールユニットが通過し終わった領域から徐冷工程へと移行していく。徐冷ユニットの先端が試験体前方の縁に達した時点で炉の走行を停止し、自然冷却を行った。冷却途中で一時歪による割れが生じるのを避けるため、電熱線ヒーターの出力を調節してガラス面内の温度差が大きくならないようゆっくりと温度を下げた。

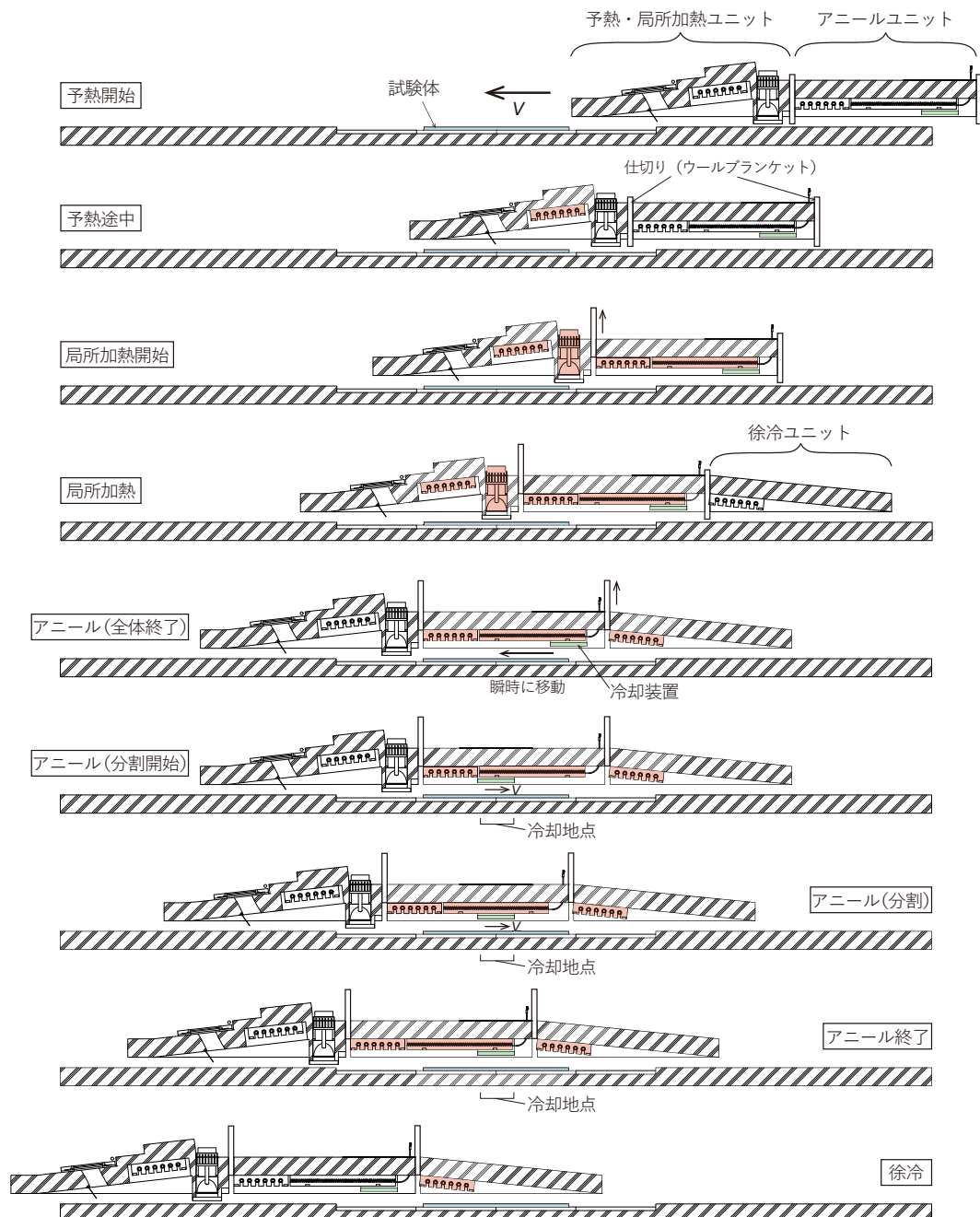


図5.22: 主要な工程での奥行方向断面

温度測定方法

ガラス板の温度の測定には、4章の小型炉の実験同様、熱電対を使用した。熱電対はガラス板の表面に設置する方式と、ガラス板の裏に設置する方式の2種類を行った。例として後者の方式での熱電対の配置図を図5.23に示す。図中Y正方向を走行型炉の進行方向としているが、ガラス板の手前側に、ユニットの事前加熱の温度監視のための熱電対を設置した（熱電対番号60, 62）。また、炉の内外の境界付近では加熱時に温度差が大きくなると思われるため、熱電対のピッチを50 mmとした。

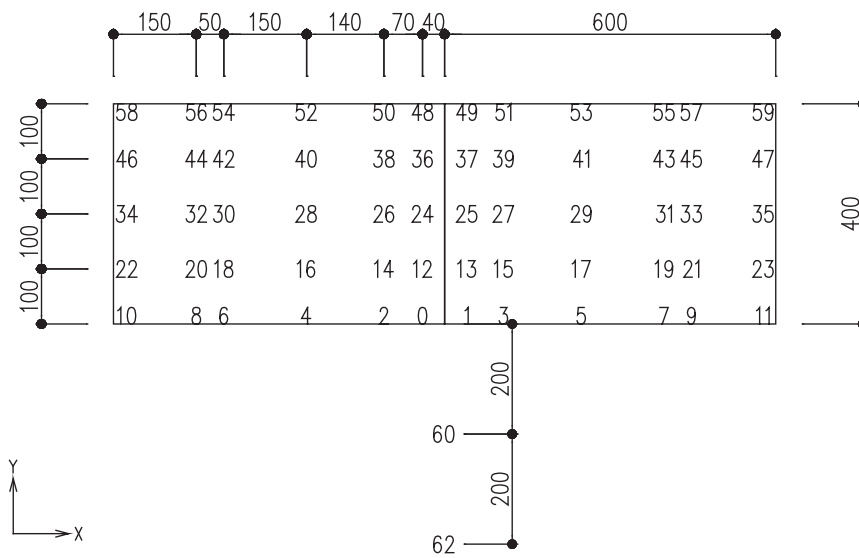


図5.23: 熱電対の配置例

5.2.3 主応力度算出方法

ガラスに割れが発生した時点での応力状態を知ることができれば、割れの原因を予測する手掛かりとなる。本実験では、3章の温度分布操作の予備検討で用いたものと同様、既往の数値解析アルゴリズム^[7]を用いて、割れが発生した時点での主応力場を算出した。入力値として与える温度データの、熱工程上におけるステップの刻み方の例を表5.5に示す。

表5.5: 熱工程上の温度取得時点

	段階	特記
1	開始	
2	予熱途中	ガラス板面最高温度 300°C
3	予熱終了	ガラス板面最高温度 550°C
4	局所加熱開始	溶着線開始点 (Y = 0) が温度履歴上最高温度
5	局所加熱途中 1	溶着線途中点 (Y = 100) が温度履歴上最高温度
6	局所加熱途中 2	溶着線途中点 (Y = 200) が温度履歴上最高温度
7	局所加熱途中 3	溶着線途中点 (Y = 300) が温度履歴上最高温度
8	局所加熱終了	溶着線終了点 (Y = 400) が温度履歴上最高温度
9	全体アニール開始	ガラス板面最高温度 570°C 前後
10	全体アニール終了	
11	溶着線中央冷却開始	ガラス板中央付近に相対的な温度低下
12	溶着線中央冷却終了	
13	溶着線手前縁冷却開始	ガラス板手前 (Y = 0) 側温度が 530°C 前後
14	溶着線奥縁冷却開始	ガラス板奥 (Y = 400) 側温度が 530°C 前後
15	徐冷途中 (割れ)	割れ音が観測された時点

5.2.4 実験内容

分割停留方式を走行型炉へ実装するにあたり、4種類の冷却機構を用いて溶着実験を行い、温度分布の再現程度を確認した。冷却方法としては伝熱形態として、炉内空気の対流熱伝達（convection heat transfer）に着目した冷却方式と、ヒーターからの輻射伝熱（radiation heat transfer）に着目した冷却方式に分けられる。用いた冷却方式に従って試験体名称を表 5.6 のように定める。各試験体における冷却機構の概要を表 5.7、5.8 に示す。

表5.6: 試験体一覧

試験体名称	冷却に利用した伝熱形態	試験体寸法	実験日
C	対流熱伝達	400 × 600 × 8	2020/10/8
R1	輻射伝熱	400 × 600 × 8	2020/11/16
R2	輻射伝熱	400 × 600 × 8	2020/11/30
R3	輻射伝熱	400 × 600 × 8	2020/12/22

試験体 C では、小型炉での分割停留方式の再現に用いた手法と同様、ガラス板の局所冷却を行う領域と炉外の空間を 0.5 mm 厚のステンレス板で仕切った。炉内の冷却装置下の空気の熱が薄いステンレス板を通して外気へと移動することで、冷却装置下の試験体の温度を下げるという仕組みである。5.2.2 で述べたように、炉の走行中にガラス板の同じ領域を冷却し続けるためには冷却装置は可動する必要がある。そこで冷却装置がアニールを行う電熱線ヒーター下部を通過する構成とした。

試験体 R1、R2、R3 ではアニールの温度保持の加熱効率を上げるため電熱線ヒーターとガラス板の間隔が C と比較し大幅に狭まっているが、これはヒーターからガラスへの伝熱形態として輻射伝熱の割合が大きくなることを意味する。また、平行な 2 固体面間の輻射伝熱を考えた際、平面間に薄い金属板を挿入すると、金属板の温度が表裏で等しいと仮定して 2 平面間の輻射伝熱量は、中間に板がないときの半分程度となることが知られている^[18]。そこで冷却方法としては、いずれの試験体においても薄い金属板などから構成される冷却装置をヒーター下部で稼働させ、輻射伝熱を遮る機構とした。

R1 では冷却装置は 0.5 mm 厚のステンレス板 1 枚からなる。ヒーターの輻射熱を受ける金属板の温度が時間経過とともに上昇するのを抑制するため、ステンレス板の一部を炉外に露出させて放熱を行う。放熱効率を上げるため、炉外部分の面積は炉内部分よりも大きくした。

R2 では R1 よりも放熱効率を上げるため、冷却装置にはステンレスの代わりに熱伝導率の高い銅板を用いた。ヒーターからの輻射伝熱による銅板自体の温度上昇を抑制するため、銅板の上に 10 mm 厚の断熱材を設置し、さらにその上を反射率の高いステンレス板で覆った。

R3 では電熱線ヒーターの配置上生じる加熱ムラを緩和するため、ユニット中央付近のヒーター下部に遮蔽板としてのステンレス板を設置した。これはステンレス板で覆われていないユニットの縁部に熱が優先的に伝わるようにし、ユニット縁部と中央部の温度差を和らげることを意図している。冷却装置はステンレス板と 10 mm 厚の断熱材からなるが、炉内の冷却装置の奥行寸法を、R1、R2 の 100 mm に対し 150 mm と大きくし、局所冷却の領域を広げることを試みた。

表5.7: 冷却機構 - C、R1

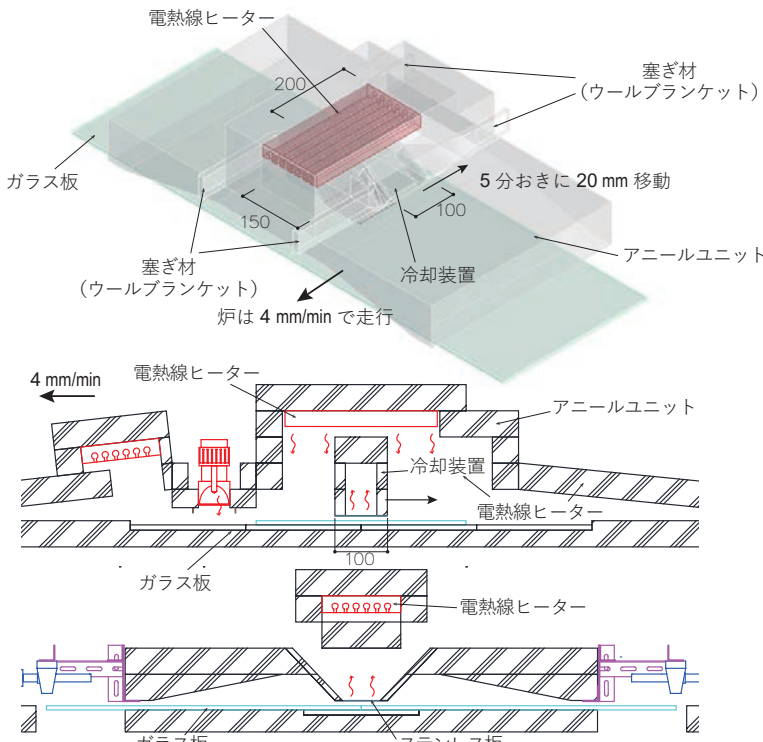
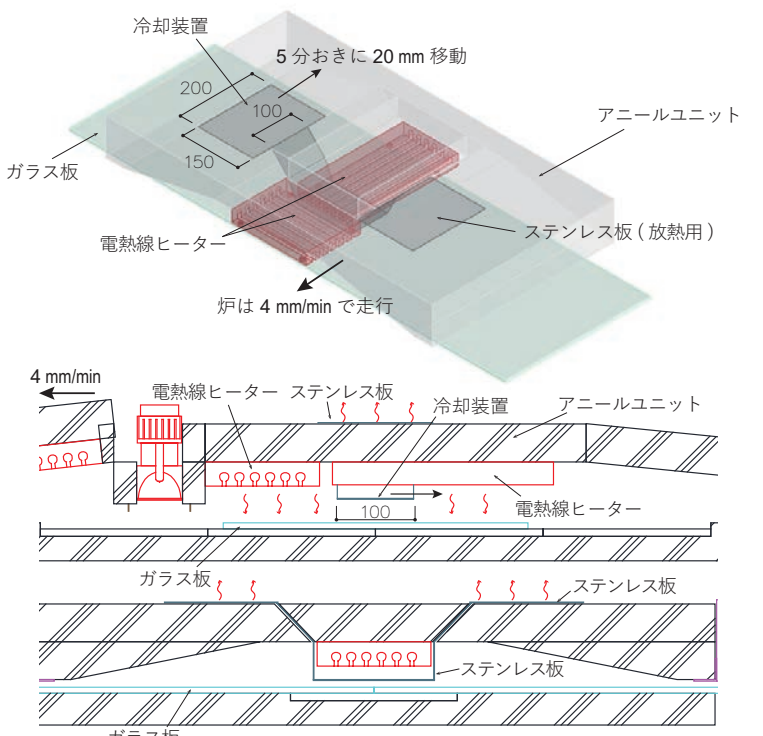
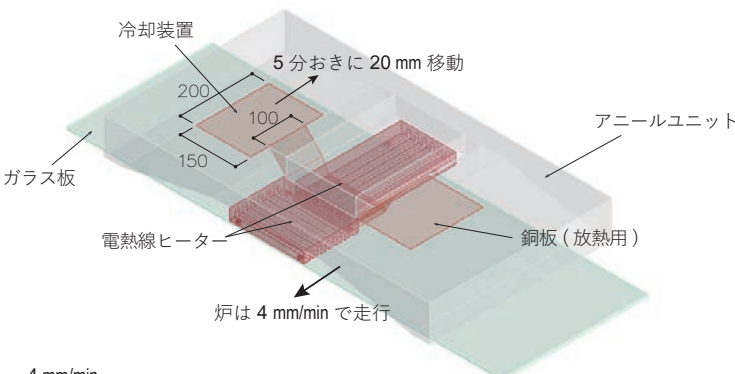
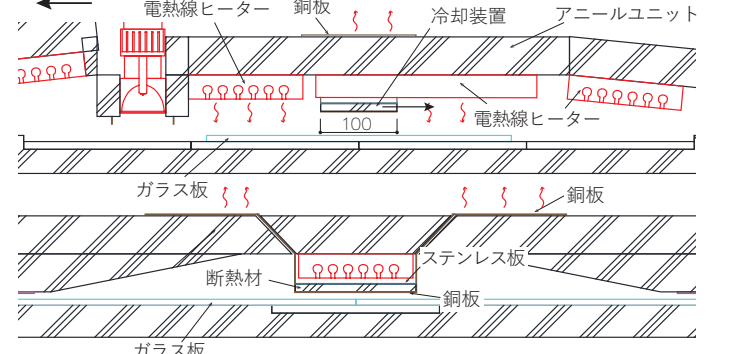
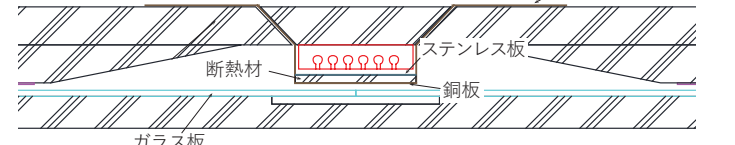
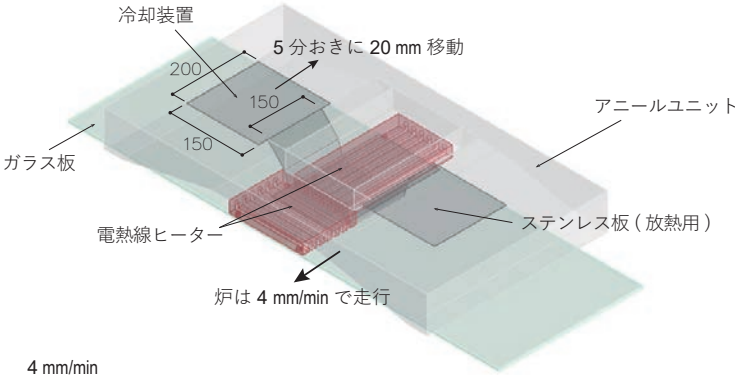
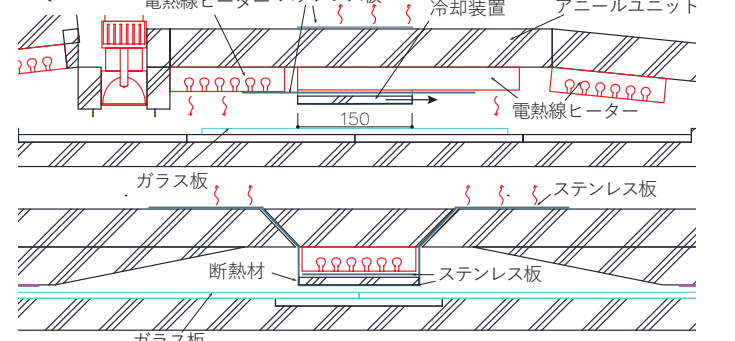
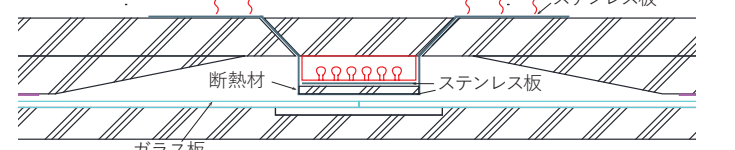
試験体名称	C
<p data-bbox="304 600 400 622">アイソメ図</p> <p data-bbox="284 875 421 898">奥行方向断面図</p> <p data-bbox="292 1048 413 1070">幅方向断面図</p>	
試験体名称	R1
<p data-bbox="304 1402 400 1424">アイソメ図</p> <p data-bbox="284 1686 421 1709">奥行方向断面図</p> <p data-bbox="292 1859 413 1881">幅方向断面図</p>	

表5.8: 冷却機構 - R2、R3

試験体名称		R2
アイソメ図		
奥行方向断面図		
幅方向断面図		
試験体名称		R3
アイソメ図		
奥行方向断面図		
幅方向断面図		

5.2.5 実験結果

各試験体の主な実験結果を表 5.9、表 5.10に示す。各試験体の詳細結果は付録に記載する。

表5.9: 実験結果 - C、R1

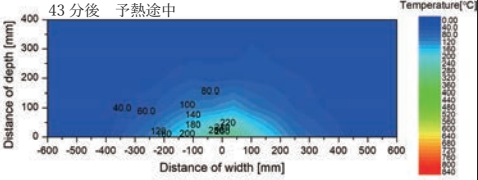
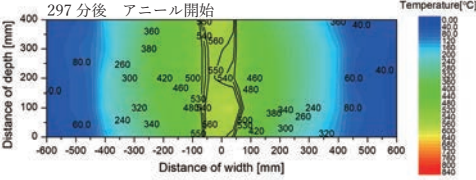
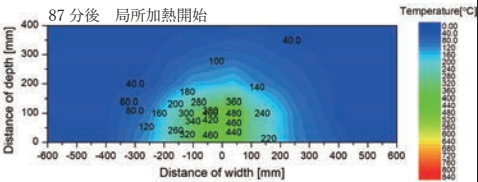
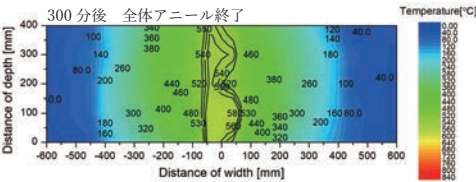
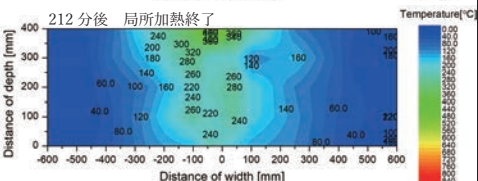
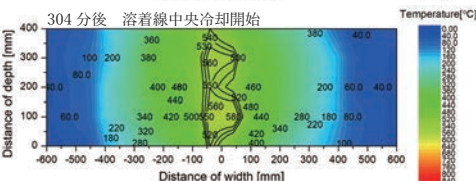
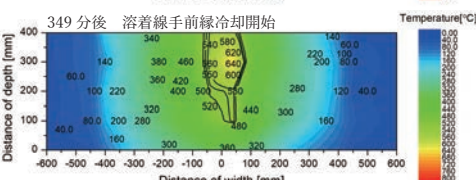
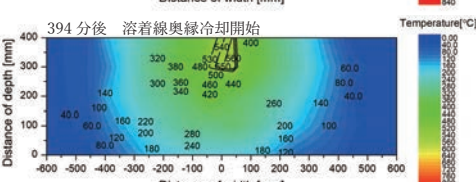



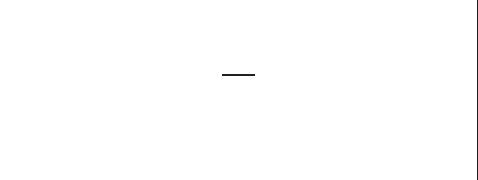
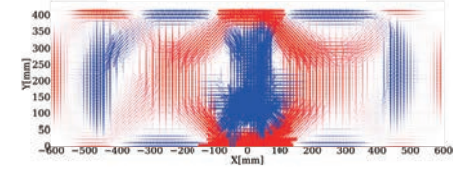
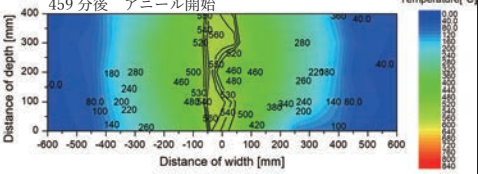
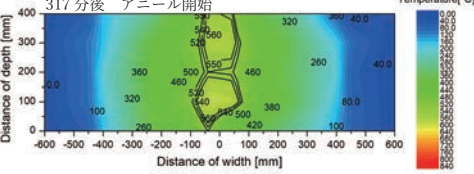
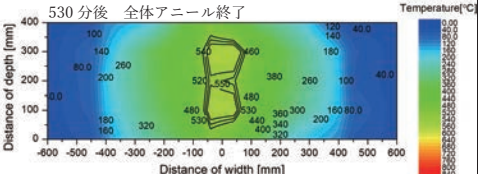
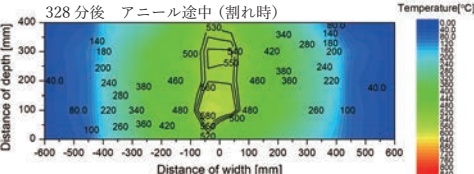
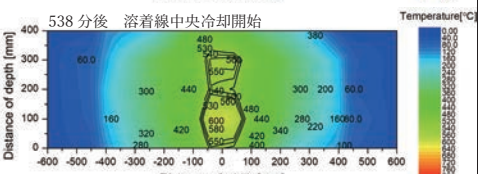
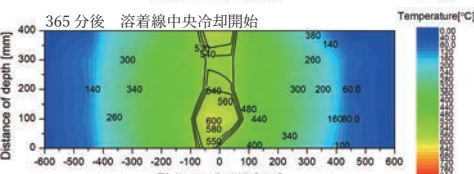
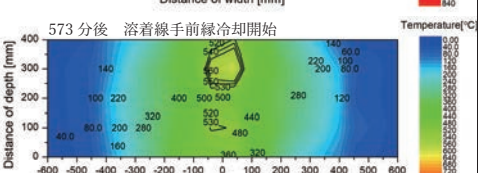
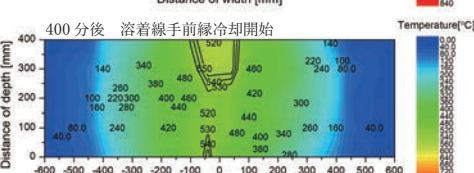
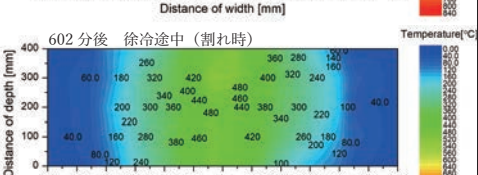
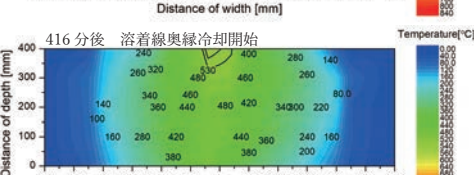


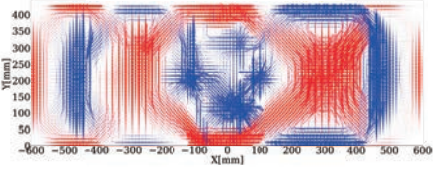
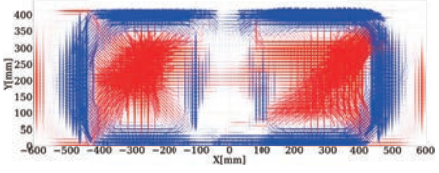
試験体名称	C		R1	
温度等高線図	43 分後 予熱途中 		297 分後 アニール開始 	
	87 分後 局所加熱開始 		300 分後 全体アニール終了 	
	212 分後 局所加熱終了 		304 分後 溶着線中央冷却開始 	
			349 分後 溶着線手前縁冷却開始 	
			394 分後 溶着線奥縁冷却開始 	
試験体写真				
割れた工程	局所加熱開始時		徐冷時（溶着線の一部溶着不十分）	
主応力場 (最初の割れ時) 				
	左	右	左	右
最大主応力度 [N/mm ²] (引張)	—	—	33.9 (X = 0, Y = 110)	47.3 (X = 40, Y = 200)
最小主応力度 [N/mm ²] (圧縮)	—	—	-69.7 (X = 0, Y = 0)	-64.5 (X = 10, Y = 0)

表5.10: 実験結果 - R2、R3

試験体名称	R2		R3	
温度等高線図	459 分後 アニール開始 		317 分後 アニール開始 	
	530 分後 全体アニール終了 		328 分後 アニール途中 (割れ時) 	
	538 分後 溶着線中央冷却開始 		365 分後 溶着線中央冷却開始 	
	573 分後 溶着線手前縁冷却開始 		400 分後 溶着線手前縁冷却開始 	
	602 分後 徐冷途中 (割れ時) 		416 分後 溶着線奥縁冷却開始 	
試験体写真				
割れた工程	徐冷段階		アニール段階、徐冷段階	
主応力場 (最初の割れ時) ← 引張 → 圧縮				
	左	右	左	右
最大主応力度 [N/mm ²] (引張)	33.1 (X = -460, Y = 190)	43.1 (X = 460, Y = 210)	51.4 (X = -240, Y = 390)	58.0 (X = 280, Y = 390)
最小主応力度 [N/mm ²] (圧縮)	-42.2 (X = 0, Y = 400)	-36.0 (X = 10, Y = 400)	-26.6 (X = -270, Y = 230)	-27.3 (X = 410, Y = 290)

5.2.6 考察

ガラス板表裏の温度の違い

ガラスの熱伝導率は常温で $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 程度と比較的小さい。走行型炉ではガラス板上方からのみヒーターで加熱しているため、表裏で温度差があると考えられる。そこで試験体 R1、R2 では3か所に試験体の表裏両方に熱電対を設置し、温度を測定した（図 5.24）。結果を図 5.25に示す。

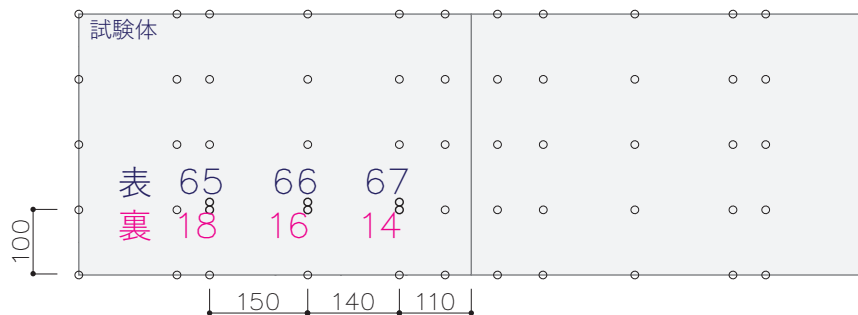


図5.24: 試験体表裏の温度測定用の熱電対の配置

R1、R2 両試験体において、ガラスの溶着線から 110 mm 離れた地点ではガラス板の裏側の温度のほうが表側よりも 20°C 前後高かった。溶着線から 250 mm の地点では表裏の温度はほぼ一致していた。溶着線から 400 mm の地点では表側の温度変動が大きく、特にどちらが大きいということではなかった。これらの違いは、熱電対の測定値が実際のガラスの表面、裏面の温度のみを反映しているわけではなく、表面であれば接している空気温度、裏面であれば接しているアルミナ板や断熱ボードの温度も反映していることで説明がつく。特に、ヒーター付近や炉の縁付近では、空気温度は断熱ボード等と比べると変動しやすいため、表の温度履歴は裏と比較し激しく上下していると思われる。以上より、ガラスの実際の温度に近いのは、変動の大きな表面の温度ではなく、安定した裏面の温度であるとする。

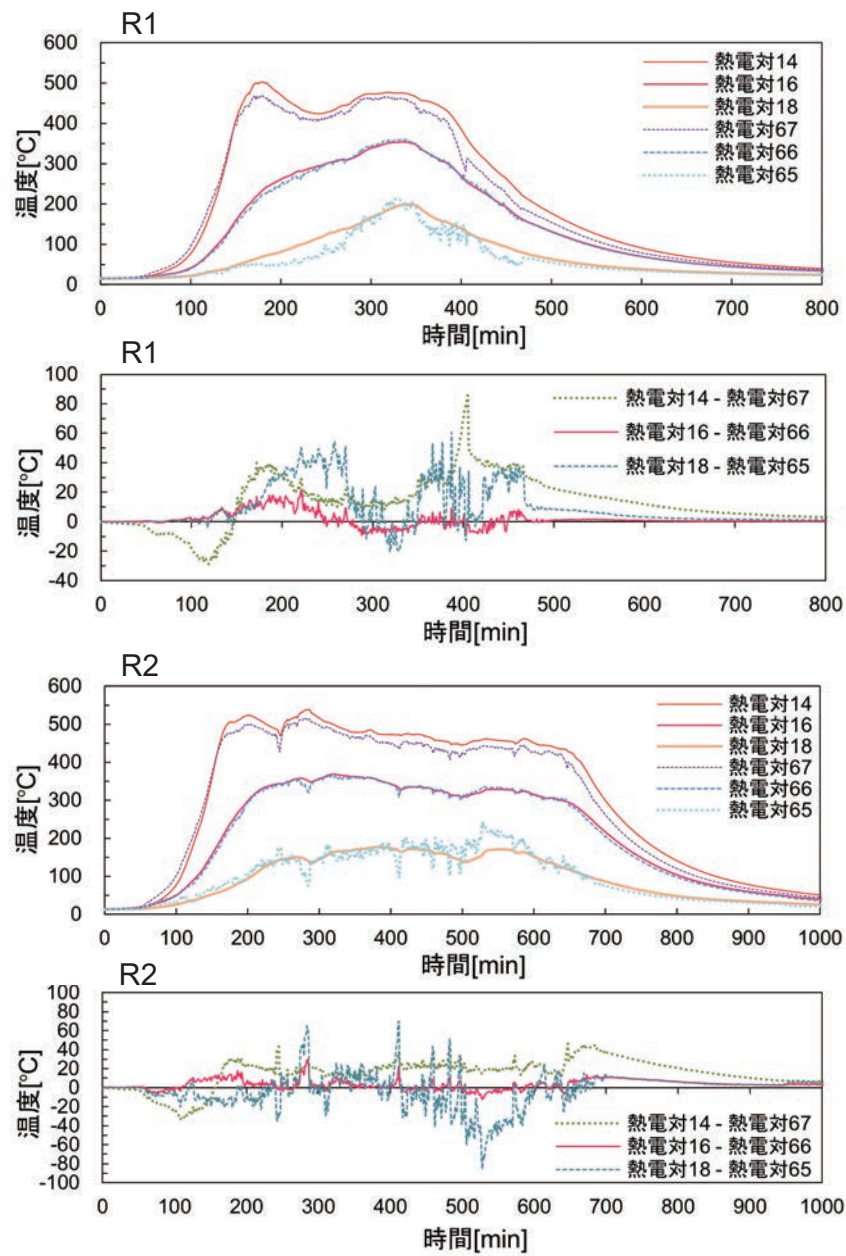


図5.25: ガラス板表裏での温度差

走行型炉での温度分布の特徴

設計・製作した走行型炉で再現された温度分布を観察する。4体の試験体のうち、アニール域の分割が明瞭であった R3 の温度分布について、分割停留方式の解析モデル L-SA（解析）の温度分布、同手法の小型炉実験での試験体 L-SA（実験）の温度分布と比較を行う（図 5.26、図 5.27）。

