

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

局所加熱によるフロート板ガラスの溶着法における
温度勾配と残留応力の関係

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

2016 年 7 月 19 日提出
指導教員 社文 佐藤淳 准教授

滝口 雅之
TAKIGUCHI, Masayuki

目次

第 1 章. 序論	5
1.1 研究の背景	6
1.1.1 ガラス板の使用サイズの制限	6
1.1.2 ガラスの接合方法の課題	6
1.1.3 ガラス溶着による接合の可能性	7
1.2 ガラス溶着の特徴	8
1.3 関連する既往研究	10
1.3.1 ガラス溶着に関する既往研究	10
1.3.2 ガラス溶着の先行研究	12
1.4 研究の目的	13
1.5 用語の定義	14
1.6 本論の構成	16
第 2 章. ガラスの粘弾性特性と残留応力の基礎理論	18
2.1 ガラスの強度	19
2.1.1 ガラスの理論強度	19
2.1.2 ガラスの実用強度	19
2.2 ガラスの温度特性	22
2.2.1 特性温度と温度依存性	22
2.3 粘弾性特性	24
2.3.1 弾性と粘弾性	24
2.3.2 粘弾性による残留応力	25
2.3.3 応力緩和挙動	25
第 3 章. ガラス溶着実験	26
3.1 実験方法	27
3.1.1 実験手順	27
3.1.2 ガラス試験体	28
3.1.3 溶着炉の概要	28

3.1.4	ガラスの位置の呼称	29
3.1.5	温度測定方法	30
3.1.6	温度制御方法	33
3.2	試験体の残留応力の算出方法	35
3.2.1	光弾性による測定手法	35
3.2.2	等色線画像	38
3.2.3	等傾線画像	41
3.2.4	鋭敏色画像	45
3.2.5	主応力分離法	45
3.3	溶着炉の温度分布特性	50
3.4	実験結果のパラメータの整理	52
3.5	実験結果一覧	54
3.5.1	全試験体の結果一覧	54
3.5.2	試験体の残留応力の結果	68
3.6	冷却比例定数 k の影響	73
3.7	温度勾配による影響	75
3.7.1	残留応力のピーク位置とクラック起点	75
3.7.2	溶着可能範囲の考察	76
3.8	破面解析による破壊応力値の推定	80
3.8.1	破面解析の原理	80
3.8.2	破壊応力値	80
第4章. 熱応力解析		83
4.1	既存の熱応力解析の手法	84
4.2	温度変化のある時の応力ひずみ関係と平衡方程式	85
4.3	本研究の解析手法と手順	87
4.3.1	ガラスの熱弾性モデル	87
4.3.2	温度履歴とガラス試験体のモデル化	88
4.3.3	主応力値、主応力角度の算出	91
4.4	解析結果	92
4.4.1	解析結果と実験結果との比較	92

目次

4.4.2	解析結果の残留応力の急激なピーク	100
第5章. 温度勾配のパラメトリックスタディ		104
5.1	温度履歴の作成	105
5.2	解析結果	108
5.3	今後の課題	110
第6章. 総括		111

参考文献

付録1 使用した解析プログラム

付録2 全実験データ

付録3 関連する発表論文 梗概

謝辞

第1章. 序論

本論文は、2枚のガラス板同士を突き合わせ接合部を溶かして一体化する「ガラス溶着」と呼ばれる接合方法の実現を目指し、ガラス溶着が可能となる適切な加熱・冷却の温度プロセスを検証するものである。本章では、このガラス溶着が必要とされる背景と本研究の意義について述べる。

1.1 研究の背景

1.1.1 ガラス板の使用サイズの制限

現在建築分野において、多くのガラス板はその透明性から建築の開口部やファサードに使用されており、その外観のみならず、建築内と外部との環境調整機能など建築における重要な機能を担っている。これらのガラス板は製造装置や運搬上の交通法による制限から使用サイズに制限があり、特注ではなく日常的に製造されているガラス板の最大の寸法は表 2 のようになっており、厚み 19mm の場合では、最大でも幅約 3m×10m 程度であり、例えば 4m 角のガラス板といったサイズは使用できない。

表 1 道路交通法における車両と積載物の制限

車両	幅 2.5m×高さ 3.8m×長さ 12m
積載物	幅 2.5m×高さ 3.8m-(積載する場所の高さ)×長さ (車体の長さ) ×1.1 =長さ 10~12m×高さ 3m×幅 2~2.5m

表 2 フロート板ガラスの最大受注寸法 [1]

ガラス板の品種	厚さ (mm)	最大受注寸法 (mm)
フロート板ガラス	3, 4	1,829×1,219
	5	3,658×2,438
	6	4,267×2,921
	8, 10	7,620×2,921
	12, 15, 19	10,160×2,921

1.1.2 ガラスの接合方法の課題

ガラスの機械的な特性は硬く強い材料であるが、外力に対して塑性変形せず脆性的に破壊するため、現時点で建築基準法上の構造材としてはほとんど使用されていないが、過去にはガラスの構造材としての可能性を試みた例が複数報告されており [2] [3] [4] [5]、また解析や、施工技術の開発が進み、ガラスを建築の構造体として使用する状況が整ってきている。しかし、将来的にガラスを構造材として使用することを想定すると、問題となることの 1 つが他部材との接触部であり、現在の主なガラス接合方法であるサッシ、シーリング材によるシーラント構法、DPG 構法では構造材としてガラスからの応力を伝達することは想定されておらず、また樹脂系の接合は紫外線などで劣化することから、ガラスの構造材の実現には、十分に応力が伝達できて劣化しない接合方法が必要となる。

1.1.3 ガラス溶着による接合の可能性

そこで、鉄における溶接のようにガラス板同士の接合部に熱を加えて溶かし現場で一体化することが出来れば、使用できるガラス板の自由度を劇的に上げることができる。このように、ガラス板同士の接合部に熱を加えて溶かし一体化する工法は「溶着」と呼ぶ。例えば、大判ガラスを制作する場合、現場に搬入できる小型炉を使用してガラス板2枚の接合部を一体化するためにガラス溶着し「大判ガラス」を制作するといったイメージである。このように現場において大判ガラスが制作できれば、継ぎ目をなくすことができガラスの透明性を活かすことができる。また、この接合方法を用いれば、従来ではできなかった新しいガラス形状、例えば「多面体ドーム」や「シームレスな曲面」も実現できる。そして、接合方法としては、ガラス同士を接合するため、応力も伝達でき、劣化の可能性も少なくなることからガラスの硬くて強い性質を活かす構造材としての可能性も大きく広げることができると思われる。

1.2 ガラス溶着の特徴

ガラス溶着の特徴は以下に列挙する

- i. 通常の鉄の溶接とは異なり、反りや収縮といった変形がほとんど生じない。
- ii. ガラス板同士を突き合わせた間に、充填したガラスの破砕くず（カレットと呼ばれる）を溶かし一体化させるため、接合部は同じガラス材料でシンプルかつ透明な接合部となり、外部環境による劣化が少ない。
- iii. 建築の現場で溶着できるように炉は運搬できるサイズを想定しているため、溶着の加熱・冷却プロセスにおいて接合する部分（溶着部）は高温、接合する部分から離れた端部は炉外にでて低温となる温度分布となる。
- iv. ガラス板に任意の角度で拘束し溶着を行えば、角度のついたガラス形状が実現できる。ガラス板だけでなく曲げガラスを用いたガラス溶着も可能であり、ガラス形状の可能性が広がる。

このようにガラス溶着は従来の接合部とは異なる特徴があり、建築において新たなガラス板の使用が可能となると予想される。図 1 にガラス溶着で制作される大判ガラスのイメージ図を、図 2 にガラス溶着で可能となる多面体ドームやアーチなどの形状のイメージ図を示す。



図 1 ガラス溶着で可能となる大判ガラスの例

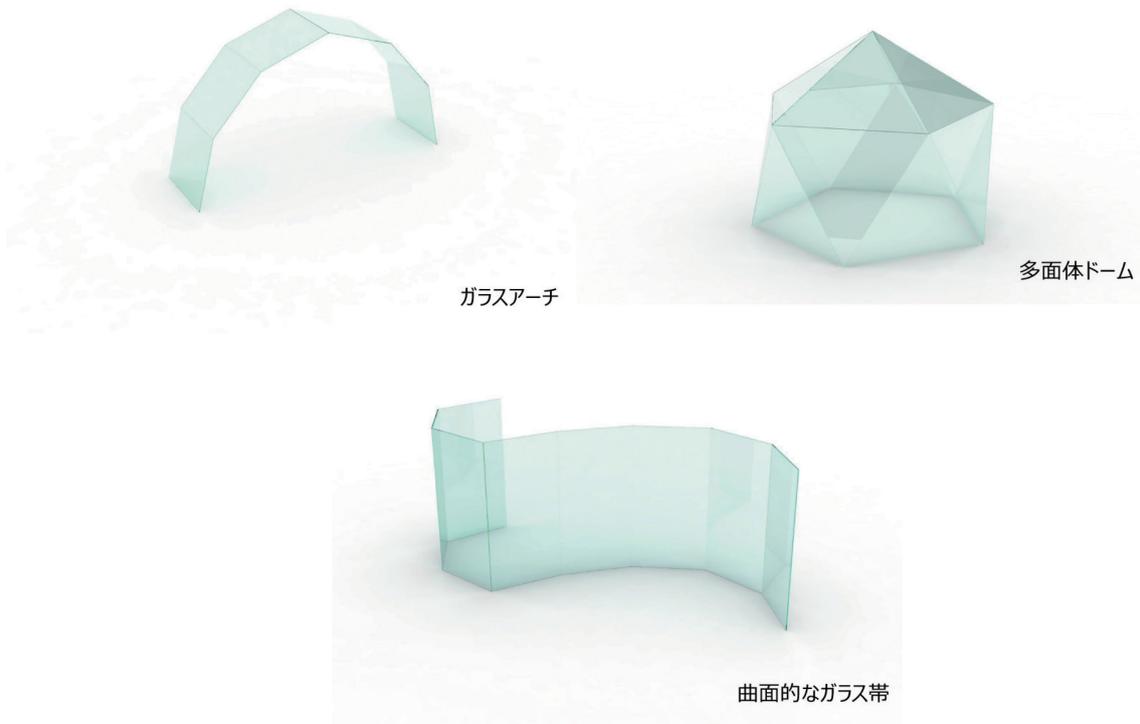


図 2 ガラス溶着で実現可能となるガラス形状の例

1.3 関連する既往研究

1.3.1 ガラス溶着に関する既往研究

部材の接合部に熱を加えて溶かし一体化する工法は「溶着」と呼ばれ、樹脂・プラスチックの分野では工業的に使用されている。ガラスにおいては、ガラス工芸の分野でガラス小片を電気炉内で加熱し溶着するガラスフュージングという技法はあるものの、ガラス全体が軟化することが前提となっており、溶接のように母材の一部を溶かすような溶着は、ガラスが熱割れに弱く 200℃程度の温度差があると割れてしまうと言われており、困難だと考えられて行われていないのが現状である。

しかし、既往の研究により温度条件によってはガラス板が溶着できる可能性が示されており [6] [7]、本研究はそれらの研究をもとに、ガラスの溶着の実用化に向けて、ガラス溶着可能な温度条件や工法を探ることを目的とする。図 3 に本実験で突き合わせガラス溶着された試験体写真を、図 4 にガラスに角度をつけて溶着された試験体写真を示す。ガラスは熱割れに弱いと認識されており、ガラスを溶着して接合する技術についての既往研究は少なく、ガラスと異種金属・セラミックスとの融着 [8]や光ファイバーの融着接続 [9]など、対象が小さい報告例にとどまっている。また、ガラス溶着に関する既往研究としてレーザーパルスを用いた研究例が報告されているが [10]、小型のガラス製品を想定しており、また熱衝撃に強く高価な石英ガラス (Quartz glass, silica glass) やホウケイ酸ガラス (Borosilicate glass) を対象としている。一般的に建材のガラス板は比較的安価なソーダライムガラス (Soda-lime glass) のフロート板ガラスで、表 3 のようにソーダライムガラスは線熱膨張係数が石英ガラスの約 18 倍以上、ホウケイ酸ガラスの約 3 倍以上と熱応力が発生しやすい材料であるため、レーザーのような加熱領域が非常に狭い溶着技術はそのまま建築分野でのガラスに適用することは難しいと考えられる。

このように建築スケールのガラス溶着を想定した研究例はほとんどなく、その溶着の方法論については未だ明らかになっていないといえる。

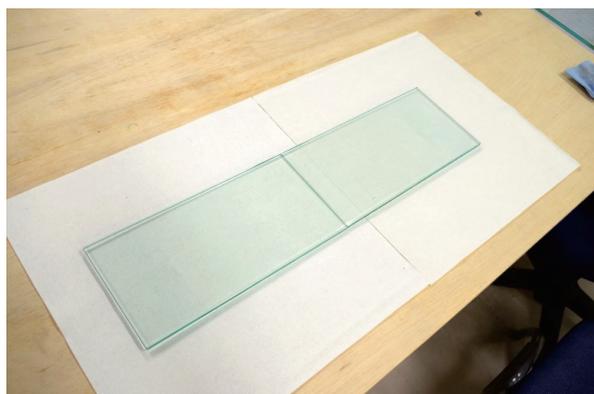
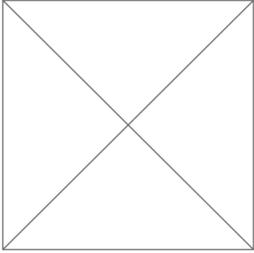
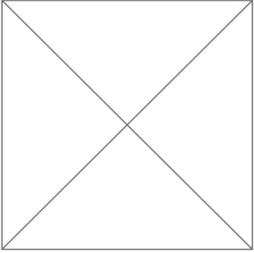
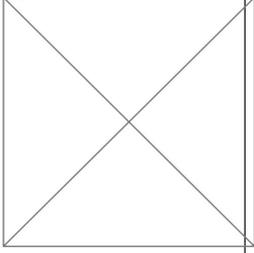


図 3 ガラスの突き合わせ溶着



図 4 ガラス溶着による立体ガラス

表 3 代表的なガラスの線膨張係数 α と特徴 [11]

	石英ガラス (シリカガラス)	ホウケイ酸ガラス	ソーダ石灰ガラス
写真	 1	 2	 3
線膨張係数 α	$5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	$33 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^4$	$101 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^5$
使用用途	医療・理化学用ガラス、 光ファイバー、光学機器、 水銀灯	医療・理化学用ガラス、 光学レンズ	びん、コップ、 フロートガラス
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ● 線熱膨張係数が非常に小さい。 ● 非常に透明度が高く無色透明。 ● 化学的耐久性に優れる。 ● 軟化点 1700°C で耐熱性が高いが、熔融、成形が困難。 ● 高価。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱耐久性・化学的耐久性が高い。 ● 線熱膨張係数が小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱膨張係数が大きい。 ● 化学的耐久性は高くない。 ● 断面が緑色。 ● 比較的安価。

¹ http://www.agc.com/english/rd/images/rd_image_292.jpg

² <http://www.connecticutvalleybiological.com/isotope/b/beakers-338a74c3.jpg>

³ https://wardsci.com/stibo/low_res/std.lang.all/65/23/10236523.jpg

⁴ パイレックスガラス Corning7740 を例とした。

⁵ 一般的な板ガラスの線膨張係数を例とした。

1.3.2 ガラス溶着の先行研究

ここでは、ガラス溶着の先行研究の流れについてまとめておく。それぞれの先行研究では以下の様な研究成果が述べられている。

1. 「フロートガラスの縁部の局所加熱による溶着性状」 [6]

この先行研究では、ガラス溶着の手法について装置とともに模索し、自作した溶着炉を用いて150mm角のガラス板のガラス溶着実験を行い、一部の試験体が溶着に成功した。溶着した試験体とクラックの発生した試験体を比較し、500℃以上に予熱をした状態で接合部を局所加熱すると割れずに加熱ができること、また、アニーリングという応力緩和の工程における温度の変動が溶着に大きく影響することを示した。

2. 「ガラス板溶着法における局所加熱の温度勾配条件」 [7]

前述の先行研究の溶着の工程中では、試験体全体が軟化していた。筆者等によるこの研究では、将来現場での溶着を想定して、150mm角のガラス試験体を使用し、溶着部分のみ軟化させた溶着実験を行った。全体軟化した状態から冷却した試験体と、接合部付近のみ軟化させた試験体の光弾性画像から試験体の応力状態が異なることを示した。また、その違いが温度分布から引き起こされることを定性的に分析した。

3. 「局所加熱による板ガラス溶着法における温度勾配条件と熱応力解析手法の提案」 [12]

さらに、この先行研究では、試験体の寸法を300mmx150mmに大きくしてガラス板端部と溶着部の温度差を生じさせた場合の溶着実験を行い、溶着に成功している。高温時に応力が消失するという仮定をした熱応力解析を行い、実験試験体のエッジの応力との対応を確認している。

これらガラス溶着の先行研究はガラス溶着の可能性を示唆しているが、具体的にどのような加熱冷却プロセスとすれば残留応力を小さくでき、ガラス溶着が十分に可能となるのかまだ把握されておらず、ガラス溶着は基礎的な研究段階にある。

1.4 研究の目的

このようなガラス溶着の先行研究や既往研究の背景を踏まえ、将来的にガラスを構造的に使用することを想定し、ガラス溶着の研究の目的を以下のように大きく3つの段階に分け、段階的な達成を目指す。

1 段階目 ガラス溶着の実用化のための基礎研究

まず溶着時にクラックの原因となる残留応力現象を理論的・定量的に把握し検証する。具体的には、基本的な例として小さい平板試験体の溶着実験を行い、温度分布などのパラメータと残留応力の関係性を明らかにする。また、ガラスの基礎理論をもとにガラス溶着に望ましい残留応力分布を議論し、その残留応力を実現する溶着手法や温度分布を提案する。

2 段階目 ガラス溶着を用いた形状と形態の提案

1 段階目で明らかになった残留応力分布の特徴やガラスの性質を踏まえ、溶着を用いて実現できる新たな構造形態や空間を提案する。フラットなガラス板だけでなく、曲げ加工されたガラス板やガラスの角材などを溶着してできる形状について実験を通して検討する。

3 段階目 設計法・構法の構築

ガラス溶着を用いた構造の設計法を検討する。具体的にはガラスの溶着が強度にどのように影響するか構造実験を通して検討したうえで、許容応力度と安全率と簡略な設計式など実際の建築物を実現する際の設計法や構法を構築する。

現時点のガラス溶着の研究は、前述したようにどのような加熱・冷却工程とすれば溶着可能となるのか把握できておらず、現時点で1段階目の基礎研究段階にあるといえる。そこで本研究は、ガラスが溶着可能となる加熱・冷却温度履歴を明らかにするために、溶着の可否に関わる残留応力と温度勾配の関係に着目し、その関係性を解明することを目的とする。

1.5 用語の定義

■温度分布と温度勾配

本研究で、温度分布と呼ぶときは、「実験で測定されたガラス面内の温度を線形補間した 2 次元的な温度の分布」とし、一方、温度勾配と呼ぶときは、「ガラス試験体の温度分布を短手方向に平均化した、 x 方向の 1 次元の温度分布」を指す。実験中の温度勾配のイメージを図 5 に示す。

■軟化範囲

温度勾配によってガラス試験体でガラス転移温度 T_g を超えた高温の範囲を軟化範囲 L (cm) と呼ぶ。ガラス転移温度 T_g は 2 章にて後述する。この軟化範囲は図 6 に示すように、軟化範囲が大きいほど軟化していない部分の温度勾配が急になるという関係がある。そこで、軟化範囲は温度勾配を表す指標として用いる。この軟化範囲をもとに、溶着時の温度勾配と残留応力分布との関係性を実験と解析の両アプローチから分析する。残留応力と残留ひずみ、ゆがみ、残留変形など溶着が与える影響には様々な表現があるが、本研究では、残留応力で統一して表現することとする。

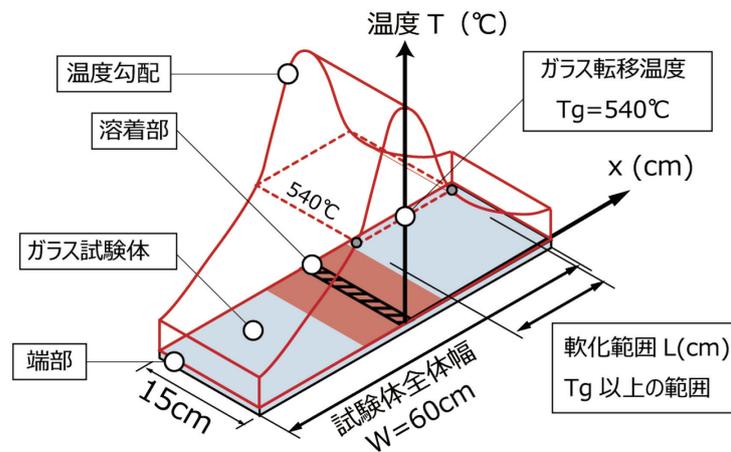


図 5 ガラス溶着時に生じる温度勾配と軟化範囲 L

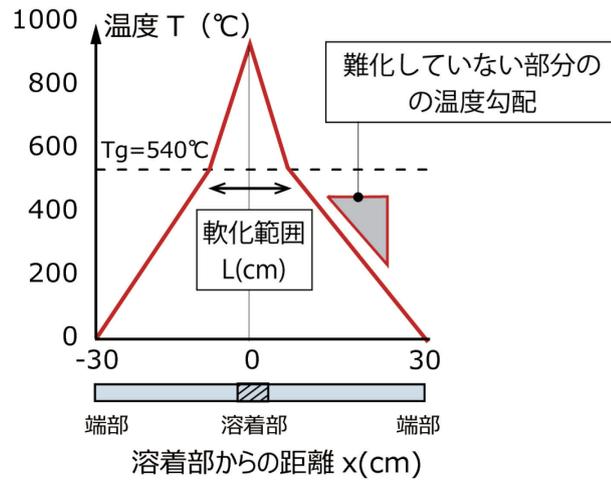


図 6 温度勾配と軟化範囲の関係

1.6 本論の構成

目標とする溶着可能範囲を予測するまでの検討のフローチャートを図7に示す。検討の手順としては、

1. ガラス溶着の実験

温度勾配を変えて溶着実験を行い、溶着の可否や割れなかった試験体の残留応力を取得し、残留応力分布の特徴を把握する。ただし、平面応力状態を仮定し、板厚方向の応力は無視する。また、溶着の対象は、建材として一般的であるフロート板ガラス（ソーダライムガラス）に限定した。
2. ガラス溶着の実験温度データをもとにした解析

ガラスの温度依存性を単純化した熱粘弾性モデルを提案し、その解析手法を実験の温度データをもとに行い、解析による残留応力と実験結果と比較し、解析の妥当性を検証する。
3. 作成した温度データをもとにした解析

本研究の熱粘弾性解析手法を用いて、温度勾配を変えた時の残留応力の変化についてパラメトリックスタディを行い、溶着可能となる温度勾配について予測を行う。

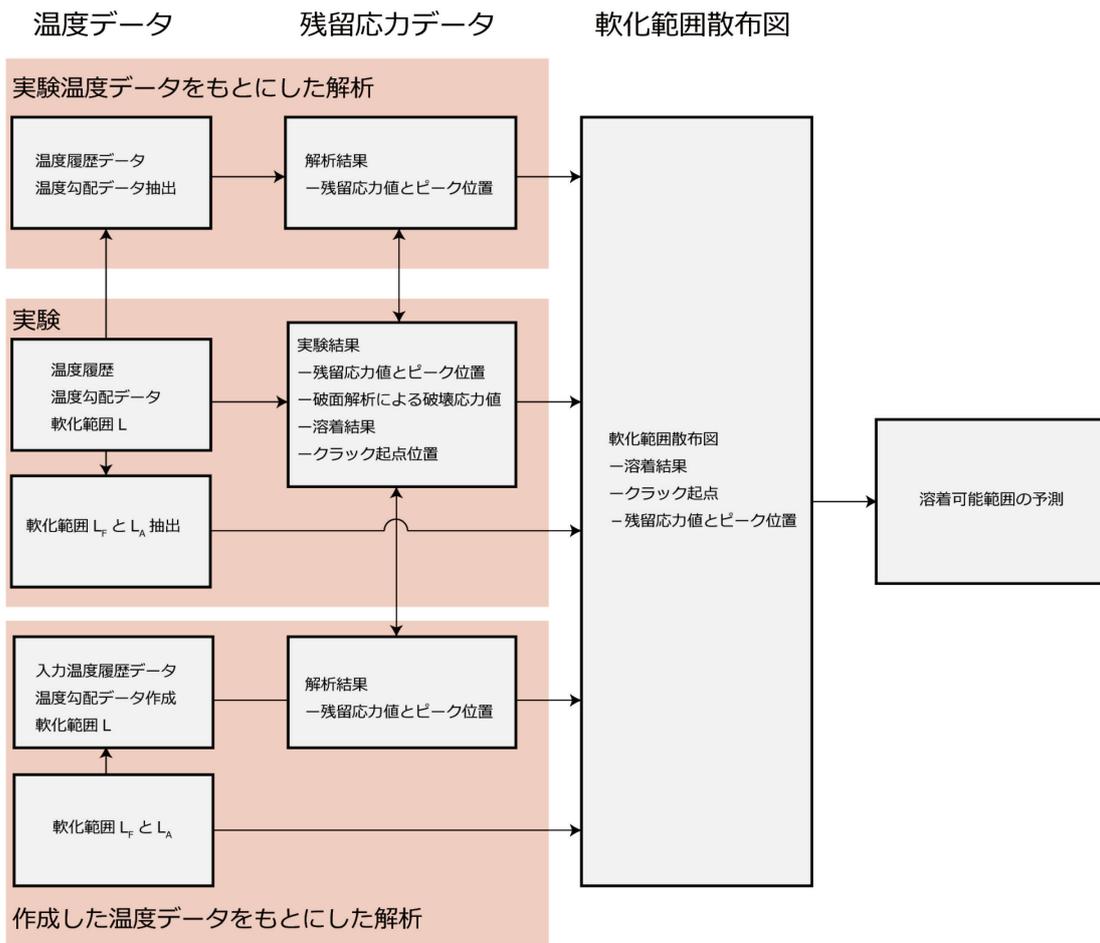


図7 溶着可能範囲の予測までのフローチャート

各章の構成としては以下ようになる。

1章では、ガラス板の使用サイズに制限があり、これを解決するガラス溶着という接合技術の可能性について述べた。そしてガラス溶着の先行研究を踏まえ、溶着可能な加熱冷却に関する温度条件を見つけることを目的として、温度勾配条件と残留応力の関係を明らかにすることを本研究の目的とすることを述べた。