予熱途中、局所加熱開始段階では走行型炉の温度分布は解析で与えた温度分布に近い分布となっている。R3 では予熱段階での割れは発生しておらず、同様の温度分布であった R1、R2 でも予熱時に割れていないため、予熱・局所加熱ユニットは適切な温度分布を再現できているといえる。

局所加熱終了段階では、局所加熱領域の後ろ（ $Y = 200 - 300$ ）に低温域が見られた。これはハロゲンポイントヒーターの加熱可能範囲とアニールユニットの電熱線ヒーターの加熱可能範囲の狭間に該当する場所であるため温度が下がりやすいことが原因と考えられる。転移点より下がると歪が大きくなりうるため注意する必要がある。

溶着線を一様にアニールする段階（図 5.26中、全体アニール開始時）では、小型炉の温度分布と比較してもやや加熱ムラが大きい。これはヒーターからガラス板への伝熱形態として電熱線ヒーターの輻射伝熱の割合が大きくヒーターの中央部と周縁部で伝熱量が異なることに起因すると思われる。

溶着線中央を低温にした状態でのアニールを開始する段階（図 5.26中、溶着線中央冷却開始時）では、アニール域の中央を奥行方向に分割するような低温域が確認されるが、アニール域境界の温度勾配は L-SA（解析）や L-SA（実験）と比較して大きいものとなっている。

溶着線の手前（ $Y = 0$ ）から順次アニールを終了していく段階（図 5.26中、溶着線手前縁冷却開始、溶着線奥縁冷却開始）では、解析や小型炉の実験と似たような分布となっている。また、徐冷途中では、徐冷ユニットを途中で停止させて自然冷却を行ったためか、小型炉での温度分布同様、ユニットの周縁部から冷却が進んでいき、中央部が比較的高温となる温度分布となっている。

全体として走行型炉で再現される温度分布は、幅方向の炉の境界付近（ $X = \pm 450$ ）より外側の部分は温度の上り幅が小さく、ヒーター直下の領域（ $|X| < 100$ ）は温度ムラが大きい傾向が見られた。

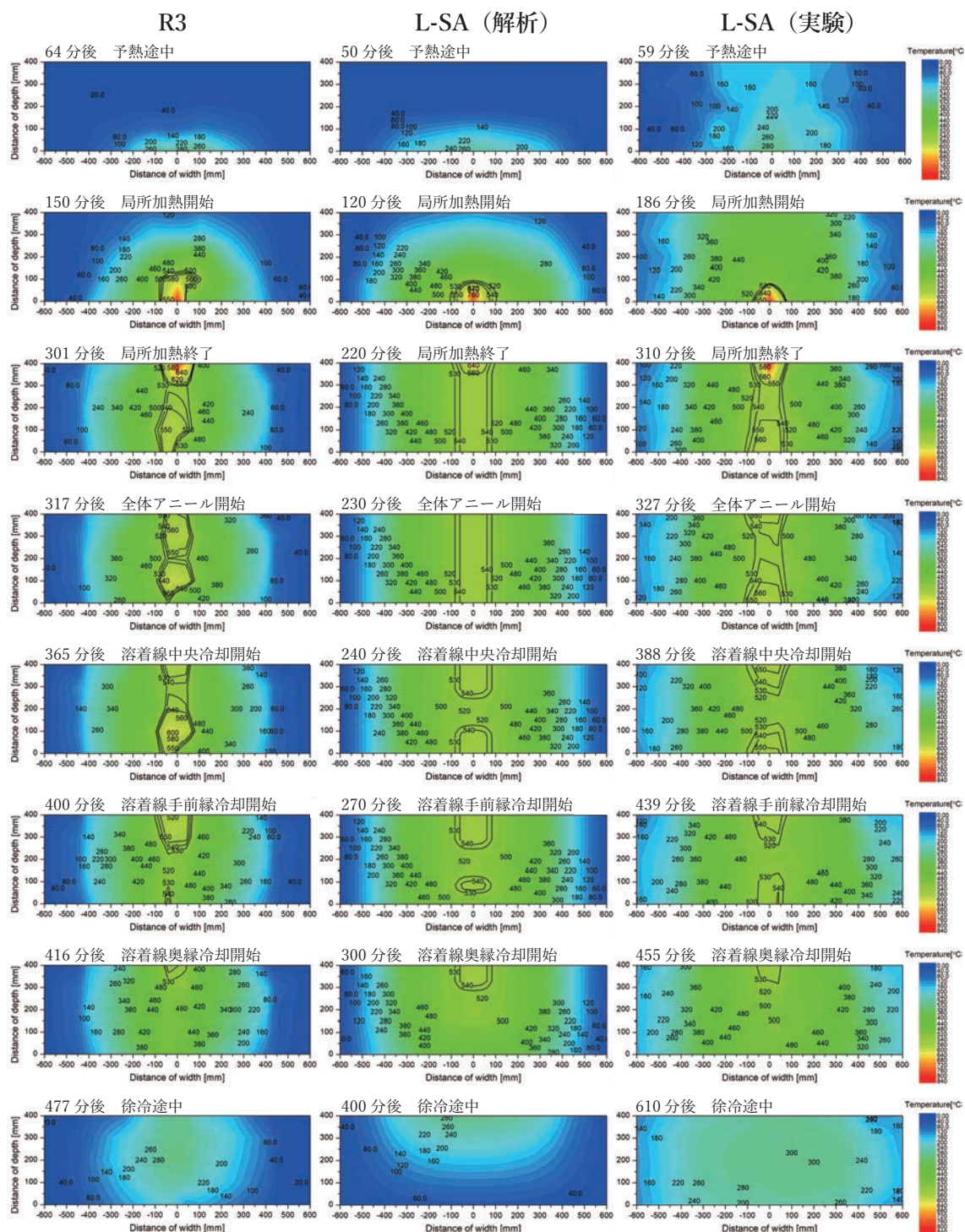


図5.26: 温度等高線図比較 - R3、L-SA (解析)、L-SA (実験)

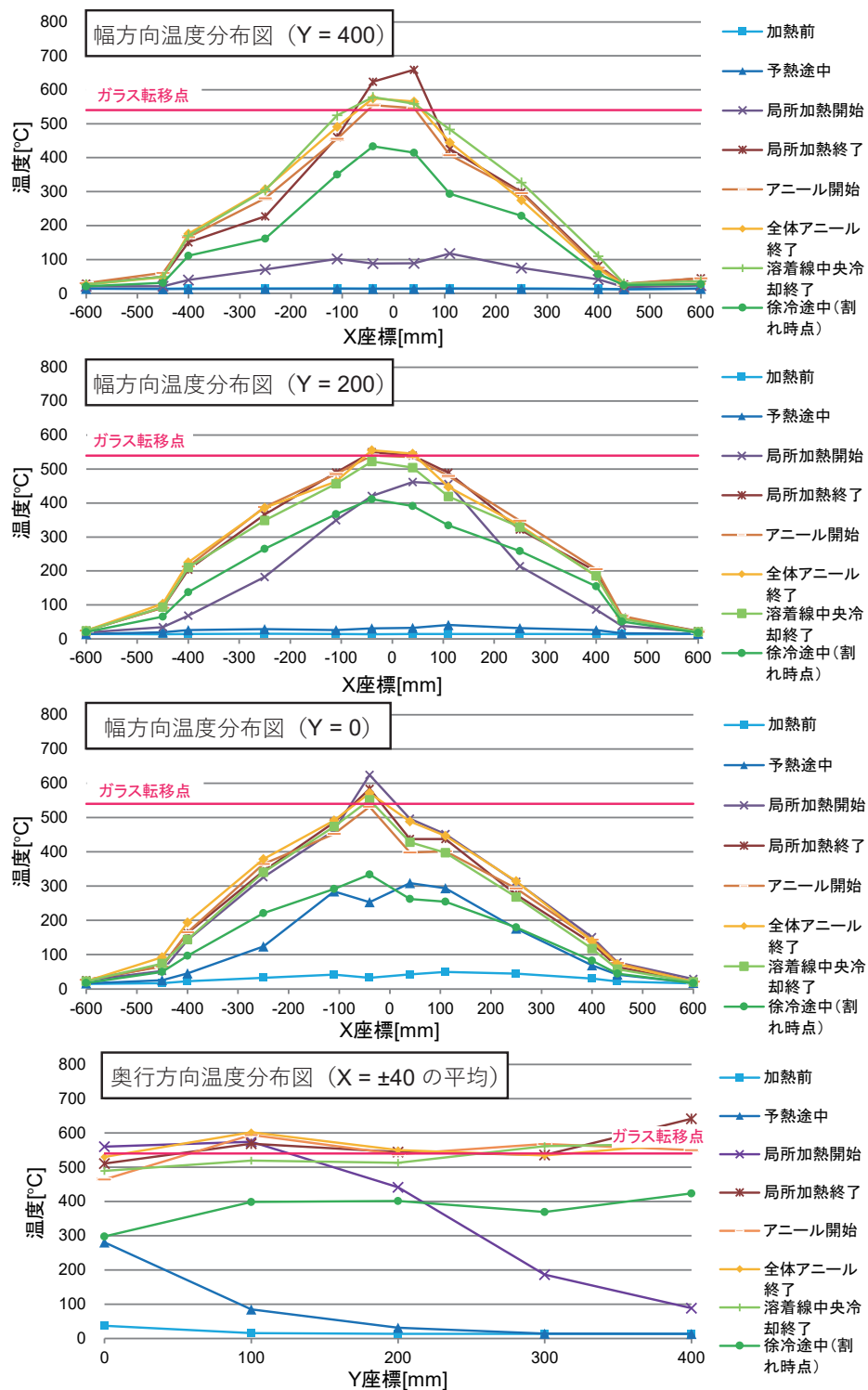


図5.27: 温度分布例 - R3

試験体の割れ

走行型炉で溶着を試みた試験体はすべて割れた（表 5.9、表 5.10）。熱工程上で、各試験体の一番初めに割れ音が観測されたおよその時点を図 5.28 に示す。

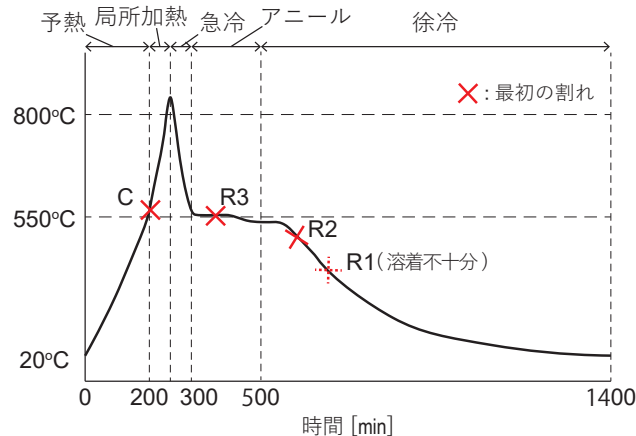


図5.28: 各試験体の最初の割れが生じた工程

C では局所加熱開始時に、溶着線付近に割れが生じた。これは局所加熱開始前にガラスを転移点以上まで加熱しておく予熱が不十分であったことが原因と考えられる。ガラス板の温度が転移点以下の粘性が十分に大きい状態で、ハロゲンポイントヒーターで瞬間的に 800°C 近くまで加熱される部分が生じると、歪を解消することができずに割れてしまう。電熱線ヒーターにより溶着線の手前が転移点付近まで加熱されることを確認してからハロゲンポイントヒーターによる加熱を開始する必要がある。

R1 は最初に大きな割れ音が確認されたのは徐冷段階であるが、アニール段階でも時折ミシミシと音が観測された。本試験体は一部溶着が不十分であり、アニール段階ではその部分で溶着部が徐々に裂けていった可能性がある。

R3 では溶着線を一様にアニールしている段階で最初の割れが発生した。この時点での温度分布は特に R2 の温度分布とあまり変わらないため、原因ははっきりとわからないが、アニール域において一部 580°C を超える部分があり、均一な温度保持を行えていなかったことが応力の増大につながった可能性がある。

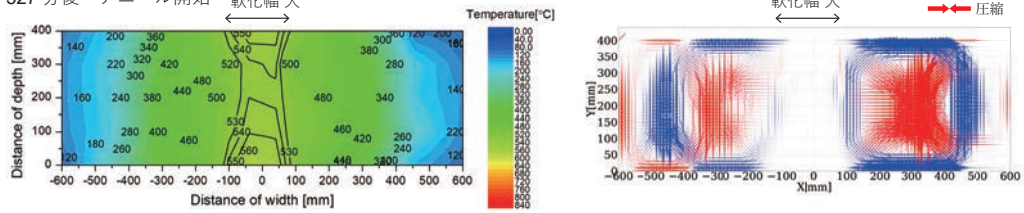
R2 では徐冷時に割れが発生した。R2 の割れの要因を、小型炉の試験体 L-SA と R2 の温度分布と主応力場の推移を比較して特定を試みる（図 5.29、図 5.30）。

アニール時の温度分布をみると、R2 は L-SA（実験）と比較し、溶着線の縁の部分で転移点を下回っているほか、分割停留方式で再現を目指した試験体中央の低温域の領域（図中、分割幅）が小さいことが確認できる。また、アニール域境界付近の温度勾配は大きい。さらに、R2 の軟化幅は L-SA と比較し小さくなっており、応力緩和の発生している領域が狭くなっている。よって、割れの要因としては、アニールが不十分なことによる応力緩和不足、分割停留方式による残留応力低減の効果の不足、アニール域境界の大きな温度勾配による残留応力の上昇が挙げられる。

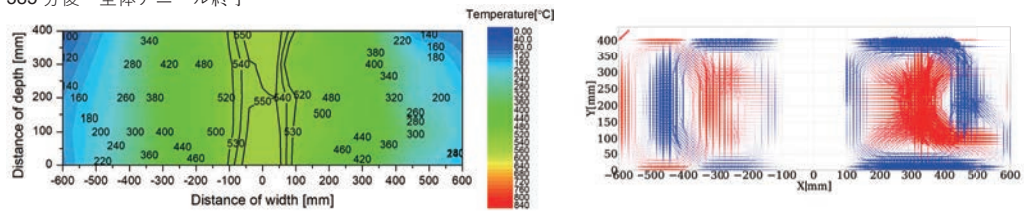
また、表 5.10 の R2 の試験体の写真を見ると溶着線付近に割れが生じているが、これは図 5.30 において徐冷途中の主応力場の中央部に見られる引張応力によるものと推測される。

L-SA(実験)

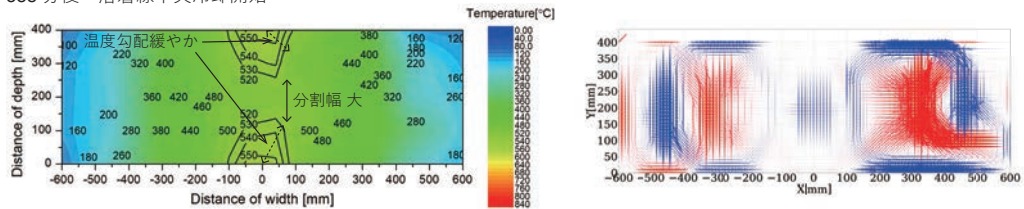
327 分後 アニール開始 軟化幅大



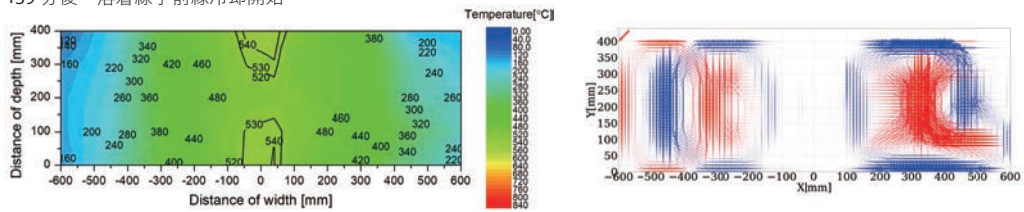
385 分後 全体アニール終了



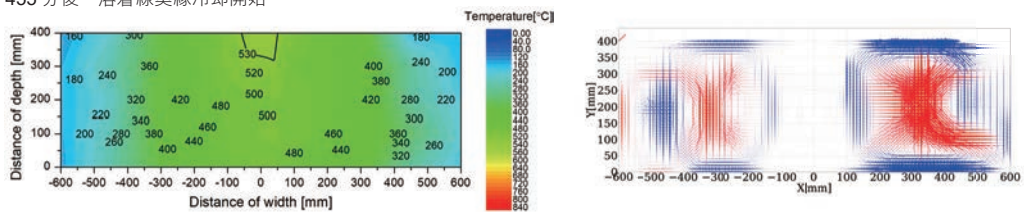
388 分後 溶着線中央冷却開始



439 分後 溶着線手前縁冷却開始



455 分後 溶着線奥縁冷却開始



610 分後 徐冷途中

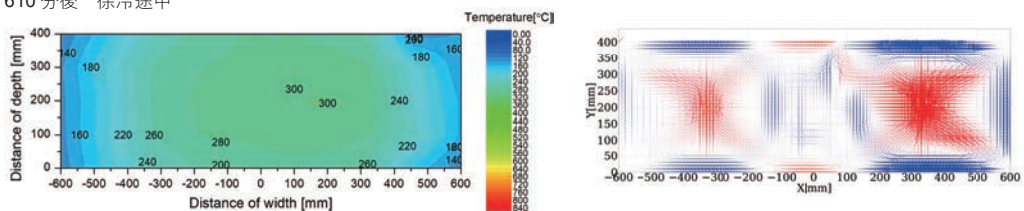
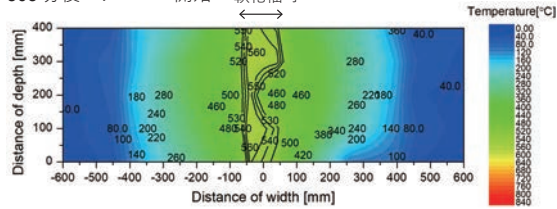


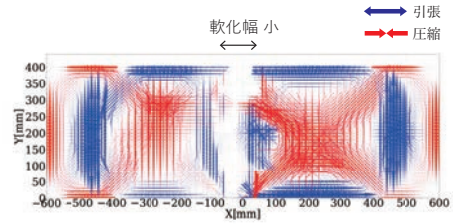
図5.29: 主応力場の推移 - L-SA (実験)

R2

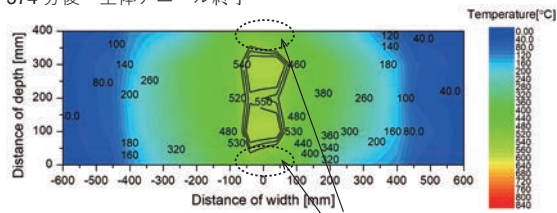
503 分後 アニール開始 軟化幅 小



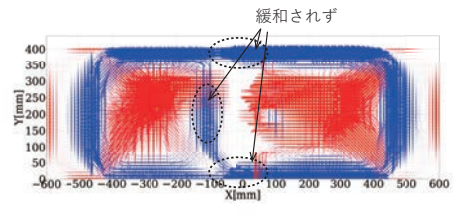
軟化幅 小



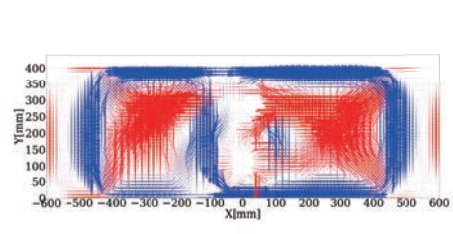
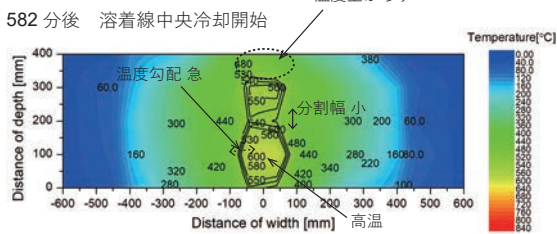
574 分後 全体アニール終了



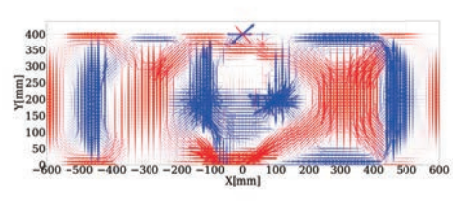
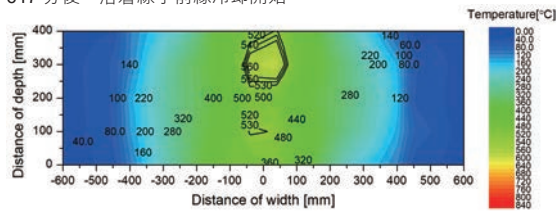
緩和されず



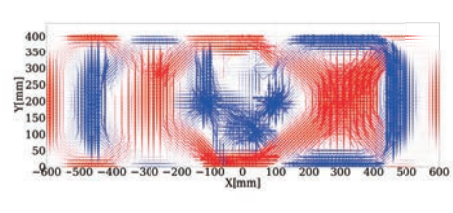
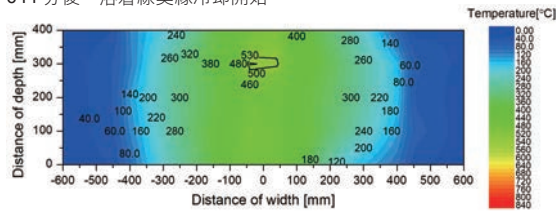
582 分後 溶着線中央冷却開始 温度上がらず



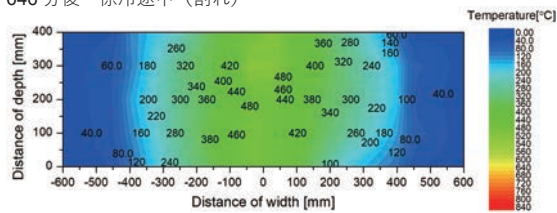
617 分後 溶着線手前縁冷却開始



644 分後 溶着線奥縁冷却開始



646 分後 徐冷途中 (割れ)



割れの要因か

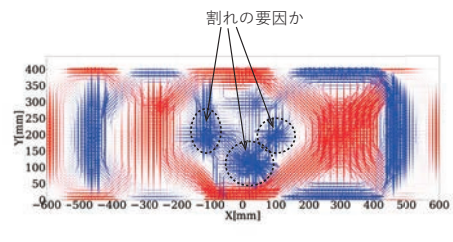


図5.30: 主応力場の推移 - R2

アニールユニット冷却機構

表 5.7 に示した C の冷却機構では、電熱線ヒーターとガラス板の距離が離れすぎているため、局所加熱終了後のガラス板を転移点付近まで加熱することはできなかった（表 5.9）。走行型炉では小型炉と異なり、ヒーターがガラス板の上方に設置されるため、炉内空気を対流により高温まで加熱することは困難であり、ガラス板を高温に加熱するにはヒーターをガラス板に近接させ、輻射伝熱による加熱に頼る必要があると考えられる。

冷却装置にステンレス板のみを用いた R1（表 5.7）では局所冷却の効果は見られなかった（表 5.9）。ステンレス板の炉外部分からの放熱のみでは、ヒーター直下部のステンレス板の温度上昇は抑えられないとわかった。また、R1 では徐冷ユニットに電熱線ヒーターを設置していないが、アニール段階の途中で、試験体の手前の縁の温度を転移点付近まで上げることができなくなった。徐冷時の温度アニールユニット後方の温度維持のためにも徐冷ユニットにはヒーターが必要であるといえる。

銅板とその上の断熱材、ステンレス板の覆いからなる冷却装置を利用した R2（表 5.8）では、R1 と比較しアニール域の中央に低温域が見られた（表 5.10）。しかし、低温域の領域は狭く、残留応力低減の効果は小さいものと考えられる。また、中央冷却のアニールの段階でガラス板縁付近の温度の低下が見られ、この領域の応力緩和が不十分な可能性がある。冷却装置に関しては、使用した 0.3 mm 厚の銅板が加熱により黒く酸化し、劣化が見られた。冷却装置に用いる金属板としては、錆びづらく高温に耐えられるステンレス板が適当であると考えられる。

冷却装置の奥行寸法を大きくし、ヒーター直下に加熱ムラ緩和のための遮蔽用ステンレス板を設置した試験体 R3（表 5.8）では、装置の局所冷却による低温域は R2 と比較し大きいものとなった（表 5.10）。冷却装置の底面積とガラス板に生じる低温域の大きさには相関関係があると予測される。また、中央冷却のアニール段階のガラス板縁付近は R2 と比較すると温度低下が抑制されており、ユニット中央付近のヒーターの下に遮蔽板を設置することにはユニット奥行方向の伝熱量を均一にする効果があるとわかった。

以上より、分割停留方式の再現にあたっては R3 の冷却機構が最も有効であると考えられる。

溶着線長さの検討

既往研究では溶着線長さが最大 600 mm までのガラス板について数値解析による残留応力算出が行われ、溶着線増大に伴い残留主応力度が大きくなることが報告されている^[3]。将来的には溶着線が 10 m を超える試験体の溶着を想定しているため、溶着線が 600 mm より長い試験体について数値解析を行い、溶着線長さの残留応力への影響を探る。

数値解析では 3 章の解析と同様ガラス板を 10 mm 間隔の格子状線材骨組に置換したものを使用する。幅寸法 600 mm、溶着線長さが 400、800、1200、1600 mm の 4 種類のモデルについて検討を行った。3 章の検討に用いた数値解析では溶着する 2 枚のガラス板を一体化しているものとしたモデルを使用したが、本章では溶着線について線対称な温度分布で加熱・冷却が行われるとし、溶着する 2 枚のガラス板の片方のみモデル化している。

5章の走行型炉を用いた実験では試験体の溶着線端部から溶着線に沿ってハロゲンポイントヒーターによる局所加熱を進めていく過程で2枚のガラス板の隙間が数ミリ開いていくことが確認されたが、溶着線が長くなると隙間の開きは大きくなると思われる。熱工程においてガラスが融点に達した部分から逐次的に一体化していく過程を反映するために、解析モデルの溶着部の支持条件を変更していくことを考えた。増分解析のステップが進むにつれ支持条件が切り替わっていく様子を図6.2に示す。局所加熱段階において、ガラス板の溶着を行う端部のうち融点に達しておらず一体化する前の部分は自由端、一体化した後の部分は拘束され動かない固定端として考えられる。そこでガラスモデルの節点について、局所加熱開始以前の解析ステップでは原点をピン支持、溶着線上で原点の一つ隣の節点($X = 0, Y = 10$)をY方向ローラー支持、その他の点をX, Y方向ローラー支持とした。ステップが進み局所加熱が始まると、溶着線付近の領域はY軸正方向に向かって順に高温になっていくが、溶着線上の節点のうち属する領域の温度が 700°C を超える節点をX, Y方向ローラー支持からY方向ローラー支持へと変更した。局所加熱が進み領域の温度が 700°C 以下に戻っても変更した支持条

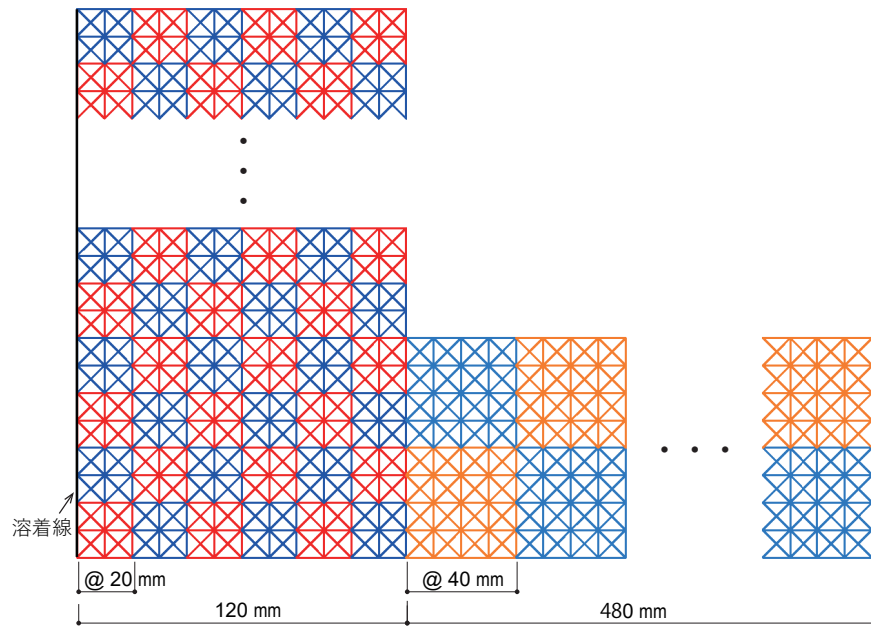


図6.1: 解析モデル-温度入力用の領域分割

件は維持した。この操作により局所加熱終了時には、すべての溶着線上の節点は Y 方向ローラー支持となる。

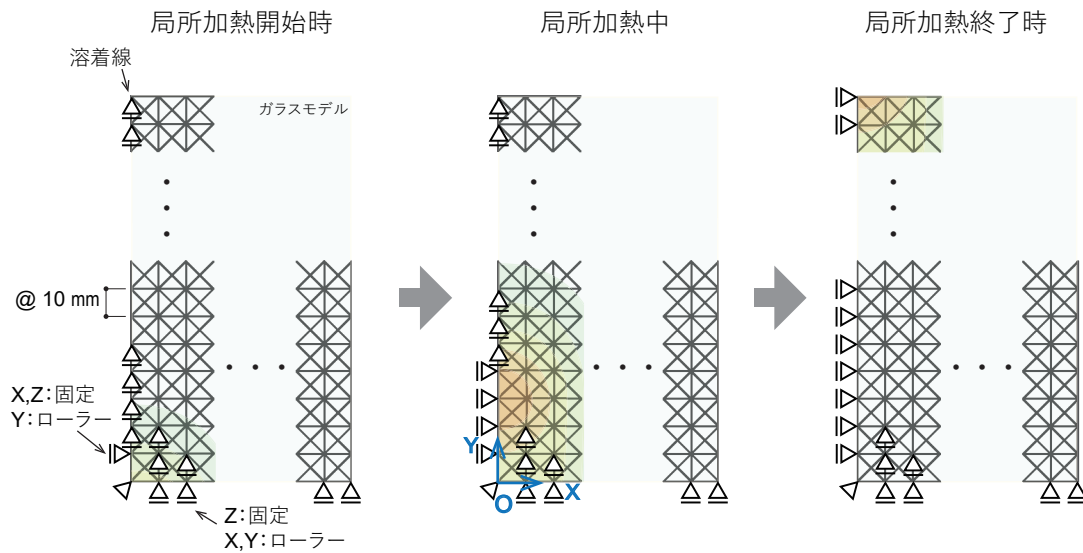


図6.2: 解析モデル-支持条件

以上の解析モデル、温度データを入力値とし、既往研究で提案されている熱粘弾性解析アルゴリズム^[7]を用いて残留応力を算出した。

6.1.2 解析結果と考察

溶着線長さと残留主応力度

各解析モデルにおける解析で算出した主応力場の様子を図 6.3に示す。引張、圧縮の主応力度分布はいずれの溶着線長さにおいても、 $Y = L/2$ についての対称に近い分布となった。ガラス板周縁部に圧縮応力、溶着線付近を含むガラス板内側に引張応力が集中する傾向がいずれの寸法においても確認された。

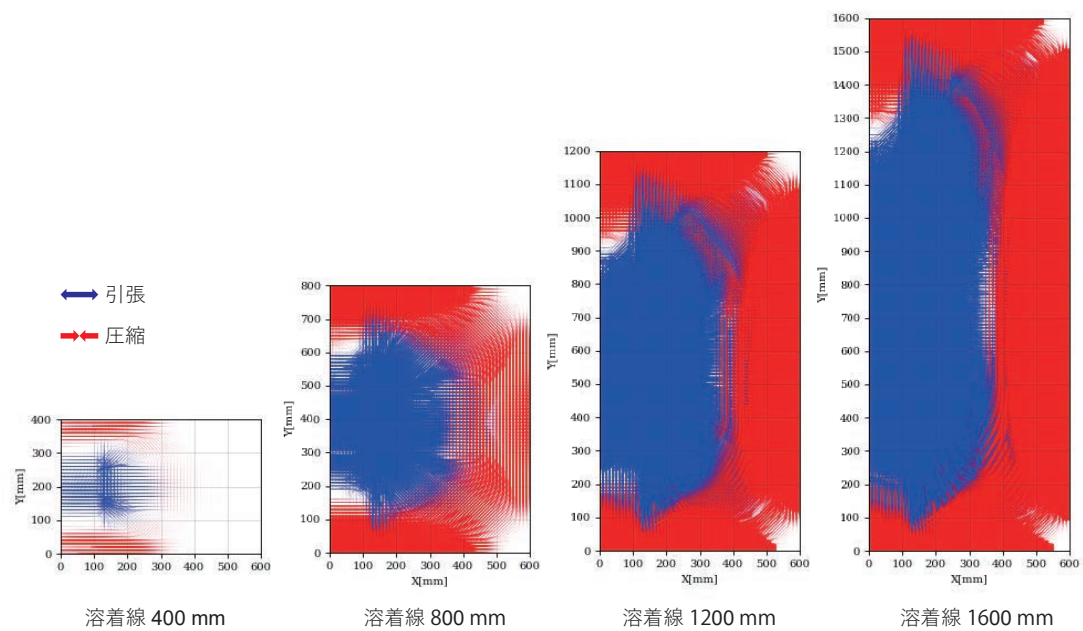


図6.3: 溶着線長さと主応力場の様子

溶着線長さと残留主応力度の関係を図 6.4 に示す。溶着線長さが伸びるにつれ、引張を正とした最大主応力度と、最小主応力度の絶対値はともに増加した。最大主応力度 σ_1 、最小主応力度（絶対値） σ_2 と溶着線長さ L の関係を最小二乗法により回帰直線に近似すると次式のようなになる。ただし L が 0 のとき残留応力はないので切片は 0。

$$\sigma_1 = 0.1025 \cdot L \quad (R^2 = 0.9966) \quad (6.1)$$

$$\sigma_2 = 0.1608 \cdot L \quad (R^2 = 0.9918) \quad (6.2)$$

ここで R^2 は、回帰式を $f(L_i)$ 、 σ の平均値を μ_σ として、

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\sigma_i - f(L_i))^2}{\sum(\sigma_i - \mu_\sigma)^2} \quad (6.3)$$

で定義される決定係数であり、1 に近いほど回帰式の適合具合が大きいことを意味する。式 (6.1)、(6.2) より、最大主応力度、最小主応力度はともに溶着線長さに比例しているといえる。

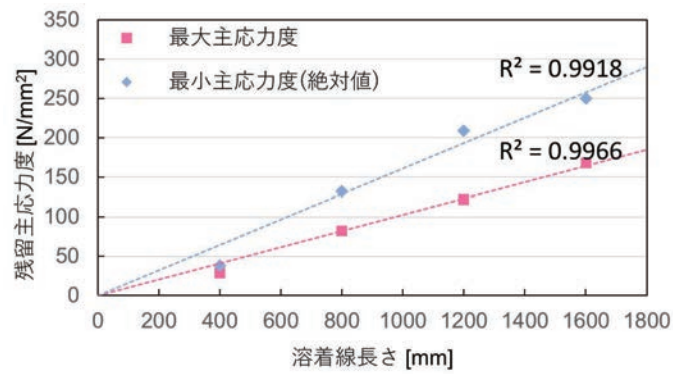


図6.4: 溶着線長さと残留主応力度

主応力場の時間変化

溶着線長さが 1600 mm の解析モデルの、温度分布と主応力場の時間変化の様子を図 6.5 に示す。溶着線付近 ($X = 0$) の応力に着目すると、加熱開始から 250、370 分後の時点では局所加熱が行われている地点より手前側の領域 (250 分後では $Y < 500$ 、370 分後では $Y < 1000$) ではほとんど応力が見られない。これは局所加熱が完了した溶着線のうち緩和が起こる領域 ($450 < Y < 1000$) が多くを占めていることが要因であると考えられる。逐次溶着の過程で、すでに溶着済の部分に幅方向の引張応力が生じると、母材と比べ強度の劣る溶着線付近に亀裂が生じることが想定されるため、局所加熱領域後方の応力がほぼ生じない領域は大きいことが望ましい。

溶着線全体の局所加熱が終了する 510 分後の時点では、歪点以上である $Y > 1000$ の部分では緩和が起こるため応力は見られないが、 $Y < 1000$ の領域では手前の縁付近には圧縮、他の大部分には引張の応力が発生している。また、溶着線全体のアニールが完了する 650 分後の時点では、溶着線の両端近くに圧縮、その他の部分に引張の応力が観察される。図 6.3 と比較すると主応力場が似ており、徐冷完了後の最終の残留主応力分布はほぼこの時点で定まると考えられる。

以上より、割れや強度低下の要因となる残留応力は、逐次溶着の過程で溶着線全体のうち緩和の生じない温度域の領域の割合が増えていくとともに発生する、溶着線中央付近の引張応力とガラス板周縁部の圧縮応力からなる。溶着線長さの大きな試験体において残留応力を低減するには、これらの応力の発生を抑制するような加熱冷却操作が必要となる。

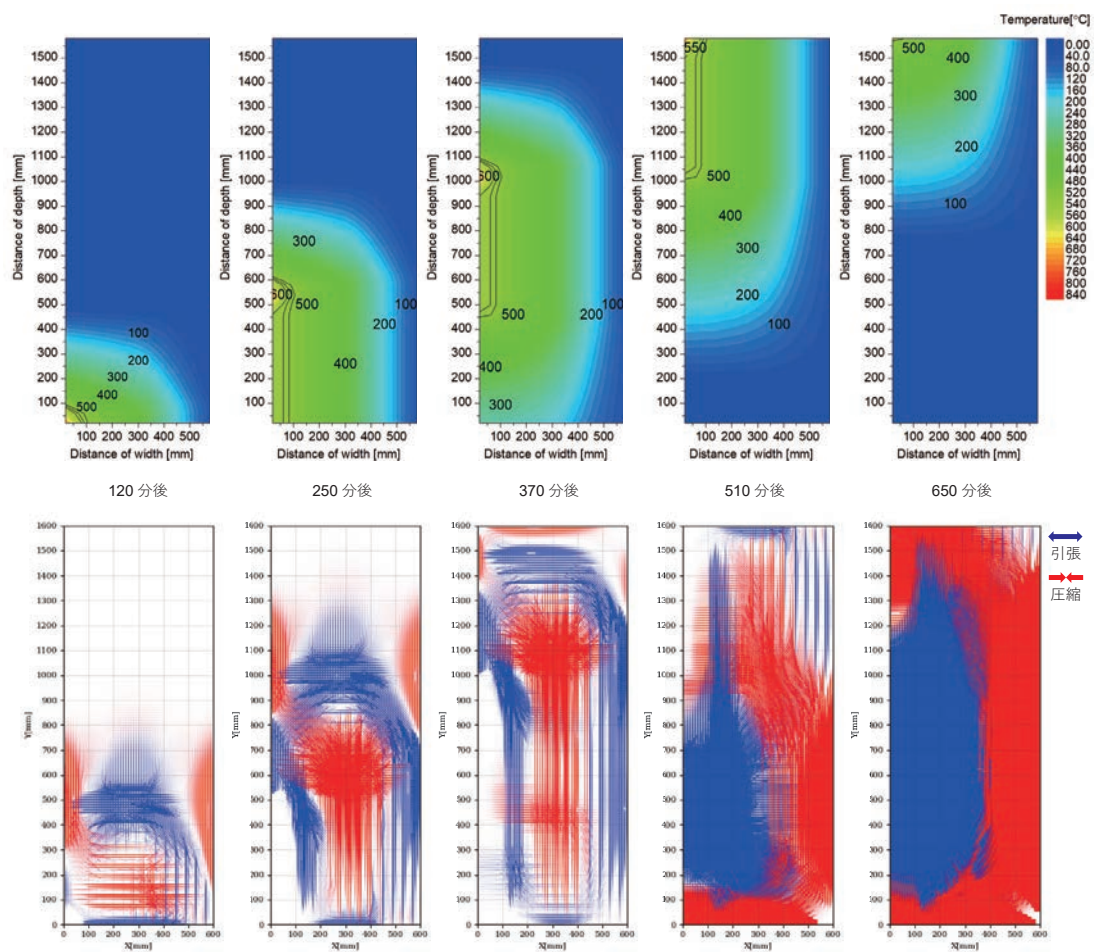


図6.5: 主応力場の時間経過（溶着線 1600 mm の場合）

逐次溶着に伴うガラス板の変形

逐次溶着に伴うガラス板面での温度分布の移動により、ガラス板は時間経過とともにわずかに変形する。溶着線長さが 1600 mm の解析モデルの、徐冷完了時の溶着線上の節点の変位を図 6.6 に示す。

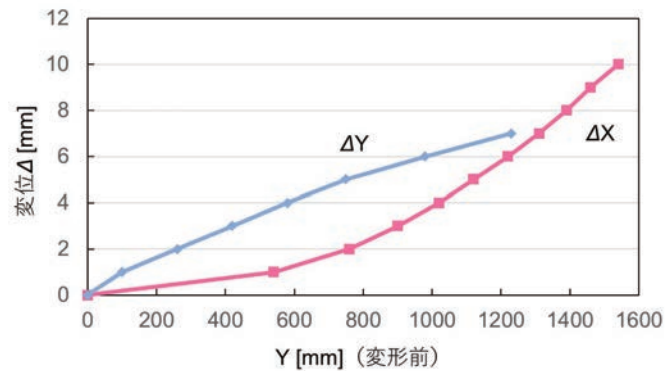


図6.6: 局所加熱終了時の溶着線の変位

幅方向の変位 ΔX 、奥行方向の変位 ΔY はともに正方向に増加が見られた。 ΔX は、溶着線上の Y における、元の溶着線との離れ具合であり、溶着前は 2 枚のガラス板が溶着線で隙間なく接しているものと仮定すると、 ΔX を 2 倍した値は変形により生じる 2 枚のガラス板の隙間の大きさに該当する。例えば溶着線長さが 1 m であれば、溶着線の終端では約 8 mm、溶着線長さが 1.6 m であれば約 20 mm の隙間が生じることを意味する。

2 枚のガラス板の隙間が 2, 3 mm 程度であれば、カレットを充填することで溶着可能であるが、それ以上開いた状態での溶着は、溶融範囲が広くなり現在の手法では困難である。また、溶着前後でガラス板の変形が大きくなるのは施工上好ましくない。2 枚のガラス板の、溶着を行わない側の端部を固定し、溶着部の隙間が開いていかないよう変形を拘束するなどの対処が必要な可能性があることを今後の課題として挙げておく。

6.2 溶着線の長いガラス板への残留応力低減法の適用

本論文で、溶着線長さが 400 mm のガラス板に対する温度分布操作方法を検討した際には、分割停留方式は、アニール時に溶着線の中央に低温域を設ける方式とした。しかし、溶着するガラス板の溶着線長さが走行型炉のアニールユニットの全長より大きい場合、溶着線の中央のみに一か所低温域を設けたところで残留応力低減の効果は見込めない。そこで、溶着線上に分割停留方式を適用する冷却地点を一定間隔で複数設けることで残留応力の上昇を抑える方法を提案する（図 6.7）。

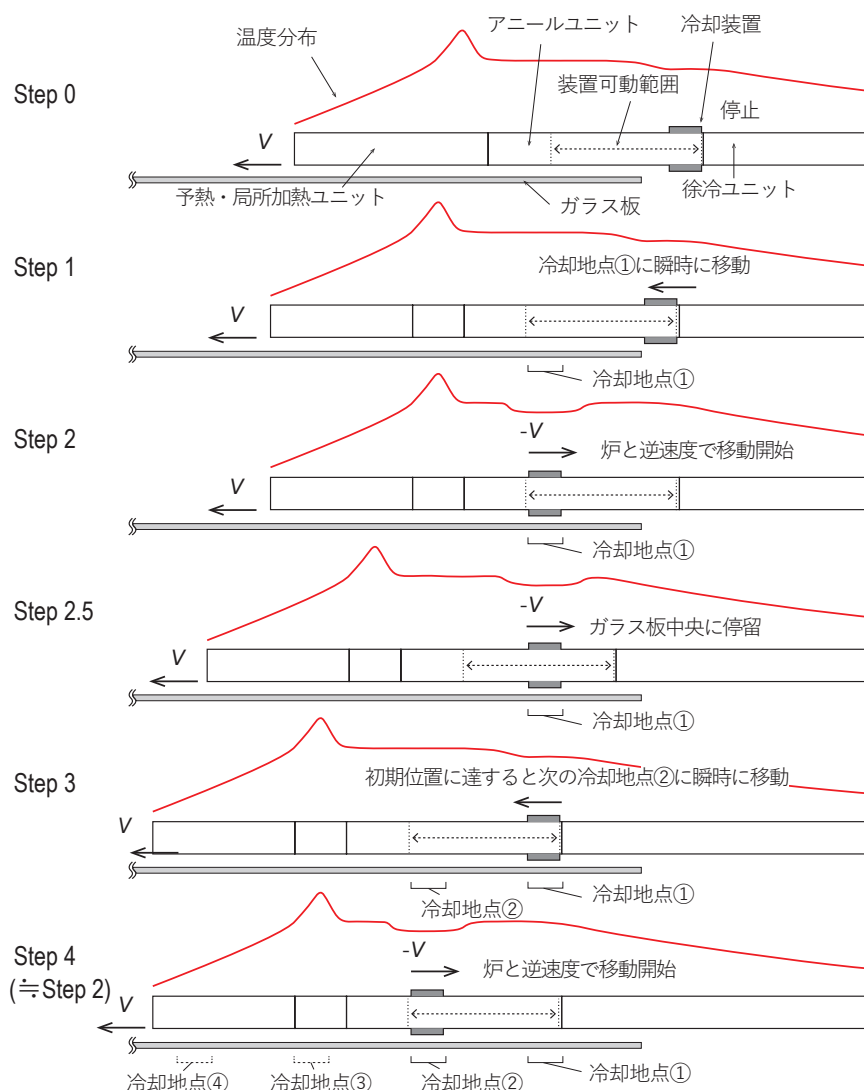


図6.7: 溶着線の長いガラス板を溶着する際の冷却機構の動き

ガラス板にアニールユニットが差し掛かり始めた時点（図 6.7中 Step 0）では冷却装置はアニールユニット後方に停止している。炉が進行し、冷却装置の可動範囲が最初の冷却地点（冷却地点①）に差し掛かった時点

で冷却装置を瞬時にアニールユニット前方に移動させる（Step 1）。続いて、冷却装置を、装置がアニールユニット後方の初期位置に戻るまで炉と逆の速度で移動させ、アニール域を断続的に分割した状態でアニールを行う（Step 2、Step 2.5）。装置が初期位置に戻った時点で、先ほどと同様に冷却装置を瞬時にアニールユニット前方に移動させる（Step 3）。このとき、走行型炉は移動を続けているため冷却装置の冷やす地点は冷却地点①から装置の可動範囲分だけ前方にずれた地点（冷却地点②）となる（Step 4）。その後、Step 2以降の手順を繰り返していくと、溶着線上の、冷却装置可動距離の間隔おきに生じる冷却地点において分割停留方式の温度分布操作が適用されることとなる。

第 7 章

総括

7.1 本論文での成果

本論文での成果を下記にまとめる。

- 溶着における残留応力低減法

溶着時にガラス板に発生する残留応力を低減する手法として、アニール域（540 - 560℃）の形状を操作し段階的にアニールを行う温度分布操作を試みた。数値解析と据え置き型の小型炉を用いた実験により、アニール域を断続的に分割し、低温域のみガラス中央に留まるようにアニールを行う分割停留方式の温度分布操作が有効であることを示した。結果として、既往の実験で溶着により一体化された試験体よりも溶着線の長い、奥行寸法が 400 mm のガラス板を、据え置き型の炉を用いて割れることなく溶着して一体化することができた。

- 走行型炉の製作と分割停留方式の実装

予熱・局所加熱、アニール、徐冷の役割を担う 3 つのユニットで構成される、逐次溶着を行う走行型炉を設計し、製作した。走行型炉を用いた溶着実験により、各ユニットの炉の内部形状を、ユニット中央のヒーター設置部に向かって炉内空間が徐々に大きくなるよう傾斜がついたものとする事で幅方向、奥行方向ともに温度勾配が比較的緩やかな温度分布を再現できることを示した。また、分割停留方式を走行型炉に実装するにあたり、アニールユニットに炉本体と独立して移動する冷却装置を組み込むことを提案した。

- 溶着線長さと残留応力の関係

数値解析により、温度分布操作を施さずに溶着を行った場合、残留応力の最大主応力度は溶着線長さに応じて線形的に増加することを示した。また、逐次溶着により 2 枚のガラス板が一体化する前後を反映して数値解析を行った結果から、ガラス板の最後に溶着が完了するほうの端部は初期位置から 2 枚のガラス板の隙間が開く方向に変形することが示唆された。

7.2 今後の課題

本論文での成果を踏まえ、今後の研究における課題を下記に挙げる。

- 溶着線長さに依存しない残留応力低減法

本研究では溶着線長さが 400 mm の試験体については分割停留方式の温度分布操作により残留応力を低減できることを示したが、6 章で述べたように溶着線長さが増加するにつれ残留応力は大きくなる傾向があり、400 mm より溶着線の長いガラス板に対し有効かはわからない。現場で溶着線が 10 m 近いガラス板を溶着するためには、溶着線長さによらず残留応力を許容値に抑えられる温度分布操作方法を探る必要がある。

- 走行型炉の温度制御

本研究で制作した走行型炉は、ガラス板の上を通過するユニットの炉内に設置されたヒーターにより、ガラス板の上方のみから熱を与える加熱方式であるが、特にガラス板面のヒーター直下の領域では加熱ムラが大きくなっている。また、ガラス板面の溶着線付近において、炉の走行中にユニット間の隙間やユニットの縁部が差し掛かる領域では温度が上がりにくい。アニール域の温度保持を精度よく行うためには、加熱ムラの少ない加熱方式が望ましい。

- 温度測定方法の改善

実験では熱電対を用いてガラス板近くの雰囲気温度、もしくは表面温度を測定しているが、ガラス板の実際の温度と熱電対の測定温度との誤差がどの程度なのかかわかっていない。熱電対以外の装置によりガラス板自体の温度を測定することが必要である。

- ガラス板厚み方向の考慮

走行型炉を用いた実験では、ガラスの表裏の測定温度に差が見られた。ガラス板の上からのみ加熱を行う走行型炉による溶着では、ガラス板の厚みが増すにつれ表裏の温度差は大きくなるものと思われる。厚みを増やして溶着を行う際にはガラス板表裏の温度差が与える応力状態への影響を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 西村祐哉, “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,” 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 2017 年度修士論文, 2017.
- [2] AGC 株式会社, “4 ガラス選定早見表 4-5-5 - agc glass plaza,” https://www.asahiglassplaza.net/catalogue/sougou_gijutsu/spdfdata/00043_39s.pdf, 閲覧日 2020-10-18.
- [3] 張耕嘉, “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,” 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 2018 年度修士論文, 2018.
- [4] AGC 株式会社, “Agc 板ガラス建材総合カタログ技術資料編,” https://www.asahiglassplaza.net/catalogue/sougou_gijutsu/0004apg.htm, 閲覧日 2020-10-26.
- [5] 三芝硝材株式会社, “ガラスの基礎知識,” <https://www.sanshiba-g.co.jp/column/kisochisiki/>, 閲覧日 2020-12-25.
- [6] 金井英三, “ガラスの徐冷,” 窯業協會誌 63 巻 78 号, 1955.
- [7] 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 2020 年度卒業論文, 2020.
- [8] タンブンチュウ, “普通板ガラスの縁部の局所加熱による溶着性状,” 東京大学工学部 2012 年度卒業論文, 2012.
- [9] 滝口雅之, “局所加熱によるガラス板の溶着法における温度勾配条件,” 東京大学工学部 2013 年度卒業論文, 2013.
- [10] 西村祐哉, “局所加熱によるガラス板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 2015 年度卒業論文, 2015.
- [11] 滝口雅之, “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,” 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 2016 年度修士論文, 2016.
- [12] 藤本月穂, “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,” 東京大学工学部 2017 年度卒業論文, 2017.
- [13] 永渕飛鳥, “フロート板ガラスの溶着法における温度分布制御による残留応力の低減法,” 東京大学工学部 2018 年度卒業論文, 2018.
- [14] 山根正之, 安井至, 和田正道 *et al.*, ガラス工学ハンドブック普及版. 朝倉書店, 1999.
- [15] 岸井貫, 折原芳男, and 吉村泰信, “ガラス工業に利用される光弾性技術,” 応用光学 2002.6, 2002.
- [16] 梅崎栄作, “光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望,” 精密工学会誌, vol. 79, no. 7, pp. 607–611, 2013.
- [17] I. K. Y. JOA, “Controlling speed and direction of stepper motor using xbee module.”

- [18] 吉田敏臣, “熱のつたわり方 (ii),” 調理科学, vol. 12, no. 1, pp. 32–36, 1979.

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援いただきました。

指導教員である佐藤淳先生には、このような興味深い研究テーマを与えていただき、的確なご指導を賜りました。また、コロナ禍で平常時のような活動が難しい中、できる限り不自由なく安心して実験ができるようにしていただきました。本研究だけでなく、佐藤研究室での様々な刺激的な活動に携われたことに感謝申し上げます。

副指導教員の清家剛先生には論文の構成から論文発表の仕方に至るまで、異なる視点から様々なご助言を賜りました。また、安全に実験を行えるよう実験室の環境にもお心遣い頂きました。ここに謝意を表します。

佐藤研究室の荒木美香さん、古市渉平さん、張耕嘉さんには研究内容や論文執筆で多くのご指導をいただき大変お世話になりました。特に先行研究者である張さんには研究に必要な知識や実験器具の使い方など多くの事を教えていただき、普段から相談に乗っていただきました。感謝いたします。

後輩のカザウィ桜さん、森永魁君には実験装置の製作、溶着実験をはじめとして常にお世話になりました。知恵を出し合いながらともに研究を進められたことに感謝します。

実験に使用したガラスは AGC 株式会社様にご提供いただきました。AGC 株式会社の木原様には研究室のゼミにご参加いただき、本研究に役立つ情報を提供していただきました。謝意を申し上げます。

佐藤研究室、佐藤淳構造設計事務所の皆様には日頃から大変お世話になりました。おかげさまで研究に集中することができました。

最後に、筆者を支えていただいた研究室の同期、後輩、構法系研究室の方々、家族に感謝申し上げます。

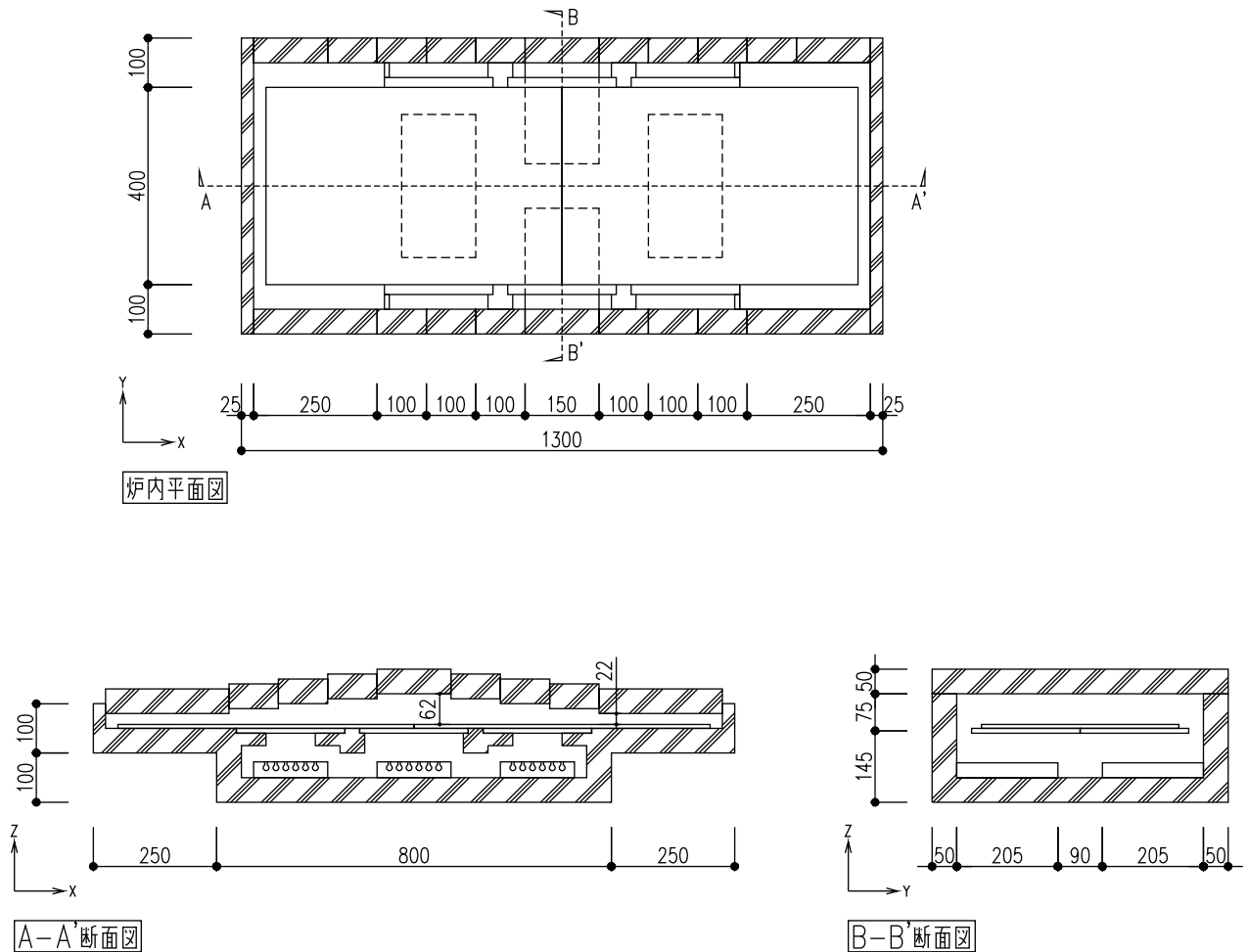
2021 年 1 月 16 日

永渕飛鳥

付録 実験結果詳細

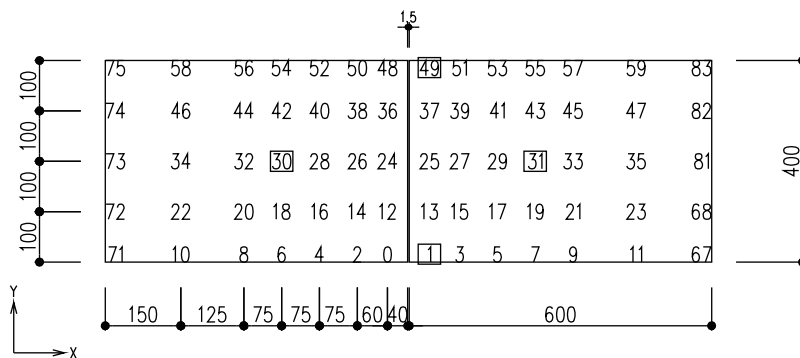
H-SN1, H-SN2, H-SA1, H-SA2, L-SA 共通

□各種寸法



□熱電対位置

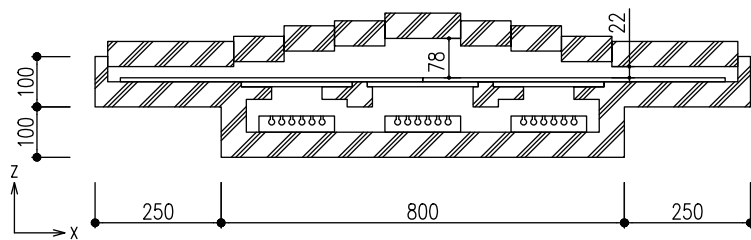
※ □はコントローラーに接続された熱電対を表す



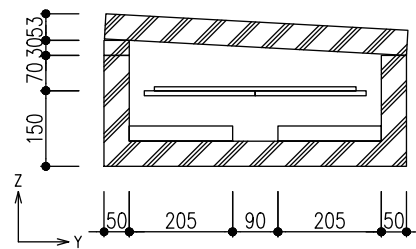
H-SN1

2020.05.28

予熱

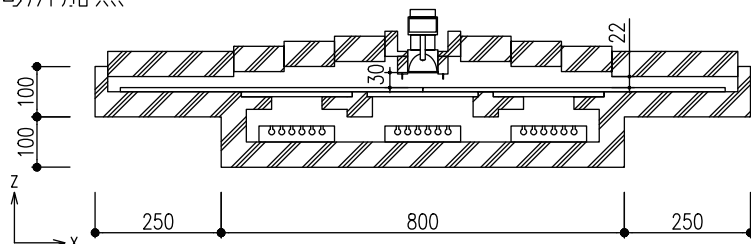


A-A'断面図

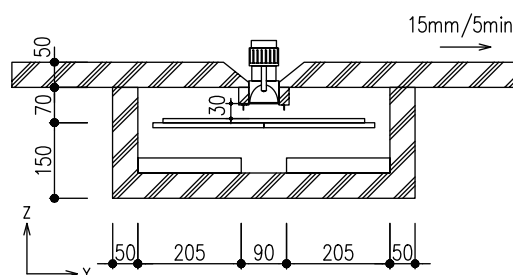


B-B'断面図

局所加熱

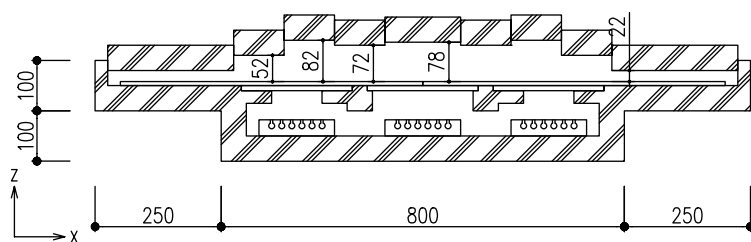


A-A'断面図

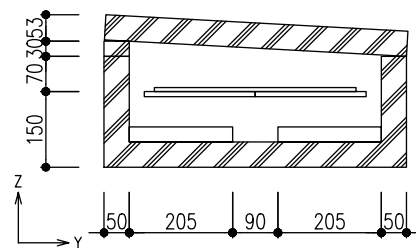


B-B'断面図

アニール

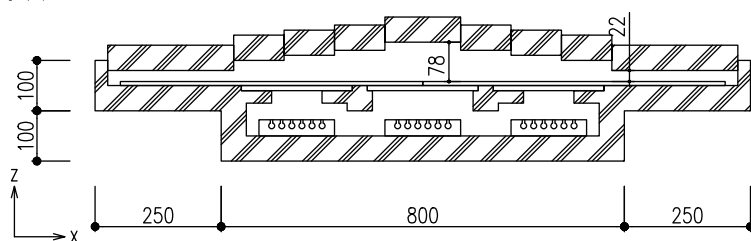


A-A'断面図

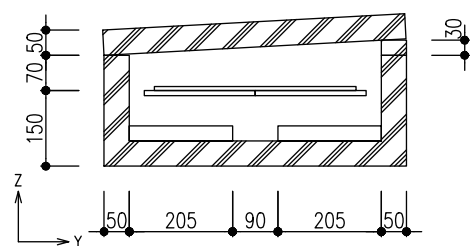


B-B'断面図

徐冷



A-A'断面図



B-B'断面図

H-SN1

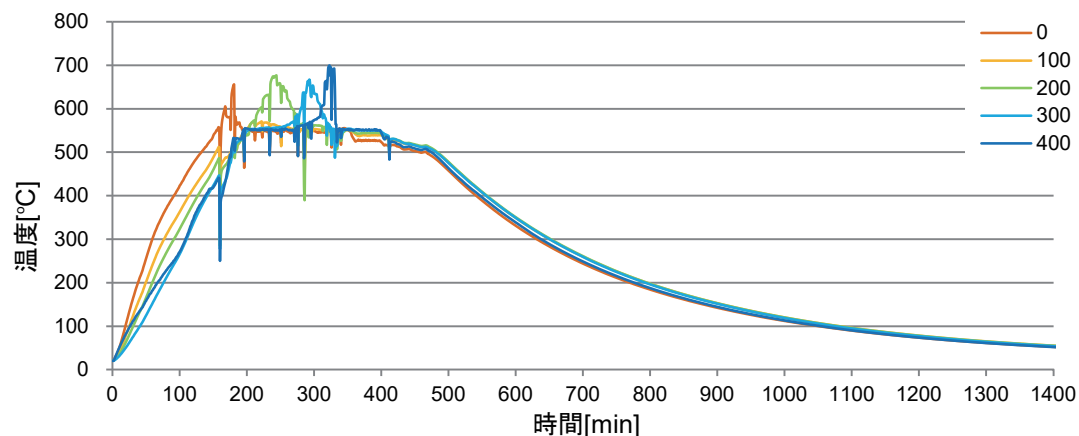
実験日：2020.05.28

試験体寸法：400×600×8

実験条件

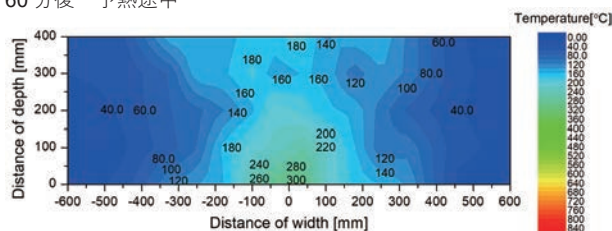
○温度履歴図

(溶着部)