2章ではガラス材料の機械的性質と温度依存性についてまとめ、ガラスの高温域における粘弾性挙動によって生じる残留応力の発生メカニズムについて述べる。

3章ではガラス溶着実験の手順や溶着装置の構成について述べる。また、2章を踏まえて、温度勾配などの温度条件が残留応力に与える影響について実験結果をもとに分析する。

4章では、溶着実験の残留応力を再現する熱粘弾性応力解析について提案し、温度勾配、ガラスの温度依存性、ガラス試験体のモデル化方法について述べる。この解析手法を用いた残留応力値と実験値を比較・検討を行い、解析の傾向などを述べる。

5章では、温度勾配の異なるガラス溶着の温度履歴を作成し、4章で用いた解析手法を用いてパラメトリックスタディを行った解析結果をもとに残留応力と温度勾配の関係について考察し、溶着可能な温度勾配について予測を述べる。

6章では、本研究を総括し、今後の課題と展望について述べる。

第2章. ガラスの粘弾性特性と残留応力の基礎理論

第2章では、ガラスの強度の特徴とガラスの温度依存性について述べる。続いて、そのガラスの温度依存性から生じる粘弾性特性について述べ、ガラスが軟化した時生じるガラス残留応力の発生メカニズムについて粘弾性挙動をもとに説明する。

2.1 ガラスの強度

2.1.1 ガラスの理論強度

ガラスの破壊様式は塑性変形をほとんど示さず脆性的である。脆性個体の破壊は、引張応力によって原子間の結合が切れることで生じるため、理論強度は原子またはイオン間の結合を切断するのに必要なエネルギーから算出することができる。Orowan は、原子間の切断に必要なエネルギーと破断面を作る表面エネルギーが等しいとして理論強度 σ_{th} を(1)式で表した。

$$\sigma_{th} = \left(\frac{\gamma_s E}{\gamma_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 γ_0 ：原子の平衡距離、 E ：ヤング率、 γ_s ：新しい面の形成に必要な単位面積あたりのエネルギーである。建材として使用されるソーダライムガラスのガラス板の場合、 $E = 70\text{GPa}$ 、 $\gamma_0 = 0.2\text{mm}$ を(2.1)式に代入して理論強度を概算すると、10GPa程度になる。この計算方法は γ_0 や γ_s をどう取るかという問題があるが、より改良された計算方法によっても20GPa程度という値が算出されている。

2.1.2 ガラスの実用強度

曲げ実験によるガラス板の実用的な強度を図9に示す。破壊強度は49~98MPa程度とばらつきを持っており、理論強度の200分の1程度の小さい値となっている。理論強度と実用強度との大きな差は、欠陥を全く含まないという仮定に起因しており、Griffithは実際のガラスの表面には微細なキズが分布していて、このキズに応力集中が起こって理論値よりもはるかに低い応力下で破壊が生じると考えた。このキズをグリフィスフロー（Griffith flaw）と呼び、ガラス構造によって生じるものではなく、製造工程や使用過程で他の物質と接触してできると考えられている。実際に高温で成形後、他の物体と全く触れないように扱われたガラスの強度は理論強度の10分の1程度の値を示す。これは、ガラス板の強度が表面上のキズの統計的な分布に由来しているためである。

また、ガラス強度は荷重速度や荷重時間、ガラス寸法によっても変化することがわかっている。一般に、荷重速度や荷重時間による強度の変化をガラスの疲労と呼ぶ。表4は曲げ実験のガラス疲労強度変化を示しており、荷重速度が小さいほど破壊応力度は小さくなる傾向がある。残留応力は荷重速度の極めて小さい時の応力と考えれば、破壊応力度は通常の板ガラスの実用強度よりも小さい値となることが推測される。参考として表5のガラスの長期許容応力度をみると、ガラス板の面内の長期許容応力度が σ_c が9.8MPa、エッジの長期許容応力度が σ_e が6.9MPaとなっている。ガラスの品種によって異なるが、一般的には許容応力は安全率2.0~2.5程度が採用されているので、仮に安全率を2.5だとすると、長期応力による平均破壊応力は面内では、24.5MPa、エッジでは、17.3MPa程度となる。この値が残留応力値の破壊応力度の参考数値となる。

また、図 10 に寸法効果によるガラス板の強度変化を示す。ガラス板の寸法が大きくなるにつれ強度が小さくなる現象を寸法効果と呼び、これはガラス板の寸法が大きいほど表面のグリフィスフローの存在確率が大きくなるためである。このように Griffith の理論を用いると、実用強度と理論強度の差や、ガラス板とガラス繊維の実測強度の違い、同種同サイズのガラスの強度のばらつき、ガラス板の寸法が大きくなる時の強度の低下、いわゆる寸法効果がうまく説明できる。

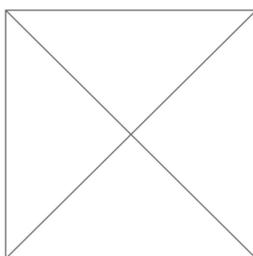


図 8 グリフィスフロー [13]

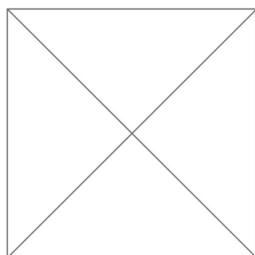


図 9 曲げ実験によるガラス板の破壊強度のばらつき⁶

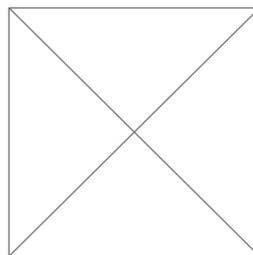


図 10 サイズによるガラス板強度への影響

⁶ https://www.asahiglassplaza.net/catalogue/sougou_gi_2015/spdfdata/003a5_2s.pdf

表 4 荷重速度による強度の変化 [13]

厚さ(mm)	荷重速度(N/s)	破壊応力度 (MPa)
2.97	15.7	74.0
2.92	5.2	62.3
2.97	1.8	53.0
2.97	0.6	48.1
2.97	0.21	47.1
2.90	0.07	44.6

表 5 フロートガラス板の短期・長期曲げ応力 [1]

厚み (mm)	平均破壊応力 (MPa)		許容応力 (MPa)			
			短期		長期	
	面内 σ_c	エッジ σ_e	面内 σ_c	エッジ σ_e	面内 σ_c	エッジ σ_e
8mm 以下	54.9	35.3	24.5	17.7	9.8	6.9
8~12mm 以下	51.5	35.3	22.1	17.7	8.8	6.9
12~20mm 以下	48.1	35.3	19.6	17.7	7.8	6.9
20mm 以上	46.6	35.3	18.6	17.7	7.4	6.9

2.2 ガラスの温度特性

2.2.1 特性温度と温度依存性

ガラスにおける体積の温度変化を示す模式図を図 11 に示す。この図に示すように、通常の結晶はある軟化点 T_m 前後で不連続に体積が変化する。一方、ガラスの体積は温度の上昇とともに増加し、ガラス転移温度 T_g 付近で連続的に傾斜が変化し、高温側ではしだいに傾斜が一定となり直線的に伸びるようになる。この時の傾斜を線膨張係数 α と呼び、ガラスはガラス転移温度 T_g の低温側と高温側で温度に対する線膨張係数 α が異なる。低温側と高温側の熱膨張量の変曲点をガラス転移温度 T_g (glass transition temperature)⁷ と呼び、ガラスの物性の温度変化の重要な指標となる温度である。このガラス転移温度 T_g は定まった値をとらずガラス転移温度 T_g 付近の冷却速度などそれまでの熱履歴によって変化する。冷却時に急冷したガラスの体積変化は図 11 の青線のようになり、加熱時と異なるガラス転移温度 T_g となり、常温に戻った際、初期時の体積とは ΔV の体積差が生じる。そのため、ガラス板面内でガラス転移温度付近での冷却速度が異なると最終的な体積の差を生じ、この体積の差は残留応力の要因の一つとなる。

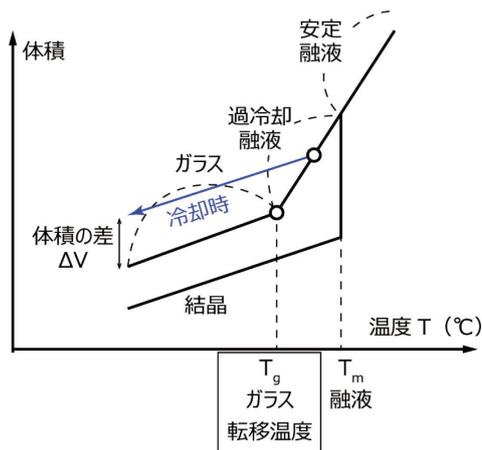


図 11 ガラスの体積の温度変化とガラス転移温度 T_g の定義 [11]

このガラス転移温度 T_g 付近で他の物性値も変化することが知られており、ヤング率とポアソン比、粘度の温度依存性を図 12 に示す。温度－粘度曲線に対応していくつかの特性温度が定められており、表 6 に一般的なソーダライムガラスの特性温度について示す。これらの特性温度はガラスの溶着の工程の参考となる。

⁷ ガラス転移温度の定義は、エントロピーやギブスの自由エネルギーなどの変曲点の温度とする場合もあるが、成形関係におけるガラス転移温度は、上述の熱膨張量の変曲点を指すことが多い。

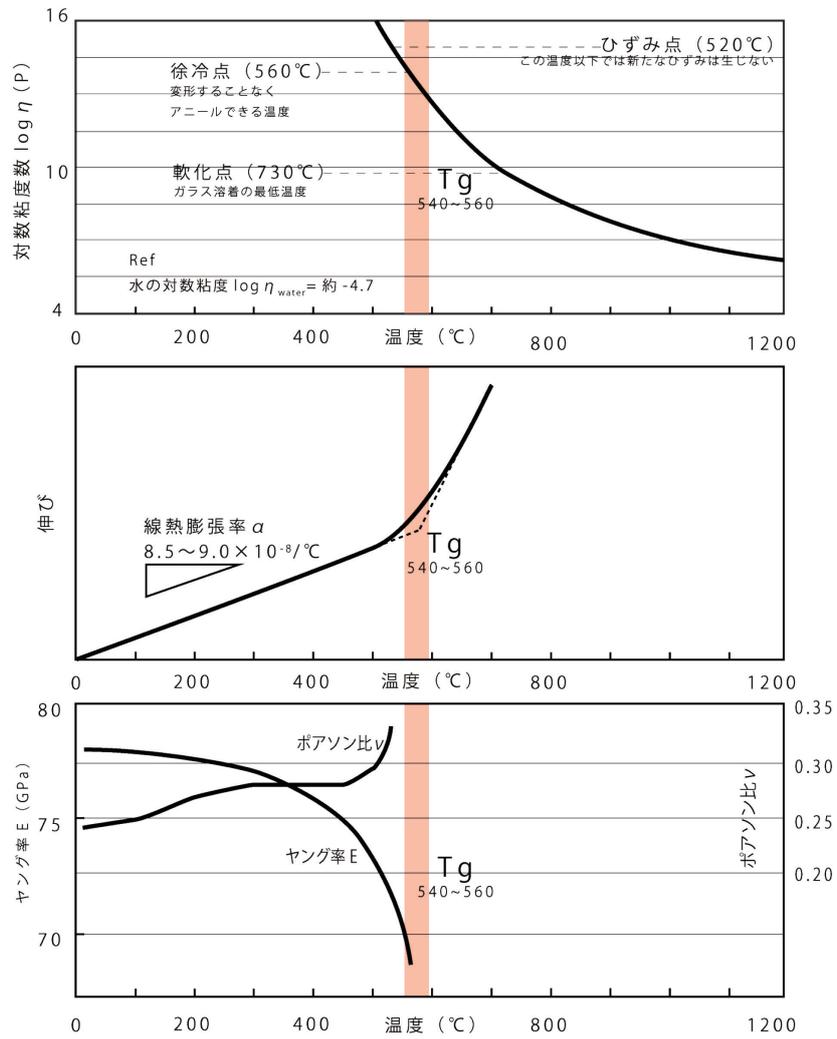


図 12 粘度 η 、線熱膨張係数 α 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν の温度依存性 [11]

表 6 一般的なソーダライムガラスの特性温度 [11]

軟化温度	T_m (°C)	733
ガラス転移温度	T_g (°C)	555
徐冷点	T_a (°C)	554
ひずみ点	P_s (°C)	511

2.3 粘弾性特性

2.3.1 弾性と粘弾性

ガラスは、室温では固体として弾性挙動を示すが、高温になり軟化し始めると温度に達すると、粘弾性という性質が温度から現れる。粘弾性は、弾性という性質と粘性という性質を兼ね備えた特性で、粘弾性挙動について記述する。図 13 に材料の弾性と粘弾性の特性を示す。図 13 の(a)は、フック弾性と呼ばれる応力 σ_s とひずみ ε_s が比例する性質を示しており、この関係は弾性率 E を用いて次式で表される。

$$\sigma_s = E\varepsilon_s \quad (2)$$

一方、ニュートン粘性と呼ばれる力学挙動は、図 13 の(b)のように応力とひずみ速度が比例し、粘性係数 η を用いて次式で表される。

$$\sigma_d = \eta\varepsilon_d/dt \quad (3)$$

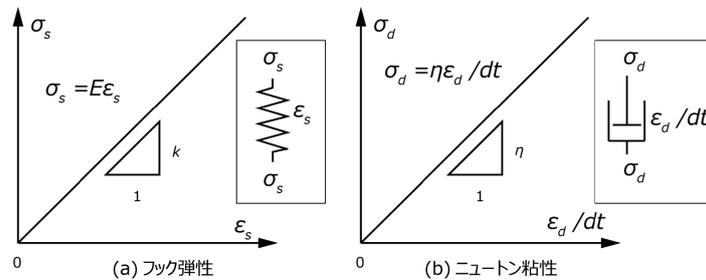


図 13 フック弾性とニュートン粘性の違い

すなわち、粘性は時間依存性を有する挙動となる。また、粘性係数 η は一般に温度依存性があるので、この(3)式は温度依存性を有する。素材の粘弾性特性は上述のように弾性を表すバネ要素と粘性を表すダッシュポット要素を組み合わせ示される。粘性の力学モデルの基本要素として、バネ要素とダッシュポット要素を直列に組み合わせたマクスウェルモデル (Maxwell model) と、バネ要素とダッシュポット要素を並列に組み合わせたフォークトモデル (Voigt model) あるいはケルビンモデル (Kelvin model) がある。ガラスの粘性挙動は、このマクスウェルモデルとフォークトモデルの組み合わせで表現しうる。

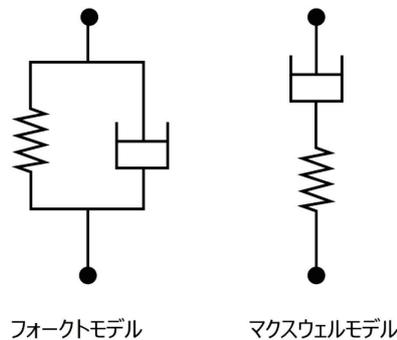


図 14 フォークトモデルとマクスウェルモデル

2.3.2 粘弾性による残留応力

部材を溶着するとき、溶接部に集中的に熱が与えられ温度差が生じ、その温度差に応じて熱膨張が生じる。この時熱膨張およびそれに続く収縮が自由に生じるならば、部材に熱応力は生じない。しかし、部材は他部材と連結しており互いに拘束しあっているため、熱応力が生じる。

残留応力は、粘弾性体をガラス転移温度 T_g 以上の温度からガラス転移温度 T_g 以下の温度に冷却し、面的に温度分布がある場合に発生する。つまり、温度分布があると、高い温度の点と低い温度の点で凝固するタイミングが異なり、最終的な体積収縮量が異なる。この体積収縮の違いによる残留応力粘弾性体の粘弾性挙動がガラス転移温度 T_g を境に大きく変化するほど大きな残留応力が発生する。

2.3.3 応力緩和挙動

粘弾性特性によって起きる代表的な挙動として、応力緩和がある。一端を固定した部材を考える。この部材に一定のひずみ ε_0 を与えて放置すると、ひずみに応じた初期の応力が生じ、その後時間の経過とともに応力が減少する。これを応力緩和挙動と呼び、応力 $\sigma(t)$ を次式で表す。

$$\sigma(t) = E_r(t)\varepsilon_0 \quad (4)$$

すなわち

$$E_r(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0 \quad (5)$$

ここで $E_r(t)$ は緩和弾性係数 (relaxation modulus) といい、ひずみを部材に与えた時の応力 $\sigma(t)$ の減少率の時間変化を示す。残留応力は粘弾性挙動で生じたものであることから、ガラス転移温度以上の温度に保持することで、ダッシュポットが解放され、残留応力が除去される。このように、生じた残留応力を除去する目的でガラス転移温度 T_g 以上に保持する熱処理をアニーリングと呼ぶ。

第3章. ガラス溶着実験

本章では、残留応力に影響すると考えられる温度条件の中で、ガラス転移温度 T_g 付近での冷却速度 k 、温度勾配をパラメータとして着目し、それぞれのパラメータを変化させた溶着実験を行った。その溶着実験の手順と使用した炉、それぞれのパラメータと残留応力の結果と分析について述べる。

3.1 実験方法

3.1.1 実験手順

長さ 300mm 幅 150mm 板厚 8mm のフロート板ガラス試験体を 2 枚溶着炉に設置してガラス溶着実験を行う。実験中は試験体の端部を約 20mm 炉外に露出させて低温としている。炉内の温度勾配の調整は、それぞれ独立に制御可能な 3 台のヒータと炉内の断熱材によって行う。図 15 にガラス試験体の A 点、B 点、C 点のそれぞれの温度履歴の例を示す。実験中の作業工程は主に、予熱、バーナーでガラス板を一体化する局所加熱、T_g 付近の 550°C に保持して溶着部の熱ひずみを除去するアニーリング、冷却の 4 つからなり、予熱を始めてから約 24 時間かけて試験体を常温まで戻す。それぞれの作業工程の詳細を以下に列挙する。

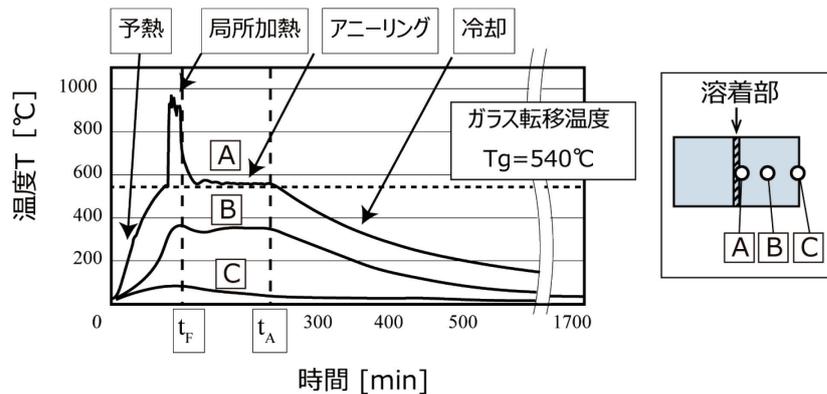


図 15 ガラス試験体の溶着部 A 点、B 点、端部 C 点の温度履歴の例

1. 予熱

溶着部を常温約 20°C から局所加熱で割れない温度である 550°C まで予めヒータで約 1 時間かけて熱する。

2. 局所加熱

バーナーで溶着部を 1000°C で 10~20 分熱し、試験体の接合部を熔融・一体化する。

3. アニーリング

溶着部のみヒータでガラス転移温度付近の 550°C に約 2 時間温度保持し、局所加熱による熱応力を緩和する。

4. 冷却

アニーリング後、常温まで 12~24 時間程度かけて自然冷却する。

3.1.2 ガラス試験体

使用ガラス材料は、建築でガラス板として一般に使用されるソーダ石灰ガラスとし、試験体は幅 W300mmx 奥行き B150mmx 厚み D8mm の2枚のガラス板とした。図 17 のように溶着部は、約 1.5mm 隙を空け、試験体と同じ材質のフロート板ガラスを破碎し外径 1~2mm 程度としたガラスくず（以後、カレットと呼ぶ）を詰めている。

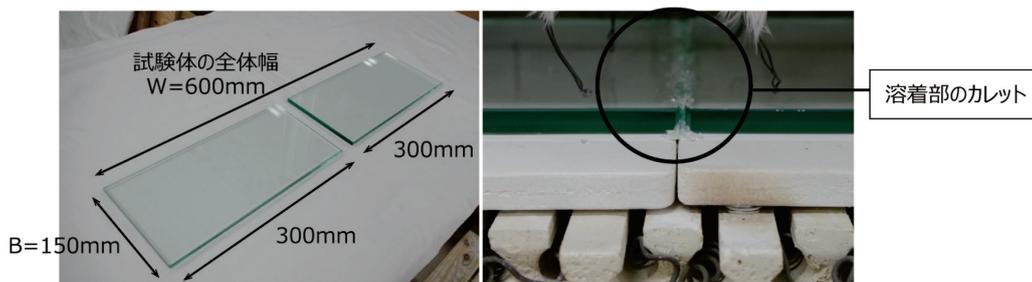


図 16 ガラス試験体の寸法と溶着部のディテール

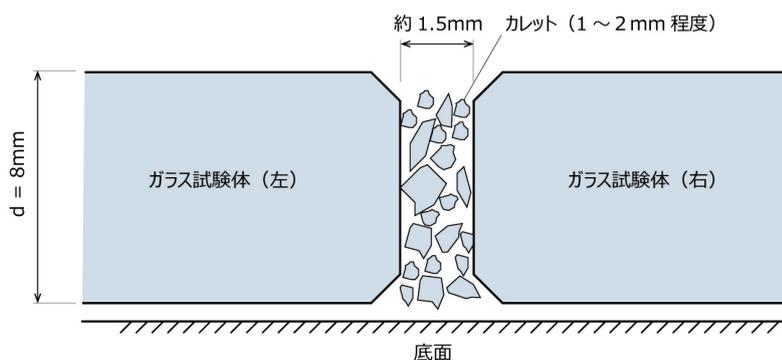


図 17 溶着部のディテール

3.1.3 溶着炉の概要

本実験に用いた溶着炉について述べる。本研究で溶着実験に用いる溶着炉は 2013 年 7 月に自作したもので、もともとは 150mm 角のガラス試験体の溶着実験を目的として制作されたものだが、溶着部と炉外端部に大きな温度差をつけ、軟化範囲を部分的とした溶着実験を行うために、溶着炉の左右の側板に試験体が露出する開口を設けて改修し、それに伴って使用するヒータなど諸設備も変更している。

溶着炉のアクソメトリックを図 18 に示す。溶着炉の外寸が幅 560mm×奥行き 360mm×高さ 490mm、内寸幅 460mm×奥行き 260mm×高さ 240mm で、溶着炉は厚さ 50mm のセラミックファイバー断熱材で構成されている。電熱線用の背面開口とガラス試験体用の側面開口、バーナー加熱用の正面開口、熱電

対用の上面開口がそれぞれ設けられている。図 19 に溶着炉の外観と実験装置の全体構成は示す。

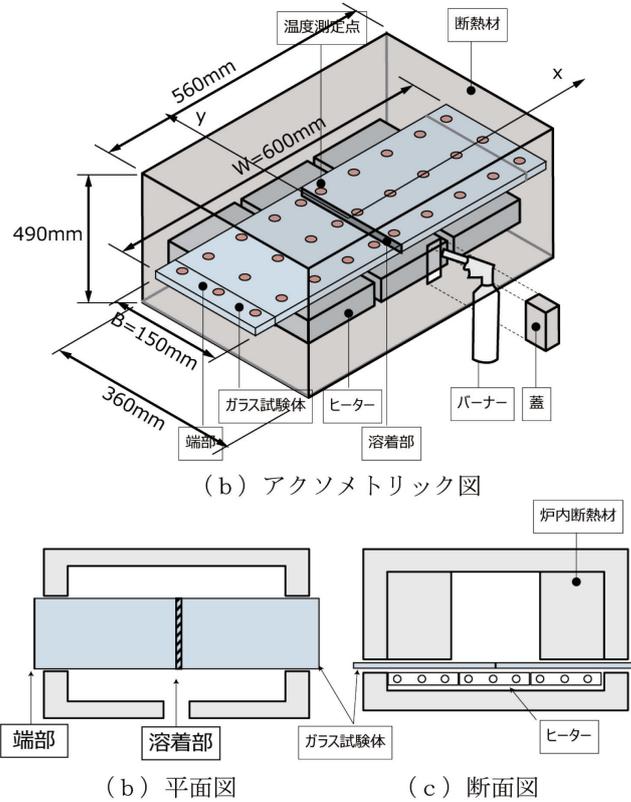


図 18 溶着炉の概要図

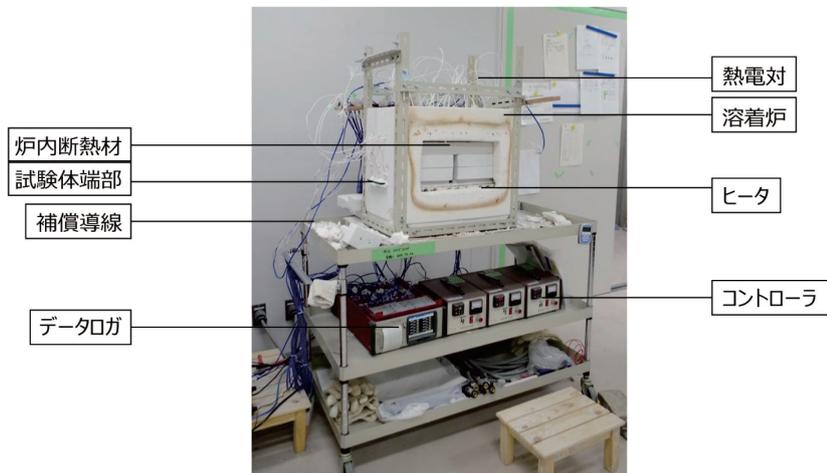


図 19 実験装置の全体構成

3.1.4 ガラスの位置の呼称

ガラス溶着で接合する部分を「溶着部」、常温の空気に露出させて低温に保っている部分を「端部」と呼ぶ。溶着部を中心に右炉外端部を $x=30\text{cm}$ 、左炉外端部を $x=-30\text{cm}$ となるように長手方向に x 座標を設けて、

細かい位置関係は x 座標で表現する。

まず、開口を設けた溶着炉の基本的な温度特性について紹介を行った後、単純な条件の下で実験を行い、溶着炉の基本的な特徴を明らかにする。なお、本章の実験比較で用いた溶着炉以外の装置については、付録にて説明する。