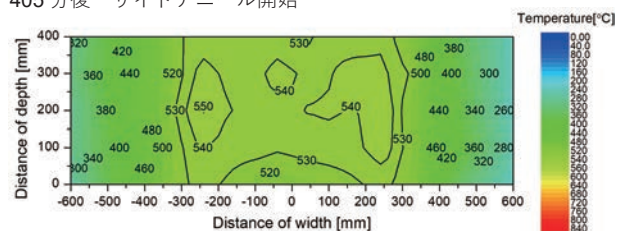


○温度等高線図

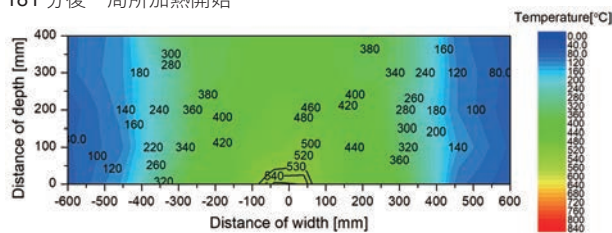
60 分後 予熱途中



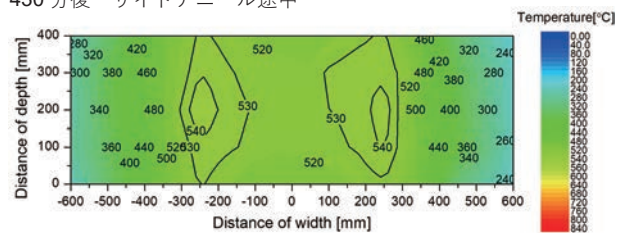
405 分後 サイドアニール開始



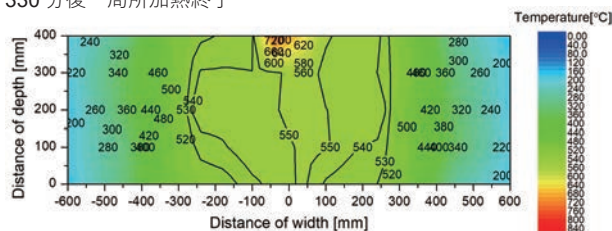
181 分後 局所加熱開始



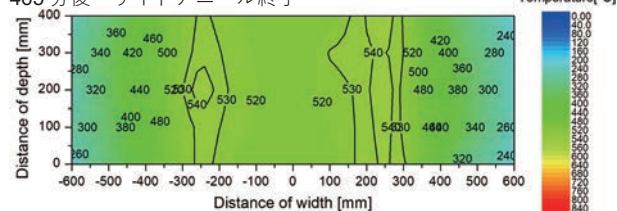
430 分後 サイドアニール途中



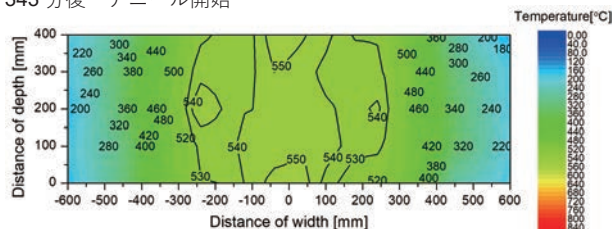
330 分後 局所加熱終了



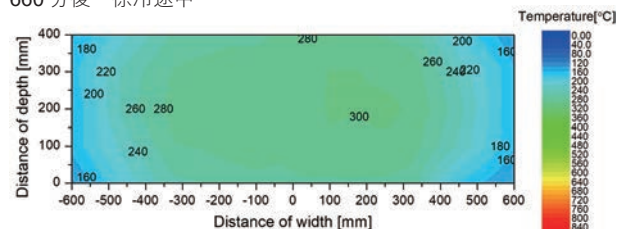
465 分後 サイドアニール終了



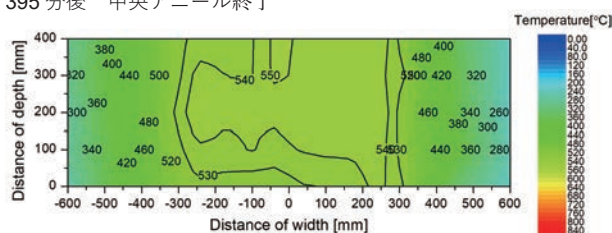
343 分後 アニール開始



660 分後 徐冷途中



395 分後 中央アニール終了



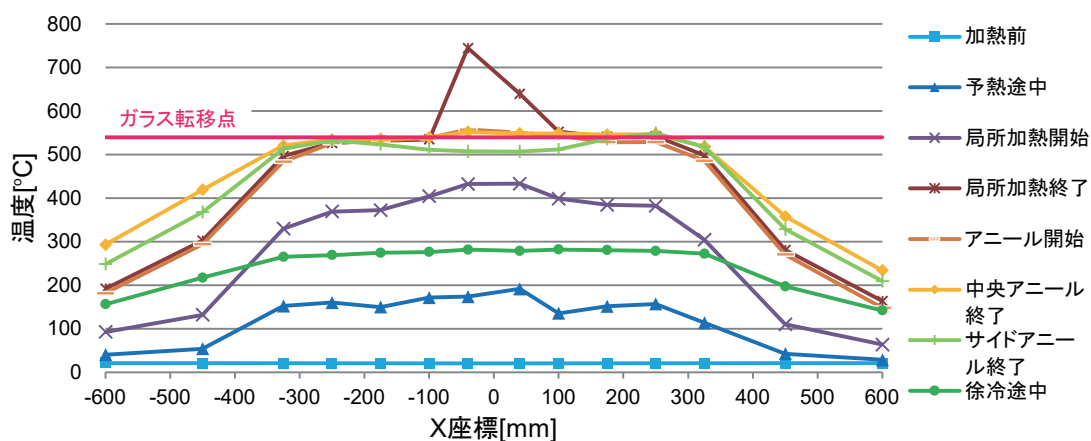
H-SN1

実験日：2020.05.28

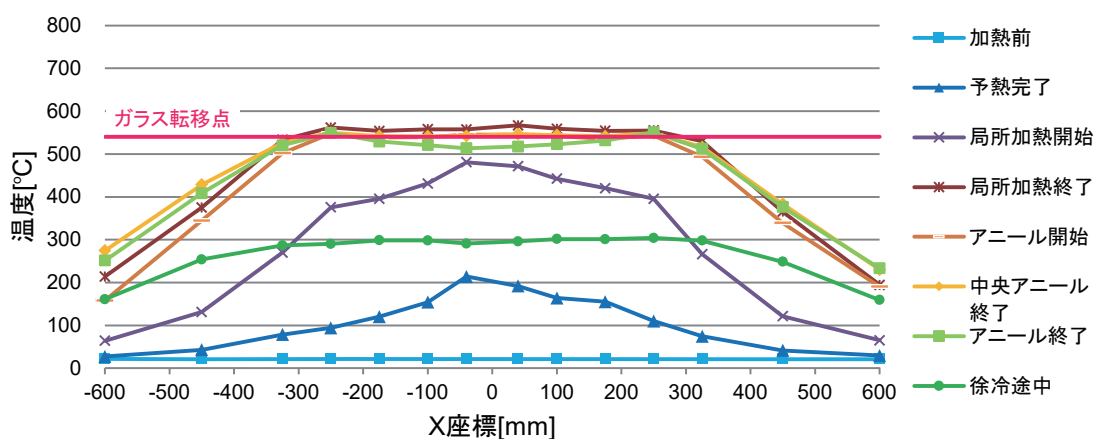
試験体寸法：400×600×8

実験条件

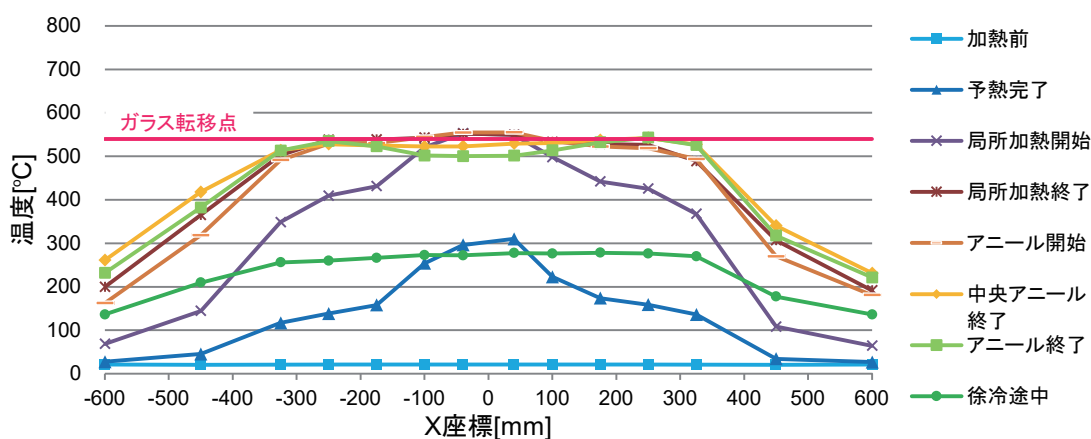
○温度分布図
Y = 400[mm]



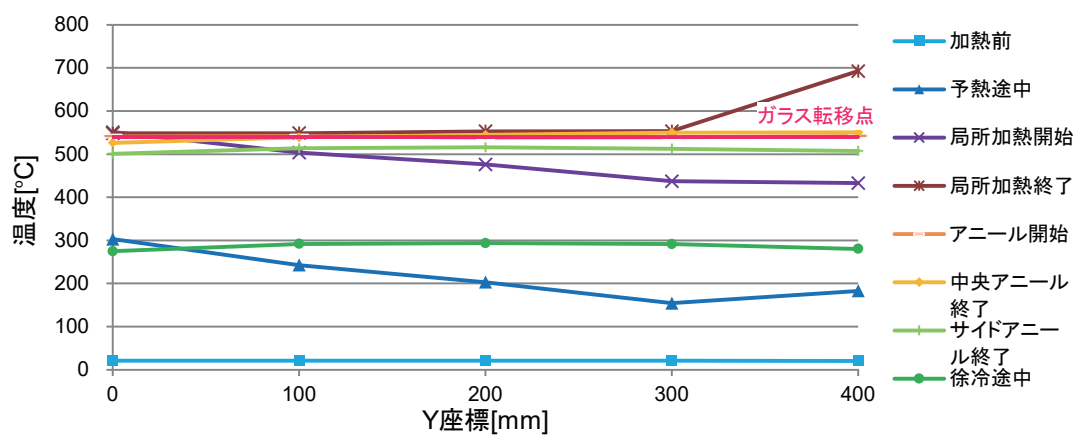
○温度分布図
Y = 200[mm]



○温度分布図
Y = 0[mm]



○温度分布図
(溶着部)



H-SN1

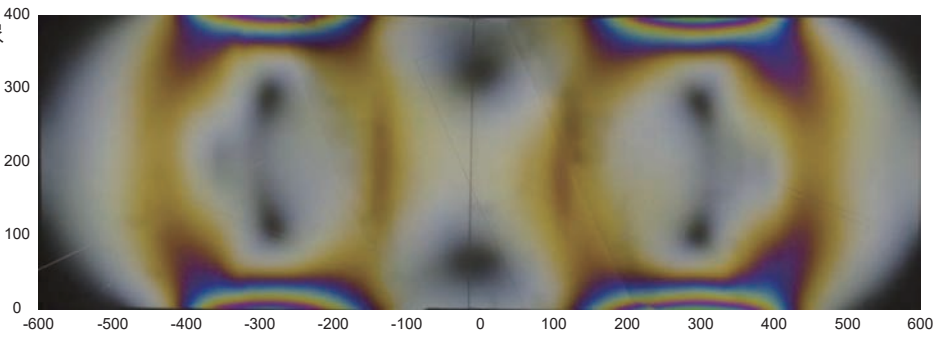
実験日：2020.05.28

試験体寸法：400×600×8

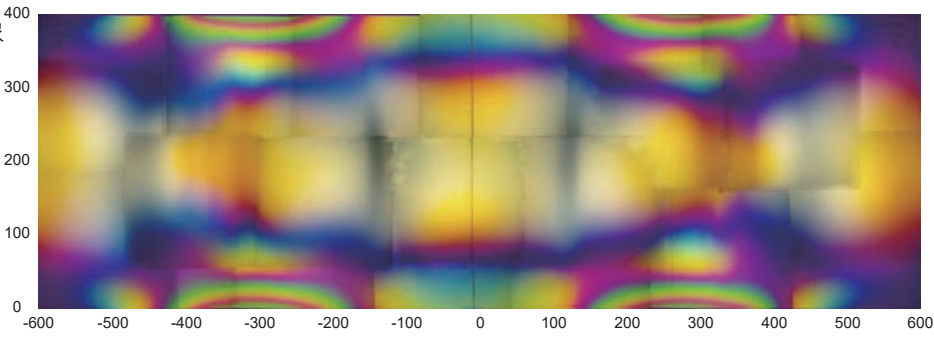
○試験体写真
(遅延割れ後)



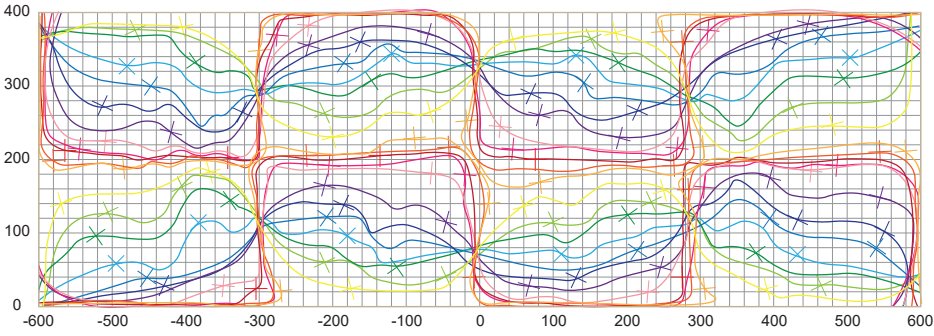
○等色線画像



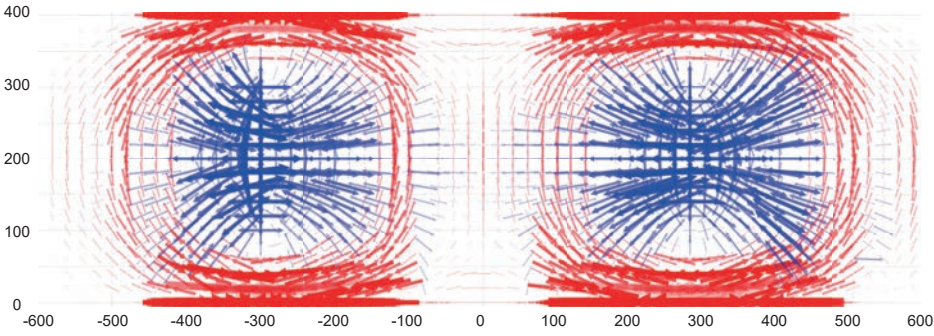
○鋭敏色画像



○等傾線図

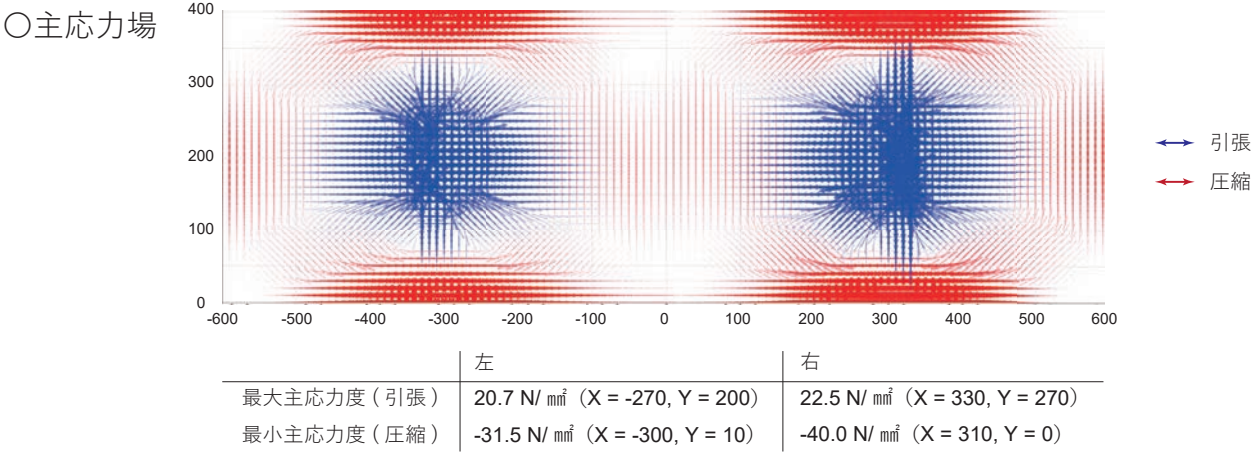


○主応力場



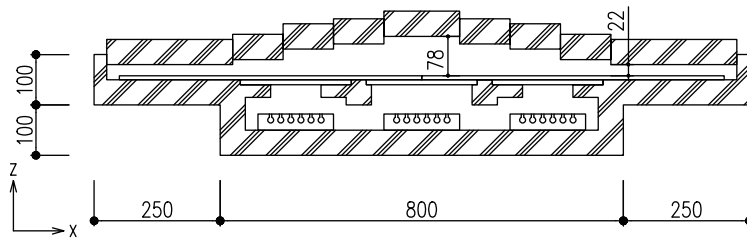
	左	右
最大主応力度 (引張)	30.7 N/mm ² (X = -320, Y = 200)	27.9 N/mm ² (X = 260, Y = 200)
最小主応力度 (圧縮)	-61.0 N/mm ² (X = -280, Y = 0)	-63.5 N/mm ² (X = 280, Y = 0)

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	中央ア ニール終 了	サイドア ニール開 始	サイドア ニール途 中	サイドア ニール終 了	徐冷途中	冷却終了
実験開始からの経過 時間 [min]	60	155	181	211	244	284	330	343	395	405	430	465	660	1800

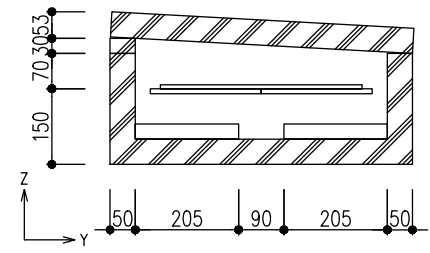


H-SN2 2020.06.05

予熱

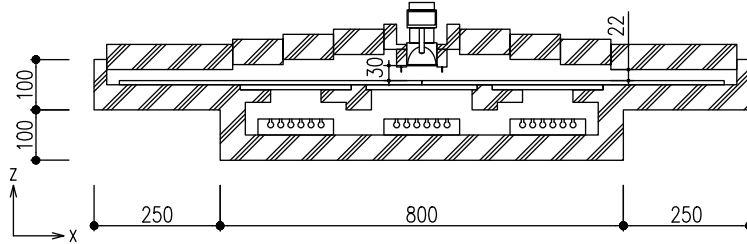


A-A'断面図

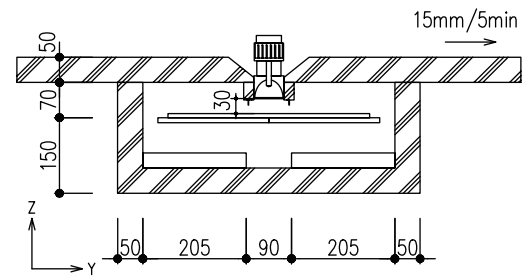


B-B'断面図

局所加熱

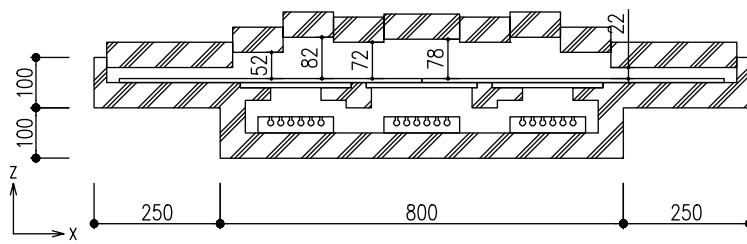


A-A'断面図

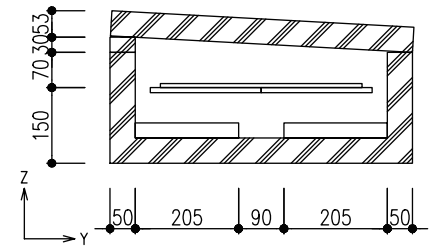


B-B'断面図

アニール

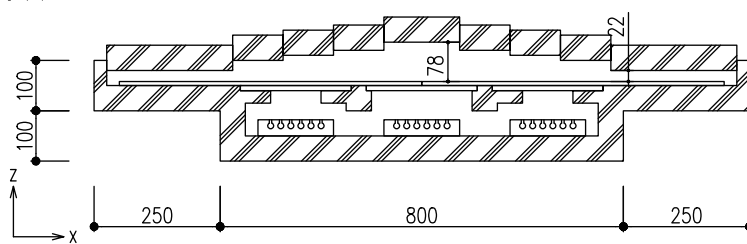


A-A'断面図

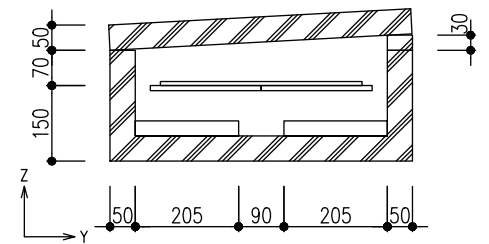


B-B'断面図

徐冷



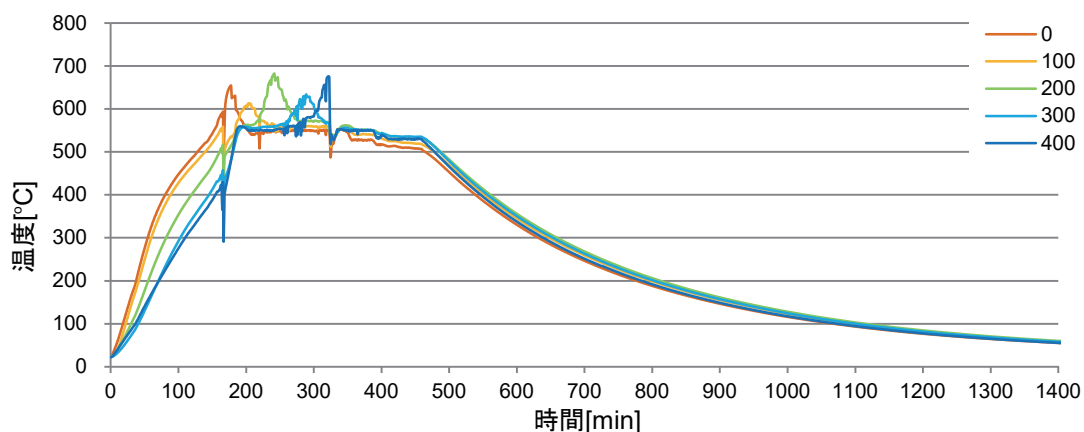
A-A'断面図



B-B'断面図

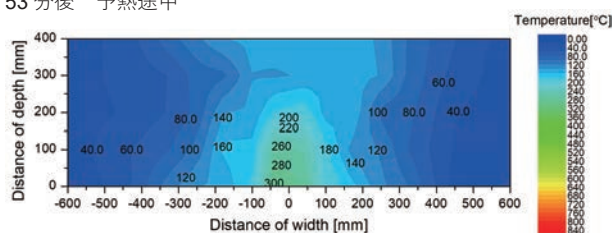
○温度履歴図

(溶着部)

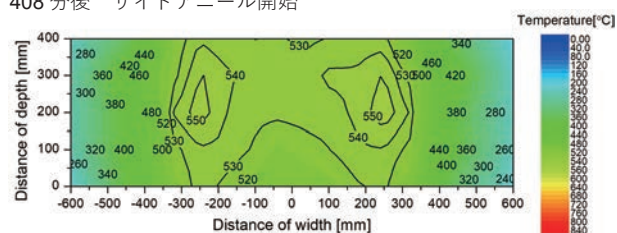


○温度等高線図

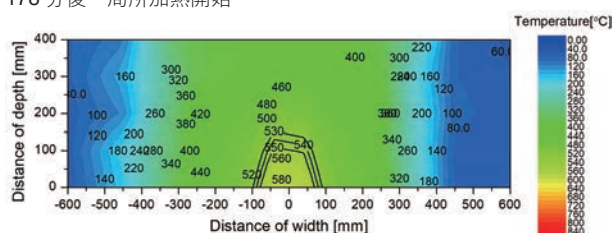
53 分後 予熱途中



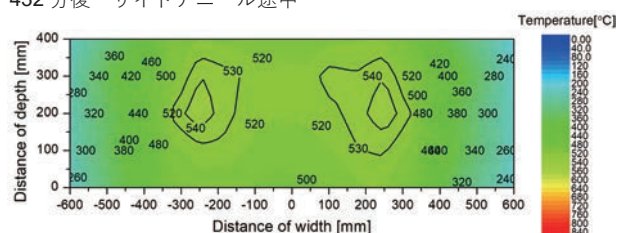
408 分後 サイドアニール開始



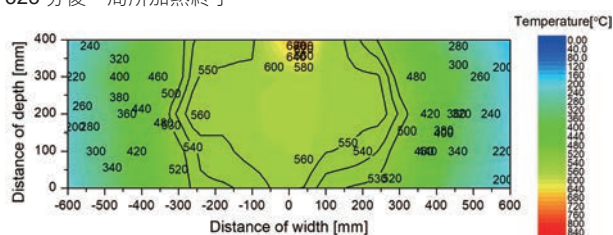
178 分後 局所加熱開始



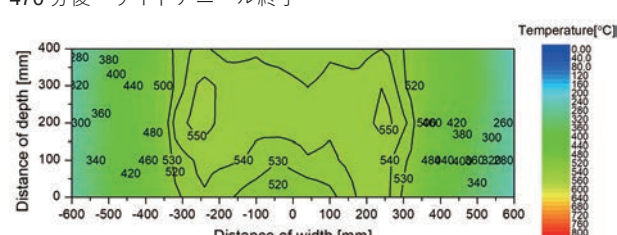
432 分後 サイドアニール途中



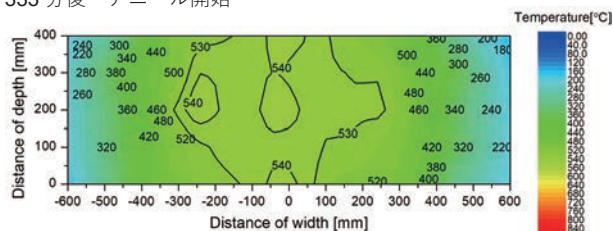
323 分後 局所加熱終了



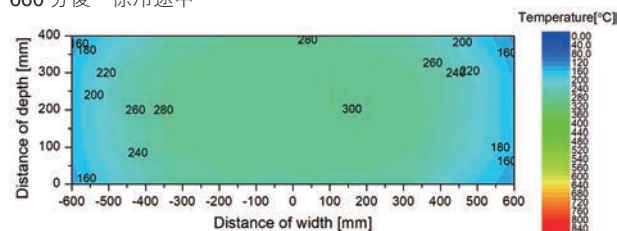
470 分後 サイドアニール終了



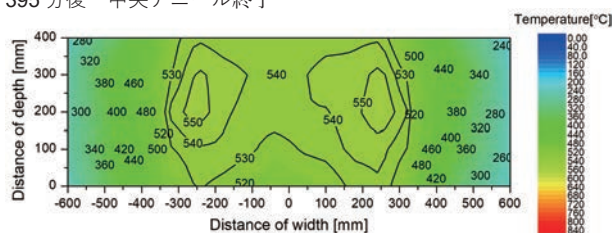
333 分後 アニール開始



660 分後 徐冷途中



395 分後 中央アニール終了



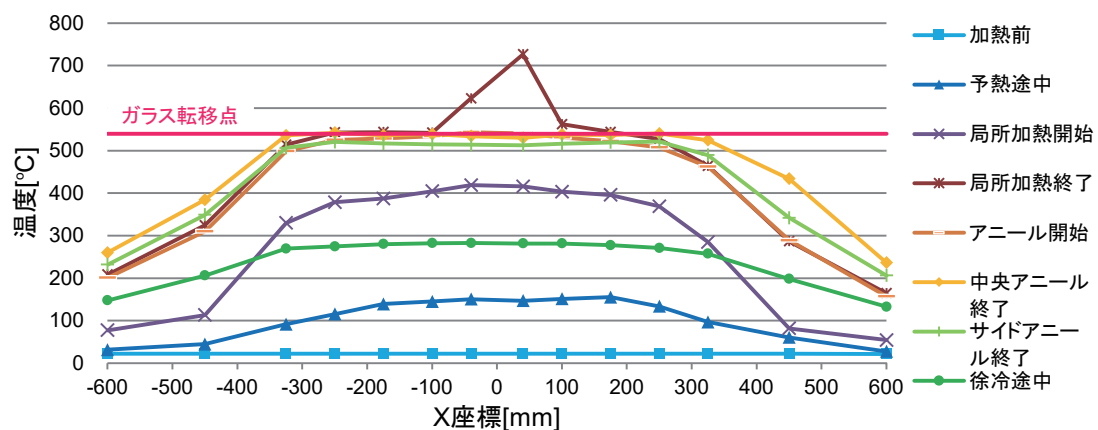
H-SN2

実験日：2020.06.05

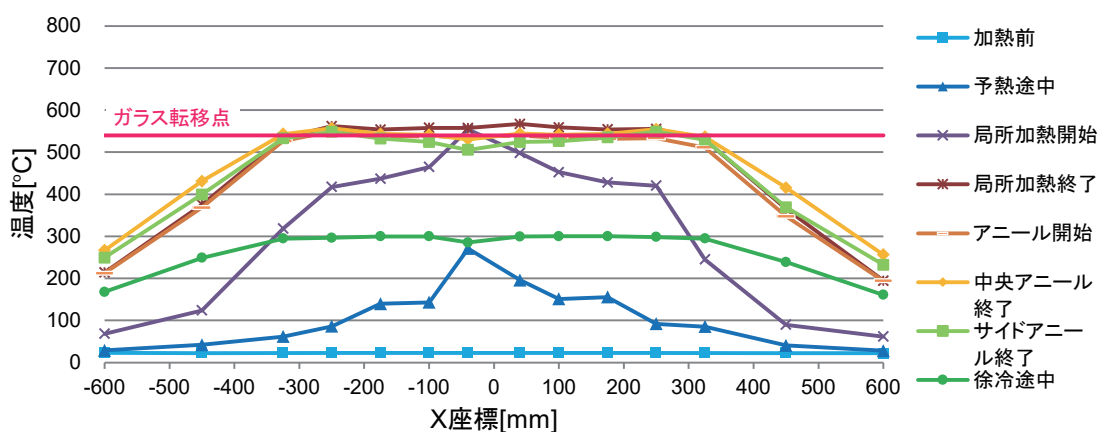
試験体寸法：400×600×8

実験条件

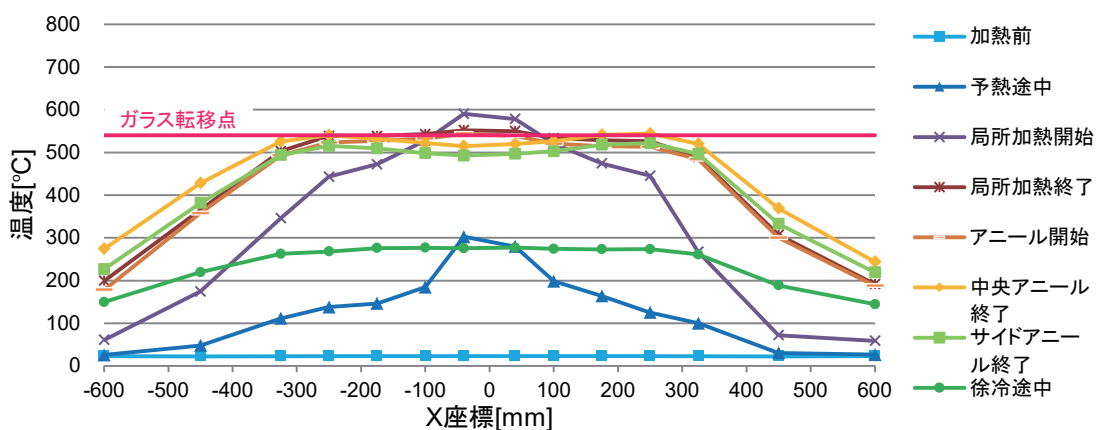
○温度分布図
Y = 400[mm]