3.1.5 温度測定方法

ガラス試験体の温度の測定は、熱電対を設置して行う。溶着炉の温度測定点の位置を図 20 に示す。複数の温度測定点からガラス試験体の xy 平面の温度分布を把握することができる。実験を繰り返す中で温度測定点を増やし、最終的には x 方向に 12 列、 y 方向に 3 段、計 36 点を測定した。熱電対の温度測定点の高さ位置はガラス表面から数ミリ浮かせた位置にセットしている。本来熱電対は、測定したい物体に接して温度測定を行うが、本実験では熱電対がガラスに接していると、ガラスが軟化した際に熱電対が付着しクラックの原因となるため、ガラスと接しないようにセットした。そのため、測定される温度は厳密にはガラス表面付近の雰囲気温度であり、ガラス表面温度と異なる。温度測定のインターバルは、温度変化の激しい局所加熱終了時までは 10 秒程度、それ以後の温度変化が緩やかな時間では 1 分とした。使用した熱電対はセラミック被覆熱電対とガラス被覆熱電対の詳細を表 7 と表 8 に示す。

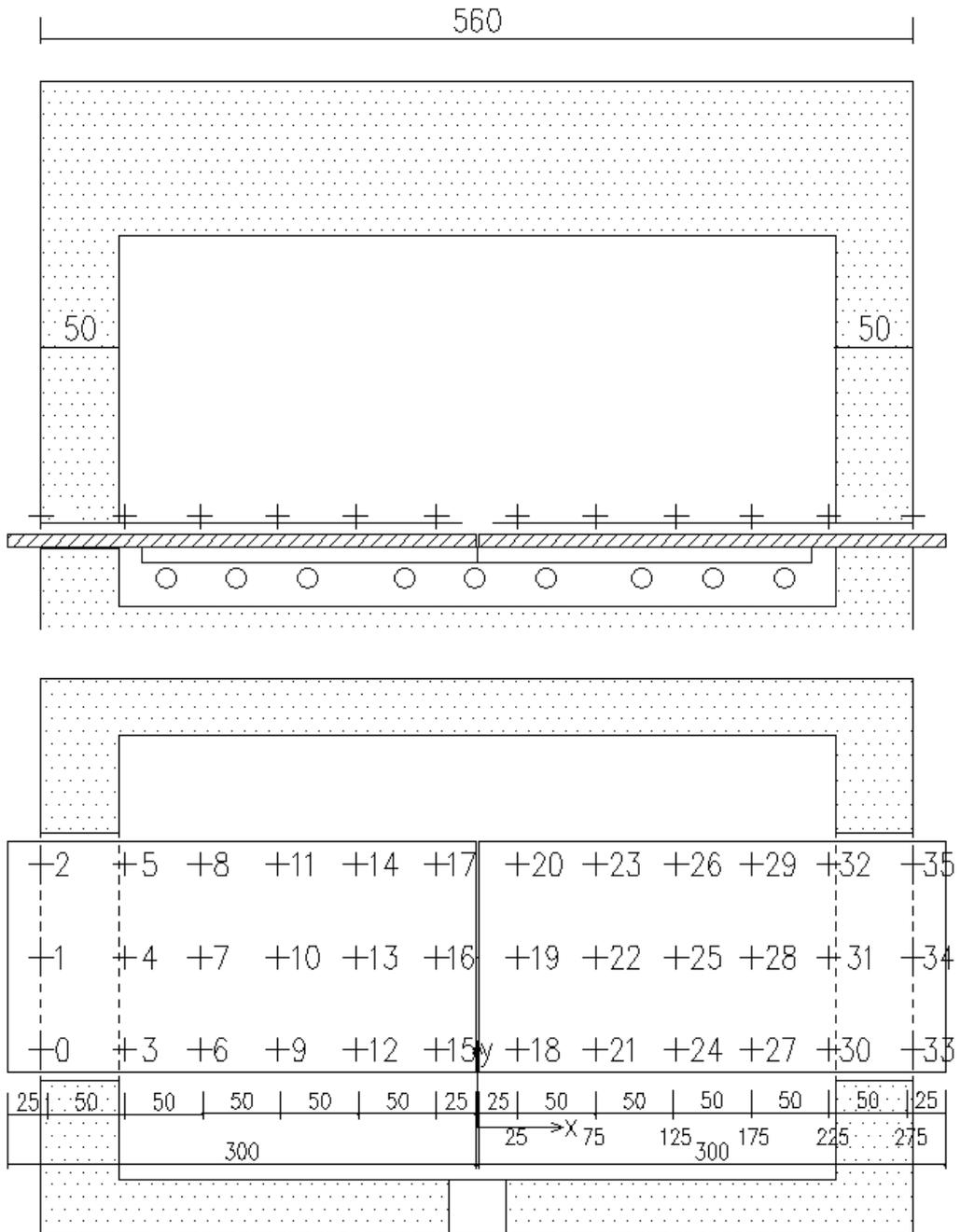


図 20 溶着炉における温度測定点の位置とチャンネル番号



図 21 溶着炉の構成要素写真

表 7 使用したセラミック被覆熱電対の詳細

1 対平型セラミック被覆熱電対線	1.0×1P K-CERAC
熱電対の種	K 型
導体材質	(+赤 ニッケルクロム合金、-白 ニッケルアルミニウム合金) クロメル アルメル
導体外径	1.0mm (or 0.814mm)
絶縁体外径	1.9mm
仕上がり外径	2.6mm×4.2mm
常用限度温度	750℃
過熱使用限度温度	950℃
特徴	絶縁体および外被に超高温用アルミナ繊維を使用した被覆熱電対。高温での耐熱性に優れる。

表 8 使用したガラス被覆熱電対の詳細

1 対平型ガラス被覆	0.32×1 P K-Hh
熱電対	K 型
導体外	0.32mm
絶縁体外	0.9mm
仕上がり外	1.4mm×2.3mm
常用限度温	350℃
短時間過熱使用限度温	400℃

3.1.6 温度制御方法

■加熱・温度保持の制御方法

溶着炉には3台の電気ヒータが設置されている。電気ヒータはカンタル線と角熱板から構成される。局所加熱以外の工程での温度制御は、電気ヒータに流す電流をコントローラが制御し、ヒータの発熱量を調整することで行われる。コントローラはそれぞれ一つのチャンネルと接続している。コントローラの設定温度は任意に入力することが可能である。接続チャンネルの測定温度がコントローラの設定温度が下回っている場合コントローラの通電が ON となり、測定温度が設定温度に達すると通電は OFF になる。通電する電流の上限値も電流のつまみを調整することで設定できる。コントローラの電源の最大電圧は 200V、電気ヒータの定格出力は 2kW である。予熱とアニーリング時の加熱に用いた電気ヒータの諸性能を表 9 に示す。電気ヒータの制御のもととする温度チャンネルは実験によって変えている。基本的に電気ヒータに通電する電流は 17A とし、制御方法は ON/OFF とした。

また、温度勾配や軟化範囲を調整するために、図 23 のように溶着炉内には炉内断熱材が設置される。

■冷却の方法

冷却は自然冷却とした。ただし、冷却速度を制御する実験では、コントローラを通電しながら自然冷却を行っている。



(a) コントローラ表面

(b) コントローラ裏面

図 22 コントローラの外観と接続の様子

表 9 コントローラの諸性能

製品名	SCR-SQ 温度コントローラ
電源電圧	AC200V
制御出力	SCR
制御方式	PID
最大負荷電流	30A ※周囲温度が 40℃以下のとき

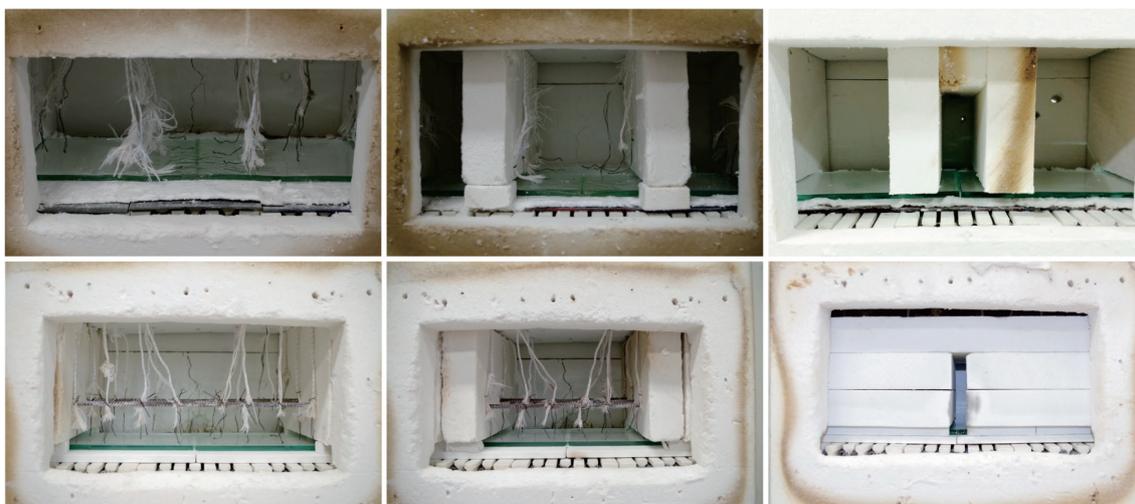


図 23 温度勾配を変化させるために挿入された炉内断熱材

3.2 試験体の残留応力の算出方法

3.2.1 光弾性による測定手法

溶着後割れなかった試験体は、光弾性画像（等色線画像、等傾線画像、鋭敏色画像）を撮影し、せん断積分法を用いて残留応力の主応力と主応力角度を算出した。この残留応力の算出に使用している光弾性の原理について以下に述べる。

樹脂やガラス等の透明な等質等方体に応力が生じている時、一時的に異方性を示し、光学的には複屈折を生じる。複屈折とは、物体に偏光を入射させると、偏光が互いに振動方向の直交し、速度の異なる2つの平面偏光に分解される現象である。この現象を利用して物体内の応力を分析することを光弾性応力分析と呼ぶ。光弾性応力分析には偏光顕微鏡を用いる。偏光顕微鏡とは試験体の複屈折を検出する顕微鏡である。顕微鏡に2枚の偏光板やその他光学装置を装着し、偏光の性質を利用して複屈折を明暗や色のコントラストとして検出することができる。

本実験でガラスの残留応力を算出するために用いた偏光顕微鏡の写真を図24に示す。検査方式によって偏光顕微鏡の光学装置の配置を変えており、使用した光弾性画像（等色線画像、等傾線画像、鋭敏色画像）について偏光顕微鏡の配置について表11に示す。表10に偏光顕微鏡の仕様を示す。偏光顕微鏡は測定の目的によって異なる光学素子を配置する。2枚の偏光板の光軸を直交にした状態を直交ニコルと呼び、光源に近い偏光板を偏光子（Polarizer）、もう一方を検光子（Analyzer）とする。2枚の偏光板の間にガラス試験体を挿入し、また必要に応じて1/4波長板、鋭敏色板を挿入して観察を行う。本以下の表11に測定手法まとめている。それぞれの測定法に関する光弾性原理を以下に述べる。光弾性画像の撮影は一眼カメラPENTAX K-70を使用した。撮影条件は付録に記載している。



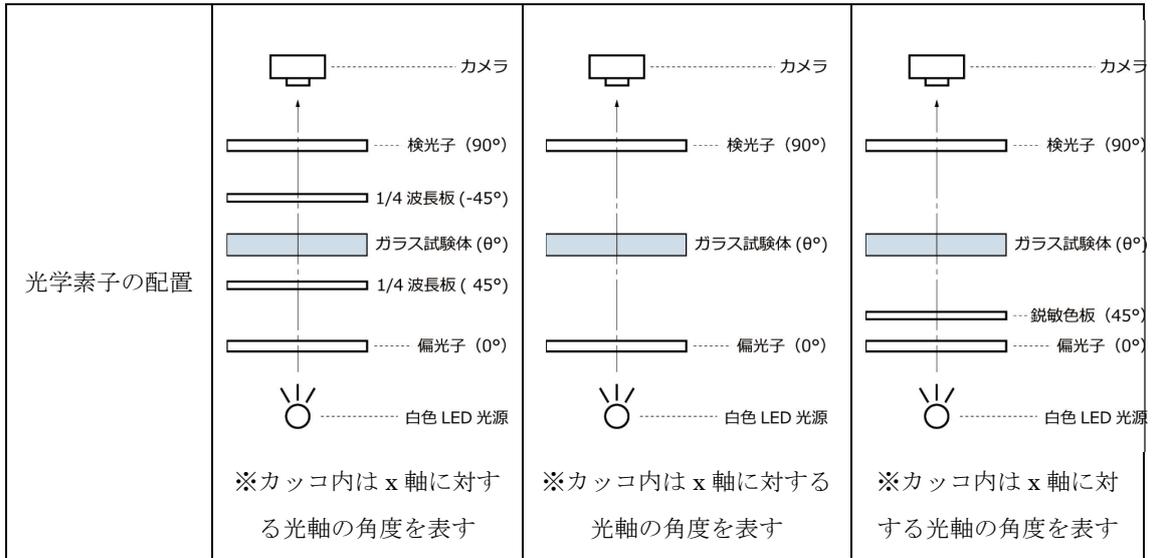
図 24 偏光顕微鏡写真

表 10 偏光顕微鏡仕様

製品名	セミオートセナルモン LSM-7000LE
重量	16kg
外寸	W280×D375×H730mm
観察範囲	最大 176×132mm / 最小 6.9×5.2mm
光源	白色 LED (色温度 3,000K)
電源電圧	AC100～240V 50/60Hz

表 11 測定手法の光学素子の配置 [14]

撮影画像名	等色線画像	等傾線画像	鋭敏色画像
測定手法	直交ニコル法 (円偏光)	直交ニコル法 (直線偏光)	鋭敏色法
目的	主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)の取得	主応力角度 ϕ の取得	小さい応力の検出 エッジ応力の正負の判別



以下に等色線画像、等傾線画像、鋭敏色画像に関する原理と残留応力の算出について述べる。

3.2.2 等色線画像

直交ニコル法（円偏光）の偏光顕微鏡に挿入された図 25 のような厚さ d の平板を考える。平板の面内に主応力 σ_1 と σ_2 が生じたものとする、第三の主応力 σ_3 は平板に垂直である。平板が十分に薄く平面応力状態にあるとすると $\sigma_3 = 0$ である。この平板に垂直、すなわち σ_3 方向から偏光が入射すると、複屈折によって生じる 2 光波の位相差は、平板面内の主応力差に比例する。これが Brewster の法則と呼ばれ、(1)式で表される。

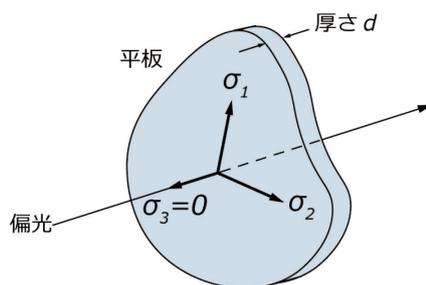


図 25 偏光が垂直入射する平板

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} R = \frac{2\pi}{\lambda} cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (6)$$

ただし、

R : 複屈折された 2 光波の光路差、リタデーション(nm)

δ : 複屈折された 2 光波の位相差(rad)

λ : 入射光の波長(nm)

c : 平板の材料の光弾性定数(MPa/cm)

d : 板厚(cm)

$(\sigma_1 - \sigma_2)$: 主応力差(MPa)

ソーダ石灰ガラスの光弾性係数 c は 25.6 (nm/cm/Mpa) である。ここでの R は平板の中で遅い速度の光が速い速度の光より遅れる距離で、光路差もしくはリタデーション (Retardation) と呼ぶ。つまり、位相差 δ もしくは光路差 R を測定することで、主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ を得ることができる。また、円偏光の場合では、透過する光の強度 I は次式で表される。

$$I = A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

ここで

I : 透過する光の強度

A : 入射する光の振幅

δ : 複屈折された2光波の位相差(rad)

(2)式を代入して

$$I = A^2 \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} cd(\sigma_1 - \sigma_2) = A^2 \sin^2 \frac{\pi R}{\lambda} \quad (8)$$

$I_0 = A^2$ だから入射光に対する相対的な光強度は次式となる。

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \frac{\pi R}{\lambda} \quad (9)$$

以上は単色光について述べたが、様々な波長が混ざっている白色光を用いた場合の I は各波長の足しあわせとなるから

$$\frac{I}{I_0} = \sum \sin^2 \frac{\pi R}{\lambda} \quad (10)$$

例として赤の波長を 700nm、緑の波長を 546nm、青の波長を 436nm として(6)式に代入すると、リタレーションに対するそれぞれの相対的な光強度は図 26 となる。各波長の光を合成すると図 27 のような色となる。この色縞を等色線と呼び、等色線は主応力差が等しい点と同じ色縞で連なっており、主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)が得られる。すなわち、等色線から複屈折の度合いを示すリタレーションが得られ、そこから主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)を求めることができる。試験体の自由境界では主応力 σ_1, σ_2 のうち一方が 0 であるから、主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)から主応力の値が求められる。

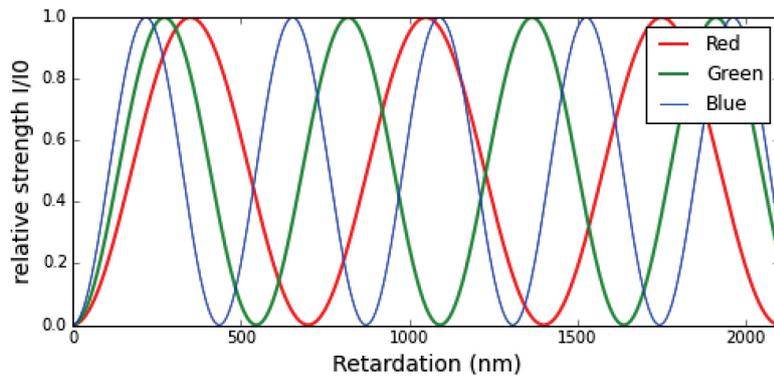


図 26 光路差 R と RGB それぞれの波長における相対強度 I/I_0

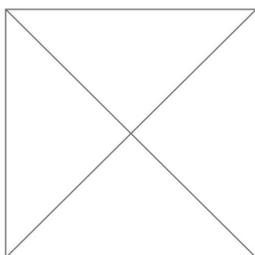


図 27 光路差 R と RGB の光を合成したときの色縞⁸

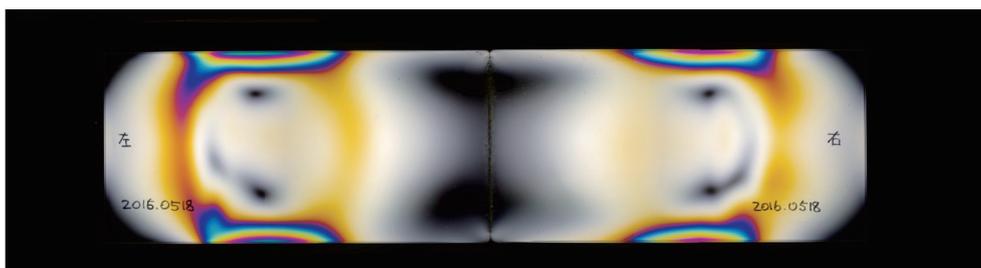


図 28 試験体で得られた等色線画像の例

⁸ tuning_the_birefringence_of_the_nematic_phase_in_suspensions_of_colloidal_gibbsite_platelets

3.2.3 等傾線画像

同様に直交ニコル法（直線偏光）の偏光顕微鏡に図 25 のようなガラス試験体が挿入されたとすると、透過してくる光の強さ I は

$$I = A^2 \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\pi R}{2\lambda} \quad (11)$$

ただし、

A : 入射光の振幅(nm)

θ : 偏光子の主軸と主応力方向のなす角度(rad)

R : 複屈折された 2 光波の光路差、リタレーション(nm)

λ : 入射光の波長(nm)

様々な波長が混ざっている白色光を使用した場合、 δ にかかわらず $\theta=0$ or $\pi/2$ となる点、すなわち偏光子の光軸と主応力方向が一致する箇所では $I=0$ 、つまり暗黒となる。この暗黒となる点の軌跡が等傾線 (isoclinic lines) と呼ばれ、等傾線上の点の主応力角度 ϕ は、偏光子の光軸 θ と等しいので、主応力角度が得られる。様々な角度に試験体を回転させて等傾線を記録すれば、試験体全面に関する等傾線図が出来上がる。試験体の回転角度 $\theta=0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 87.5^\circ$ とした際の等傾線画像の例を図 31 に示す。この画像から等傾線をトレースして抽出した等傾線図も図 32 に示す。

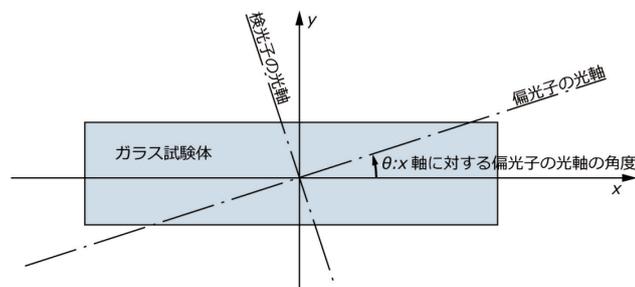


図 29 偏光子の光軸と主応力の角度

等傾線の性質は

- 自由境界では必ず主応力の一つは自由境界と平行となる。
- 等傾線はゼロ点 (zero point) で交わる。ゼロ点とは $\Delta\sigma = 0$ 、つまり両主応力が等しいため特定の主応力方向を定義できない。今回の試験片では等傾線が集中した点がゼロ点である

- 形状と荷重条件による対称軸は一本の等傾線となる。
- 試験体回転角度 90° ごとに同じ等傾線縞となる。

等傾線図が描けると、主応力線 (principal stress lines) が描ける。主応力線とは曲線上の法線と接線がその点の主応力方向を与える曲線群で、主応力の流れ方を見るのに役立つ。等傾線から主応力線の導き方を図 31 に示す。主応力線は 2 つの直交曲線群 (ここでは u 群と v 群とする) で表現され、 u 群か v 群どちらかに対応する応力はみな最大応力であり、一方他方の群はみな最小応力である。

主応力線図の性質は

- 同一の群に属する主応力線が交わることはない。
- 主応力が不定な点を特異点 (singular point) と呼び、今回の試験片ではゼロ点は特異点である。

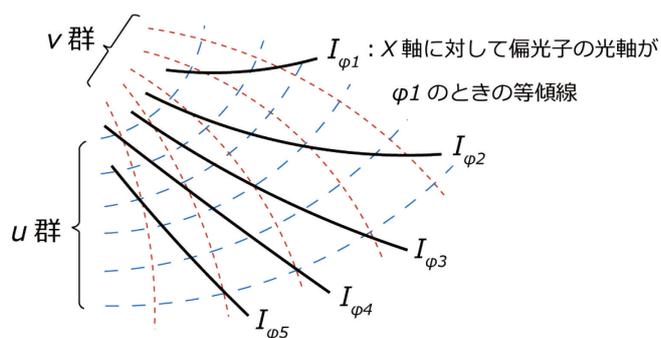


図 30 等傾線から主応力線の導き方

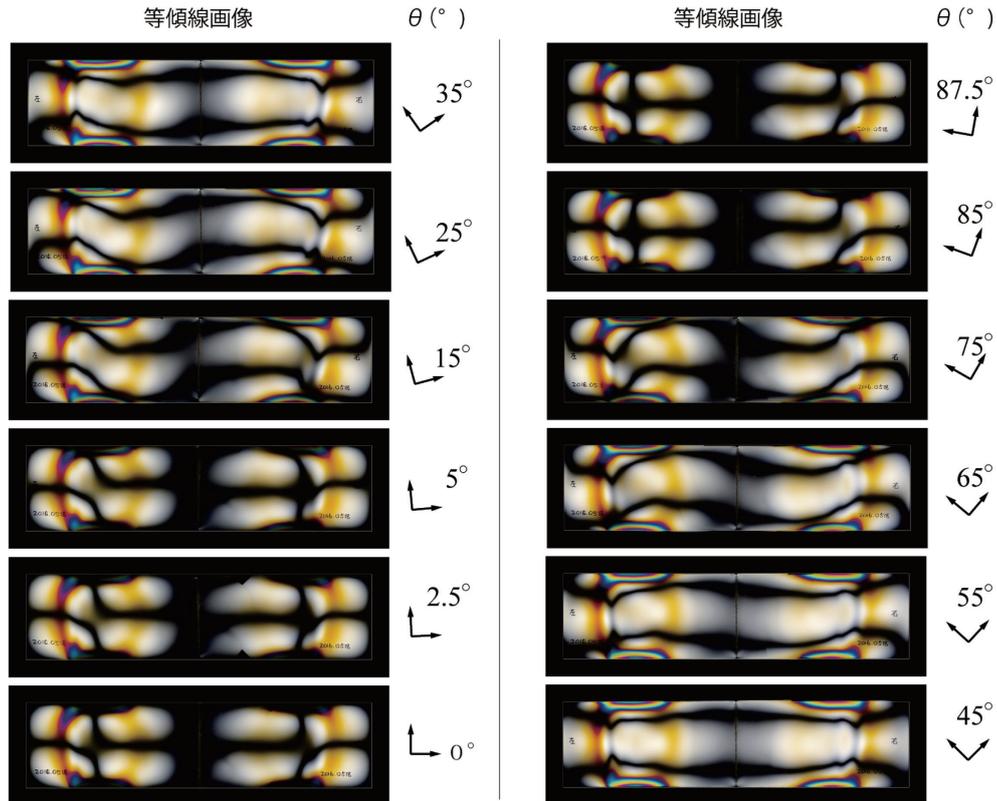


図 31 試験体の回転角度 θ とそれぞれの等傾線画像

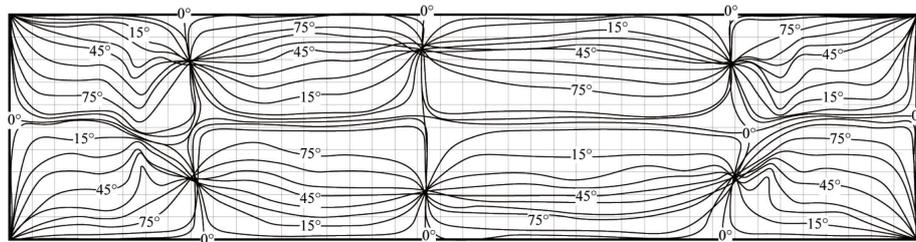


図 32 等傾線画像からトレースした等傾線図

図 4 のように等傾線の主応力角度 β の方向に曲線を描くと図 5 の主応力線図ができる。主応力線は最大主応力曲線群とそれに直交する最小主応力曲線群となる。自由境界に沿う曲線が最大主応力曲線群とわかる。最大主応力線を実線、最小主応力線を破線で示した。