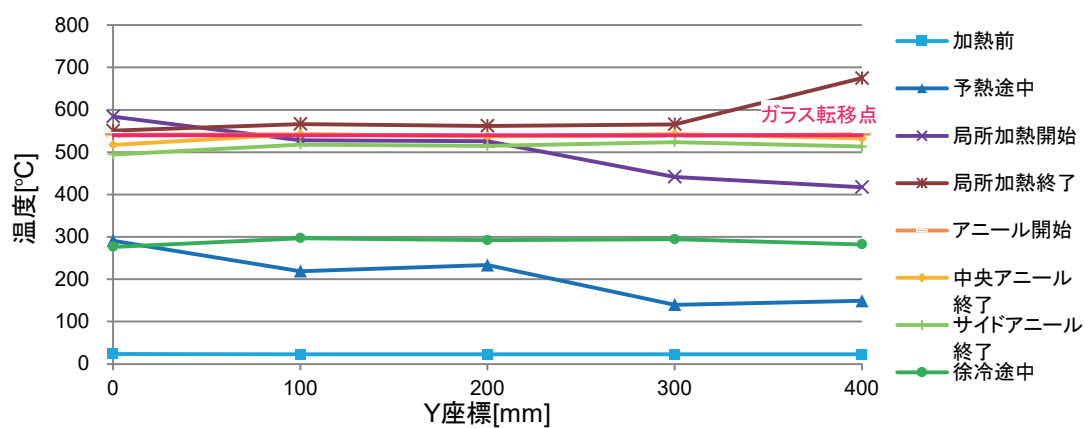
○温度分布図
Y = 200[mm]



○温度分布図
Y = 0[mm]



○温度分布図
(溶着部)



H-SN2

実験日：2020.06.05

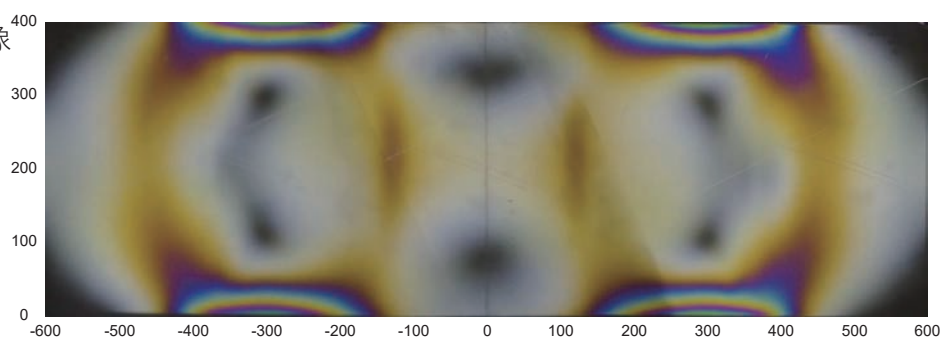
試験体寸法：400×600×8

実験結果

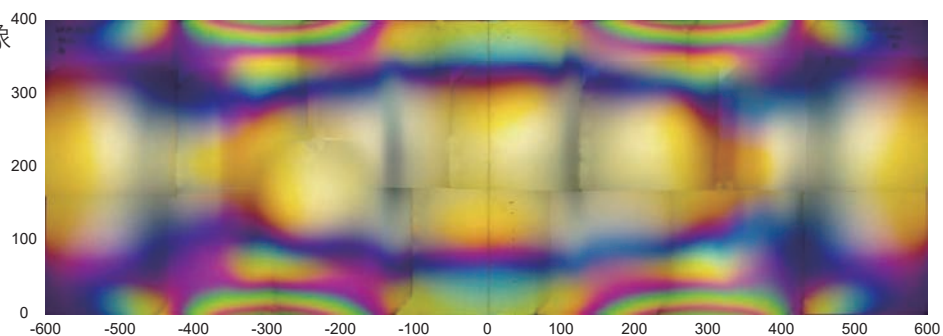
○試験体写真
(遅延割れ後)



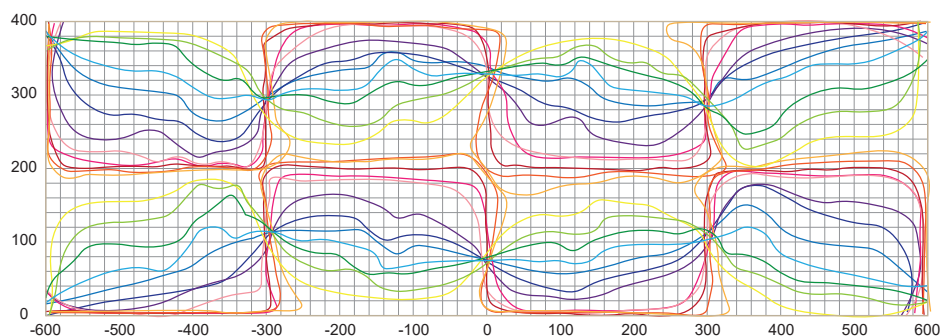
○等色線画像



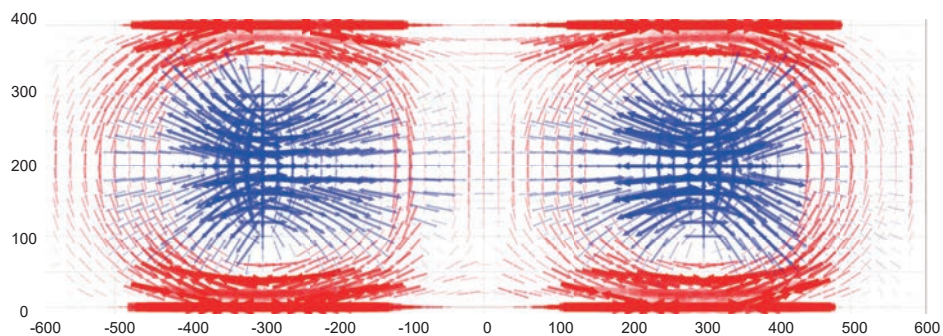
○鋭敏色画像



○等傾線図



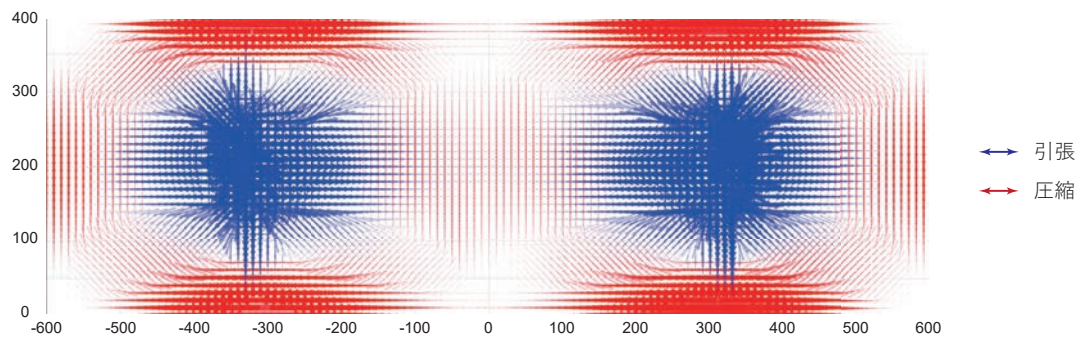
○主応力場



	左	右
最大主応力度 (引張)	27.5 N/mm ² (X = -320, Y = 200)	27.4 N/mm ² (X = 240, Y = 160)
最小主応力度 (圧縮)	-63.5 N/mm ² (X = -300, Y = 400)	-65.9 N/mm ² (X = 300, Y = 0)

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	中央ア ニール終 了	サイドア ニール開 始	サイドア ニール途 中	サイドア ニール終 了	徐冷途中	冷却終了
実験開始からの経過 時間 [min]	53	153	178	207	247	289	323	333	395	408	432	470	660	1800

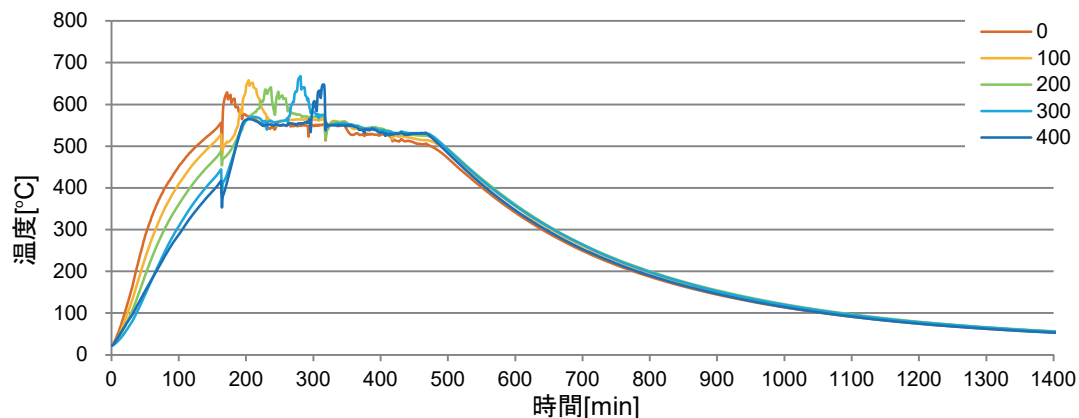
○主応力場



	左	右
最大主応力度 (引張)	26.1 N/mm ² (X = -330, Y = 210)	28.6 N/mm ² (X = 330, Y = 190)
最小主応力度 (圧縮)	-40.9 N/mm ² (X = -340, Y = 390)	-42.1 N/mm ² (X = 300, Y = 10)

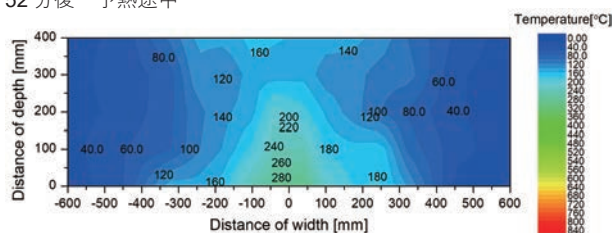
○温度履歴図

(溶着部)

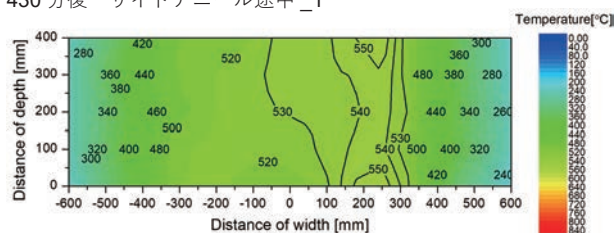


○温度等高線図

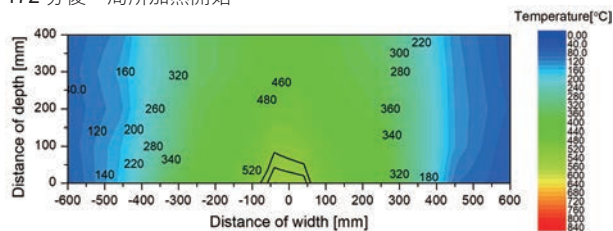
52 分後 予熱途中



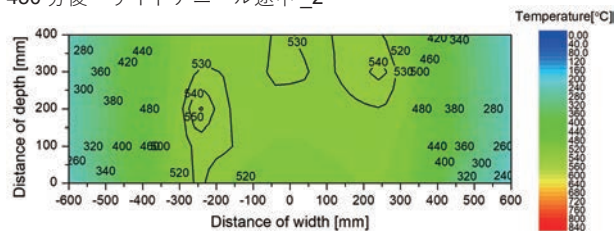
430 分後 サイドアニール途中_1



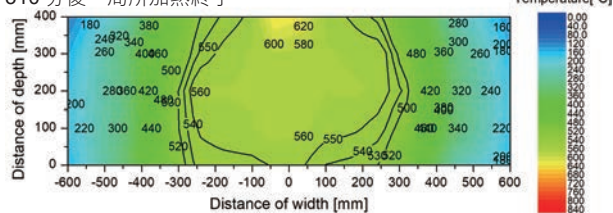
172 分後 局所加熱開始



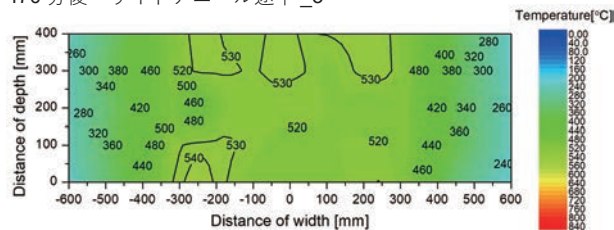
450 分後 サイドアニール途中_2



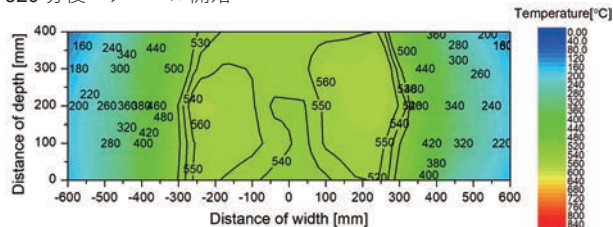
310 分後 局所加熱終了



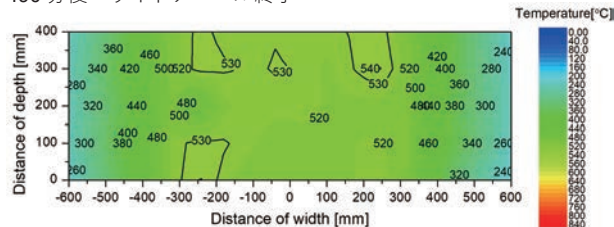
470 分後 サイドアニール途中_3



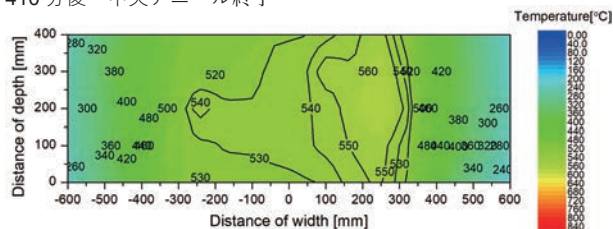
320 分後 アニール開始



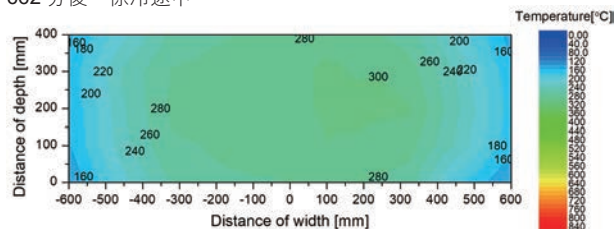
490 分後 サイドアニール終了



410 分後 中央アニール終了



662 分後 徐冷途中



H-SA1

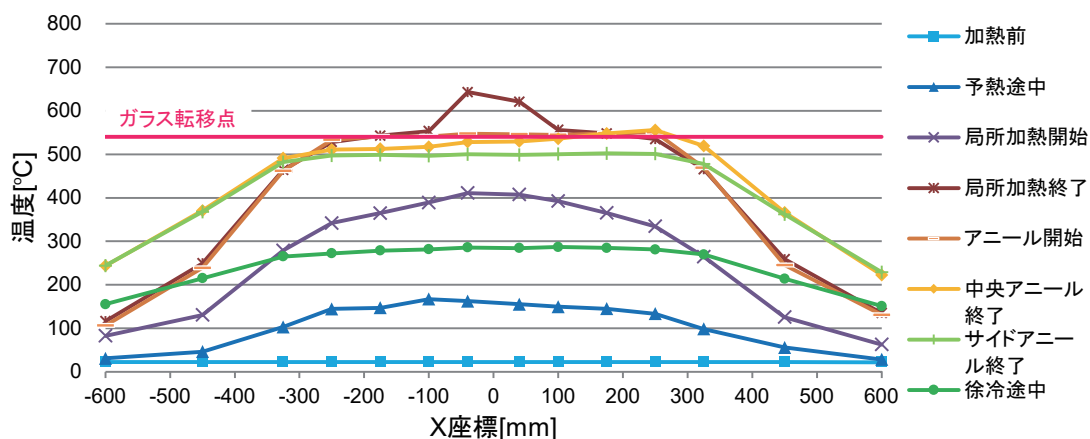
実験日：2020.06.19

試験体寸法：400×600×8

実験条件

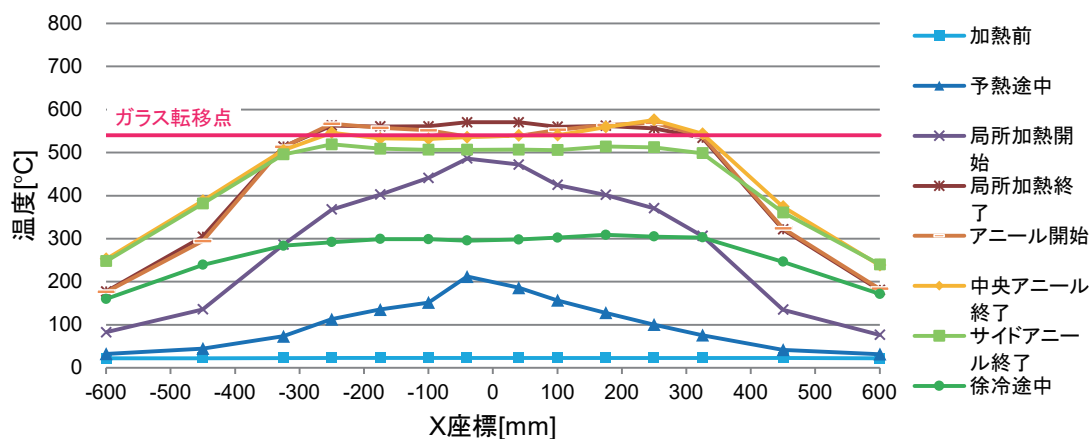
○温度分布図

Y = 400[mm]



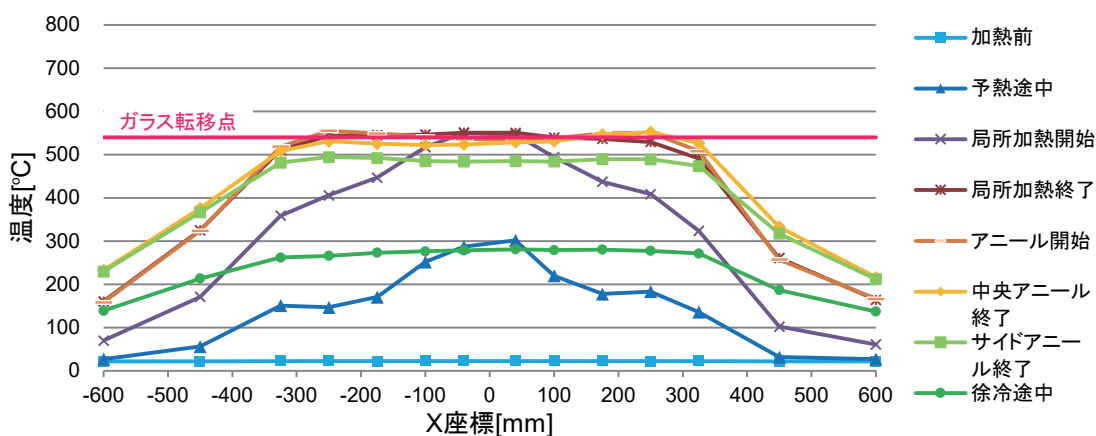
○温度分布図

Y = 200[mm]



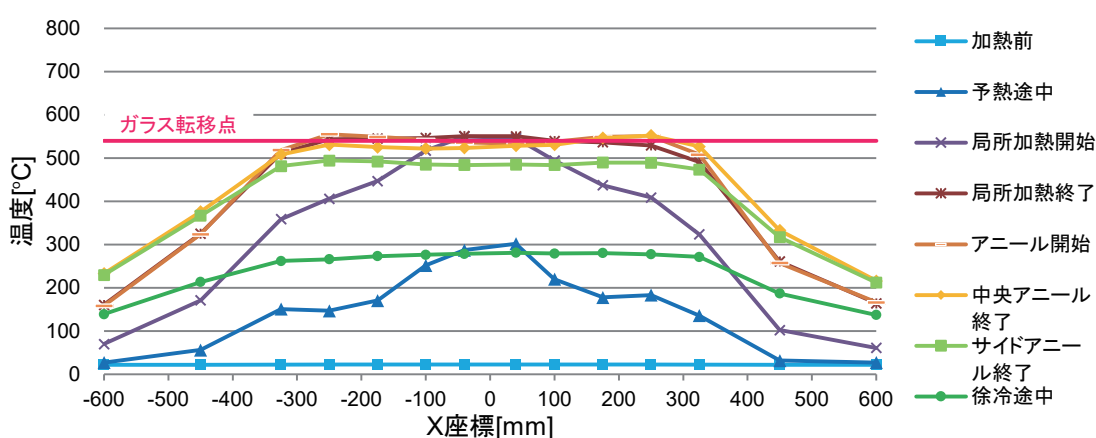
○温度分布図

Y = 0[mm]



○温度分布図

(溶着部)



H-SA1

実験日：2020.06.19

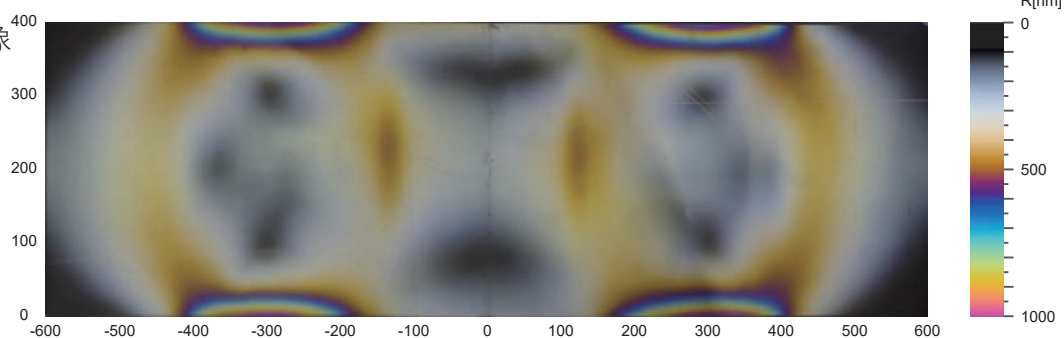
試験体寸法：400×600×8

実験結果

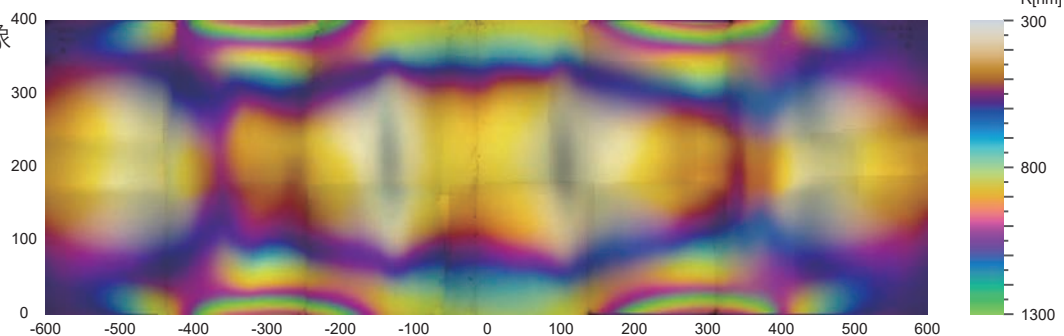
○試験体写真



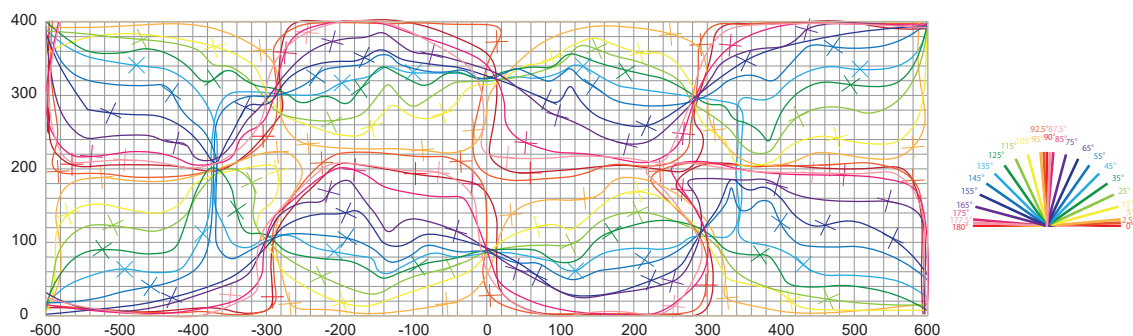
○等色線画像



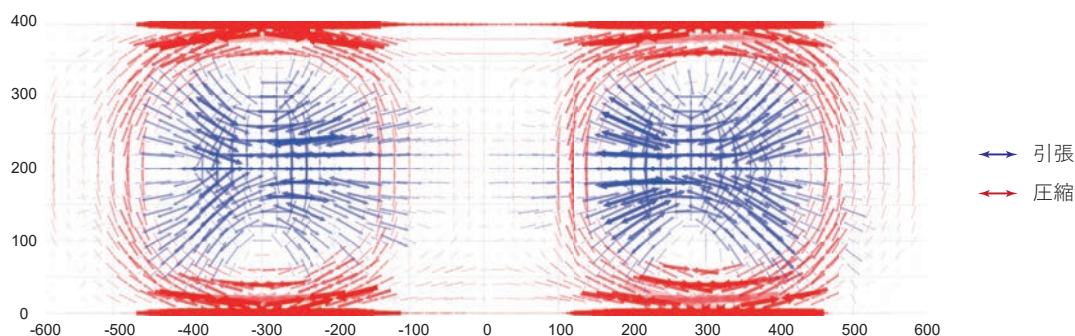
○鋭敏色画像



○等傾線図



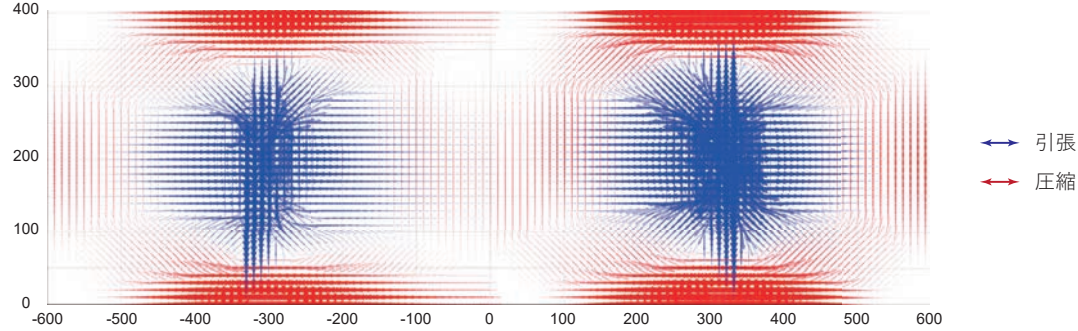
○主応力場



	左	右
最大主応力度 (引張)	23.4 N/mm ² (X = -240, Y = 240)	23.0 N/mm ² (X = 200, Y = 220)
最小主応力度 (圧縮)	-56.2 N/mm ² (X = -300, Y = 400)	-56.2 N/mm ² (X = 280, Y = 400)

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	中央ア ニール終 了	サイドア ニール 1	サイドア ニール 2	サイドア ニール 3	サイドア ニール終 了	徐冷途中	冷却終了
実験開始からの経過 時間 [min]	52	159	172	209	248	281	310	320	410	430	450	470	490	662	1800

○主応力場

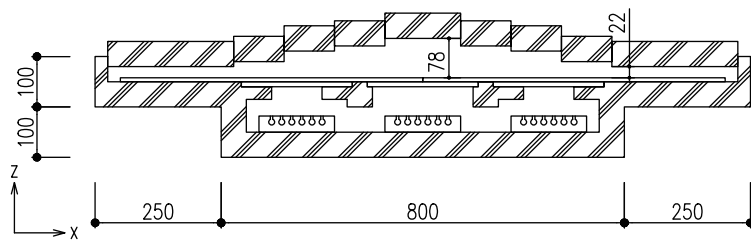


	左	右
最大主応力度 (引張)	24.4 N/ mm ² (X = -310, Y = 210)	30.2 N/ mm ² (X = 330, Y = 200)
最小主応力度 (圧縮)	-34.7 N/ mm ² (X = -310, Y = 0)	-40.3 N/ mm ² (X = 300, Y = 390)

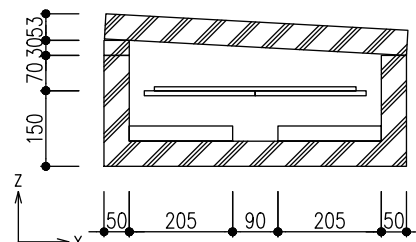
H-SA2

2020.07.21

予熱

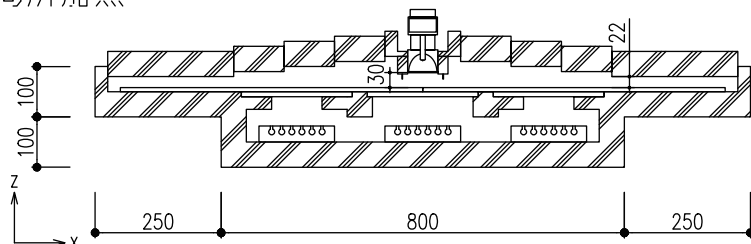


A-A'断面図

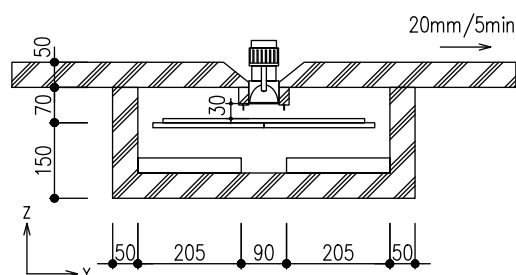


B-B'断面図

局所加熱

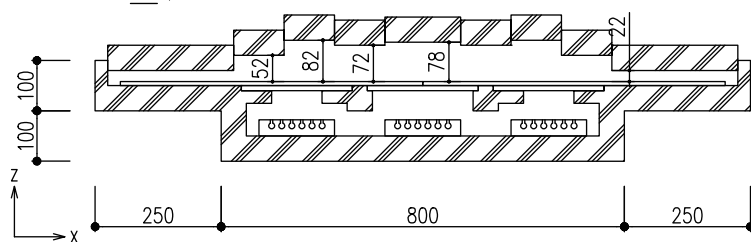


A-A'断面図

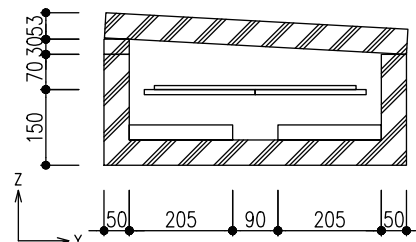


B-B'断面図

アニール_1

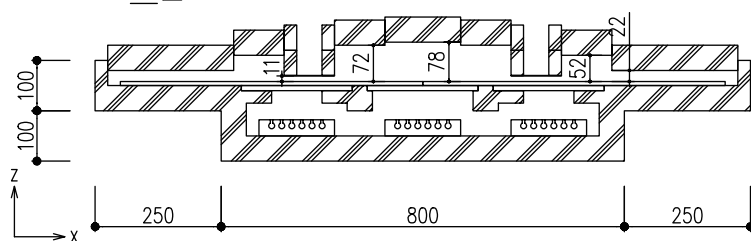


A-A'断面図

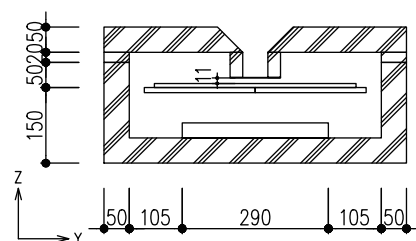


B-B'断面図

アニール_2

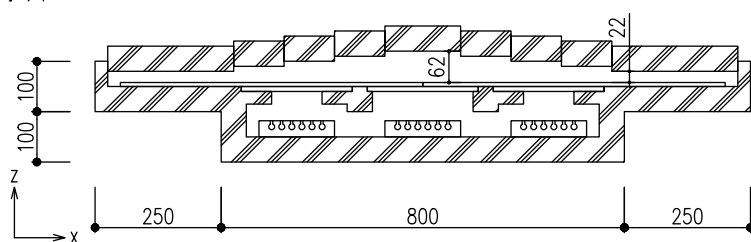


A-A'断面図

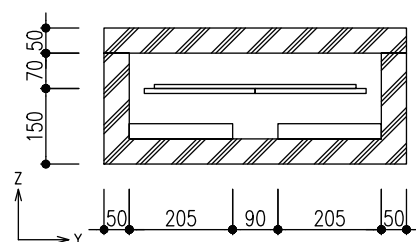


C-C'断面図

徐冷



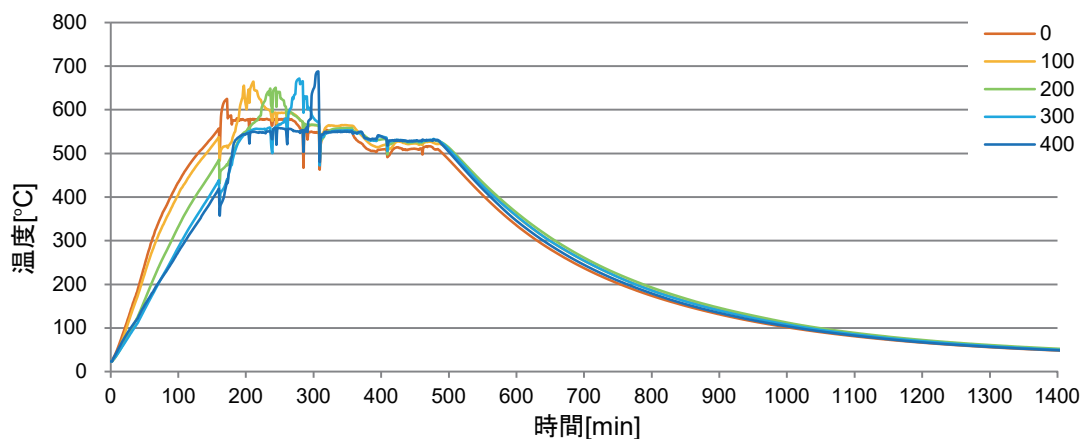
A-A'断面図



B-B'断面図

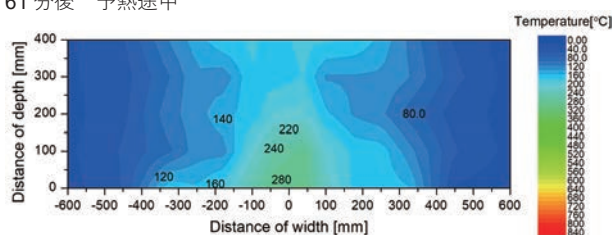
○温度履歴図

(溶着部)

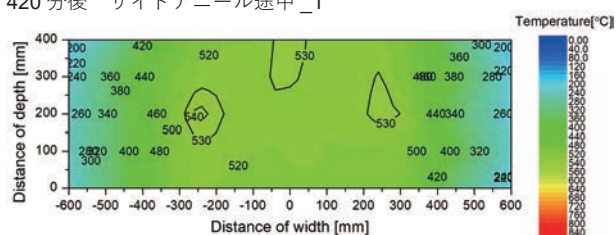


○温度等高線図

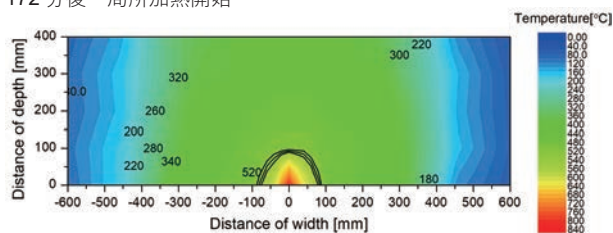
61 分後 予熱途中



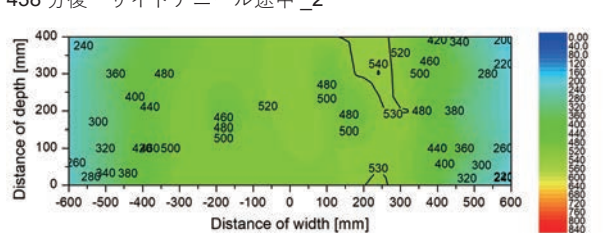
420 分後 サイドアニール途中_1



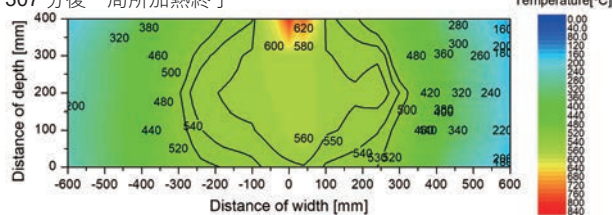
172 分後 局所加熱開始



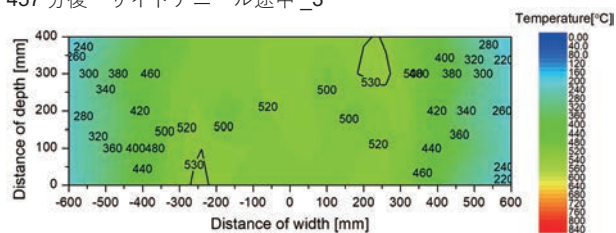
438 分後 サイドアニール途中_2



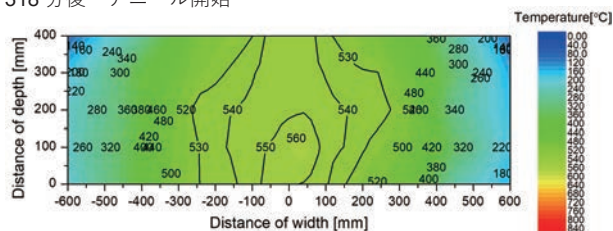
307 分後 局所加熱終了



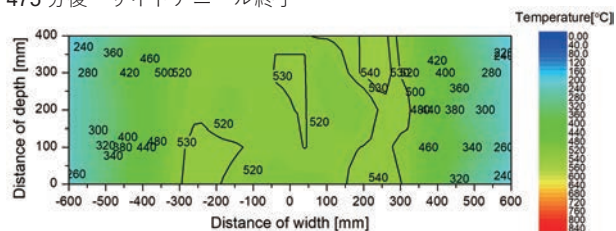
457 分後 サイドアニール途中_3



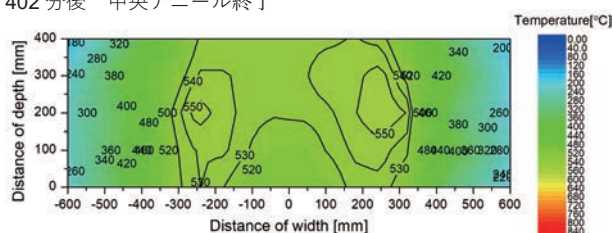
318 分後 アニール開始



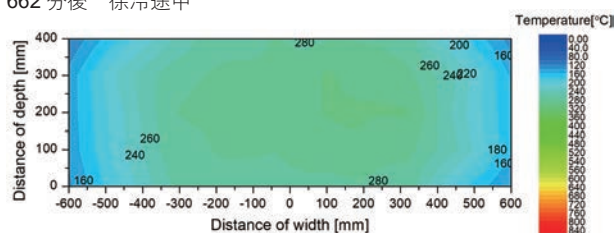
475 分後 サイドアニール終了



402 分後 中央アニール終了



662 分後 徐冷途中



H-SA2

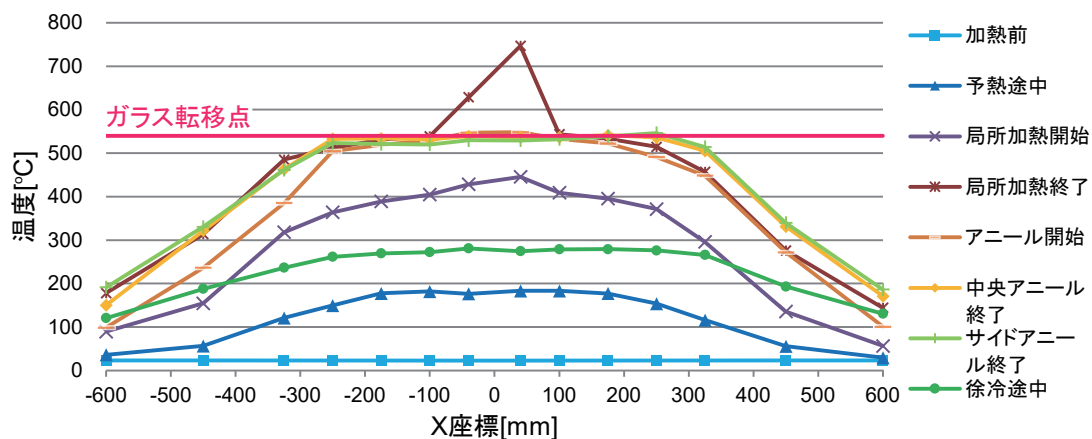
実験日：2020.07.21

試験体寸法：400×600×8

実験条件

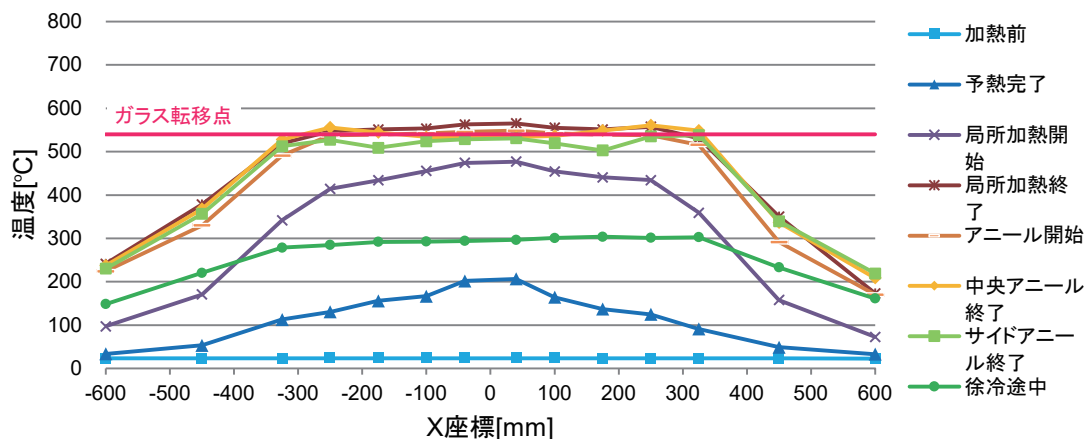
○温度分布図

Y = 400[mm]



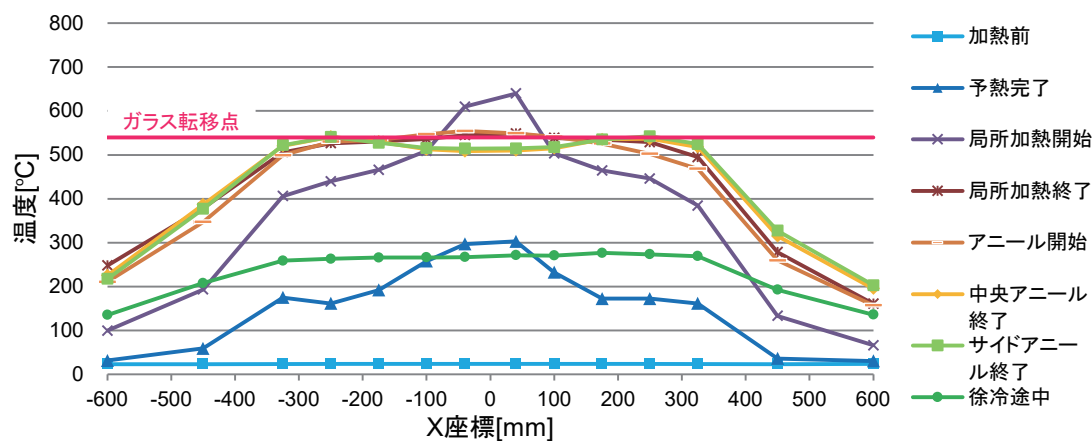
○温度分布図

Y = 200[mm]



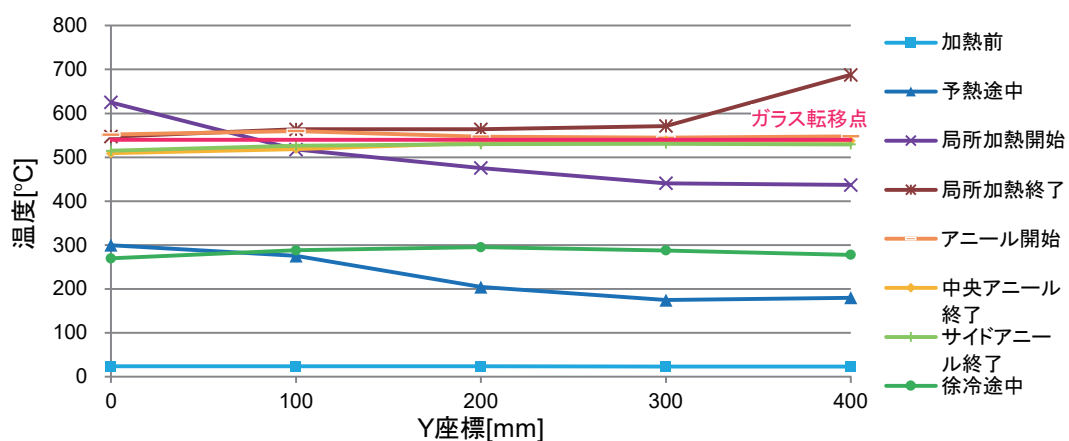
○温度分布図

Y = 0[mm]



○温度分布図

(溶着部)



H-SA2

実験日：2020.07.21

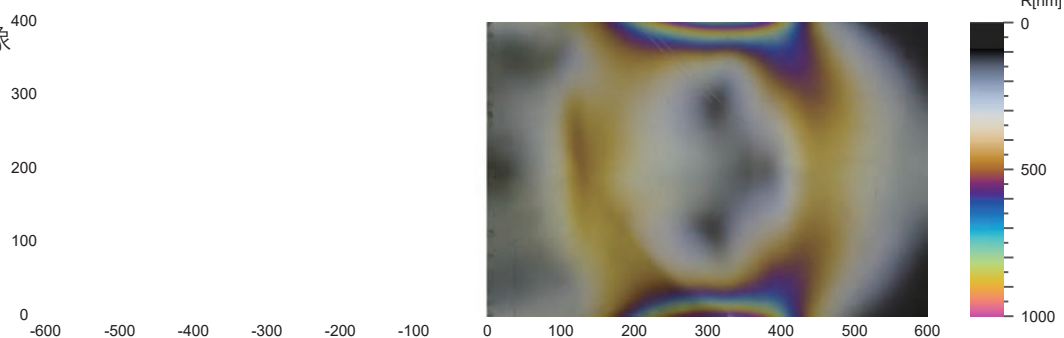
試験体寸法：400×600×8

実験結果

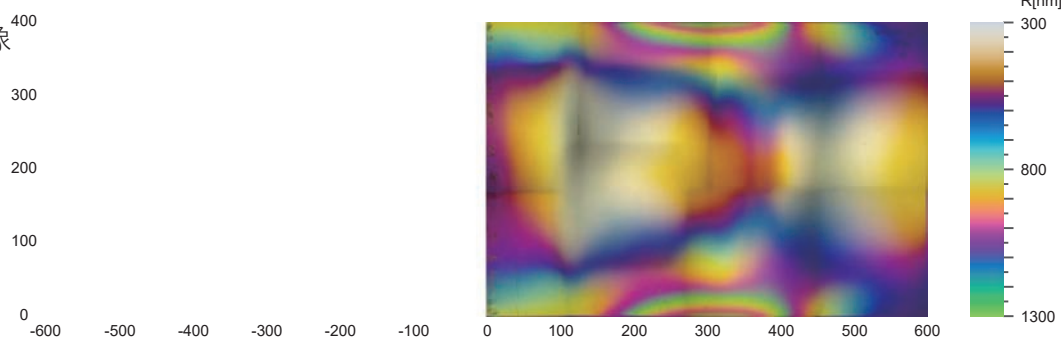
○試験体写真



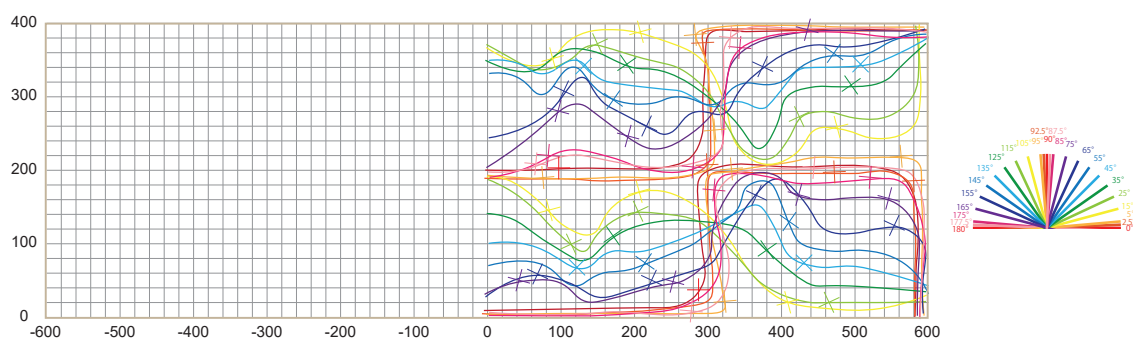
○等色線画像



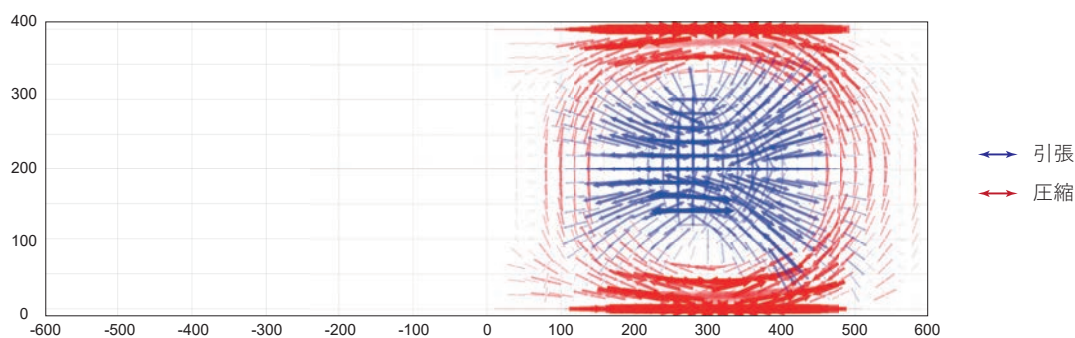
○鋭敏色画像



○等傾線図



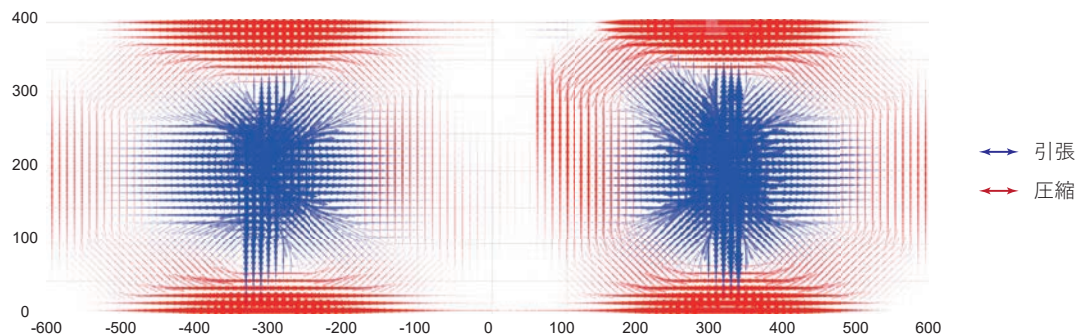
○主応力場



	左	右
最大主応力度 (引張)		28.5 N/mm ² (X = 280, Y = 140)
最小主応力度 (圧縮)		-61.0 N/mm ² (X = 300, Y = 400)

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	中央ア ニール終 了	サイドア ニール 1	サイドア ニール 2	サイドア ニール 3	サイドア ニール終 了	徐冷途中	冷却終了
実験開始からの経過 時間 [min]	61	157	172	204	250	290	307	318	402	420	438	457	475	662	1450

○主応力場

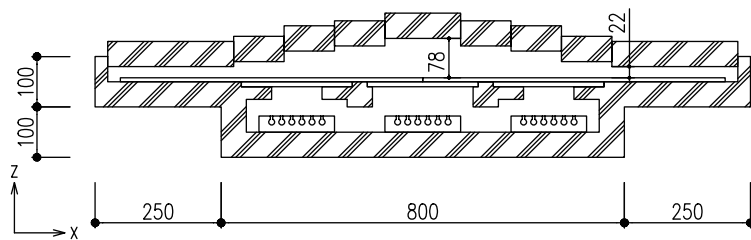


	左	右
最大主応力度 (引張)	24.9 N/mm ² (X = -310, Y = 200)	36.4 N/mm ² (X = 330, Y = 200)
最小主応力度 (圧縮)	-35.2 N/mm ² (X = -300, Y = 10)	-35.9 N/mm ² (X = 300, Y = 390)

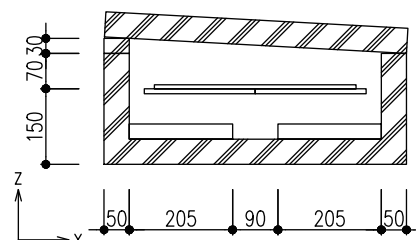
L-SA

2020.07.13

予熱

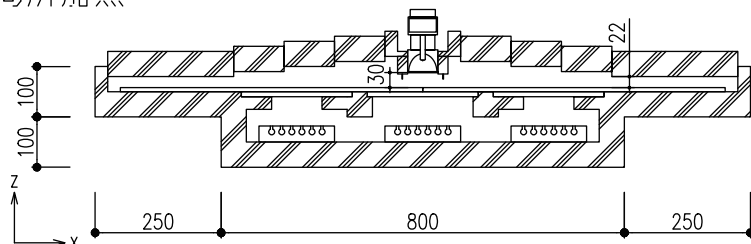


A-A'断面図

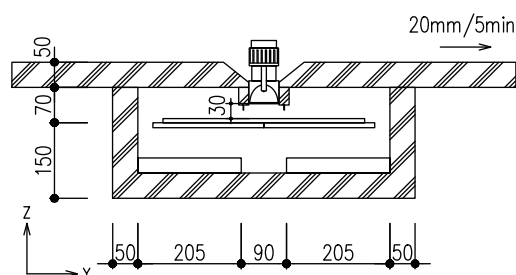


B-B'断面図

局所加熱

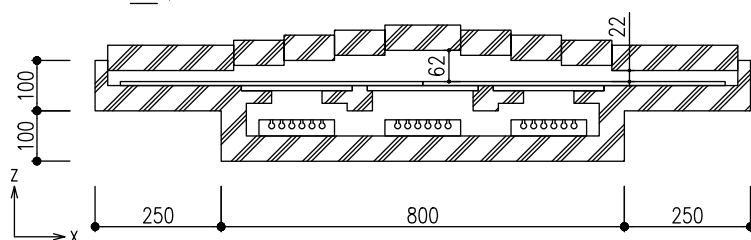


A-A'断面図

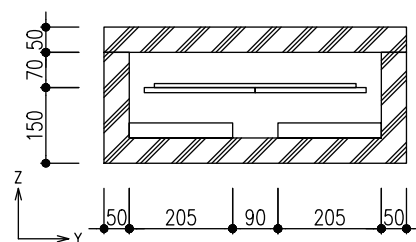


B-B'断面図

アニール_1

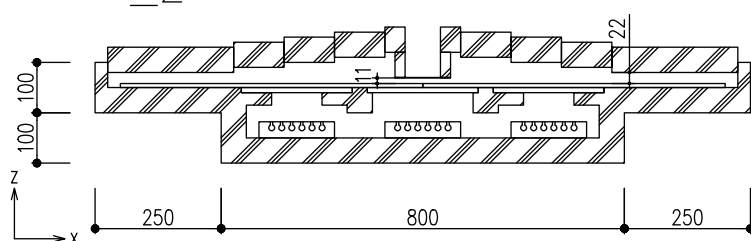


A-A'断面図

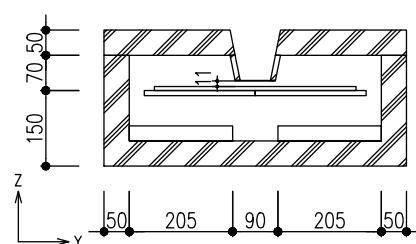


B-B'断面図

アニール_2

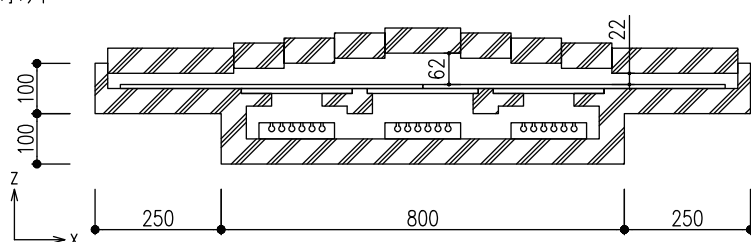


A-A'断面図

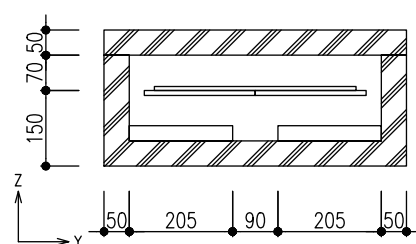


B-B'断面図

徐冷



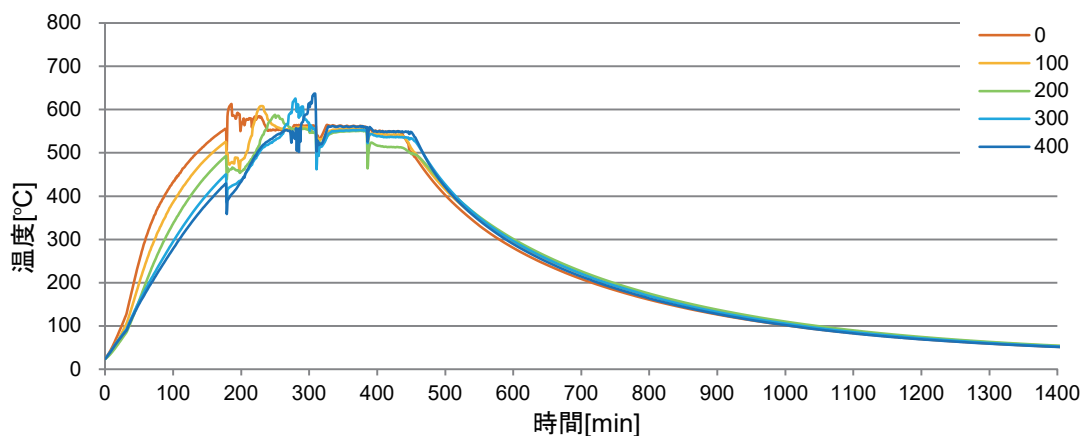
A-A'断面図



B-B'断面図

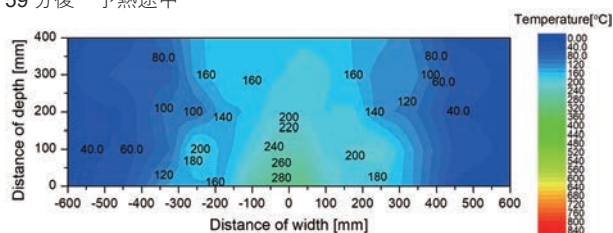
○温度履歴図

(溶着部)

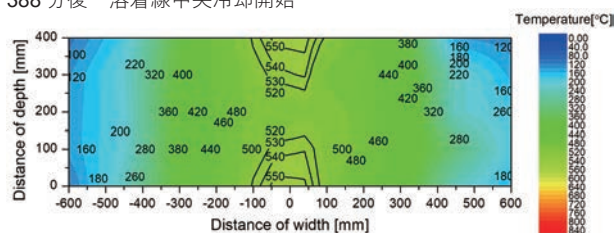


○温度等高線図

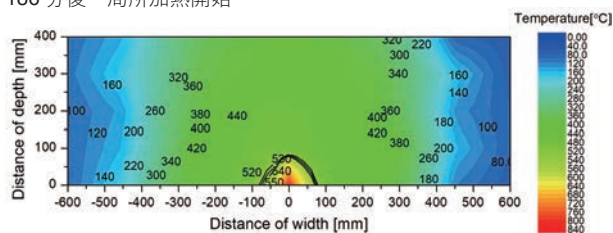
59 分後 予熱途中



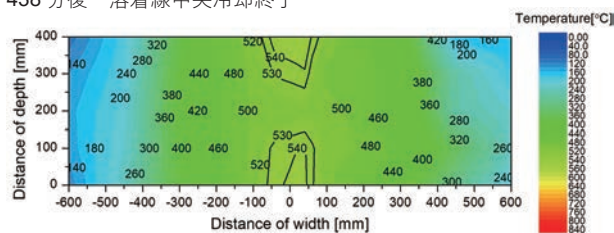
388 分後 溶着線中央冷却開始



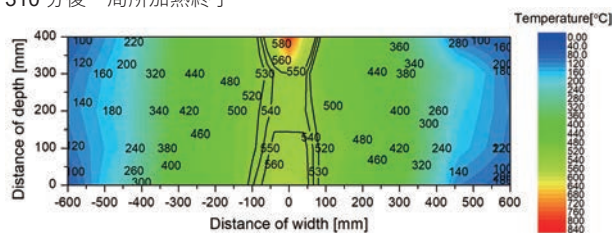
186 分後 局所加熱開始



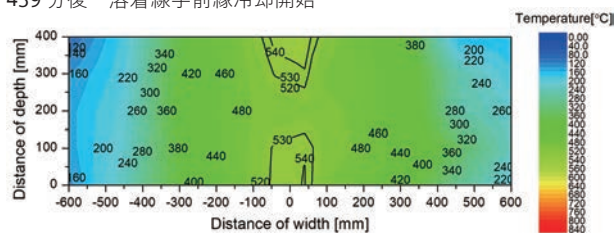
438 分後 溶着線中央冷却終了



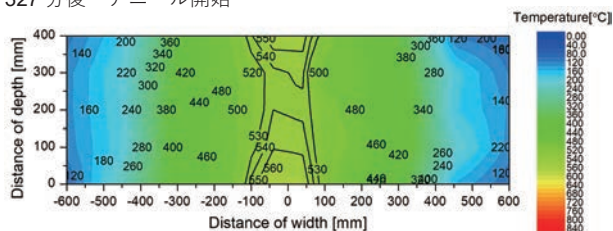
310 分後 局所加熱終了



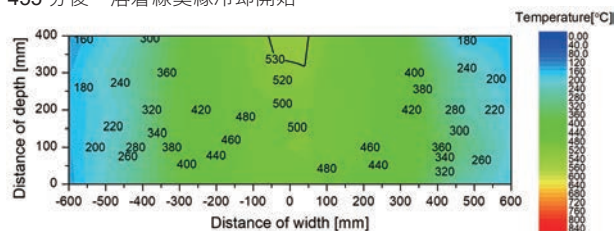
439 分後 溶着線手前縁冷却開始



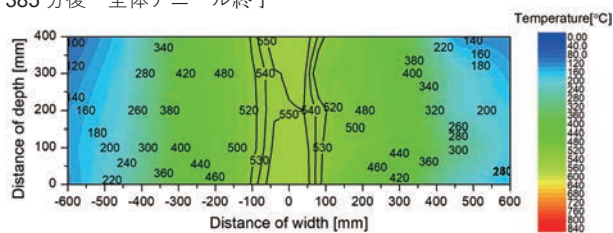
327 分後 アニール開始



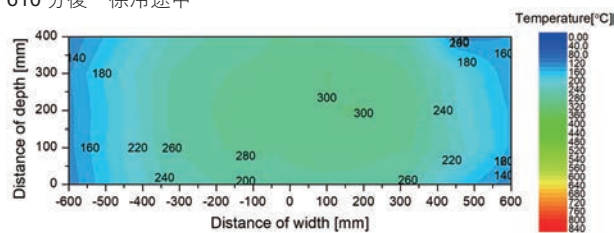
455 分後 溶着線奥縁冷却開始



385 分後 全体アニール終了



610 分後 徐冷途中



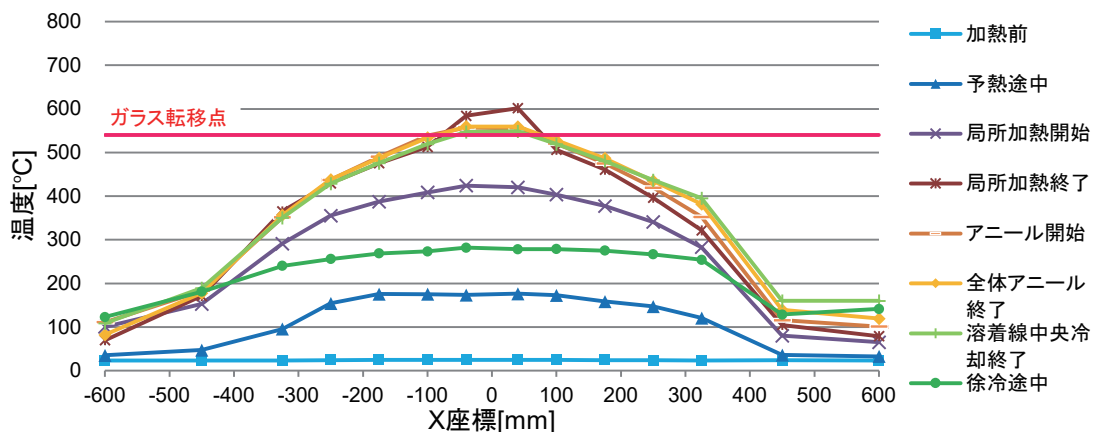
L-SA

実験日：2020.07.13

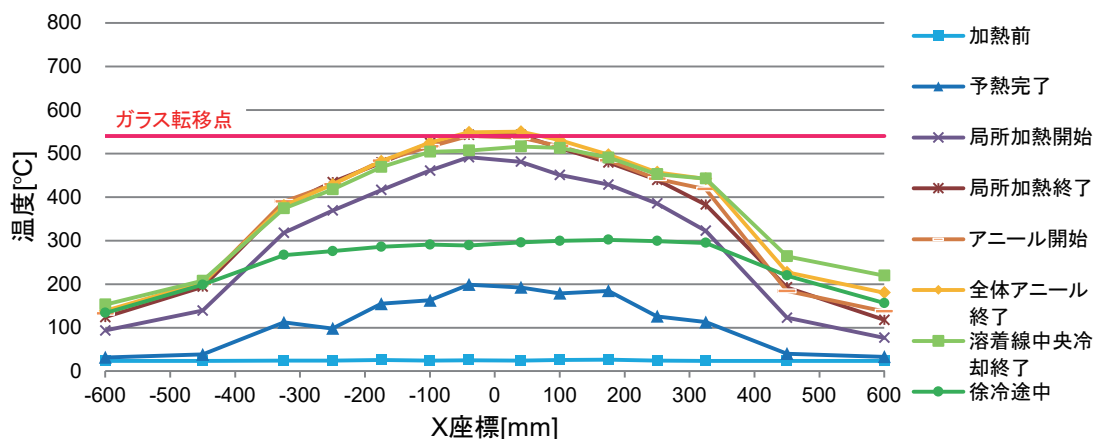
試験体寸法：400×600×8

実験条件

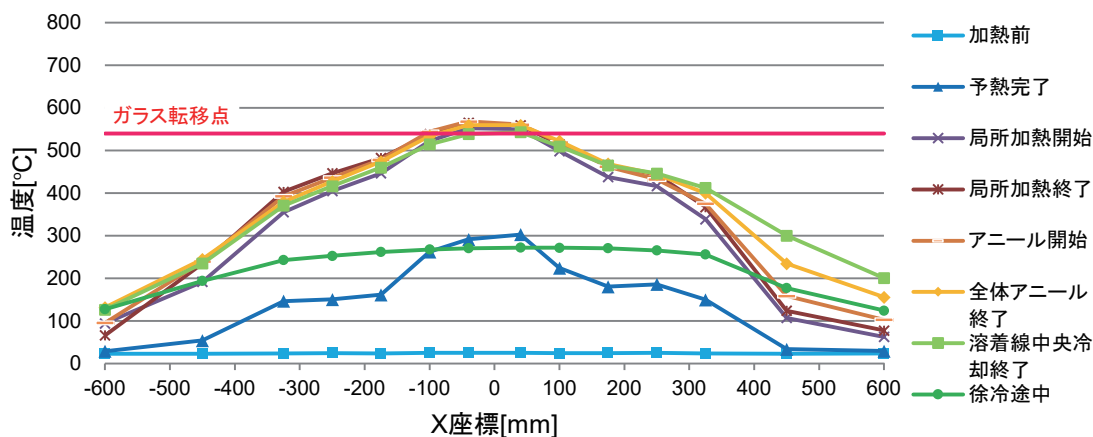
○温度分布図
Y = 400[mm]