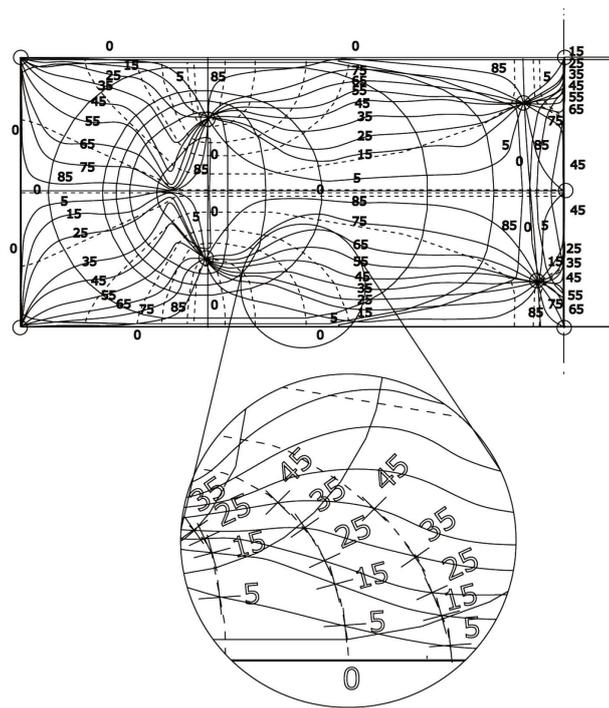


図 33 等傾線上の主応力向きと主応力線図

3.2.4 鋭敏色画像

鋭敏色画像からは自由境界の色が図 35 に示す青系統か赤系統どうかを判別することで応力の符号を決定できる。図 34 に試験体の鋭敏色画像例を示す。

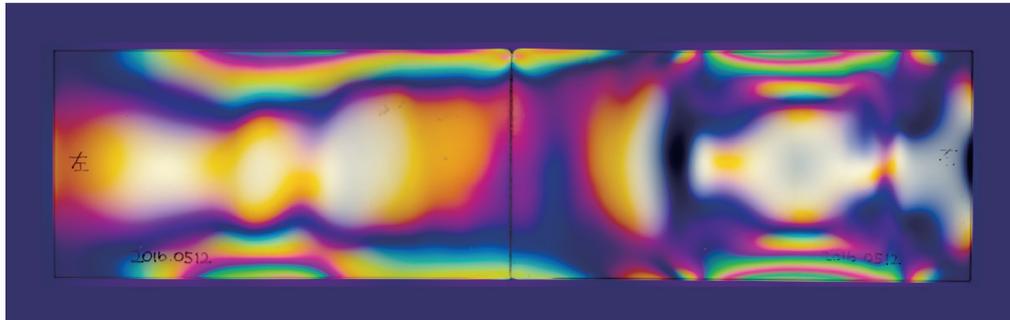


図 34 試験体の鋭敏色画像例

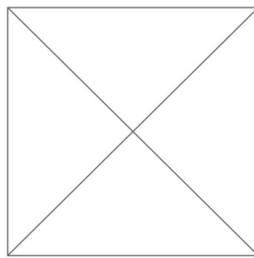


図 35 鋭敏色法における赤系統と青系統の色

3.2.5 主応力分離法

通常の光弾性実験では、等色線では主応力差が得られ、他方等傾線により主応力方向 φ が得られる。自由境界では主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ から σ_1, σ_2 を知ることができる。内部の2主応力を分析するために、図式積分法のせん断応力差積分法 (shear difference method) という方法を用いる (以後、せん断応力差積分法と呼ぶ)。せん断応力差積分法は、平面応力の平衡方程式をもとにしており、以下に詳細を述べる。

図 37 のような微小要素 $dx \times dy$ について考える。x 方向の垂直応力を σ_x 、y 方向の垂直応力 σ_y 、これに対応するせん断応力を τ_{xy} とする。応力の符号は σ_x, σ_y については微小要素に対し引張るとき正とする。また τ_{xy} の符号は図 36 のように働くとき正とする。

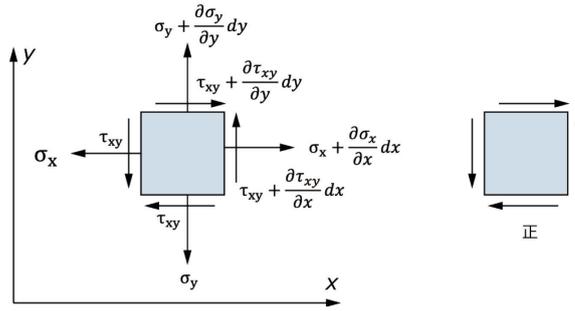


図 37 微小要素の平面応力の釣合

微小要素の平面応力の平衡方程式は

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

2 主応力 σ_1 , σ_2 のうち代数的に大きい方を σ_1 とし、 σ_1 の x 軸となす角を ϕ とすると、 σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_1 , σ_2 , ϕ には次の関係がある。

$$\sigma_x = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi \quad (14)$$

$$\sigma_y = \sigma_1 \sin^2 \phi + \sigma_2 \cos^2 \phi \quad (15)$$

$$\sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\phi \quad (16)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\phi \quad (17)$$

$$\sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\phi \quad (18)$$

(13)式を y について積分すれば、

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_{y_0} - \int_{y_0}^y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy \\ &\cong \sigma_{y_0} - \sum_{y_0}^y \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} \Delta y \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、

σ_{y_0} : y=0 の点における σ_y (MPa)

Δ_x : Δ_{xy} をとった x 方向の間隔 (cm)

Δ_y : y 方向の間隔 (cm)

$y_0 = 0$ となる自由境界上の点をとれば、 σ_{y_0} は 0 であるので

$$\sigma_y = - \sum_{y_0}^y \frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta x} \Delta y \quad (20)$$

X 方向も同様に

$$\sigma_x = - \sum_{x_0}^x \frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x \quad (21)$$

図 38 のように 15mm 格子をひき、A-A線上で右方に σ_1 を逐次求めることを考える。15mm 格子の場合、 $\Delta x=15\text{mm}$, $\Delta y=30\text{mm}$ を(16)式に代入すると

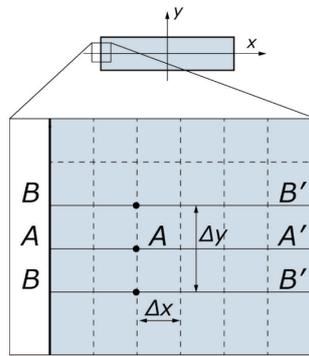


図 38 セン断応力の差をとる点

$$\sigma_x = - \sum_{x_0}^x \frac{\Delta\tau_{xy}}{2} \quad (22)$$

B 点、C 点それぞれのせん断応力 τ_{xy_B} , τ_{xy_C} は次式となる。

$$\tau_{xy_B} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)_B \sin 2\phi_B \quad (23)$$

$$\tau_{xy_C} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)_C \sin 2\phi_C \quad (24)$$

点 A のせん断応力差 $\Delta\tau_{xy_A}$ は点 B と点 C のせん断応力の差として求めて、次式となる。

$$(\Delta\tau_{xy})_A = (\tau_{xy})_B - (\tau_{xy})_C \quad (25)$$

この $\Delta\tau_{xy_A}$ を A-A線上にプロットし、これを x_0 である自由境界から求めたい x_A である A 点まで(17)式で積分することで垂直応力 σ_x の値が得られる。(11)式より、 σ_y が同時に求まる。

以上の結果から主応力 σ_1 と σ_2 が求められる。式(9)+式(10)から

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y \quad (26)$$

主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)は既知なので

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\{(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2)\}}{2} \\ &= \frac{\{(\sigma_x + \sigma_y) + (\sigma_1 - \sigma_2)\}}{2}\end{aligned}\tag{27}$$

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= \frac{\{(\sigma_1 + \sigma_2) - (\sigma_1 - \sigma_2)\}}{2} \\ &= \frac{\{(\sigma_x + \sigma_y) - (\sigma_1 - \sigma_2)\}}{2}\end{aligned}\tag{28}$$

から主応力 σ_1, σ_2 の値が得られる。以上の応力算出のフローチャートを図 39 に示す。

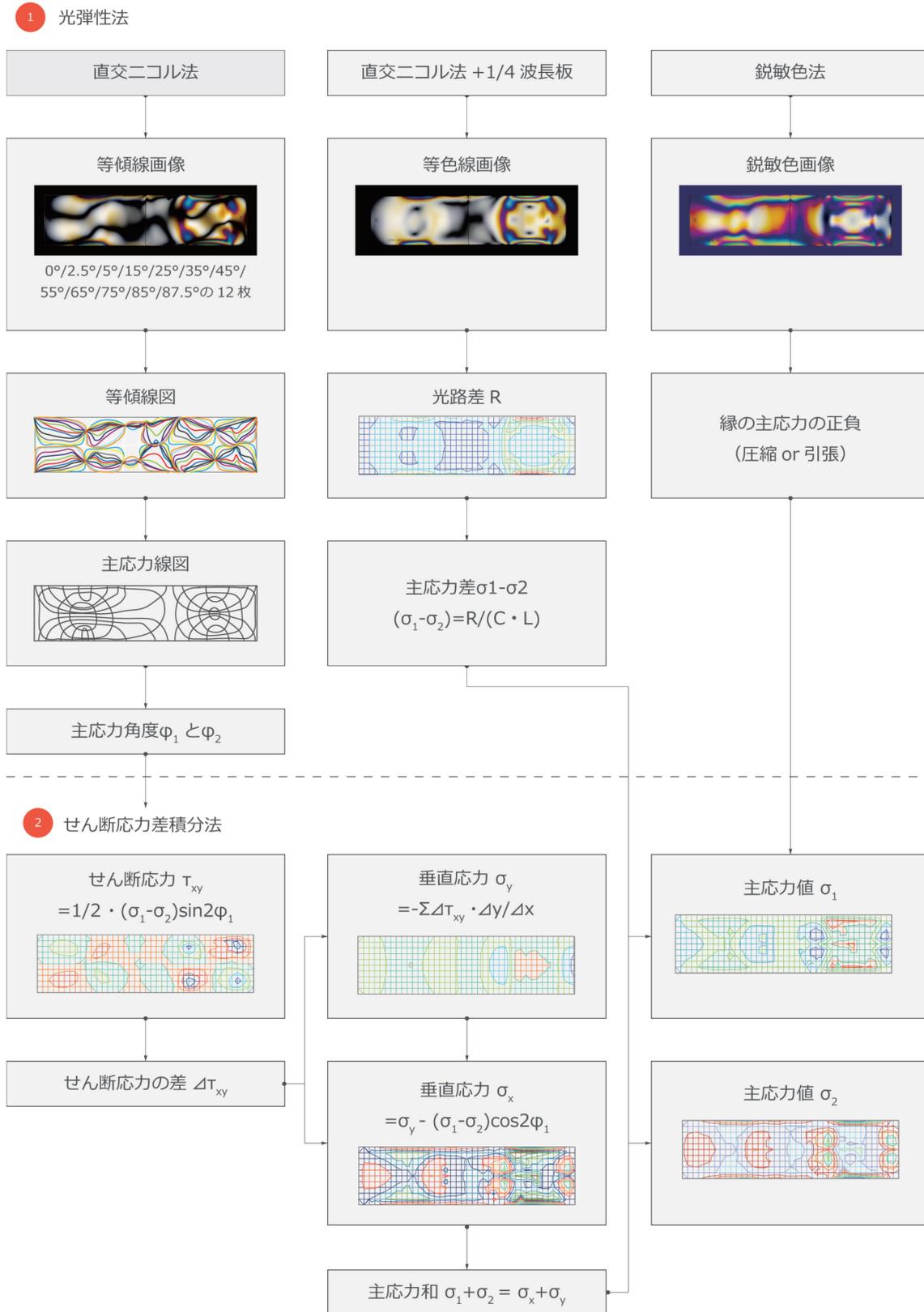


図 39 応力算出のフローチャート

3.3 溶着炉の温度分布特性

溶着炉には、図 40 のように正面にバーナー加熱用の開口、側板にはガラス板試験体の端部を露出するための開口、背面には、電気ヒータの導線用の開口があり、開口付近は熱損失が起きるため、炉内の温度分布に影響を与えると考えられる。開口が炉内の温度分布に与える影響について確認し、温度分布を Y 方向に平均化した温度勾配で代表できるか確認するため、溶着実験中における試験体の温度分布と温度勾配の対応を調べた。

49 体目の試験体の予熱終了時、局所加熱終了時、アニーリング終了時の 3 つの時間における温度分布コンタ図と、温度分布の短手を平均化した温度勾配との対応例を図 41 に示す。

ガラス手前と、中央、奥の温度の対応をみても、局所加熱時の溶着部の手前と奥方向の温度差がバーナーの加熱によって 50℃程度生じているが、軟化部分の 50℃程度の温度差が残留応力に与える影響は小さいと考えられ、温度勾配とほぼ対応しているといつてよい。

一方、左右の温度分布は実験条件によっては電気ヒータの起動タイミングが左右で異なることで多少上下する事はあったが、概ね Y 方向に平均化しても支障がないことが確認できた。以後、温度分布ではなく温度勾配をパラメータとして扱うこととする。

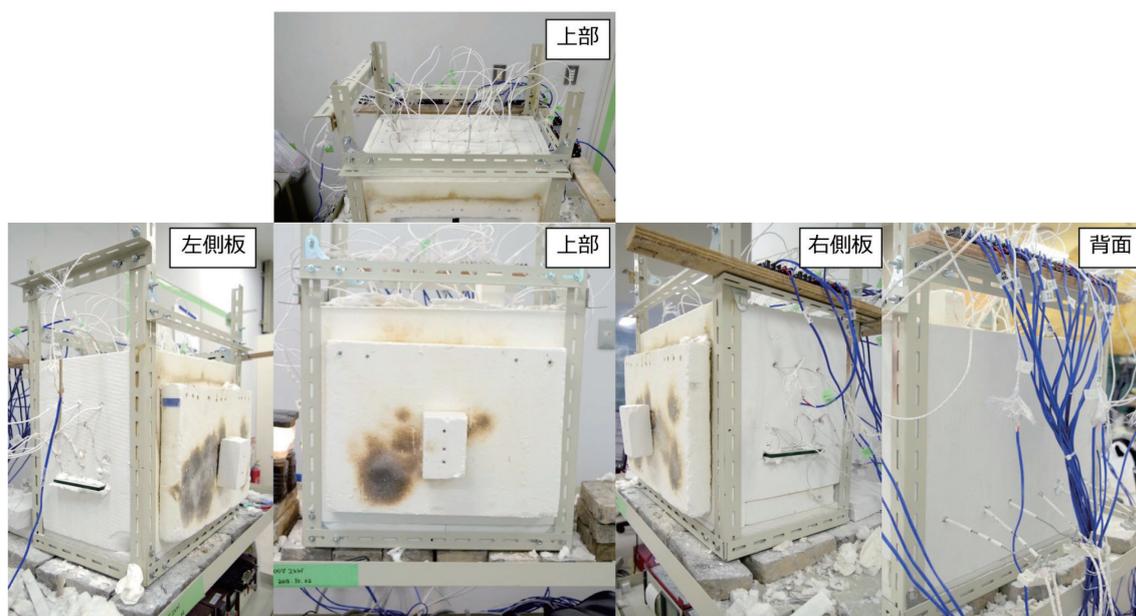


図 40 溶着炉の開口部

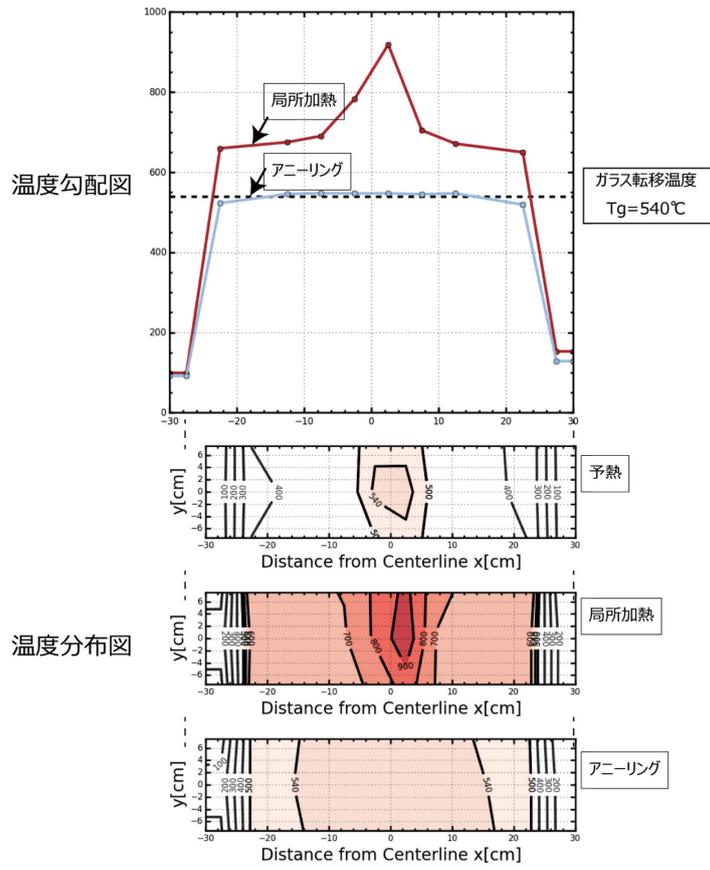


図 41 温度勾配と温度分布の対応の例

3.4 実験結果のパラメータの整理

残留応力のメカニズムをもとに、残留応力に大きく影響すると考えられる実験のパラメータを、冷却速度を表す冷却比例定数 k 、そして温度勾配を表す局所加熱時の軟化範囲 L_F とアニーリング時の軟化範囲 L_A の3つとした。それぞれのパラメータが異なる試験体を比較し、残留応力に与える影響を考察する。

- 冷却比例定数 k

軟化後、固化するまでの冷却速度が残留応力に影響するかどうかをみるため、アニーリング後に溶着部が自然冷却する時の冷却速度に着目する。一般に温度 T_{air} (°C) の空気中にある物体が温度 T_0 (°C) から自然冷却するとき、時間 t (h) 後の温度 T は、ニュートンの冷却則より次式で表される。

$$T = (T_0 - T_{air})e^{-kt} + T_{air}$$

ここで、 k (h) は冷却比例定数と呼ばれ、自然冷却の速さを表す。この冷却比例定数 k を自然冷却の冷却速度の指標とした。ただし、 $T_{air} = 20$ (°C)、 $T_0 = 550$ (°C) としている。

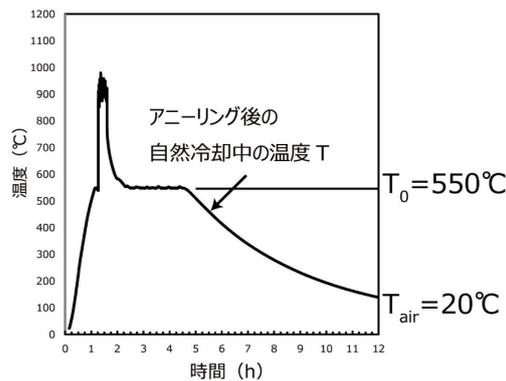


図 42 実験の温度履歴におけるアニーリング後の自然冷却の様子

- 局所加熱時の軟化範囲 L_F とアニーリング時の軟化範囲 L_A

温度履歴において特徴的な温度点である局所加熱時とアニーリング時の軟化範囲に着目する。局所加熱時の軟化範囲、アニーリング時の軟化範囲をそれぞれ L_F (cm) と L_A (cm) として温度勾配の指標とした。

表 12 試験体名と温度パラメータ結果と溶着結果の一覧

試験体名	×：割れ ○→×：遅延割れ ○：割れなし	クラック 起点位置 X(cm)	冷却比例定数 k(/h)	局所加熱時の 軟化範囲 L _F (cm)	アニーリング時の軟化範囲 L _A (cm)
S1	×	0 (cm)	-0.12 (/h)	22 (cm)	10 (cm)
S2	×	1 (cm)	-0.12 (/h)	34 (cm)	7 (cm)
S3	×	0 (cm)	-0.16 (/h)	24 (cm)	0 (cm)
S4	×	0 (cm)	-0.15 (/h)	22 (cm)	0 (cm)
S5	×	0 (cm)	-0.15 (/h)	32 (cm)	6 (cm)
S6	×	0 (cm)	-0.15 (/h)	35 (cm)	6 (cm)
S7	×	0 (cm)	-0.17 (/h)	43 (cm)	10 (cm)
S8	○→×	23 (cm)	-0.11 (/h)	48 (cm)	36 (cm)
S9	×	21 (cm)	-0.11 (/h)	48 (cm)	37 (cm)
S10	○→×	-21.5 (cm)	-0.11 (/h)	47 (cm)	37 (cm)
S11	○	割れなし	-0.09 (/h)	30 (cm)	26 (cm)
S12	×	0 (cm)	-0.14 (/h)	23 (cm)	17 (cm)
S13	×	0 (cm)	-0.06 (/h)	22 (cm)	27 (cm)
S14	×	0 (cm)	-0.13 (/h)	12 (cm)	1 (cm)
S15	○→×	-22 (cm)	-0.11 (/h)	47 (cm)	28 (cm)
S16	○	割れなし	-0.10 (/h)	47 (cm)	30 (cm)
S17	○→×	0 (cm)	-0.06 (/h)	41 (cm)	40 (cm)
S18	○	割れなし	-0.18 (/h)	27 (cm)	24 (cm)
S19	○	割れなし	-0.08 (/h)	29 (cm)	25 (cm)
S20	○	割れなし	-0.06 (/h)	20 (cm)	35 (cm)
S21	○→×	1 (cm)	-0.05 (/h)	15 (cm)	32 (cm)

3.5 実験結果一覧

3.5.1 全試験体の結果一覧

これらのパラメータを踏まえ、試験体 S1～S21 に関する温度のパラメータと溶着実験の結果を整理し

表 12 にまとめた。また、

表 12 の温度のパラメータを読み取った試験体 S1~S21 の温度履歴、アニーリング時と局所加熱時のそれぞれの温度勾配、溶着後の試験体の写真、要着後の試験体の等色線画像を、炉内の断熱材のセットアップ図とともに図 43~図 53 をまとめて以下に掲載する。

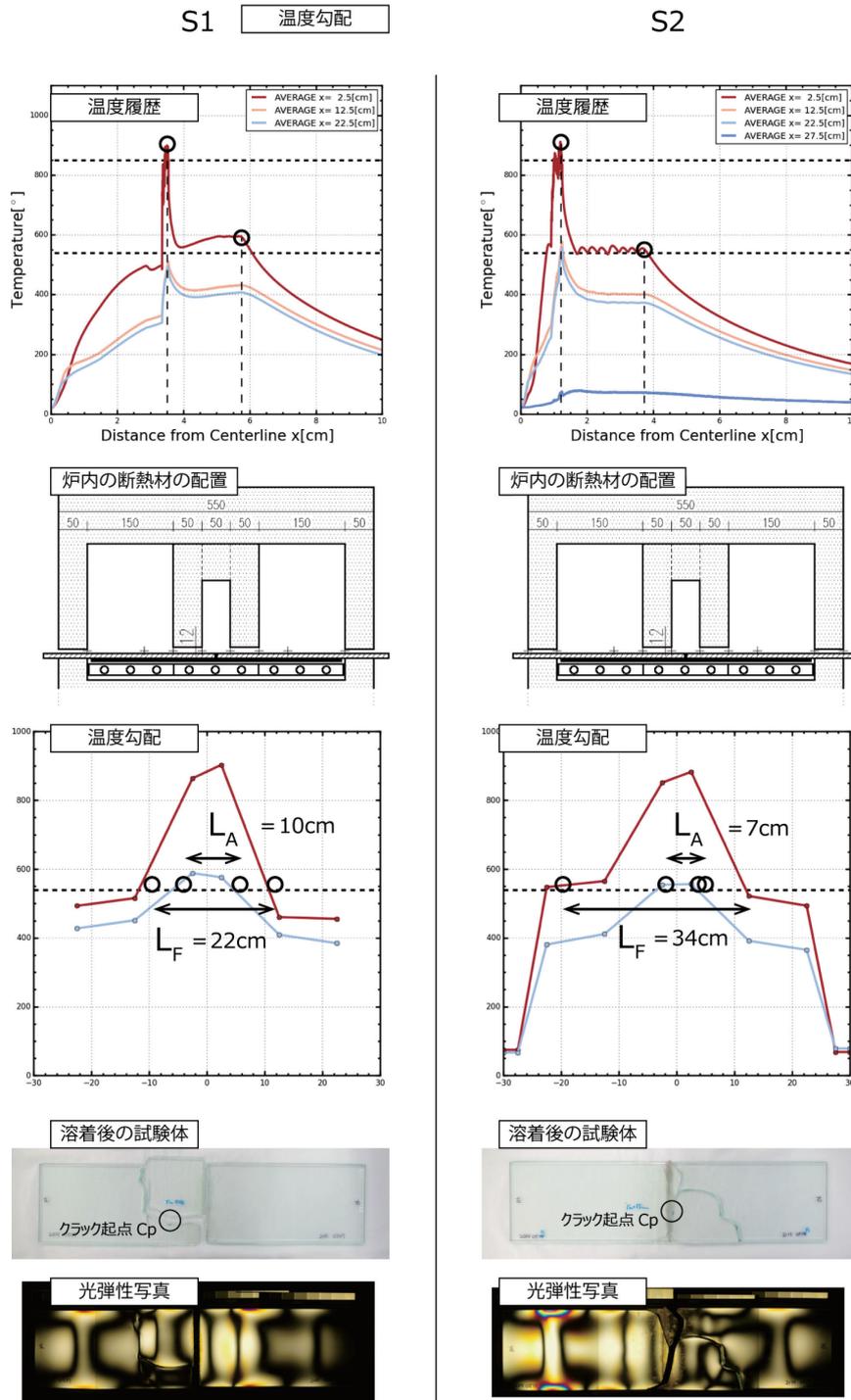


図 43 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S1~S2)

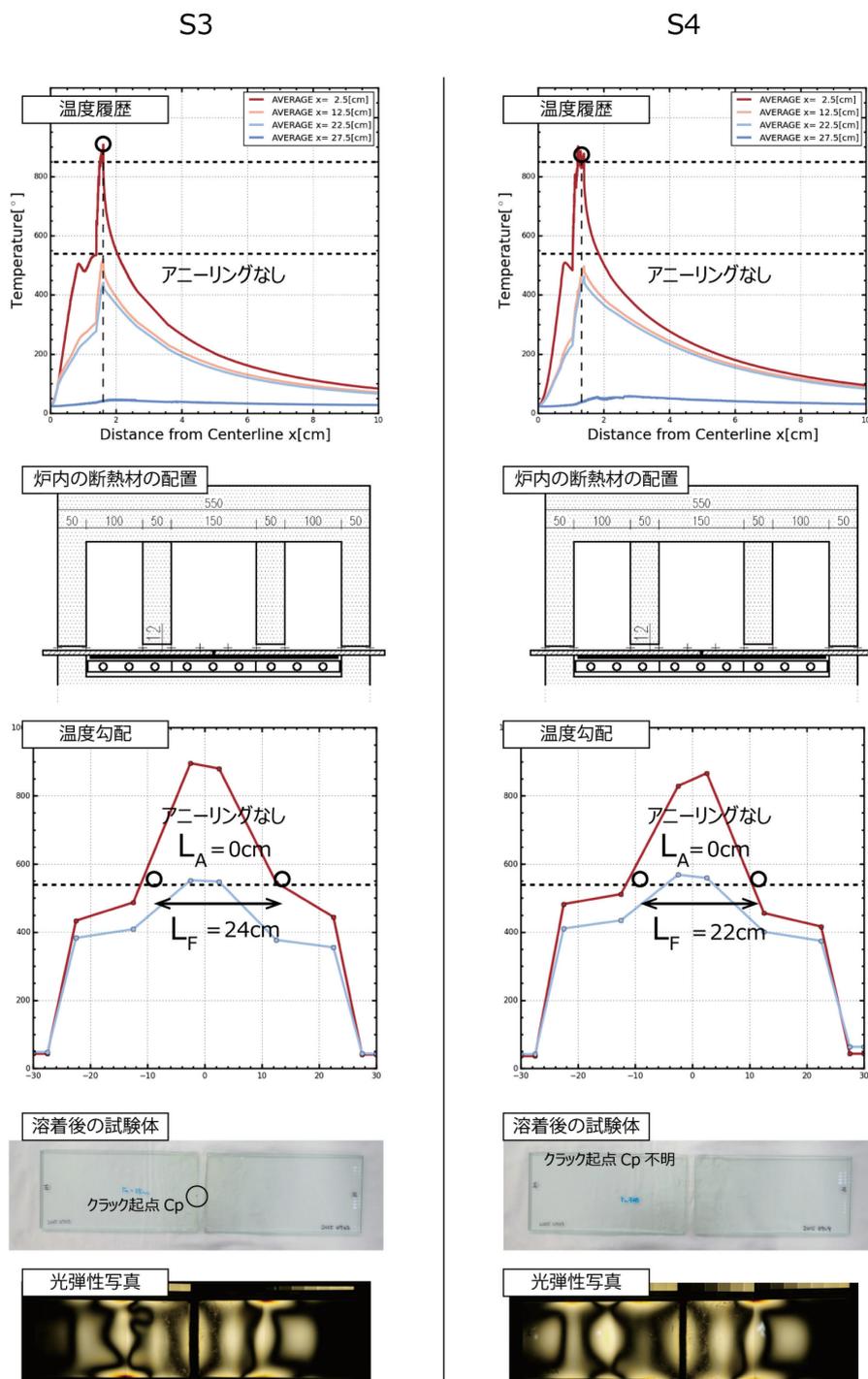


図 44 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S3~S4)

□

図 45 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S5~S6)

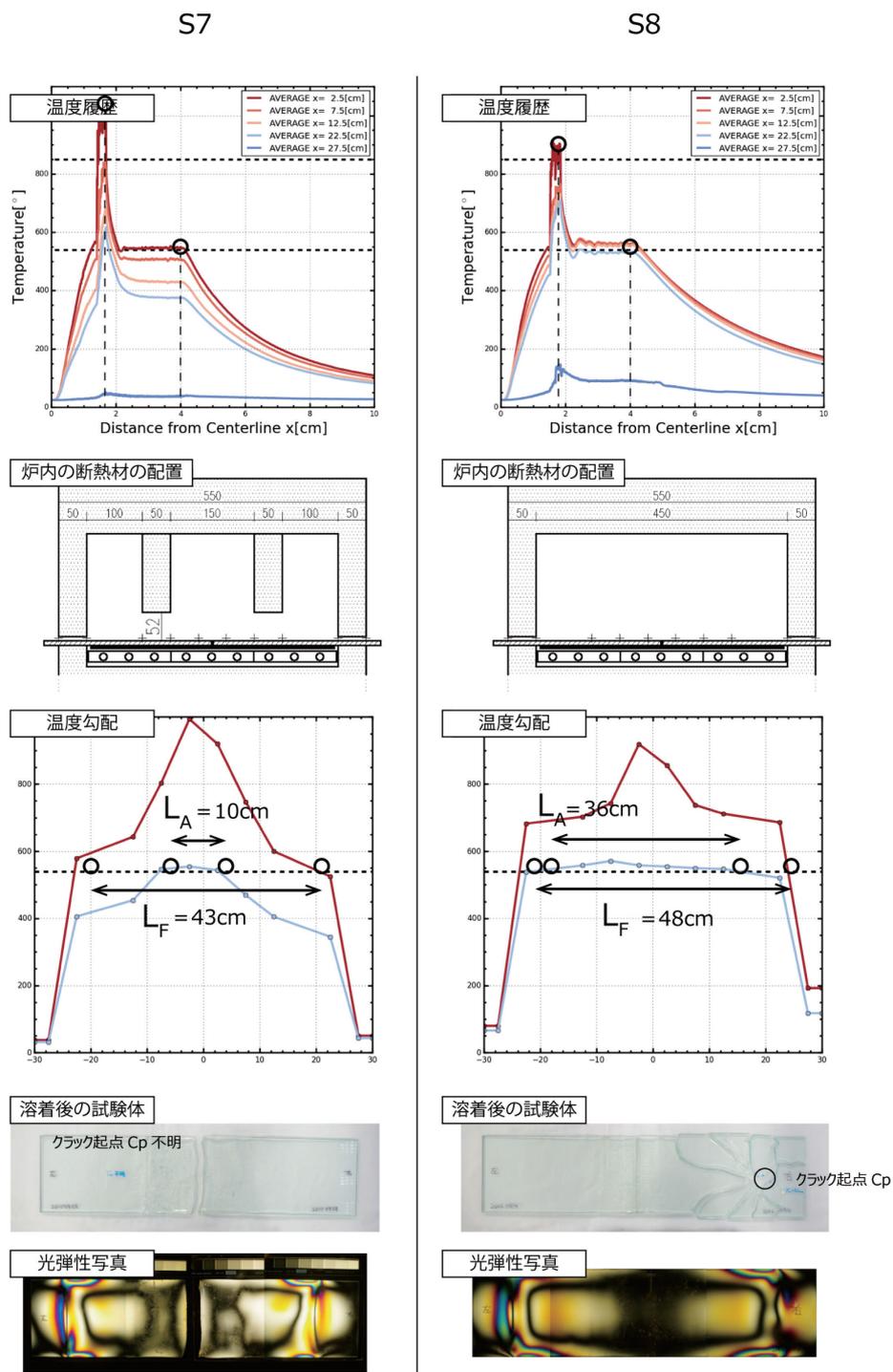


図 46 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S7~S8)

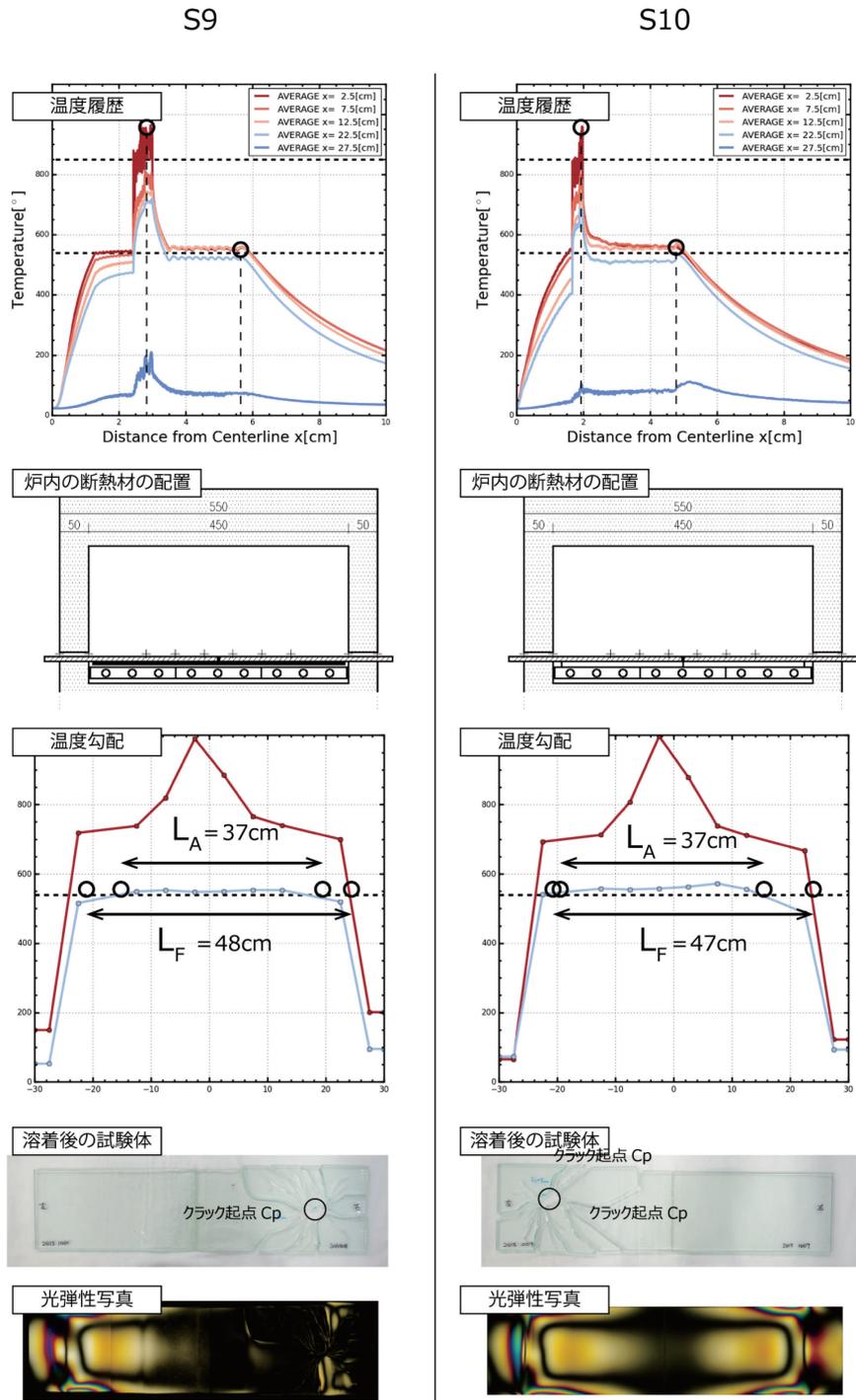


図 47 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S9~S10)

■

図 48 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S11~S12)

■

図 49 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S13~S14)

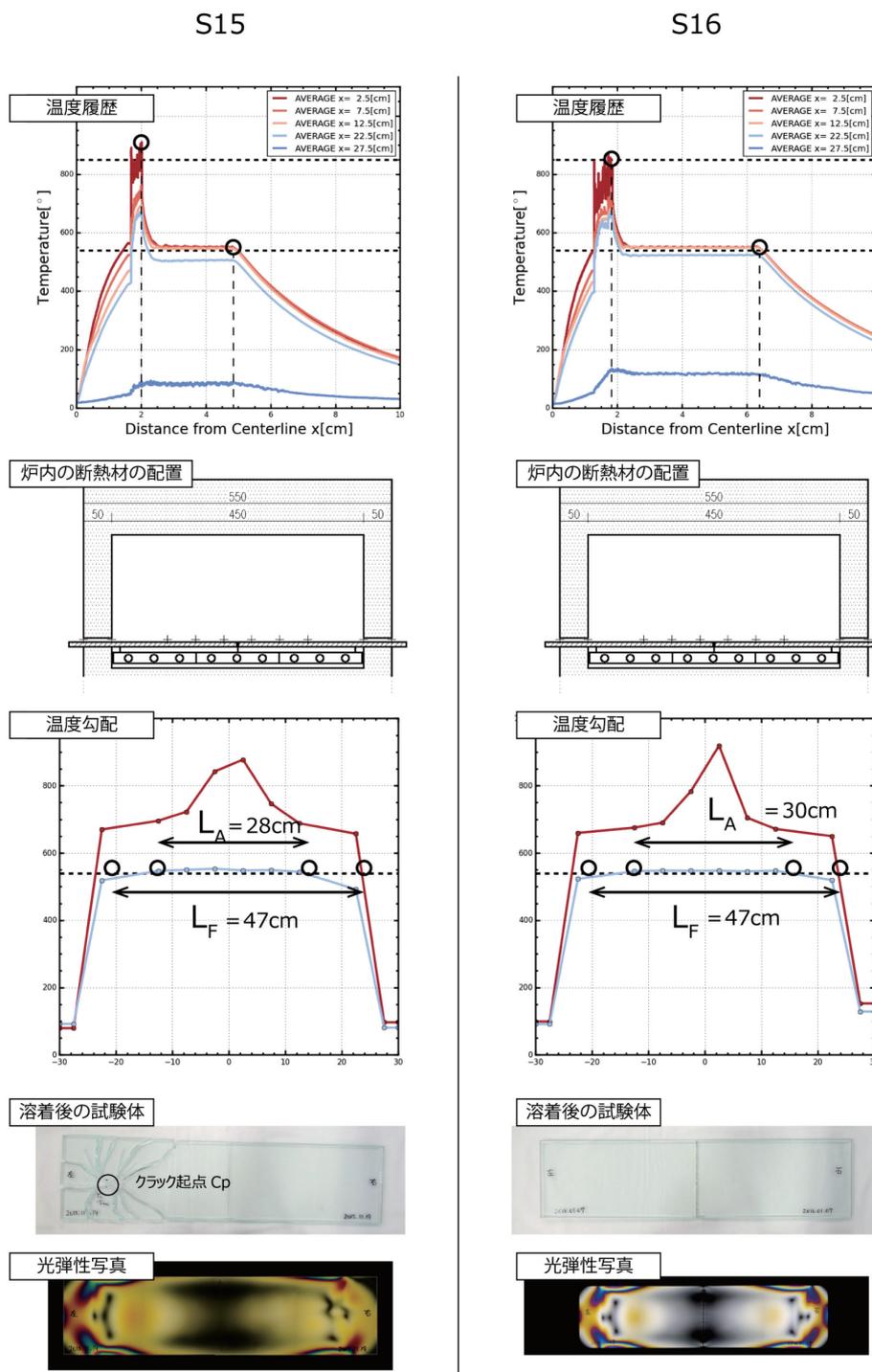


図 50 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S15~S16)

□

図 51 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S17~S18)

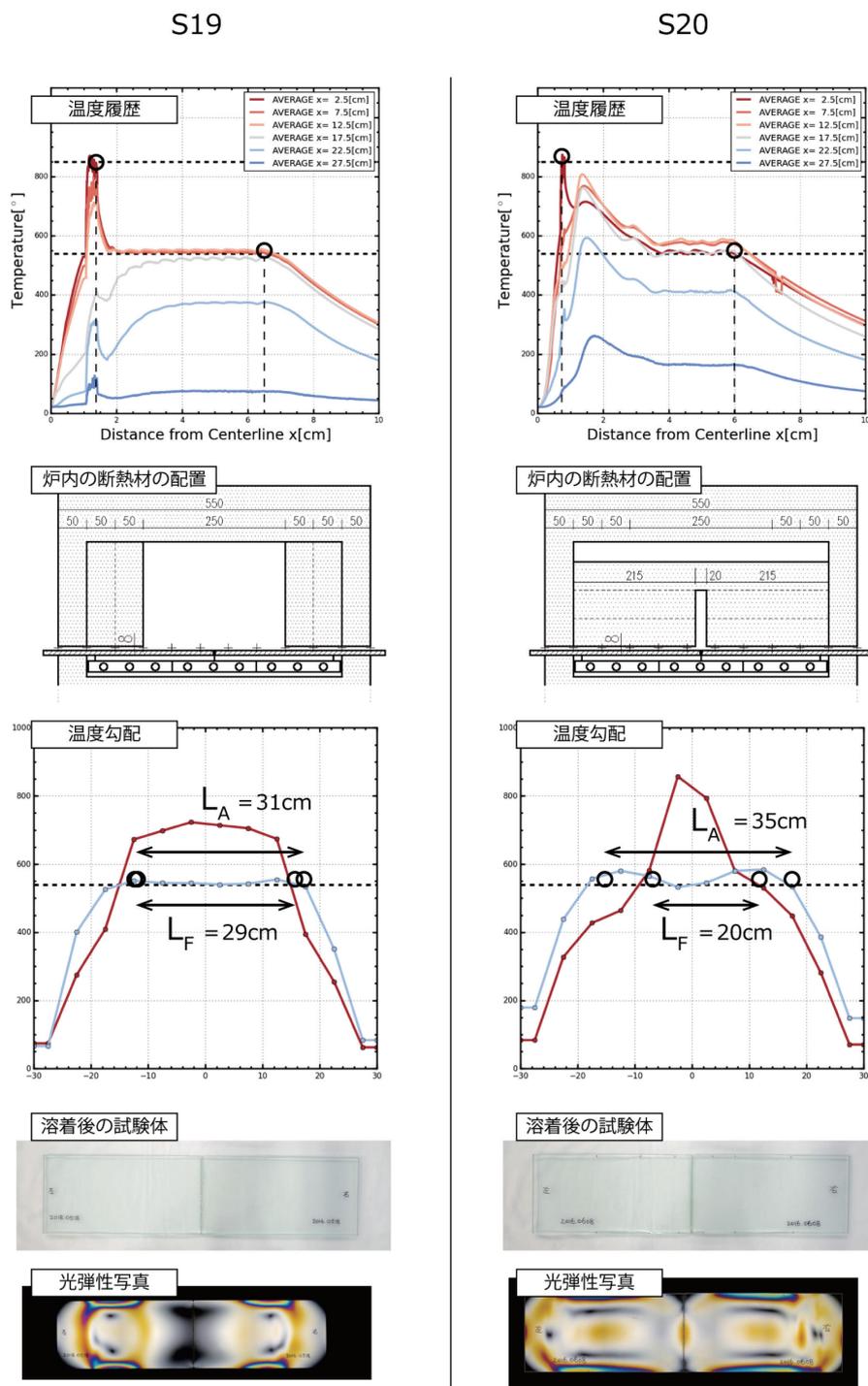


図 52 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S19~S20)

■

図 53 溶着実験における温度履歴、炉内セットアップ図、局所加熱時とアニーリング時の温度勾配、試験体写真、光弾性写真 (S21)

3.5.2 試験体の残留応力の結果

割れがなかった試験体、もしくは溶着後から数日～数ヶ月後で破断した遅延割れ試験体からは、残留が算出できた。残留応力が算出できた試験体の温度勾配と試験体の残留応力のベクトル図、引張応力のコンタ図、短手中央の長手方向の残留応力の分布図を以下に掲載する。