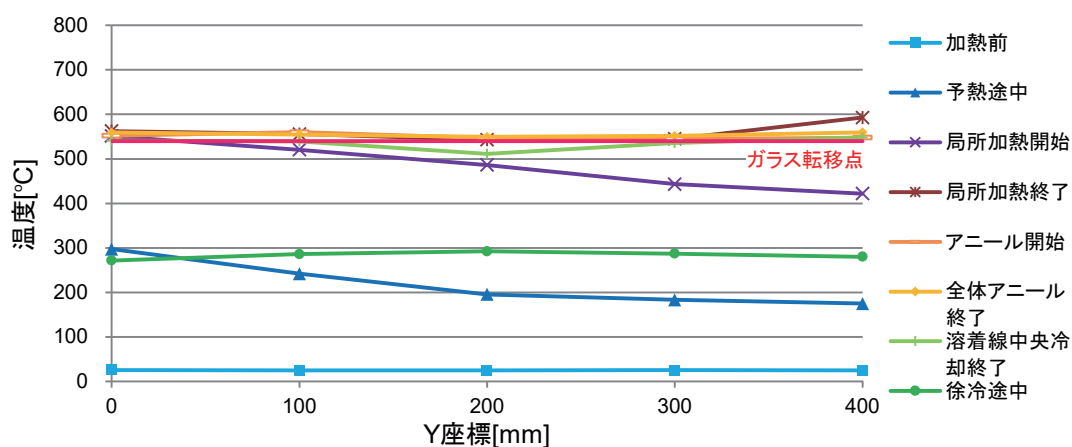
○温度分布図
Y = 200[mm]



○温度分布図
Y = 0[mm]



○温度分布図
(溶着部)



L-SA

実験日：2020.07.13

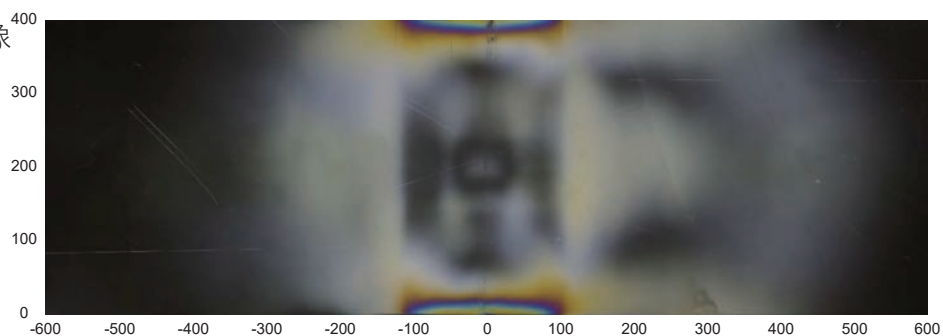
試験体寸法：400×600×8

実験結果

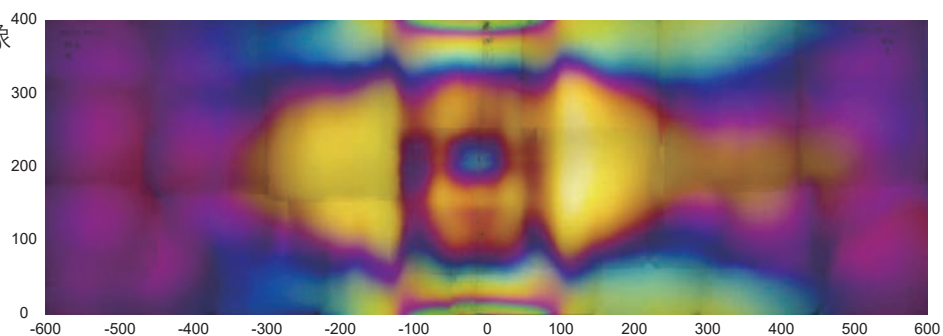
○試験体写真



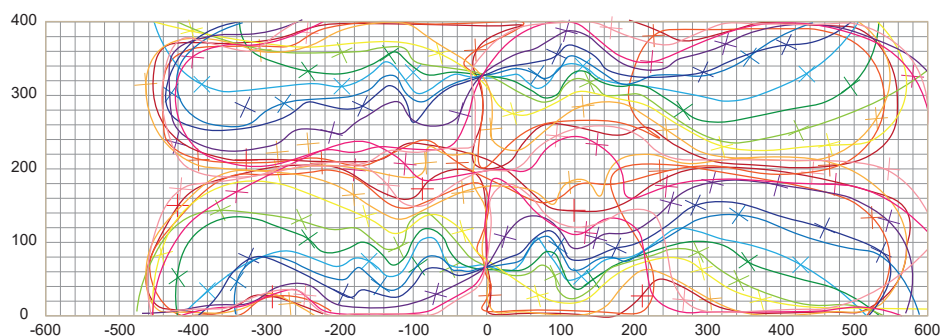
○等色線画像



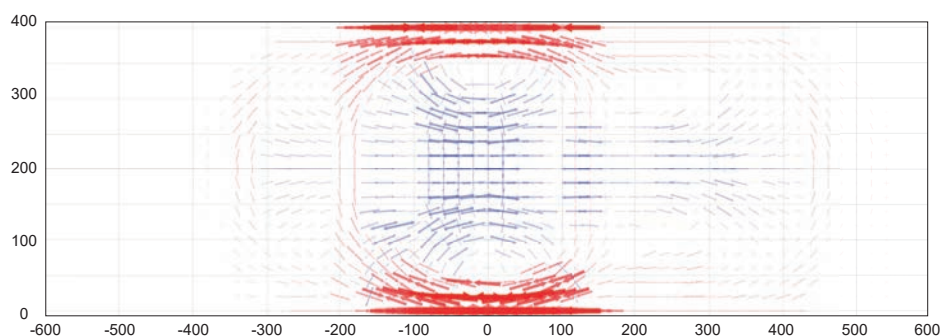
○鋭敏色画像



○等傾線図



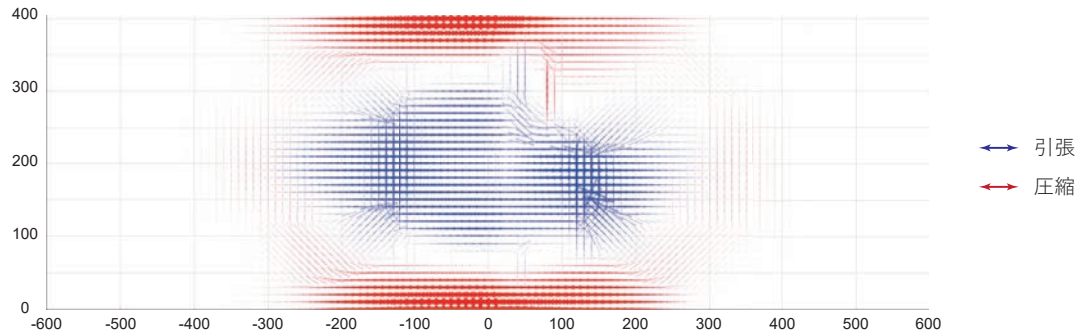
○主応力場



	左	右
最大主応力度 (引張)	11.2 N/mm ² (X = -40, Y = 160)	11.8 N/mm ² (X = 20, Y = 200)
最小主応力度 (圧縮)	-43.9 N/mm ² (X = -20, Y = 0)	-43.9 N/mm ² (X = 0, Y = 0)

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	全体ア ニール終 了	溶着線中 央冷却開 始	溶着線中 央冷却終 了	溶着線手 前縁冷却 開始	溶着線奥 縁冷却開 始	徐冷途中	冷却終了
実験開始からの経過 時間 [min]	59	173	186	231	255	290	310	327	385	388	438	439	455	610	1450

○主応力場



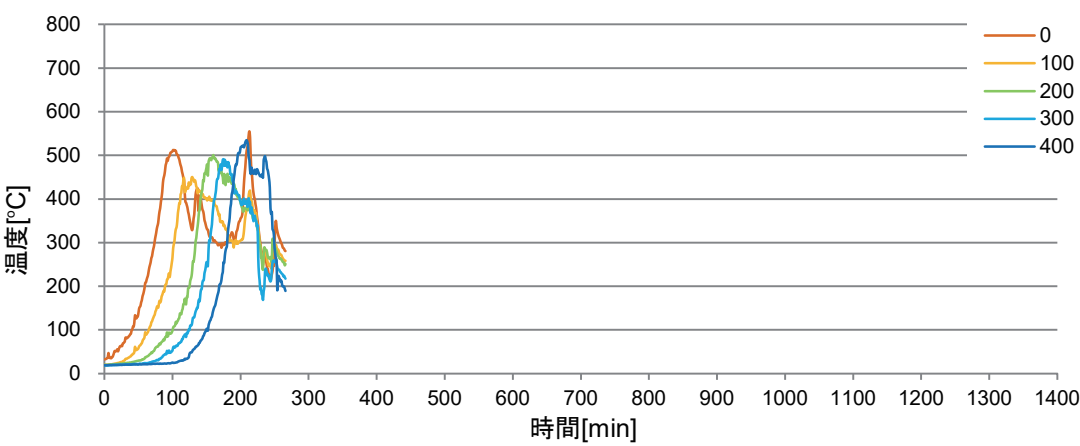
	左	右
最大主応力度 (引張)	11.7N/ mm ² (X = -130, Y = 190)	13.8 N/ mm ² (X = 120, Y = 190)
最小主応力度 (圧縮)	-27.3 N/ mm ² (X = 0, Y = 0)	-21.1 N/ mm ² (X = 40, Y = 0)

C

実験日：2020.10.08 試験体寸法：400×600×8

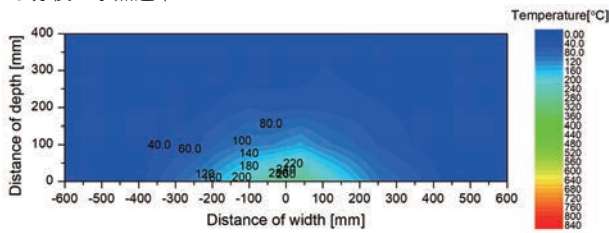
実験条件

○温度履歴図
(溶着部)

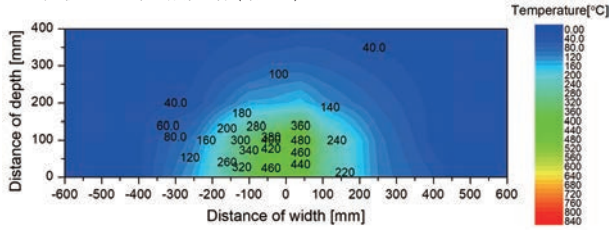


○温度等高線図

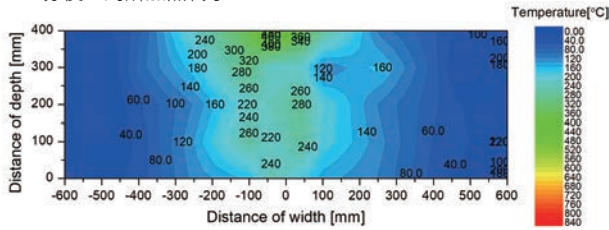
73 分後 予熱途中



116 分後 局所加熱開始 (割れ)



242 分後 局所加熱終了



実験結果

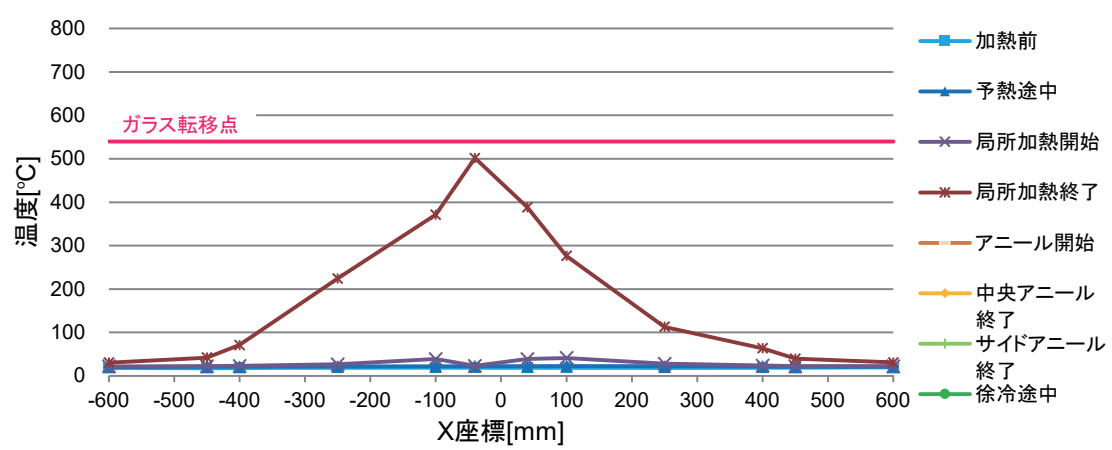
○試験体写真



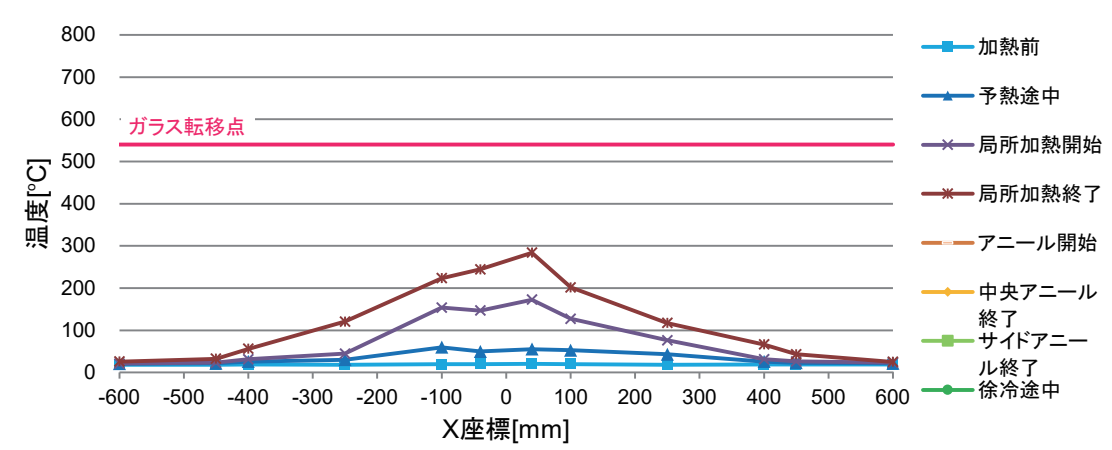
C

実験日：2020.10.08 試験体寸法：400×600×8

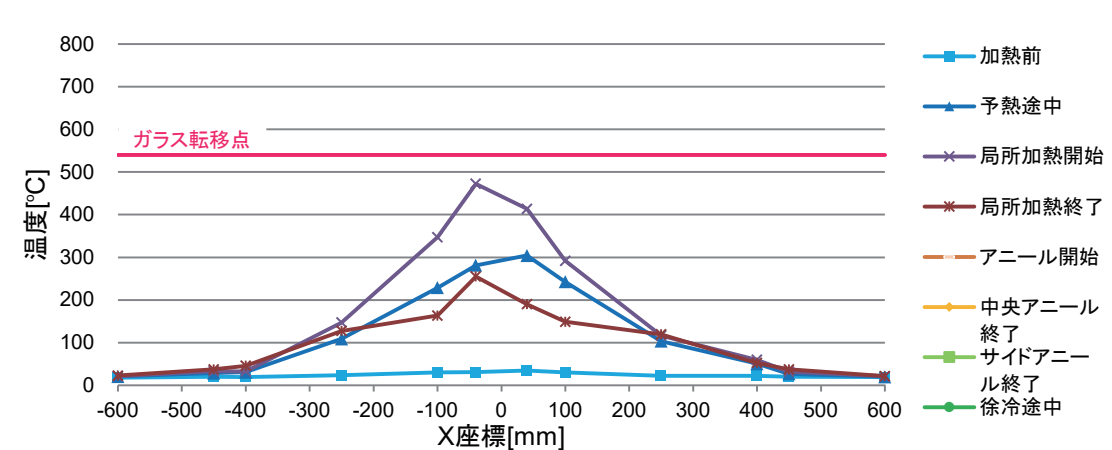
○温度分布図
Y = 400[mm]



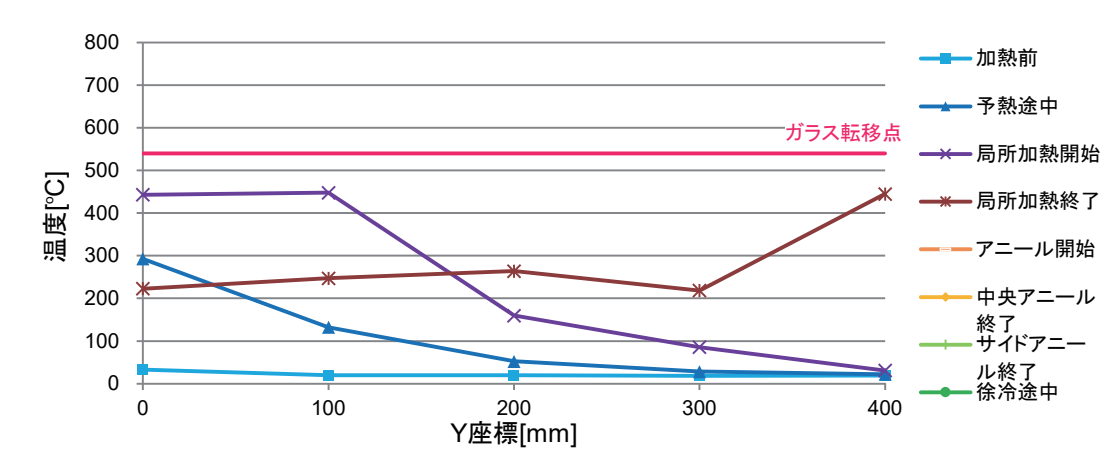
○温度分布図
Y = 200[mm]



○温度分布図
Y = 0[mm]



○温度分布図
(溶着部)



R1

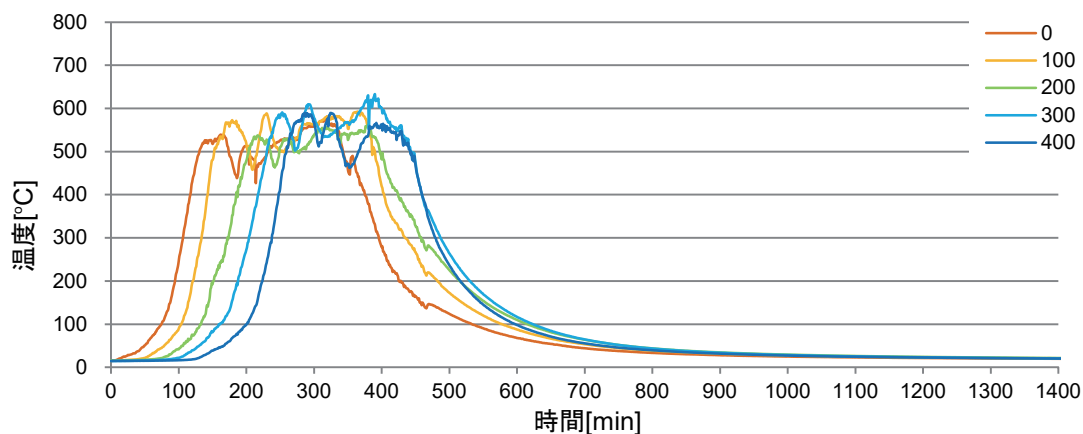
実験日：2020.11.16

試験体寸法：400×600×8

実験条件

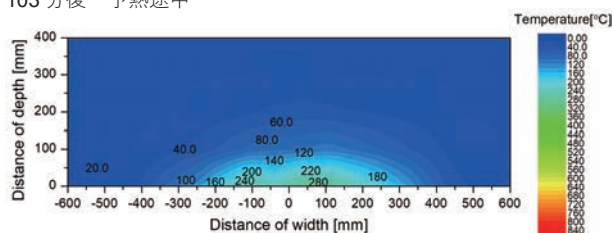
○温度履歴図

(溶着部)

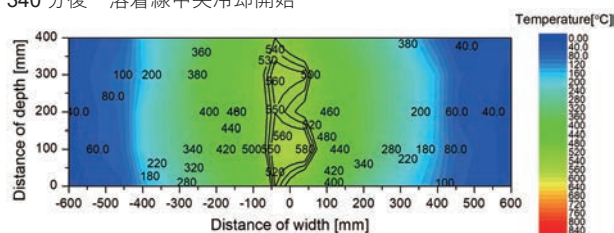


○温度等高線図

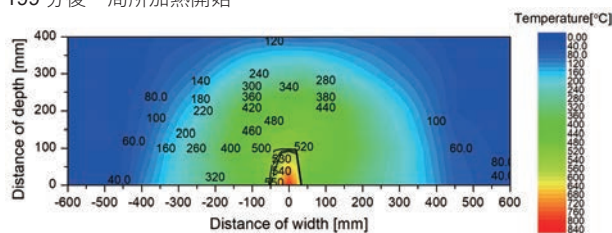
103 分後 予熱途中



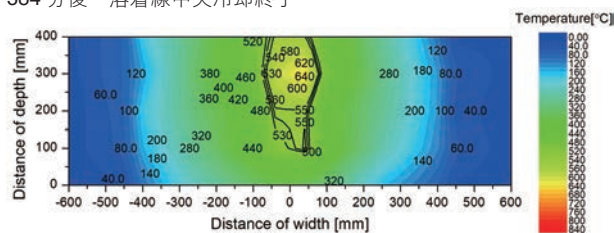
340 分後 溶着線中央冷却開始



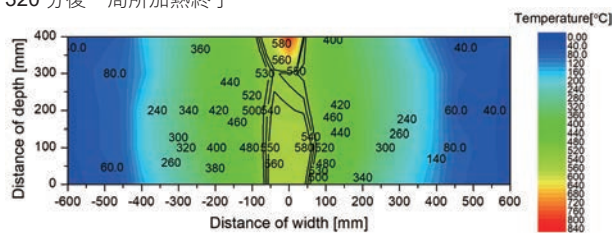
199 分後 局所加熱開始



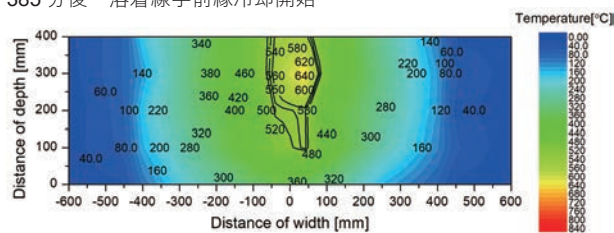
384 分後 溶着線中央冷却終了



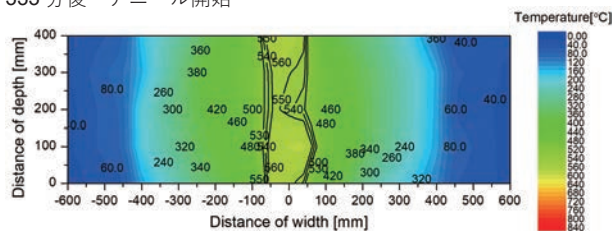
320 分後 局所加熱終了



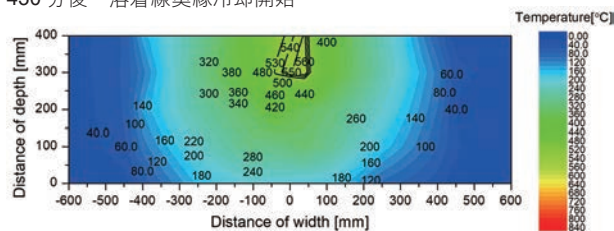
385 分後 溶着線手前縁冷却開始



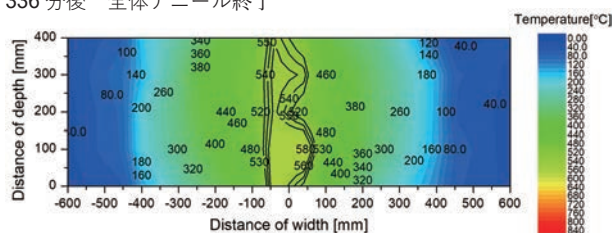
333 分後 アニール開始



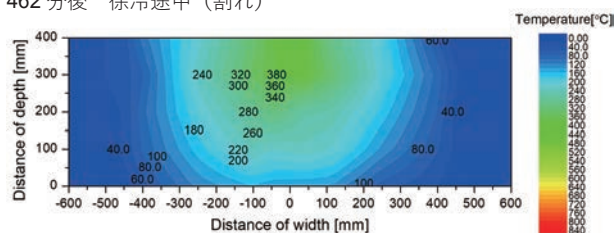
430 分後 溶着線奥縁冷却開始



336 分後 全体アニール終了



462 分後 徐冷途中 (割れ)



R1

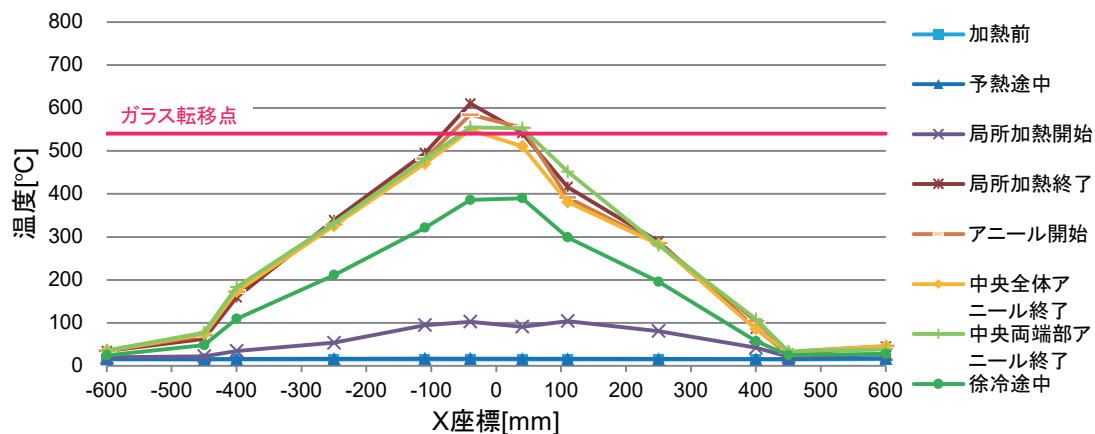
実験日：2020.11.16

試験体寸法：400×600×8

実験条件

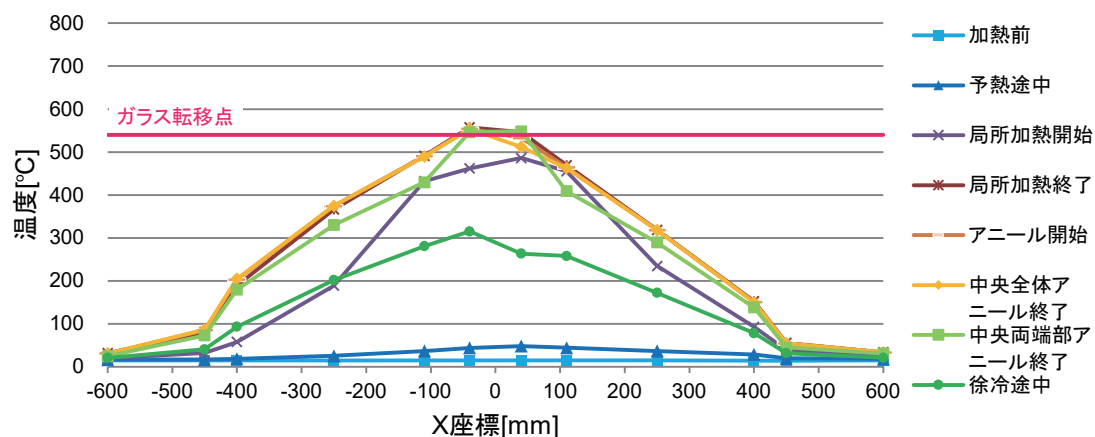
○温度分布図

Y = 400[mm]



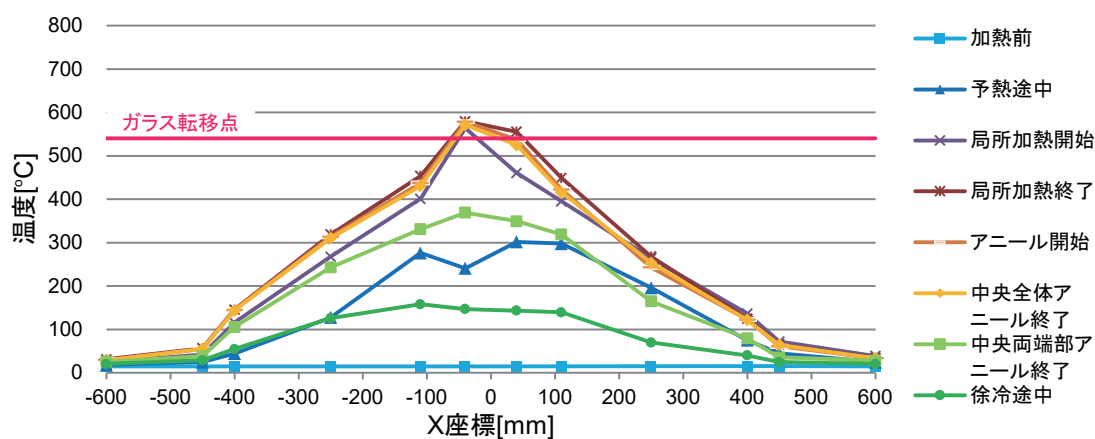
○温度分布図

Y = 200[mm]



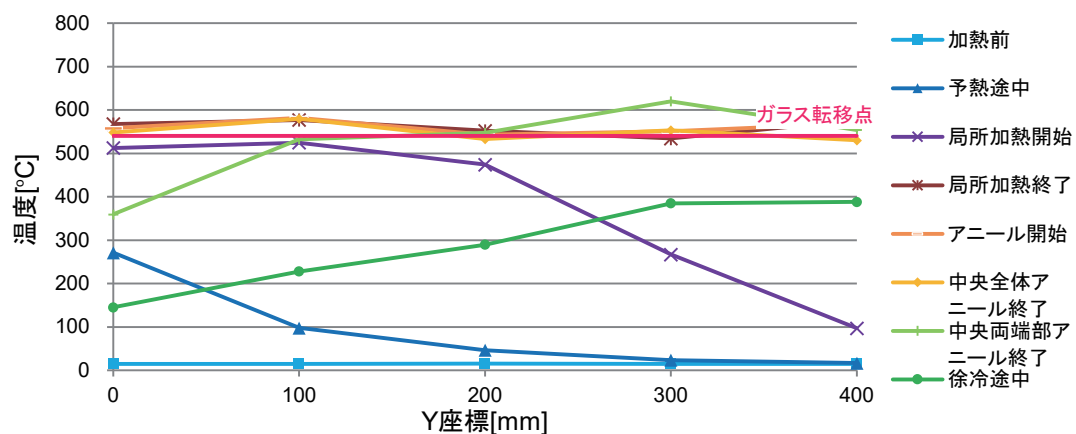
○温度分布図

Y = 0[mm]