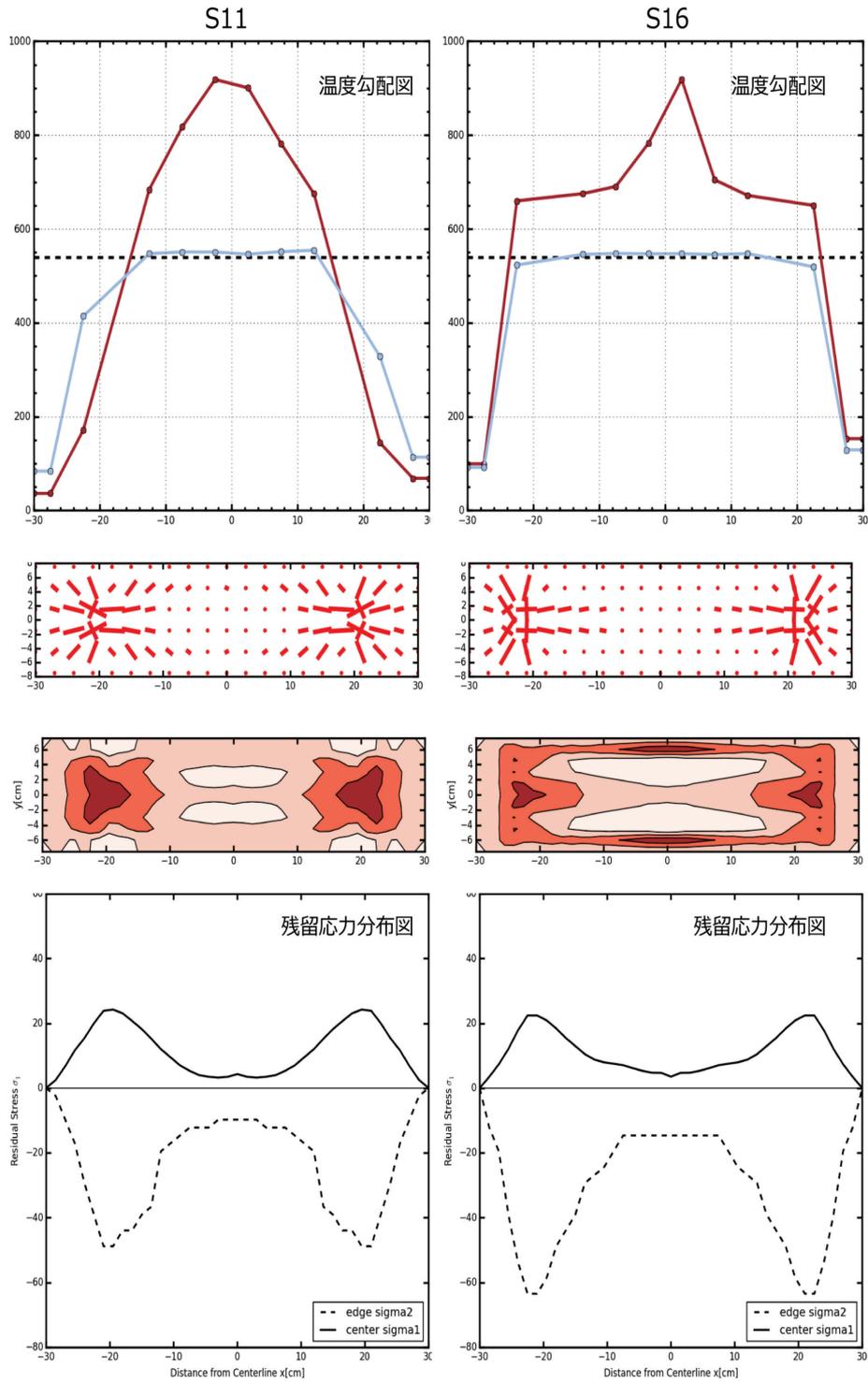


図 54 温度勾配、主応力差コンタ、引張の最大主応力ベクトル図、引張の最大応力のコンタ、引張の最大応力の折れ線グラフ

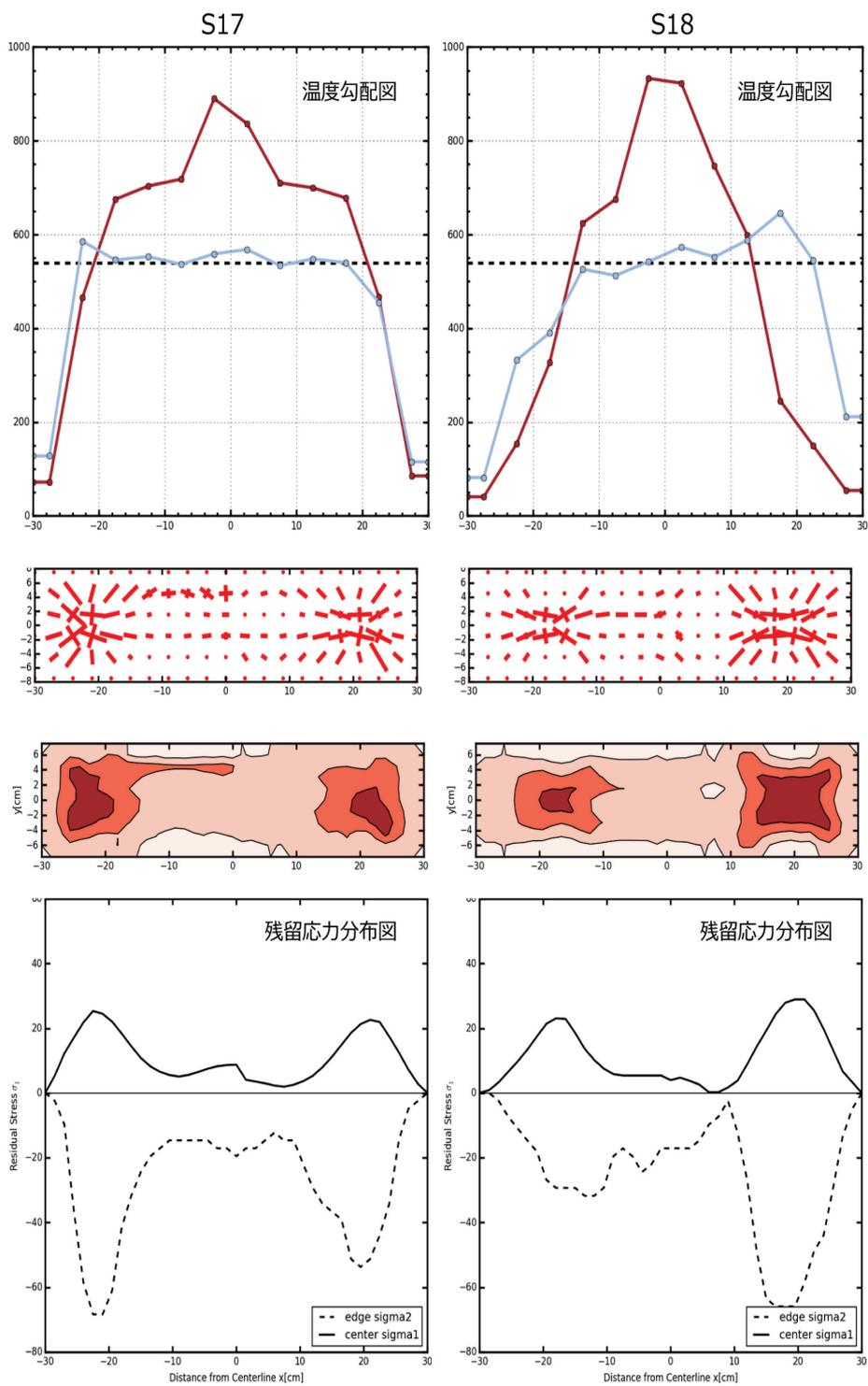


図 55 温度勾配、主応力差コンタ、引張の最大主応力ベクトル図、引張の最大応力のコンタ、引張の最大応力の折れ線グラフ

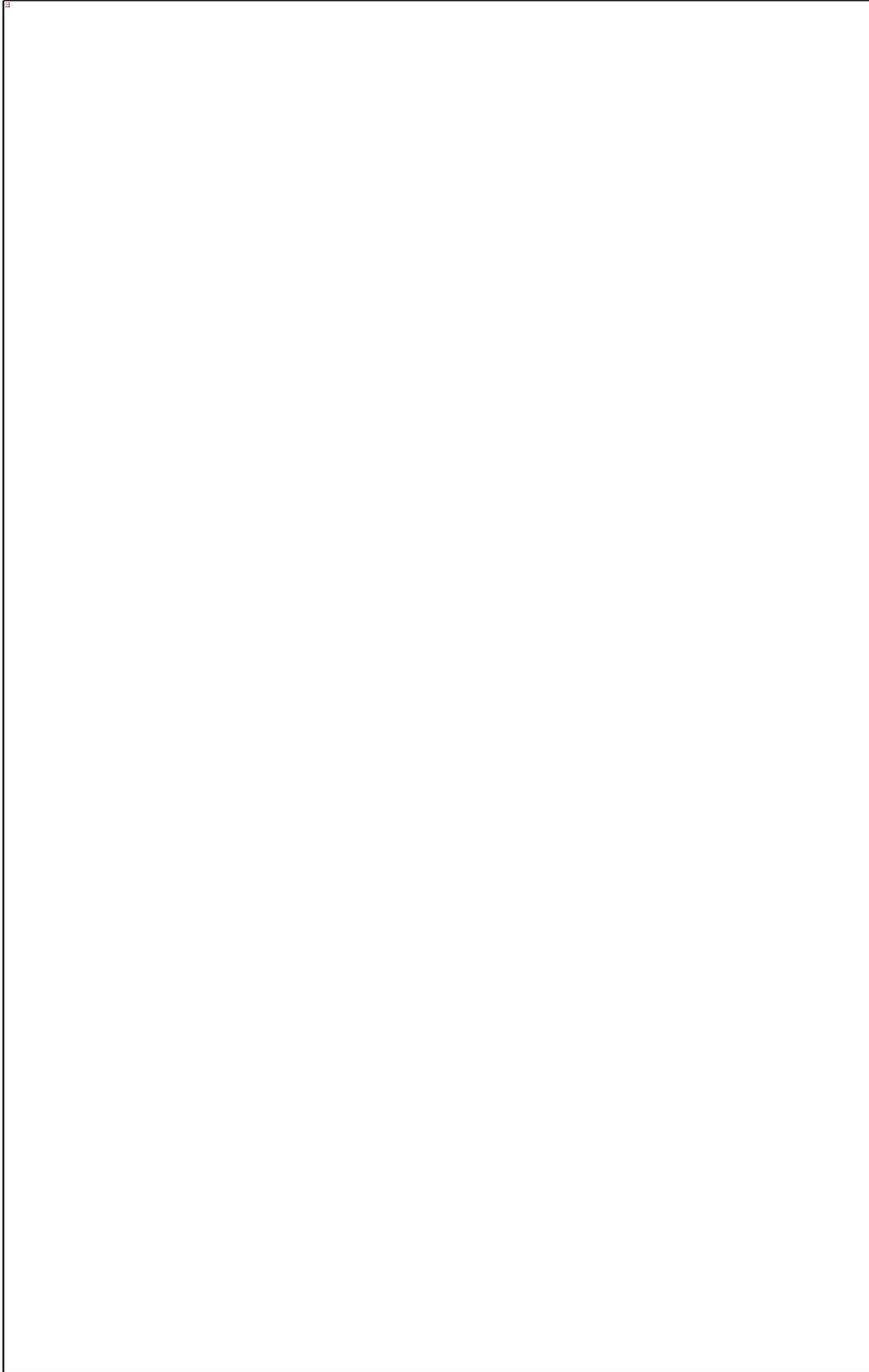


図 56 温度勾配、主応力差コンタ、引張の最大主応力ベクトル図、引張の最大応力のコンタ、引張の最大応力の折れ線グラフ

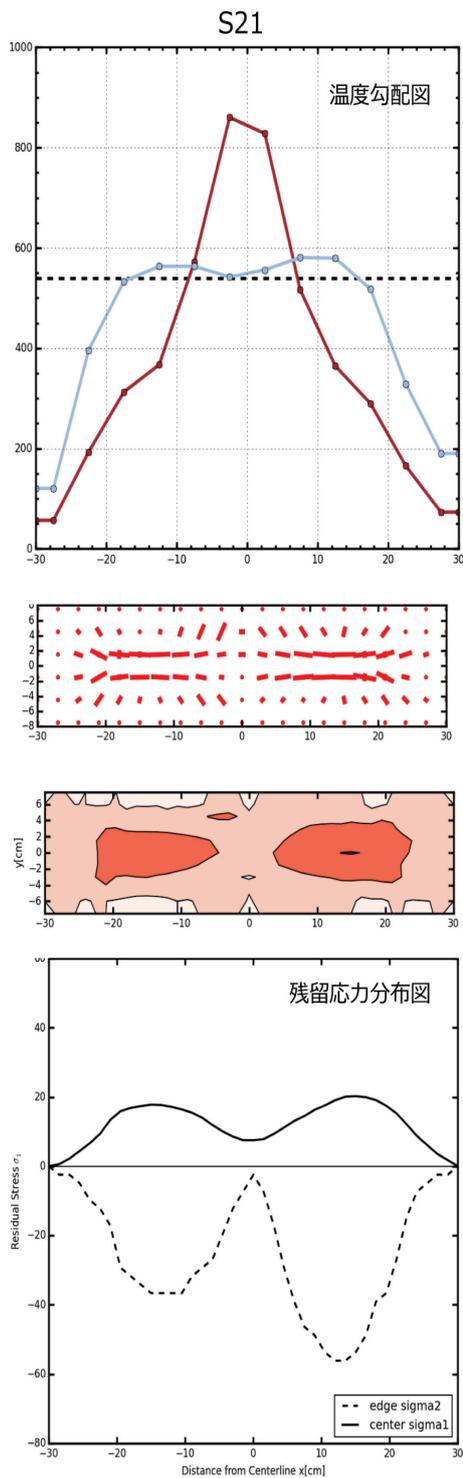


図 57 温度勾配、主応力差コンタ、引張の最大主応力ベクトル図、引張の最大応力のコンタ、引張の最大応力の折れ線グラフ

3.6 冷却比例定数 k の影響

冷却比例定数 k が残留応力へ与える影響をみるために、軟化範囲がほぼ同条件で、冷却比例定数 k が異なる試験体 S11 と S18 の残留応力を比較した。まず、図 58 にそれぞれの試験体の温度勾配を示す軟化範囲散布図を示す。試験体 S11 と S18 の軟化範囲はほぼ同じ位置にプロットされており、温度勾配はほぼ同条件とみなすことができることを確認した。冷却比例定数 k については、図 59 に示すように、試験体 S11 と S18 の溶着部の冷却速度が異なっている。

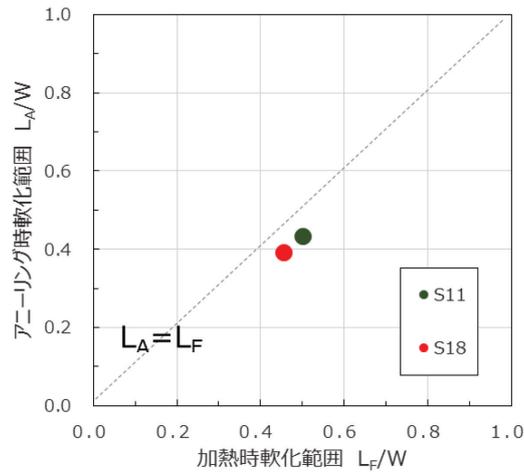


図 58 S11 と S18 の軟化範囲散布図

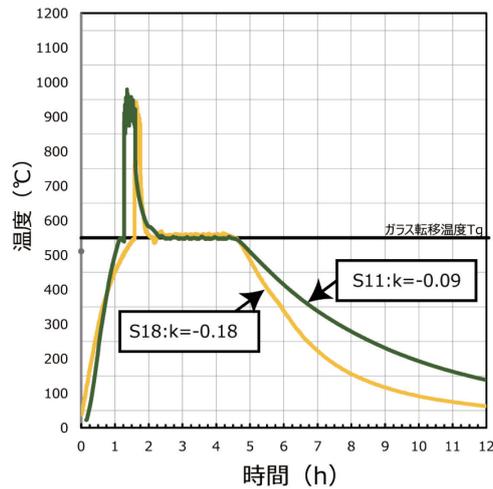


図 59 冷却速度 k の異なる試験体 S11 と S18 の溶着部の温度履歴

試験体 S11、S18 の残留応力度の最大値 σ_{max} を表 13 にまとめた。残留応力度の最大値 σ_{max} はほとんど同じであることが確認でき、冷却が急冷かどうかによる影響はみられない。

図 60 に全試験体 S1~S21 の冷却比例定数 k の結果を示す。○が割れがなかった試験体、○→×が遅延割れしたもの、×が溶着実験後に炉内を確認した時に割れていたものを表す。これをみても、冷却比例定数 k による溶着結果への明確な相関関係は見出すことはできなかった。つまり、最大の残留応力度に対する冷却比例定数 k による影響は小さいといえる。よって、今後述べる温度勾配の比較実験では冷却比例定数 k は議論せず、温度勾配のパラメータのみに焦点を当てることとし、また、解析においては冷却比例定数を考慮せず、時間に依存しない力学モデルとした。

表 13 冷却比例定数 k による最大残留応力度の影響

試験体名	冷却比例定数 $k(h)$	クラックの有無	最大残留応力 σ_{max}
S11	0.17 (急冷)	なし	23
S18	0.08 (徐冷)	なし	23

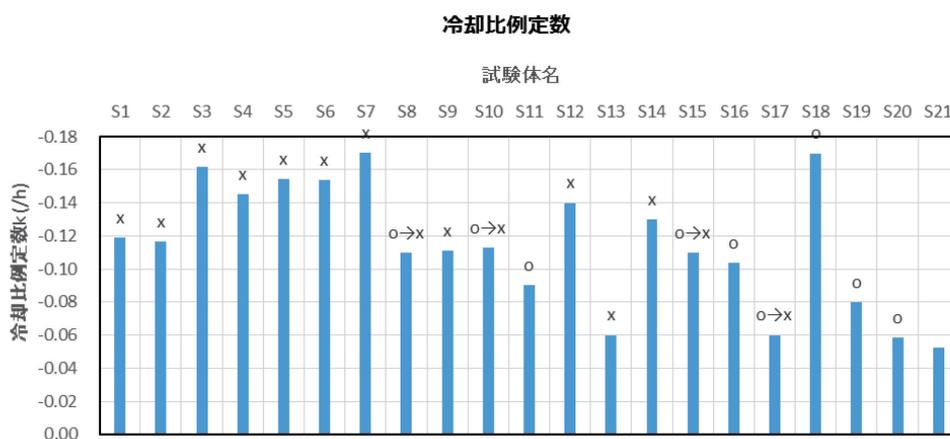


図 60 全試験体 S1~S21 の冷却比例定数 k

3.7 温度勾配による影響

3.7.1 残留応力のピーク位置とクラック起点

溶着後の試験体に生じたクラック起点の位置は大きく分けて2つのパターンが見られた。1つは溶着部からの割れ、もう片方は軟化範囲の境界で生じた割れである。それぞれのパターンの破壊性状とクラック起点の位置を図61に示し、前者を軟化範囲境界での割れ、後者を溶着部での割れと呼ぶことにする。

溶着実験の残留応力の結果の図54～図57をみると、残留応力のピーク点の位置は概ねアニーリング時にガラス転移温度 $T_g = 540^\circ\text{C}$ 付近となっていた部分、つまり軟化範囲の境界であることが明らかとなった。

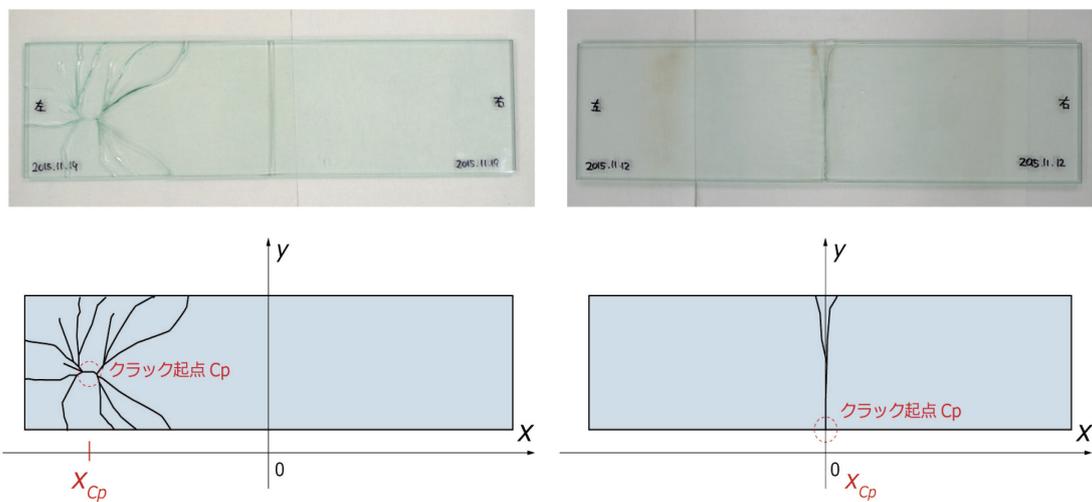


図 61 クラック起点の位置 X_{Cp} の違い

3.7.2 溶着可能範囲の考察

図 62 に試験体 S1～S21 の溶着結果で分類し、局所加熱時の軟化範囲 $L_F(\text{cm})$ とアニーリング時の軟化範囲 $L_A(\text{cm})$ をプロットした散布図を示す。ただし、それぞれの軟化範囲をガラス試験体幅 $W=60[\text{cm}]$ で除して無次元化している。縦軸が局所加熱時の軟化範囲を表す L_F/W 、縦軸がアニーリング時の軟化範囲を表す L_A/W となっており、左下にプロットされるほど軟化範囲が狭いことを示し、右上にプロットされるほど軟化範囲が広範囲となっていることを示す。溶着結果を「割れなし」、溶着後は割れがなかったが数日～数ヶ月で割れた「遅延割れ」、そして溶着後に炉内を確認した際に割れていた「割れ」の3種類に分類した。

また、図 63 に試験体 S1～S21 のクラック起点で分類し、図 62 と同様にガラス試験体幅 $W=60[\text{cm}]$ で除して無次元化した局所加熱時の軟化範囲 $L_F(\text{cm})$ とアニーリング時の軟化範囲 $L_A(\text{cm})$ をプロットした散布図を示す。クラック起点は「割れなし」、「溶着部からの割れ」、「軟化範囲境界からの割れ」の3種類に分類した。緑色の軟化範囲が狭い範囲と青色の軟化範囲が大きい範囲は、溶着炉や装置の関係上、実験によって検証できなかった。

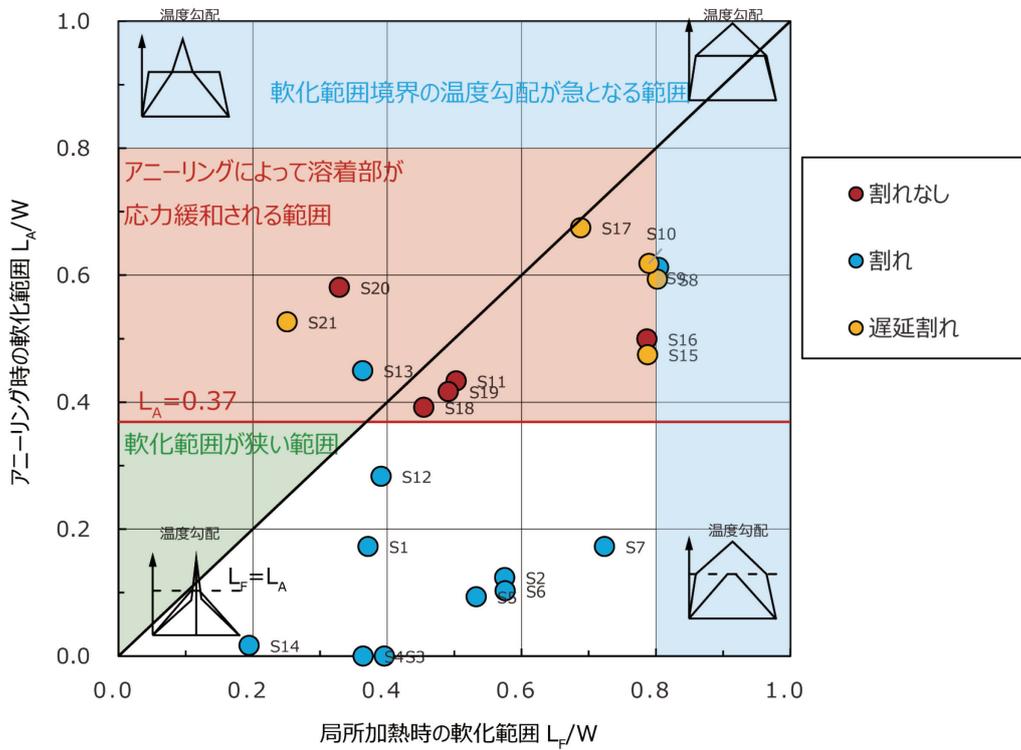


図 62 軟化範囲の散布図と溶着結果

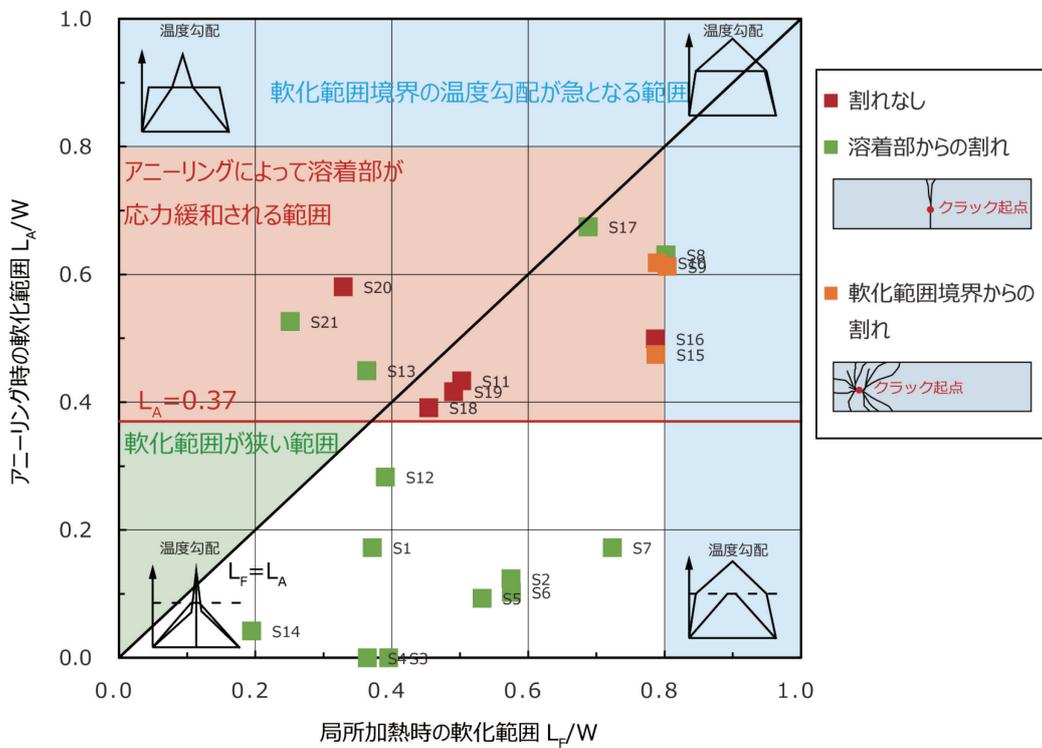


図 63 軟化範囲の散布図とクラック起点位置

- 溶着部の応力緩和に必要なアニーリング時の軟化範囲 L_A

図 62 をみると、「割れなし」と「遅延割れ」の試験体が $L_A = 0.37$ である赤い線よりも上に位置している。また図 63 のクラック起点をみると、 $L_A = 0.37$ より下の試験体は全て、溶着部からの割れとなっている。これは、アニーリング時の軟化範囲 L_A がある一定程度より小さいと溶着部の応力緩和が十分になされず割れてしまうことを示していると考えられる。溶着部の応力緩和を十分になされるためのアニーリング時の軟化範囲が絶対値なのか、もしくは局所加熱時の軟化範囲との関係で決まる相対的な値なのかは今回の実験結果ではわからないが、軟化範囲が狭い緑の範囲の試験体を検証すれば、どちらなのか明らかになると考えられる。

- 軟化範囲によるクラック起点の変化

軟化範囲と破壊性状の違いを図に示す。緑の範囲では軟化範囲の境界付近でクラックが生じ、その他で割れた試験体は溶着部からクラックが生じている。溶着部からクラックの生じた試験体は応力集中によるものだと推察される

L_F, L_A がともに 0.8 以上の大きい青い範囲となる試験体サンプルはないが、溶着部が十分に応力緩和なされたとしても、軟化範囲境界での温度勾配が急になるため、軟化範囲境界に大きな残留応力が発生すると考えられ、溶着できる可能性は低い範囲だと考えられる。図 63 の軟化範囲とクラック起点位置の関係を見ても、軟化範囲が大きく青い範囲に近い試験体は、軟化範囲境界からの割れが発生しており、軟化範囲が大きくなると軟化範囲境界の残留応力が大きくなる傾向が読み取れ、青い範囲では割れる可能性が高いといえる。

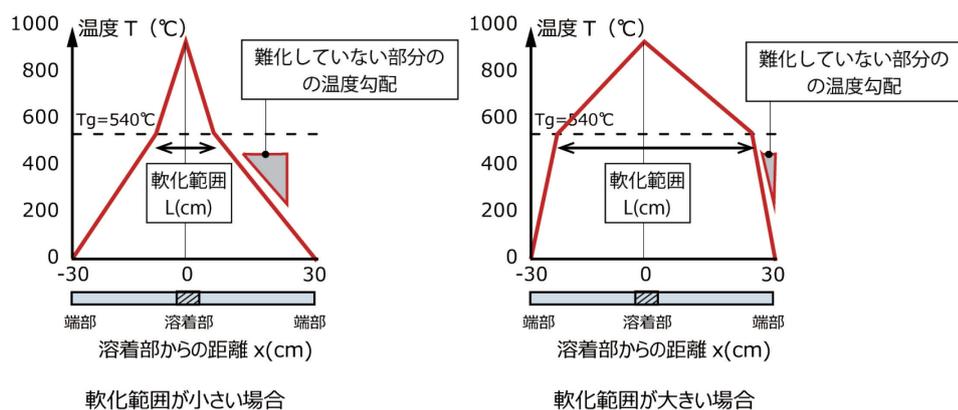


図 64 軟化範囲と温度勾配の関係

- 割れがなく溶着できる可能性の高い軟化範囲

前述の考察から、図 62、図 63 において、軟化範囲が青い範囲以外で、アニーリング時の軟化範囲 $L_A=0.37$ 以上である赤い軟化範囲が現時点で溶着できる可能性が高い範囲であると思われる。赤い軟化範囲でも割れが発生している試験体がある要因として、以下の点が考えられる。

- ◇ ガラスの強度特性が表面のキズによって強度が大きくバラつくこと
- ◇ アニーリング時の温度勾配から軟化範囲を抽出する際、ガラス転移温度 $T_g = 540^\circ\text{C}$ 以上で軟化しているとしたが、試験体によっては 540°C より数度低い部分も実際には応力緩和現象が起きると考えられ、ガラス転移温度 T_g 前後の温度勾配が緩やかな場合はその軟化範囲の取り方が難しい場合があること
- ◇ 軟化範囲が大きい場合であってもアニーリング時に温度変動が生じていて応力緩和が十分になされていない場合があること
- ◇ 軟化範囲以外の要因も影響している可能性

3.8 破面解析による破壊応力値の推定

3.8.1 破面解析の原理

試験体でクラックが生じた破面を観察すると、破壊の起点、破壊の進行方向、破壊の進行速度が緩やかだったかもしくは急速度だったか、破壊時の応力値などを推定することができる。また、クラックの進展方向や、クラックの数で定性的な応力の向きが推定できる。このような学問は破面形態学 (fractography) と呼ばれ、各材料で研究が行われている。以下にガラスの場合の破面解析の詳細を述べる。

クラックの発生した試験体の典型的な破断面は図 65 のように、ミラー面 (Mirror)、ミスト面 (Mist)、ハックル面 (Hackle) という特徴的な破断面がみられる。ミラー面はクラック起点 (fracture origin) を含んだ平滑な面で、その外側にはミスト面という粗な面、またその外側には亀裂が分岐してできる凹凸の激しいハックル面が形成される。また、リブマークと呼ばれる弧形の模様も見られる。

徐冷ガラスの破壊応力 σ_t は次式で表される。

$$\sigma_t r_m = A_m$$

ただし、

σ_t : 破壊応力 [MPa]

r_m : ミラー半径 [m]

A_m : ミラー定数 [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$]

ミラー半径はクラックの起点からミラー面とミスト面の境界までの距離を指す。徐冷ガラスの場合、表面近傍のミラー半径を用いることとし、また、ミラー定数は $A_m = 1.88 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ を用いる [15]。

図 66 にクラックの発生した試験体の破面、クラック起点 C_p とミラー半径 r_m を示す。既往研究にもとづき、徐冷ガラスである試験体のミラー半径 r_m はガラス表面における距離とする。

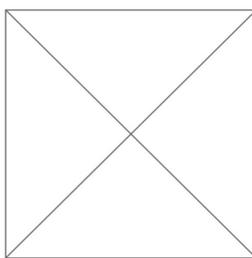


図 65 ガラスの典型的な破断面 [15]

3.8.2 破壊応力値

図 66 の破面 1～3 は試験体内で発生したクラックの破面であり、明瞭にクラック起点 C_p とミラー半径 r_m が読み取れる。一方、図 66 の破面 4 は溶着部のカレット部分で発生したクラックの破面である。溶

着部のカレット部分の破面は複雑でクラックの起点が不明瞭なことが多く、その場合はミラー半径が読み取れない。これは、複数のカレットの応力集中部分が同時にクラック起点となっているためと考えられる。

表 14 に破面から読み取れるミラー半径 r_m 、破壊応力 σ_b の推定値とクラック起点 C_p の溶着部からの距離 x_{Cp} (cm)を示す。 $x_{Cp}=0$ cm、すなわち、溶着部付近で生じたクラックの破壊応力 σ_b は平均で 14MPa、それ以外の点でのクラックの破壊応力 σ_b は平均で、28MPa で、溶着部付近の 2 倍となっている。溶着部付近での破壊応力が小さい理由は、カレット部分で応力集中が起きているためで、応力集中が見られた試験体の等色線画像を図 67 に示す。この試験体は溶着後、数週間で溶着部から遅延割れが発生しているものである。等色線画像は色の変化が大きいほど主応力差の変化が大きいことを意味しており、溶着部の点 P で、急激に応力が急増していること、つまり残留応力による応力集中が起きていることを示している。

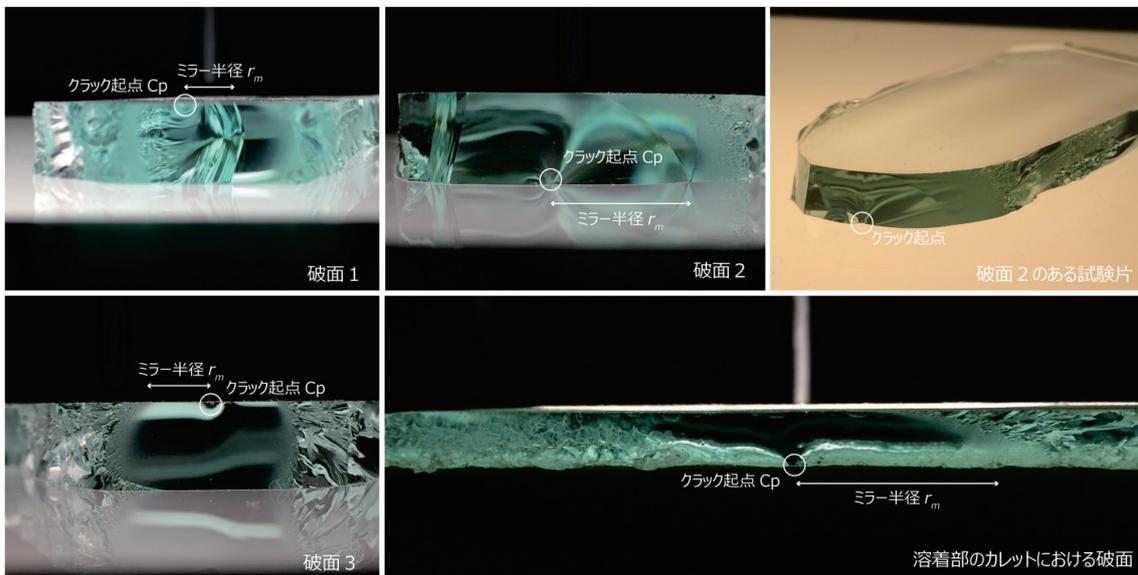


図 66 試験体の破面におけるクラック起点 C_p とミラー半径 r_m の例

表 14 クラック起点 C_p の位置 x_{Cp} と推定破壊応力 σ_b と

試験体名称	クラック起点 C_p の位置		推定破壊応力	
	x_{Cp} (cm)	ミラー半径 r_m (mm)	σ_b (MPa)	平均 σ_b (MPa)
S2	1	15	15	14
S3	0	25	12	
S12	0	16	15	
S14	0	17	14	
S8	23	10	19	28
S9	21	4	30	
S10	-21.5	5	27	
S15	-22	5	27	

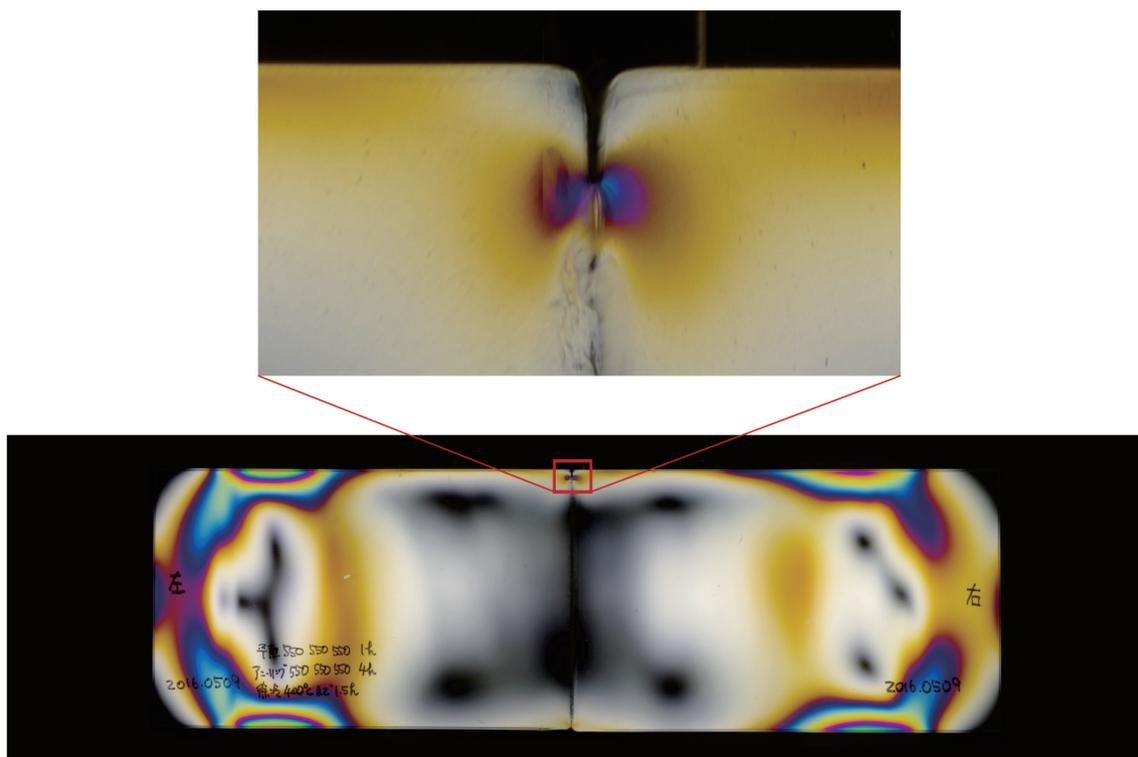


図 67 応力集中が見られる等色線画像

第4章. 熱応力解析

4章では、溶着実験の残留応力を再現する熱粘弾性応力解析について提案し、温度勾配、ガラスの温度依存性、ガラス試験体のモデル化方法について述べる。3章で行った溶着実験においてガラス試験体に生じる残留応力を有限要素解析によって再現し、解析値と実験値を比較・検討を行い、と比較し、妥当性を検証する。また、解析から加熱・冷却プロセスで温度分布によって応力分布がどう変化するのかについて考察を行った。

4.1 既存の熱応力解析の手法

第2章で述べたように、ガラスという材料は温度によって、熔融状態、粘弾性を有するゴム状態、固体のようなガラス状態へとその力学的挙動が大きく変化し、その熱履歴によっても性質が異なることが知られている。そんなガラスの既往の熱応力解析の手法について述べる。

粘弾性による残留応力解析については、ガラスと同様にガラス転移温度 T_g を持ち、ガラス転移温度付近で粘弾性挙動を示すプラスチックの材料研究の分野で、粘弾性体の残留応力の熱応力解析例が報告されており [16] [17]、ガラス転移温度 T_g 以上の高温時のエポキシ樹脂には応力は発生しないと仮定して樹脂が全体軟化した後の冷却過程において生じる残留応力を、粘弾性的に解析している。しかし、粘弾性の数値解析には、対象とする材料の複数の材料定数を実験によって得る必要があり、ガラスにおいてこれらの材料定数を得るのは専用の機器が必要となり簡単ではなく、また材料定数を得られてもマクスウェルモデルとフォークトモデルをどう組み合わせるモデルとするかの判断は難しい。

一方、固化温度 T_g を想定して、ガラスはそれ以上の温度では粘性体で、その温度以下では完全弾性体であるとして熱強化の残留応力を求めた粘弾性域の過渡熱応力を零としてガラスが弾性域に入ったときの温度分布によって残留応力を計算した例もあり [18] [18] [17]、ガラス転移温度以上の高温では応力は発生しないと仮定を置くことで、粘弾性の材料定数がなくても弾性解析によって残留応力を計算することができる。しかし、これらの既存の粘弾性解析では、対象物が全面的に軟化することが前提とし冷却の過程のみで解析を行っており、一部が軟化する時の加熱と冷却全プロセスにおいて高温時に仮定を置いた解析はほとんど行われていない。

そこで、本研究は粘弾性挙動を単純化した既存の熱応力解析手法を参考にし、一部が軟化する場合の温度履歴に適用し、実験結果の残留応力のピーク値と位置を再現することを目的とした。解析にあたってガラス溶着をどのようにモデル化したのか、その仮定を以下に述べる。

4.2 温度変化のある時の応力ひずみ関係と平衡方程式

一般に熱応力問題では、温度場と応力場が熱力学のエネルギー保存則を通じて連成することになる。また、急激な加熱と冷却によってひずみの変化率が大きい場合は慣性力を考慮した運動量保存則を満たす必要がある。しかし、溶着問題において、溶着中は急加熱であるが、加熱部は熔融状態に近く、その後の冷却過程での応力とひずみ、変形が重要となる。そのため熔融状態における慣性力は無視しても最終的な残留応力に与える影響は小さいと考えられる。また、ガラスの温度場は、ガラスが透明であることから熱伝導のみならず、熱放射の影響を受けるといわれており、現実に沿うような温度場の計算は困難である。

したがって、本研究の溶着問題で取り扱う熱応力解析では、温度場と応力場を連成せず、温度場は実験の測定温度をもとにした温度入力を用いて応力解析を行う。

ここに、弾性域における応力ひずみ関係を増分形で示すと

$$\{\Delta\sigma\} = [D_e]\{\Delta\varepsilon\} \quad (29)$$

ただし、 $[D_e]$ は弾性剛性マトリクスである。温度が T から $T + \Delta T$ に変化した時全ひずみは、弾性ひずみと熱ひずみの和で表されるとすると

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon_e\} + \{\Delta\varepsilon_T\} \quad (30)$$

よって

$$\{\Delta\sigma\} = [D_e](\{\Delta\varepsilon_e\} + \{\Delta\varepsilon_T\}) \quad (31)$$

1つの有限要素について注目すると、節点外力、節点変位、ひずみ、応力が Δt 後の時間経過のちのつりあいを考える。外部仕事 δW_e は

$$\delta W_e = \{\delta\Delta u\}^T \{F + \Delta F\} \quad (32)$$

仮想変位増分による $\delta\Delta u$ による物体力が作用しない場合の内部仕事 δW_i は

$$\delta W_i = \int \{\delta\Delta\varepsilon\}^T \{\sigma + \Delta\sigma\} dV$$

内部仕事と外部仕事は等しいので

$$\{\delta\Delta u\}^T \{F + \Delta F\} = \int \{\delta\Delta\varepsilon\}^T \{\sigma + \Delta\sigma\} dV$$

時間 t において節点外力と応力はつりあっているので

$$\{F\} = \int [B]^T \{\sigma\} dV$$

また

$$\{\delta\Delta\varepsilon\} = [B]\{\delta\Delta u\}$$

なので、平衡方程式は以下ようになる。

$$\{\Delta F\} - \{\Delta R\}_T = [K]\{\Delta u\}$$

ここに $\{\Delta R\}_T = \int [B]^T \{C\} \Delta T dV$ (熱ひずみによる等価節点力)

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dV \text{ (要素の剛性マトリクス)}$$

溶着問題においては外力の増分 $\{F\}$ は存在しないので、

$$-\{\Delta R\}_T = [K]\{\Delta u\}$$

これは1つの要素についての平衡方程式なので物体全体については

$$-\{\Delta R_g\}_T = [K_g]\{\Delta u_g\}$$

ここに $\{\Delta R_g\}_T = \sum \{\Delta R\}_T$ (等価節点力の全要素の和)

$$[K_g] = \sum [K] \text{ (剛性マトリクスの全要素の和)}$$

$$\{\Delta u_g\} = \sum \{\Delta u\} \text{ (節点変位の全要素の和)}$$

よってこれが解くべき平衡方程式である。ここで線材における等価節点力の具体的な式を考える。

固定端の長さ L の線材を考える。線材に温度が T から $T + \Delta T$ へと温度分布なく均一に温度変化が生じた時、生じる熱ひずみ $\Delta \epsilon_T$ は、熱膨張係数 α を用いて次式で表される。

$$\Delta \epsilon_t = \alpha \Delta T$$

熱ひずみによる変形は拘束されるので、熱ひずみによる軸力の増分 ΔN は以下の式になる。

$$\Delta N = -EA\alpha\Delta T$$

ただし、 E : 部材のヤング率 (MPa)、 A : 部材の断面積 (mm²)

この軸力の増分が線材の等価節点力 $\{R\}_T$ に相当し、この等価節点力を各部材に入力し、平衡方程式を解くことで変位増分が得られ、応力増分も得ることができる。

4.3 本研究の解析手法と手順

4.3.1 ガラスの熱弾性モデル

ガラスは透明であるため、高温時は熱放射が主な熱損失原因となるがガラスのある点の熱放射は反射を繰り返して複雑な挙動を示す。一方、ガラス転移温度以下では熱伝導が主な熱損失原因で、自然冷却の場合ニュートンの冷却速に従う。このように温度変化の範囲が広いガラス溶着時の厳密な温度分布を求めることは困難である。将来的には温度分布も解析で行うことも考えられるが、本研究では温度分布は実際に得られた実験温度をもとにすることとする。

粘弾性温度範囲にあるガラスの応力とひずみ関係は一般に時間および温度依存性を示すが、高温の保持温度から冷却温度まで大きい温度変化が生じるとき、応力ひずみ関係は時間よりも温度による影響が大きくなる。そこで問題を簡単にするためにガラスのヤング率や線膨張係数などの物性値は図 68 のようにガラス転移温度 T_g で不連続に変化する粘弾性モデルとした。線膨張係数 α は温度に依存せず一定とし、一方、ヤング率はガラス転移温度 T_g 以下では E_0 、ガラス転移温度 T_g 以上では0とした。粘弾性による応力緩和を表現するために、ガラス転移温度以上ではダッシュポットは自由となり応力緩和され応力は0となるとし、ガラス転移温度以下ではダッシュポットは固定され、ヤング率 E_0 のバネと熱膨張要素 L からなる通常の弾性体として扱った。以上のガラスの粘弾性モデルを図 63 に示す。

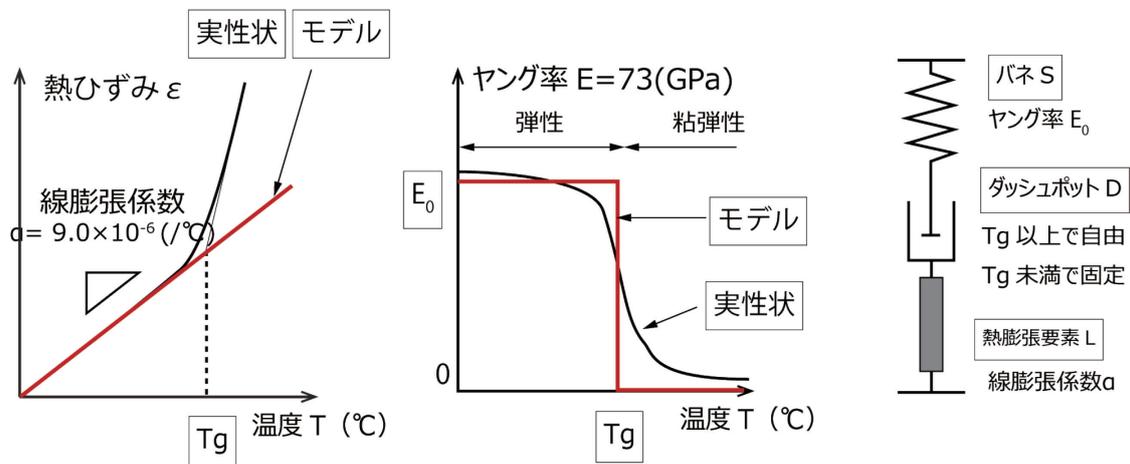


図 68 ガラスの物性値の温度依存性のモデル化

本研究の解析手法で用いられる仮定をまとめると以下のようになる。

1. 瞬間固化理論に基づいたガラス挙動を仮定する。つまり、解析ステップにおいてガラス転移温度 $T_g=540^\circ\text{C}$ を固化温度として、それ以上の線材要素は粘性体であり、 T_g 以上の線材要素は粘性流動による応力緩和が生じ、過渡熱応力は解消されて零と仮定する。解析では、 T_g 以上の部材で

はステップごとの最終応力を次のステップでは引き継がず、ゼロとする。

2. 固化温度以下ではガラスは完全弾性体であるとみなす。
3. 温度と応力は互いに独立である。

4.3.2 温度履歴とガラス試験体のモデル化

入力する温度データは、実験で得られた温度履歴を用いる。ただし、この温度履歴は y 方向の平均をとり、温度分布を温度勾配としている。x 方向は温度測定点の温度を下に線形補間をした値を用いる。ここで、先ほどの粘弾性モデルの応力状態は時間に依存せず温度のみに依存するため、解析の時間ステップを時間刻みではなく、ガラス転移温度を温度履歴が前後するタイミングで取ることとし、図のように8ステップに溶着実験の時間を離散化した。解析に用いた入力値を表 15 に示す。

ガラス試験体を図 69 のように軸力のみ負担する線材の格子と斜材でモデル化する。モデルを溶着部から対称に 15 の領域に分割し、各領域に均一の温度を入力する。入力する温度は実験で得られた温度履歴から特徴的な温度点を抽出している。

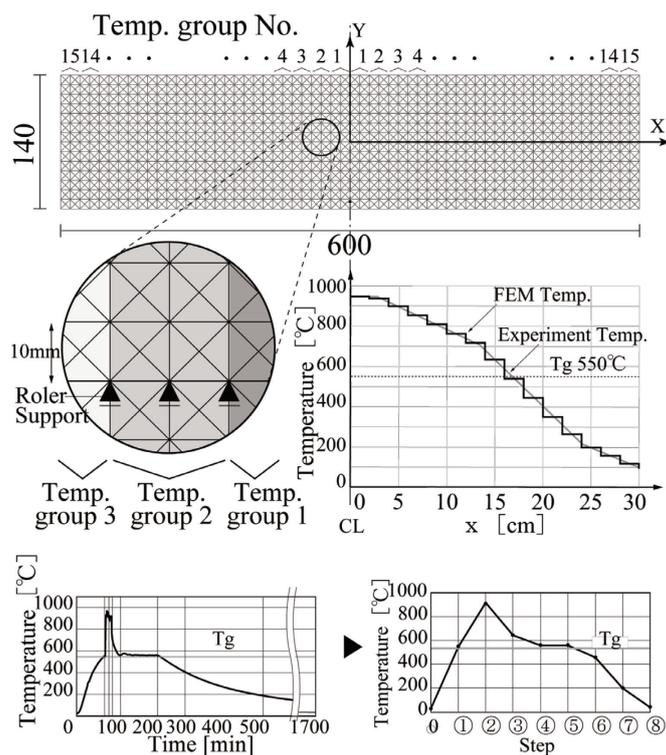


図 69 入力温度履歴と試験体のモデル化

表 15 解析の入力値

ヤング率 E	73 [GPa],
--------	-----------

線材の断面 A	20 [mm ²],
断面 2 次モーメント I	0.0 [mm ⁴]
線膨張係数 α	9.0×10^{-6} [°C],

また以下の三種類の解析手法を試し、最も実験結果と一致する解析手法を使用した。それぞれの解析結果と実験結果との比較は付録に掲載している。

1. T_g 以上の部材に熱膨張は生じないとして、熱応力は入力しない。入力する温度分布は溶着部左右を平均化した温度とする。
2. T_g 以上の部材にも熱膨張が生じるとして、熱応力を入力する。入力する温度分布は溶着部左右を平均化した温度とする。
3. T_g 以上の部材にも熱膨張が生じるとして、熱応力を入力する。入力する温度分布は溶着部左右を平均化しない。

図 70 に解析のフローチャートを示す。ある i ステップ目で温度変化 ΔT が生じた時、転移温度 T_g を $T(i-1)$ 、 $T(i)$ ともに超えているか温度判定する。超えていれば軟化状態とみなし、軸力 $N(i)$ 、熱膨張 ΔL を 0 とし、超えていなければ固体状態とみなし、熱膨張 $\Delta L = \alpha \Delta T$ を与える。その後弾性解析を行い、次のステップへ軸力を引き継ぎ、同様の計算を繰り返す。最終ステップ終了時の軸力が残留応力に相当する

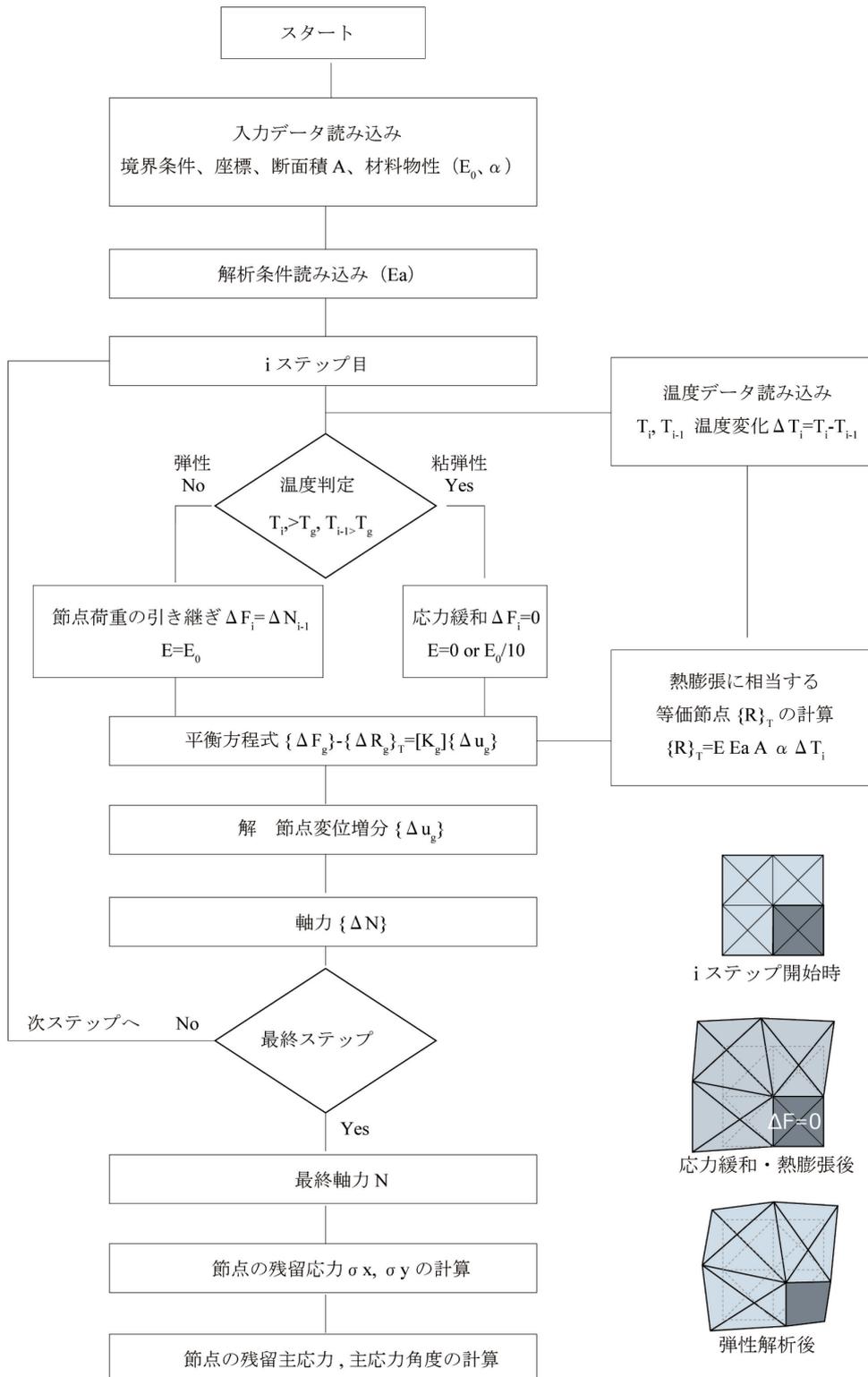


図 70 解析のフローチャート

4.3.3 主応力値、主応力角度の算出

最終ステップまで解析が終了し、全部材の残留軸力 N (MPa) がわかっているものとする。その時、ある節点 P における最大主応力と最小主応力、そして最大主応力角度を以下のような手順で求めている。

節点 P に図 71 の(a)のように残留軸力 N がわかっている 8 つの部材が接続しており、それぞれの部材の残留軸力 N の正の向きを図 71 の向きに定義する。ここで、節点 P がエッジ上にある場合は、部材が存在しない部分を残留軸力 $N=0$ の部材が接続しているとする。節点 P に対して引張力をかける場合を正とする。X 軸に対する接続している部材軸を α (rad) とし、X 軸に対して角度 θ (deg) 傾いた uv 方向の節点 P における 2 主応力 σ_u, σ_v を考えると

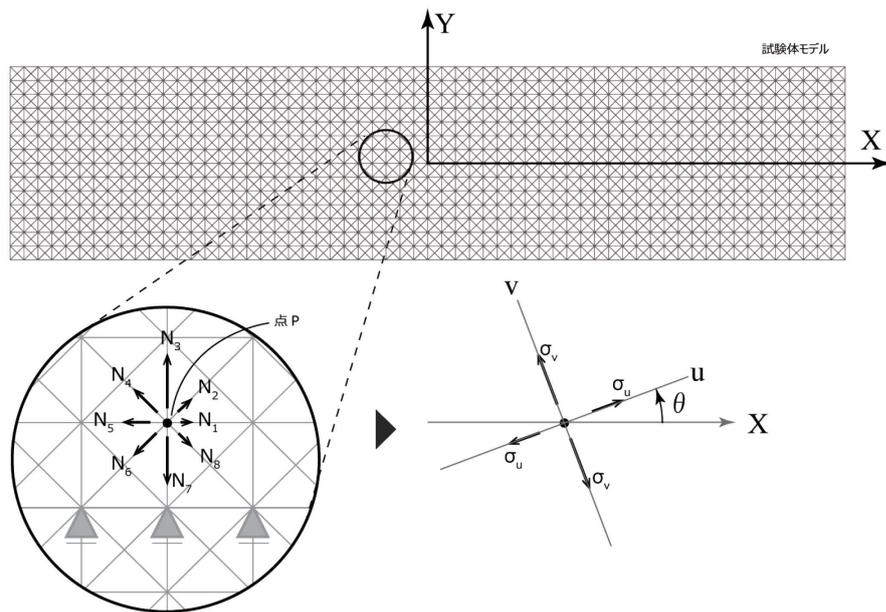


図 71 残留軸力 N の向きと主応力の関係

$$\sigma_u = \sum N_i \cos(\alpha - \theta) / A$$

$$\sigma_v = \sum N_i \sin(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2}) / A$$