○温度分布図

(溶着部)



R1

実験日：2020.07.21 試験体寸法：400×600×8

○試験体写真

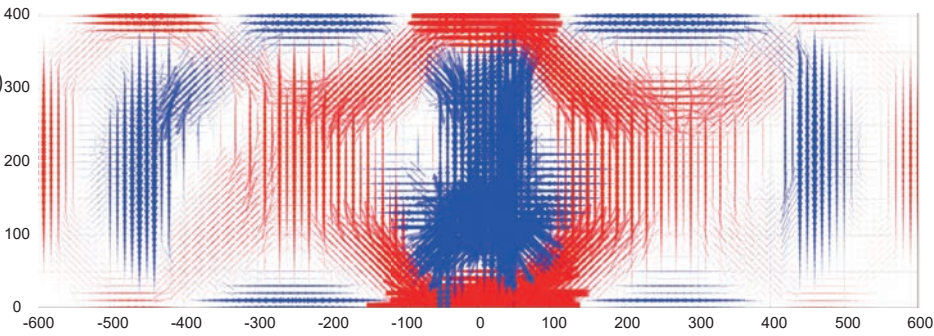


解析結果

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	全体ア ニール終 了	溶着線 中央冷却 開始	溶着線 中央冷却 終了	溶着線手 前縁冷却 開始	溶着線 奥縁冷却 開始	徐冷途中 (割れ時)	冷却終了
実験開始からの経過 時間 [min]	103	162	199	232	261	293	320	333	336	340	384	385	430	462	900
* 炉の走行 (= 試験体加熱) 開始：36 [min]															

○主応力場

(最初の割れ時)

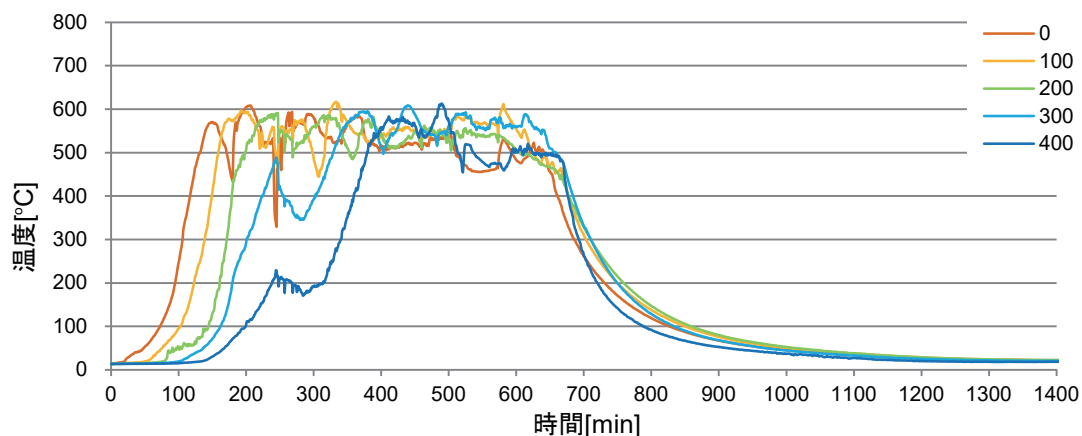


↔ 引張
↔ 圧縮

	左	右
最大主応力度 (引張)	33.9 N/ mm ² (X = 0, Y = 110)	47.3 N/ mm ² (X = 40, Y = 200)
最小主応力度 (圧縮)	-69.7 N/ mm ² (X = 0, Y = 0)	-64.5 N/ mm ² (X = 10, Y = 0)

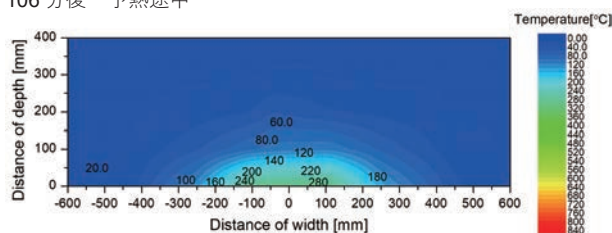
○温度履歴図

(溶着部)

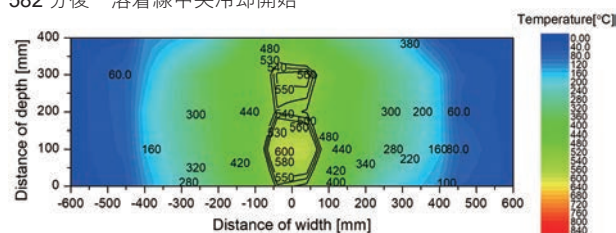


○温度等高線図

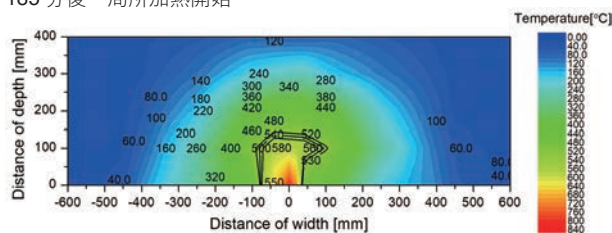
106 分後 予熱途中



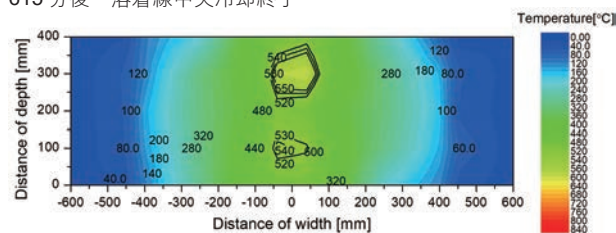
582 分後 溶着線中央冷却開始



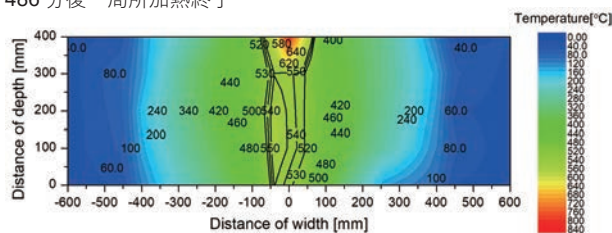
185 分後 局所加熱開始



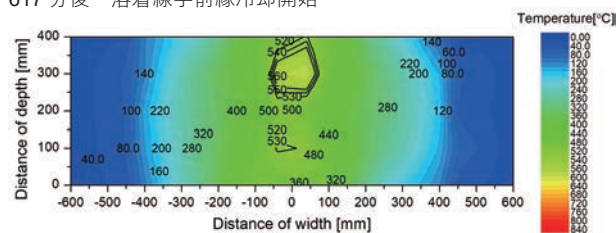
615 分後 溶着線中央冷却終了



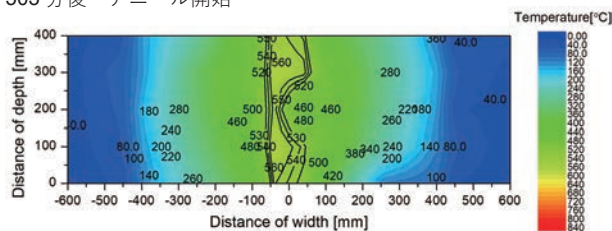
486 分後 局所加熱終了



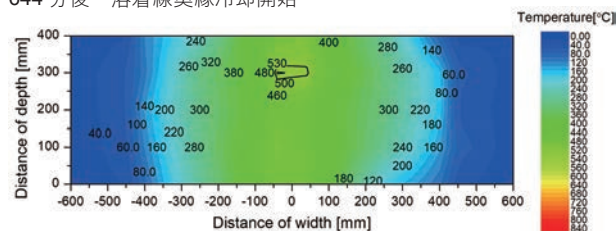
617 分後 溶着線手前縁冷却開始



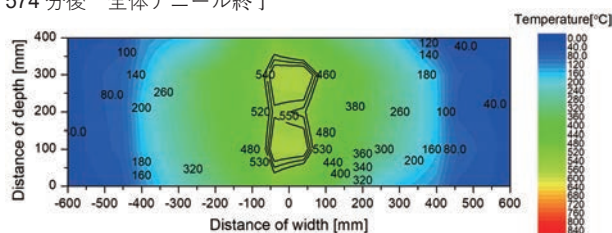
503 分後 アニール開始



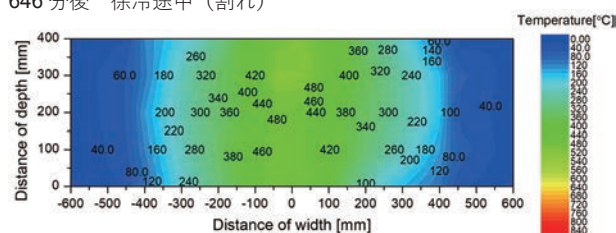
644 分後 溶着線奥縁冷却開始



574 分後 全体アニーリング終了

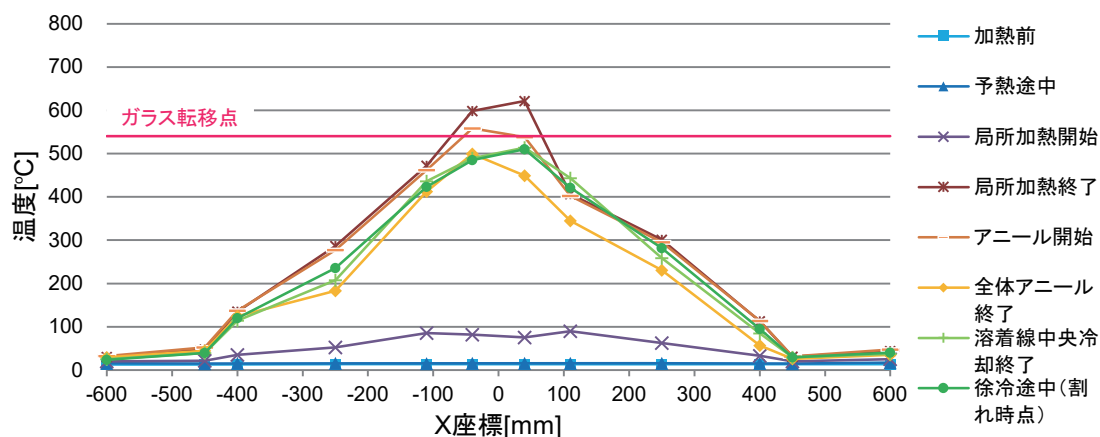


646 分後 徐冷途中 (割れ)



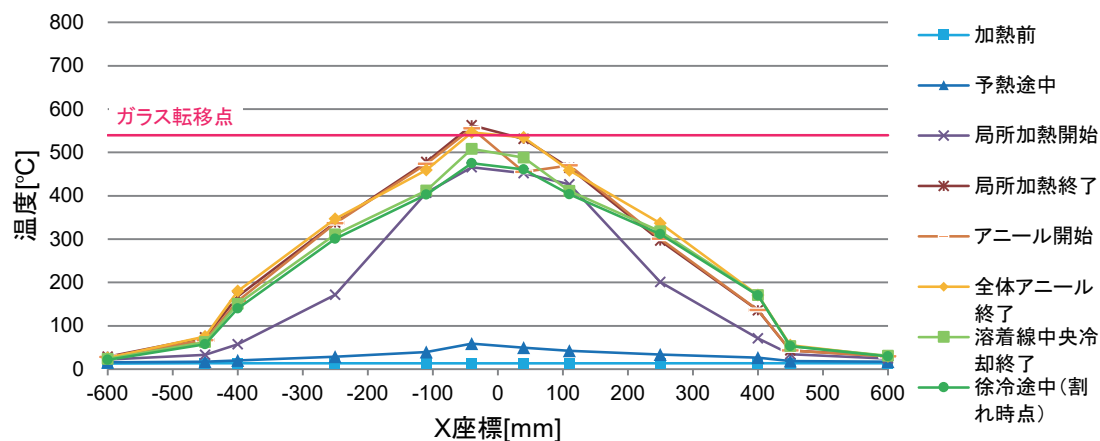
○温度分布図

Y = 400[mm]



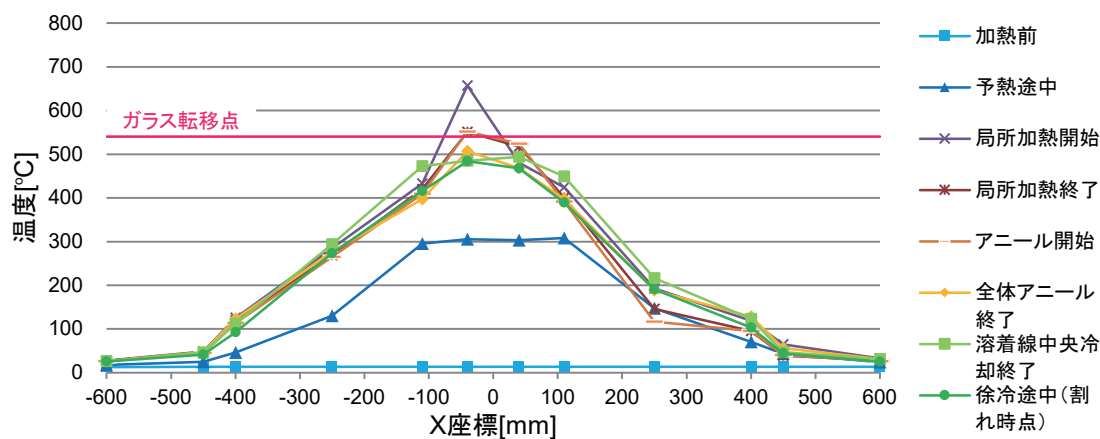
○温度分布図

Y = 200[mm]



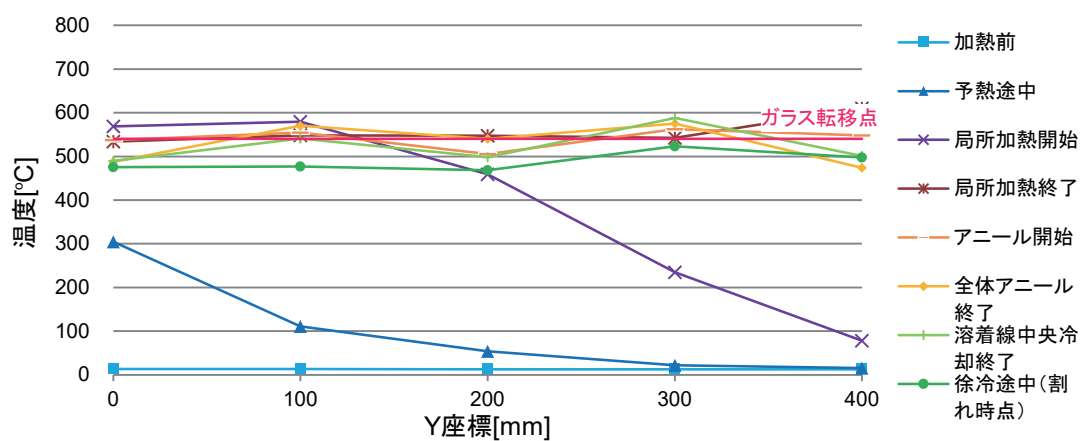
○温度分布図

Y = 0[mm]



○温度分布図

(溶着部)



R2

実験日：2020.11.30 試験体寸法：400×600×8

○試験体写真



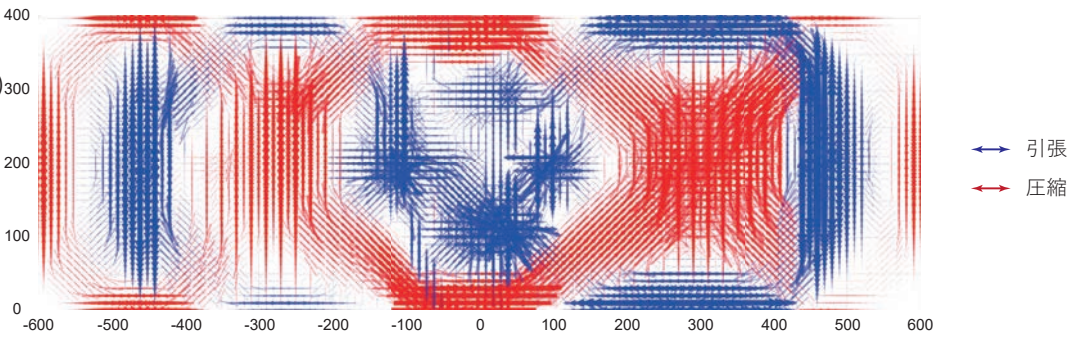
解析結果

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 1(再開始)	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	全体ア ニール終 了	溶着線 中央冷却 開始	溶着線 中央冷却 終了	溶着線手 前縁冷却 開始	溶着線 奥縁冷却 開始	徐冷途中 (割れ時)
実験開始からの経過 時間 [min]	106	139	185	267	329	381	444	486	503	574	582	615	617	644	646

* 炉の走行 (= 試験体加熱) 開始：44 [min]

○主応力場

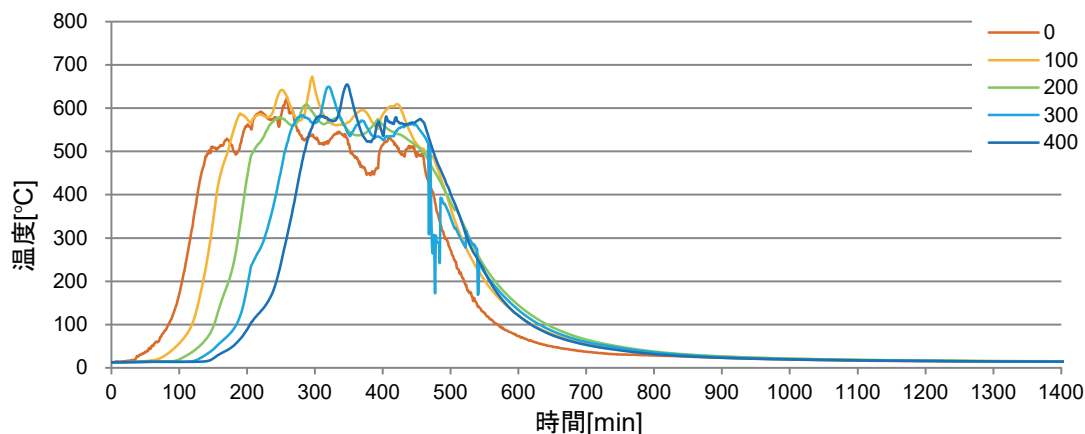
(最初の割れ時)



	左	右
最大主応力度 (引張)	33.1 N/ mm ² (X = -460, Y = 190)	43.1 N/ mm ² (X = 460, Y = 210)
最小主応力度 (圧縮)	-42.2 N/ mm ² (X = 0, Y = 400)	-36.0 N/ mm ² (X = 10, Y = 400)

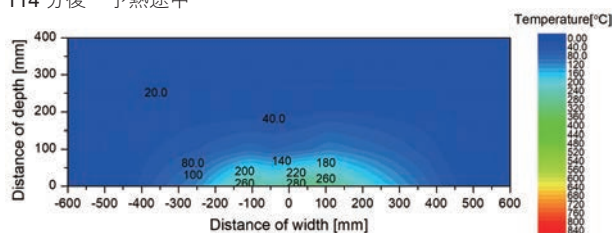
○温度履歴図

(溶着部)

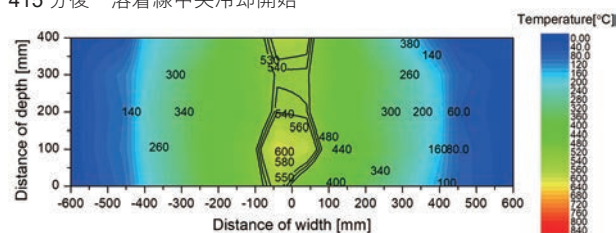


○温度等高線図

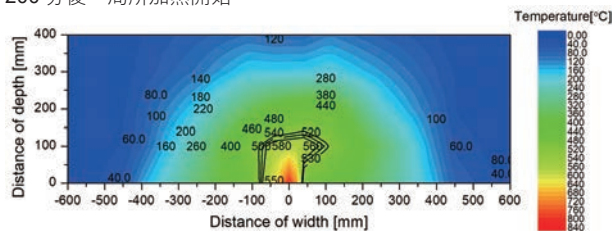
114 分後 予熱途中



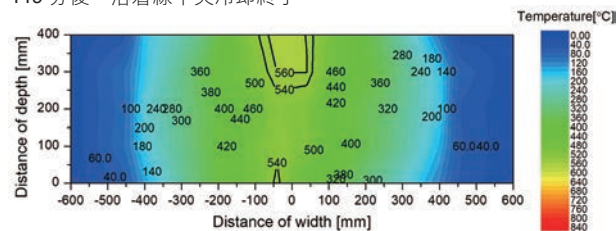
415 分後 溶着線中央冷却開始



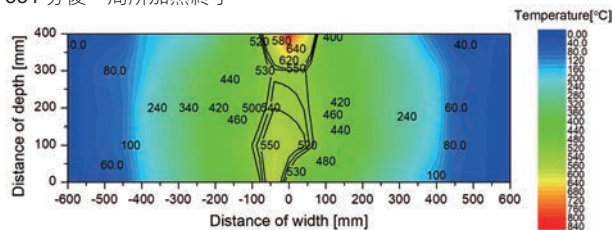
200 分後 局所加熱開始



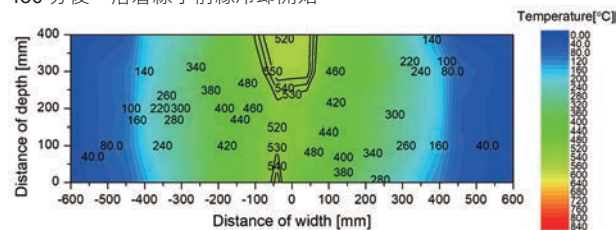
449 分後 溶着線中央冷却終了



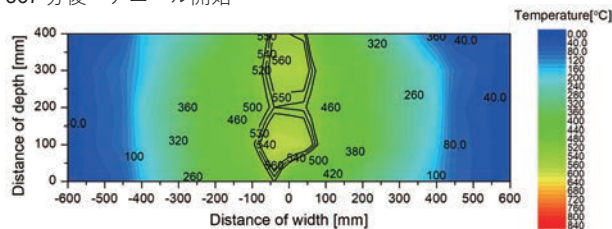
351 分後 局所加熱終了



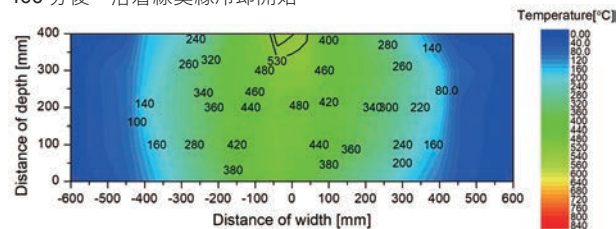
450 分後 溶着線手前縁冷却開始



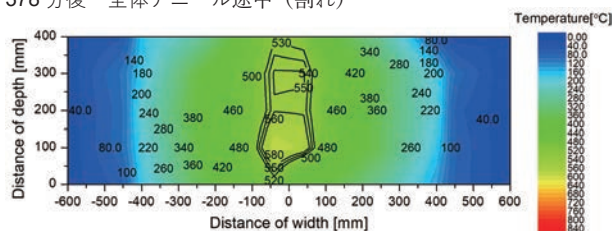
367 分後 アニール開始



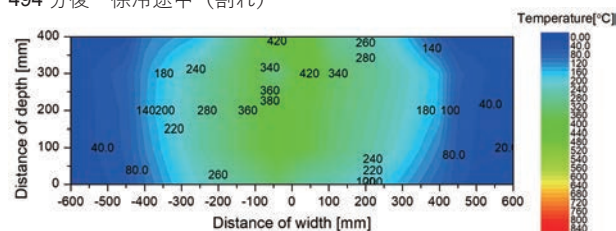
466 分後 溶着線奥縁冷却開始



378 分後 全体アニール途中 (割れ)

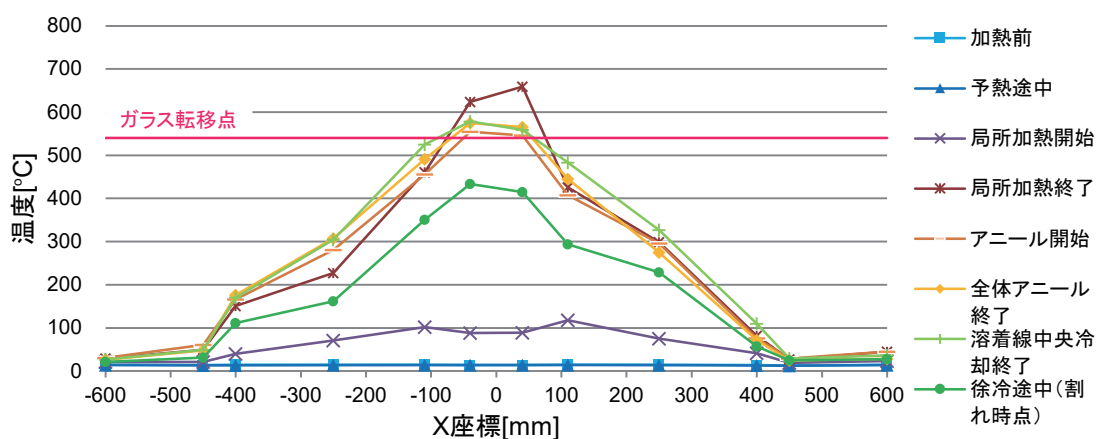


494 分後 徐冷途中 (割れ)



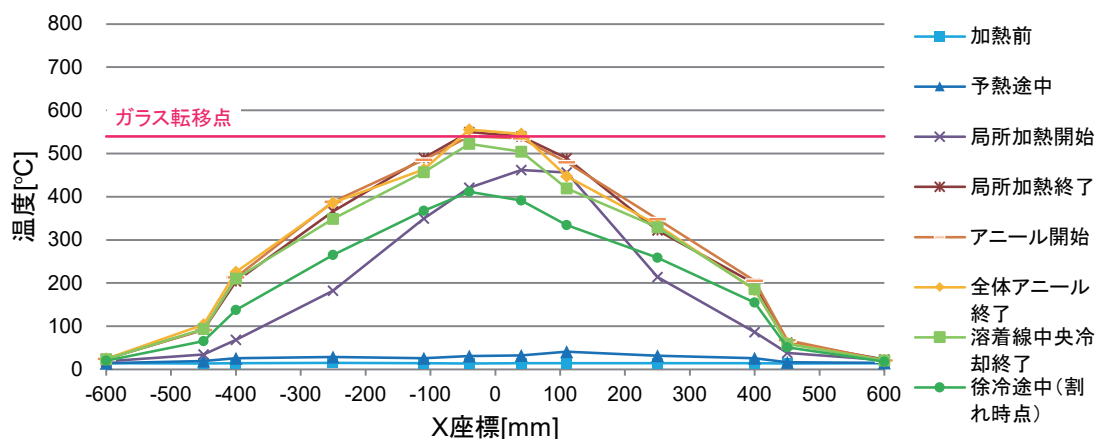
○温度分布図

Y = 400[mm]



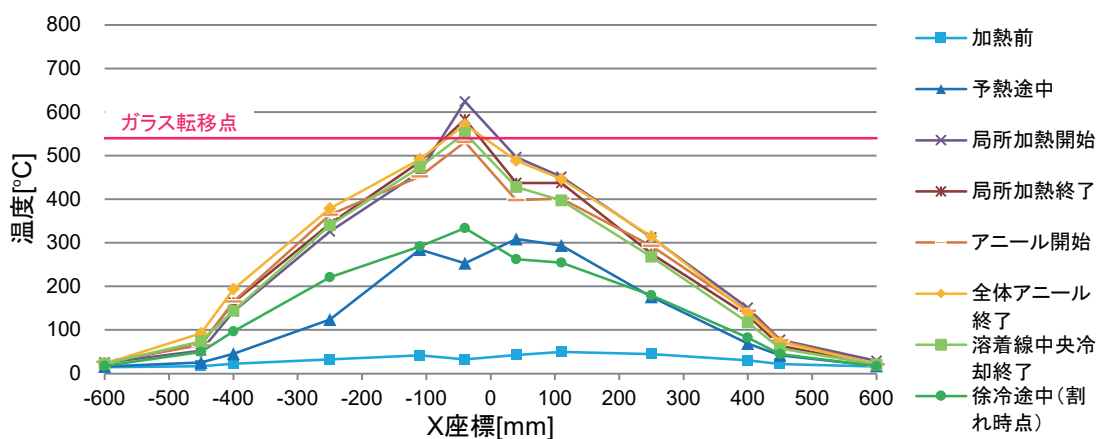
○温度分布図

Y = 200[mm]



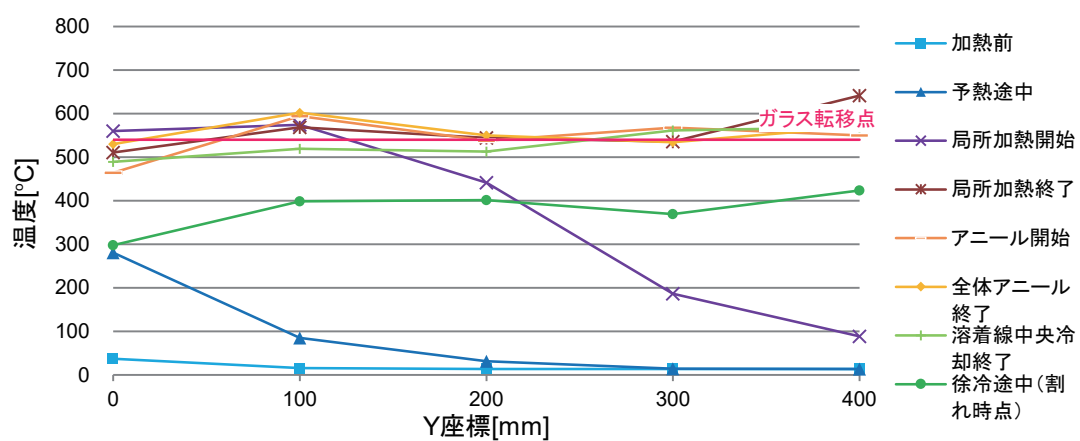
○温度分布図

Y = 0[mm]

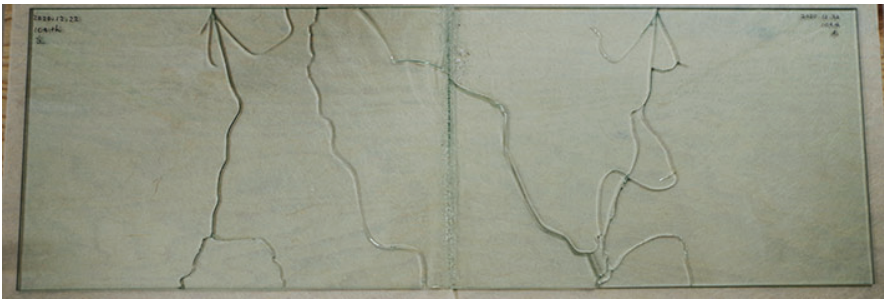


○温度分布図

(溶着部)



○試験体写真

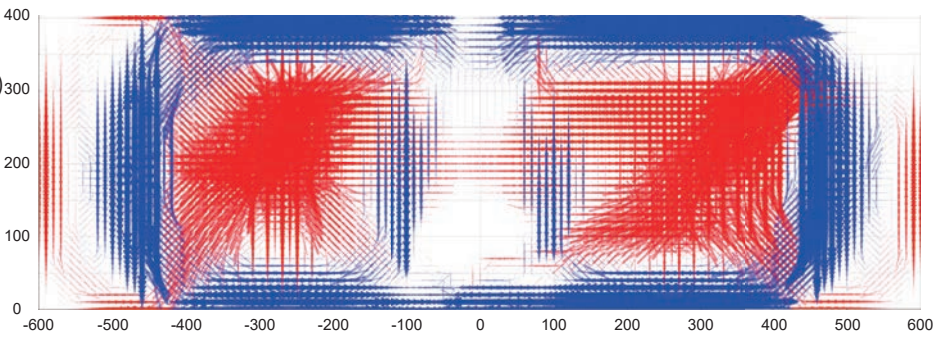


解析結果

ステップ分割点	予熱途中	予熱終了	局所加熱 1	局所加熱 1(再開始)	局所加熱 2	局所加熱 3	局所加熱 4	局所加熱 5	アニール 開始	全体ア ニール途 中(割れ)
実験開始からの経過 時間 [min]	114	190	200	221	251	288	321	351	367	378
* 炉の走行 (= 試験体加熱) 開始: 50 [min]										

○主応力場

(最初の割れ時)



↔ 引張
↔ 圧縮

	左	右
最大主応力度 (引張)	51.4 N/ mm ² (X = -240, Y = 390)	58.0 N/ mm ² (X = 280, Y = 390)
最小主応力度 (圧縮)	-26.6 N/ mm ² (X = -270, Y = 230)	-27.3 N/ mm ² (X = 410, Y = 290)