ここで

A : 部材断面積 (mm²)

$\theta = 0 \sim 89^\circ$ の間を 1° ずつ変化させて、主応力差の絶対値 $|\sigma_u - \sigma_v|$ が最大となる σ_u と σ_v を求め、その時の σ_u と σ_v のうち代数的に大きい方を最大主応力、もう一方を最小主応力とし、そして最大主応力角度は σ_u と σ_v のうち大きい方の角度としている。

4.4 解析結果

4.4.1 解析結果と実験結果との比較

溶着後すぐに破断しなかった試験体 S11、S16、S18、S19、S20、S21 は 3.2 で述べた光弾性画像を用いて残留応力が算出できる。この実験試験体から算出した残留応力と解析値の残留応力を比較した図を以下に示す。

試験体 S11

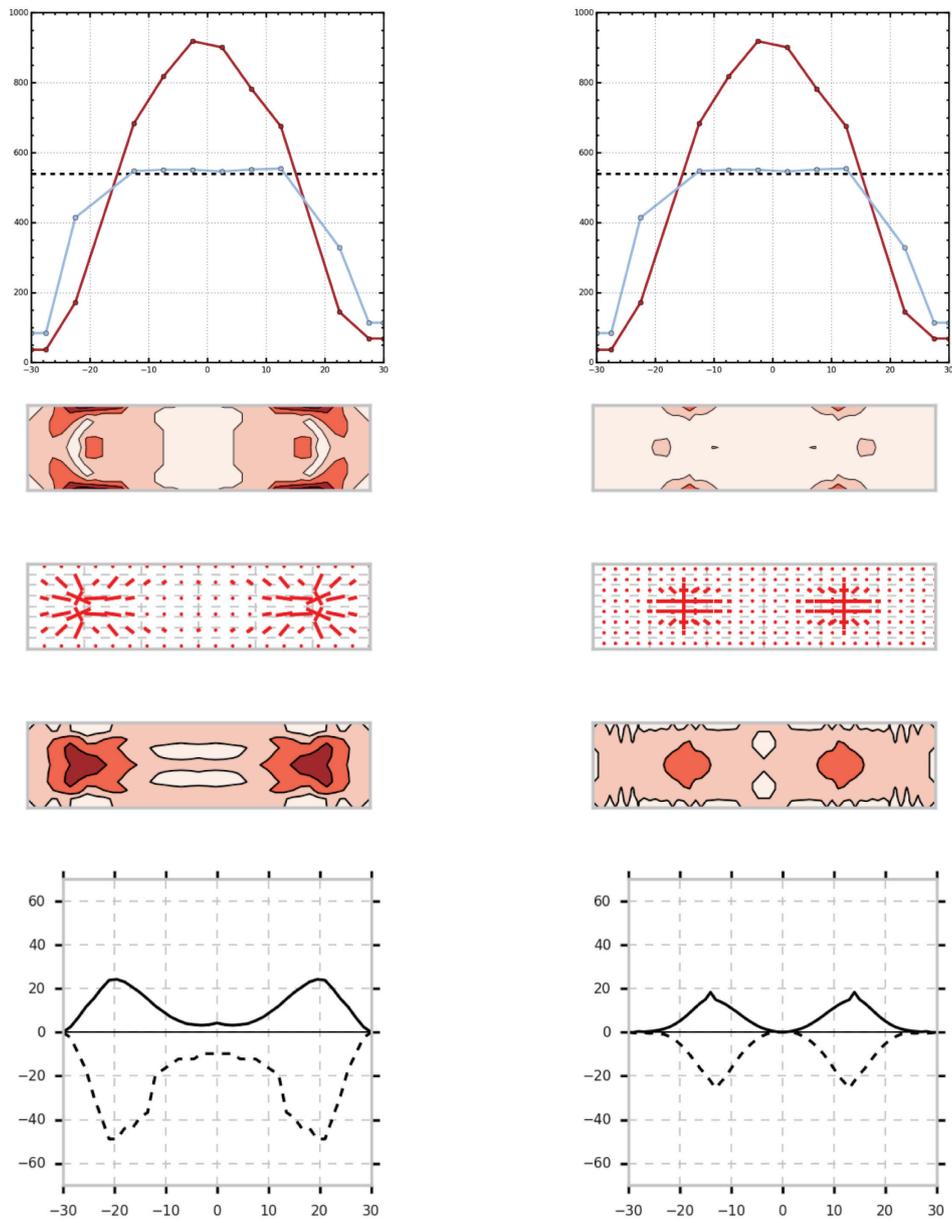


図 72 試験体 S11 の実験値と解析値の残留応力の比較

試験体 S16

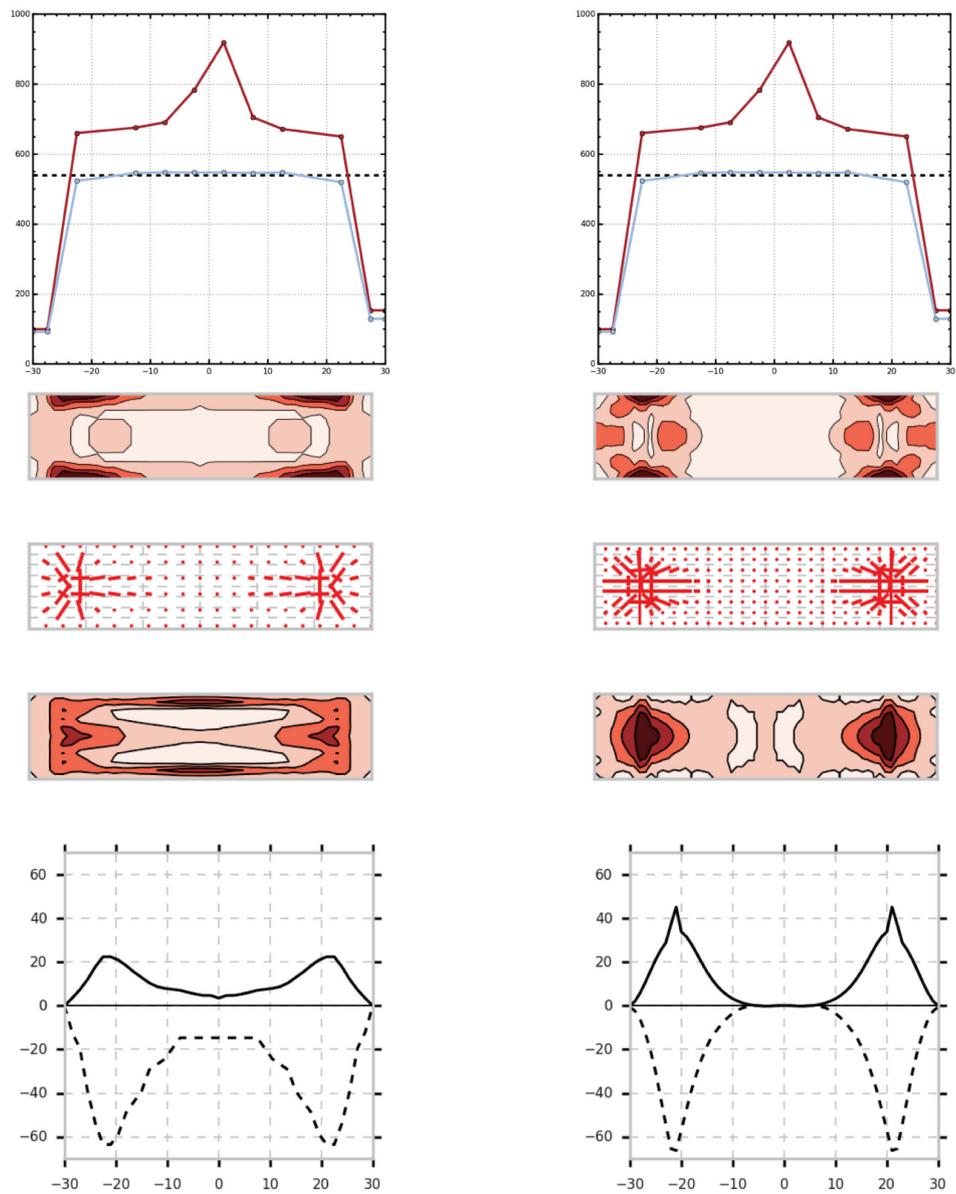


図 73 試験体 S16 の実験値と解析値の残留応力の比較

□

図 74 試験体 S17 の実験値と解析値の残留応力の比較

試験体 S18

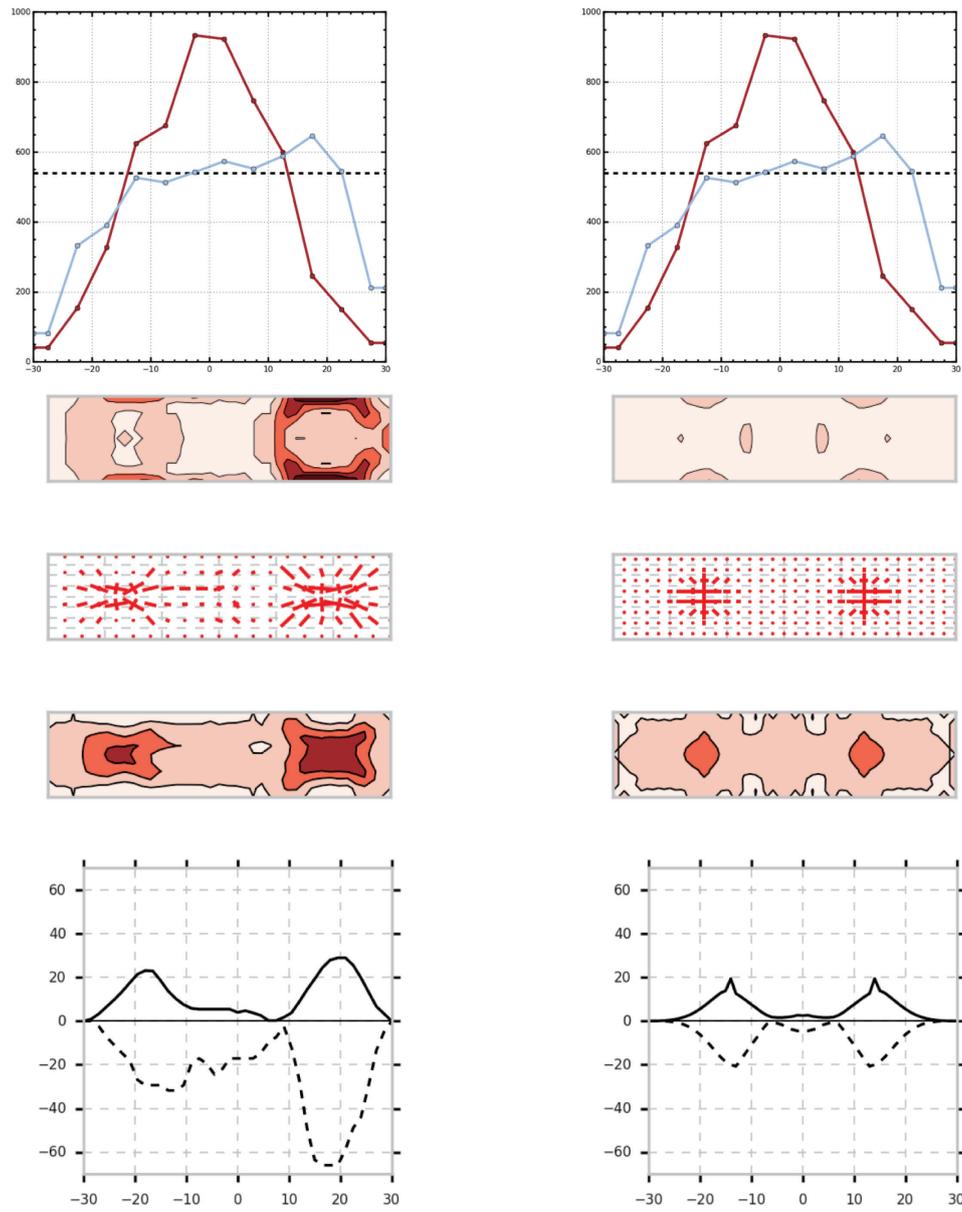


図 75 試験体 S18 の実験値と解析値の残留応力の比較

□

図 76 試験体 19 の実験値と解析値の残留応力の比較

試験体 S20

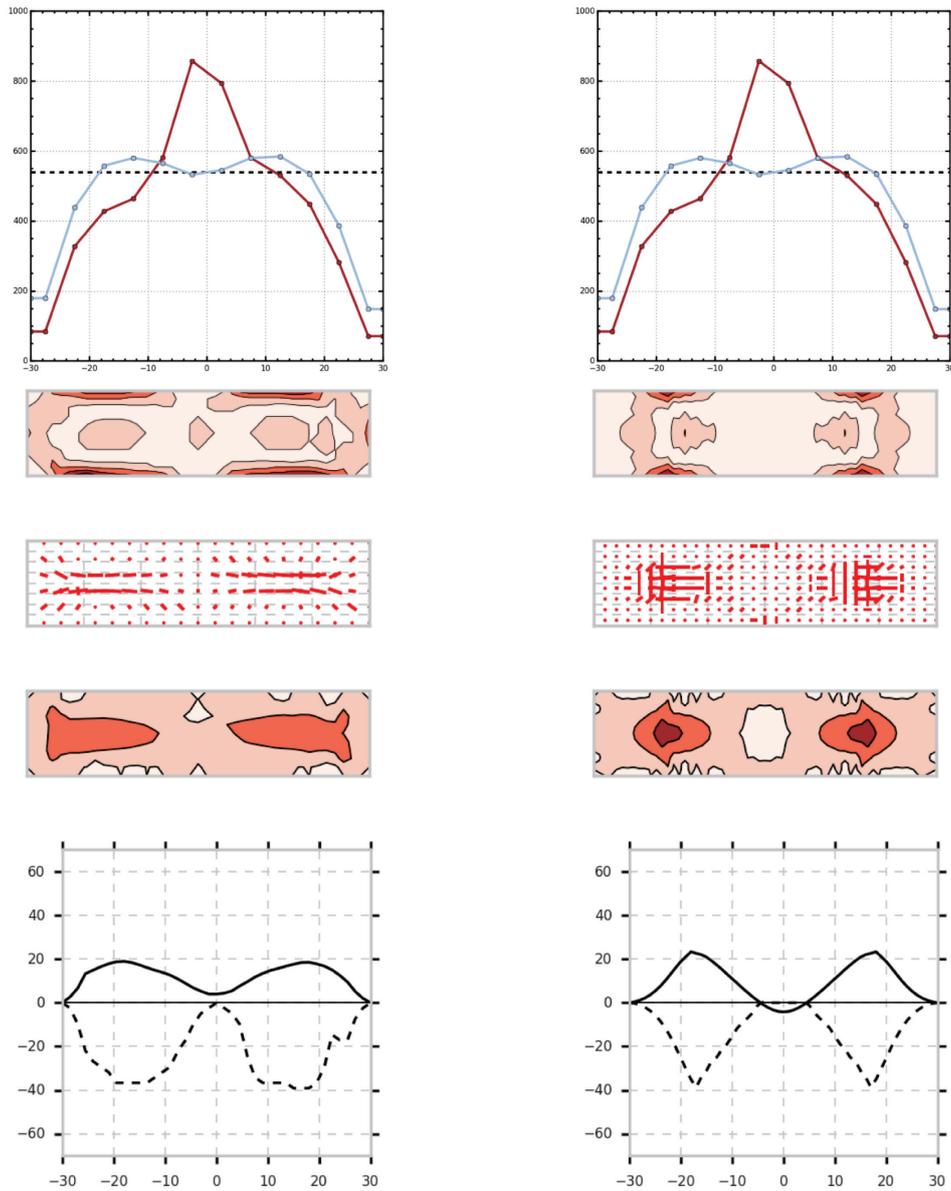


図 77 試験体 S20 の実験値と解析値の残留応力の比較

試験体 S21

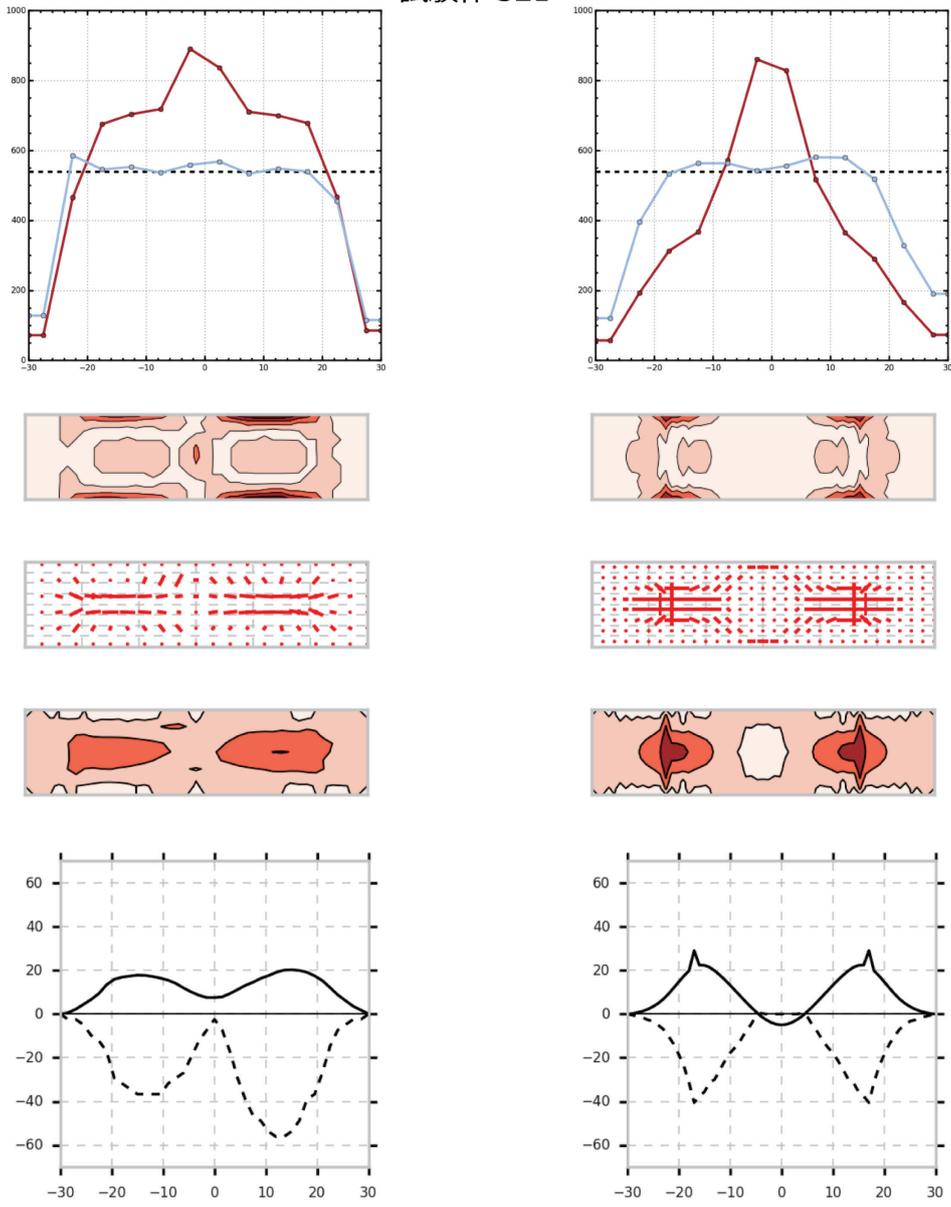


図 78 試験体 S21 の実験値と解析値の残留応力の比較

4.4.2 解析結果の残留応力の急激なピーク

解析結果の残留応力の分布が急激なピークとなる場合と実験値と同様になめらかなピークとなる場合が見られた。この現象が起きる原因を把握するため、解析においてステップごとの応力分布の変化について検討を行った。

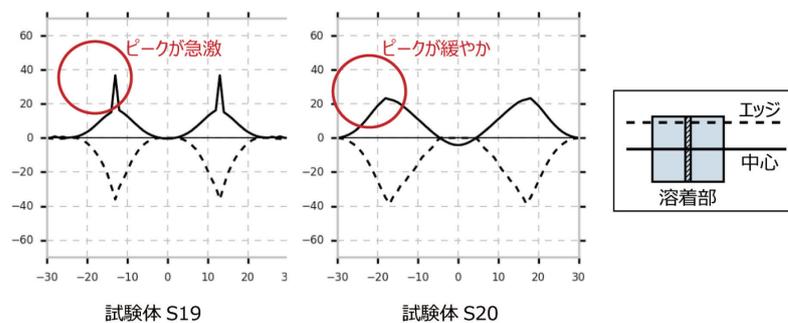


図 79 試験体 S19 と S20 の解析による残留応力の分布

解析の残留応力に急激なピークが見られた S19 となめらかなピークが見られた S20 のステップごとの応力分布の変化を比較した図 80 と図 81 を、解析用の温度履歴とステップごとの温度勾配とともに示す。

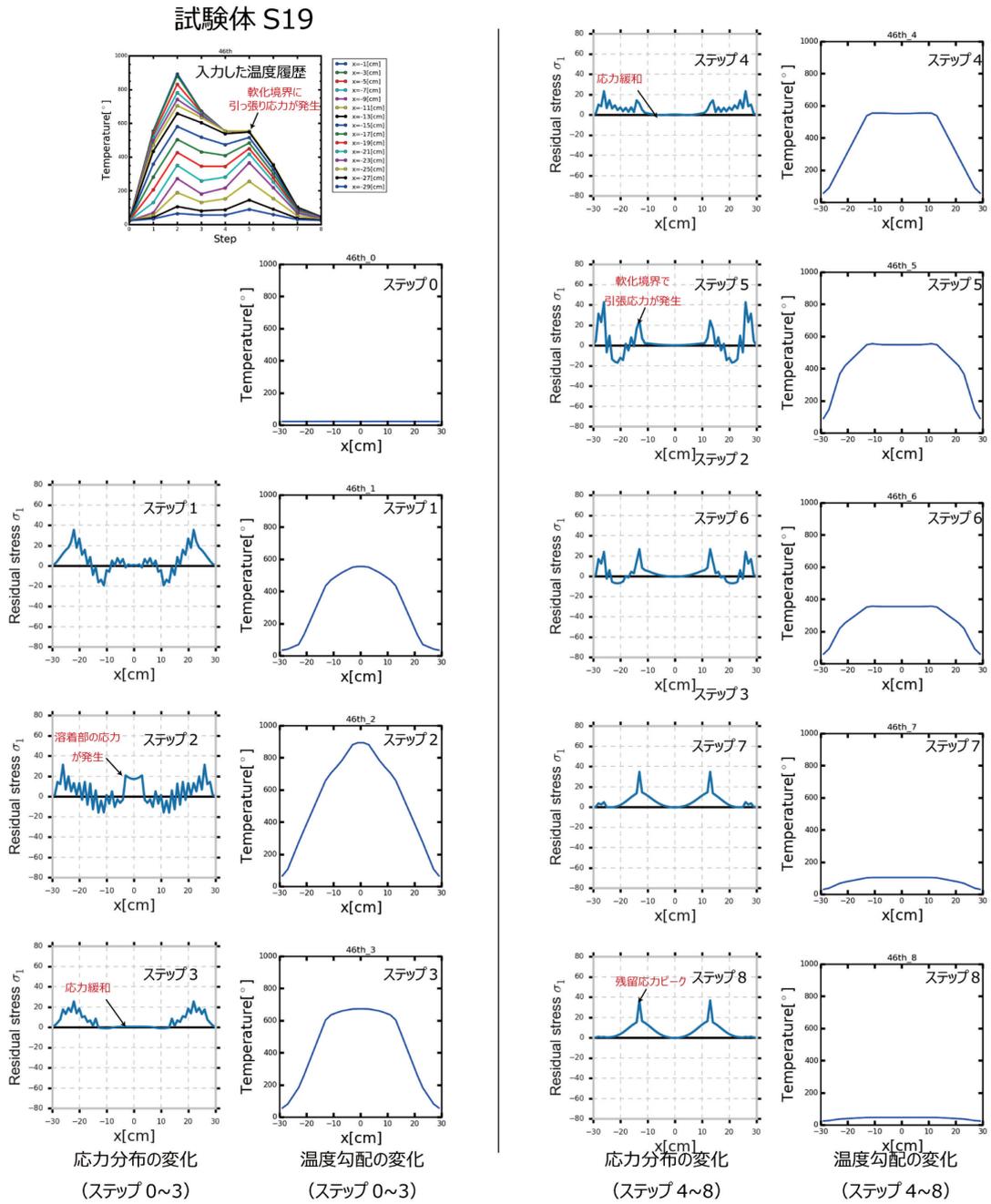


図 80 解析ステップごとの応力分布の変化の比較 (ステップ 1~3)

□

図 81 解析ステップごとの応力分布の変化の比較 (ステップ 4~8)

試験体 S19、S20 どちらの解析も、局所加熱後のステップ 2 の応力分布を見ると溶着部に大きな引張応力が生じているが、ステップ 3 と 4 後では溶着部が応力緩和されている。しかし、ステップ 5 で試験体 S20 では応力分布が変化していないが、試験体 S19 では軟化範囲の境界、つまり最終ステップで残留応力が最大となる位置において引っ張り応力が増加している。この増加した引張応力が最終ステップまで残留し、残留応力の急激なピークとして現れている。これは、ステップ 5 においてアニーリング中に軟化していな

い範囲の温度が上昇した結果、温度上昇した部分は膨張し圧縮となる一方、軟化境界付近はその膨張を拘束するため引張が生じており、その引張応力を残したまま固化するため、その引張応力が通常の残留応力に追加されるためだと考えられる。アニーリング中に温度勾配が変化することで生じる応力の発生模式図を図 82 に示す。実際のガラスは固化と軟化は連続的であることから、軟化境界付近に生じる引張応力が S19 の解析結果のように不連続になることはなく、軟化境界付近に引張応力は分散すると考えられる。しかし、アニーリング中に軟化していない部分が温度上昇することが残留応力の最大値を増加させる現象は、実際のガラスにおいても生じていると考えられ、逆に、アニーリング中に軟化していない範囲の温度を下げた場合に、軟化境界の最大引張応力を減少することができる可能性が推測される。この現象がガラスの実現象と一致するかどうかは、今後の溶着実験によって検証する必要がある。

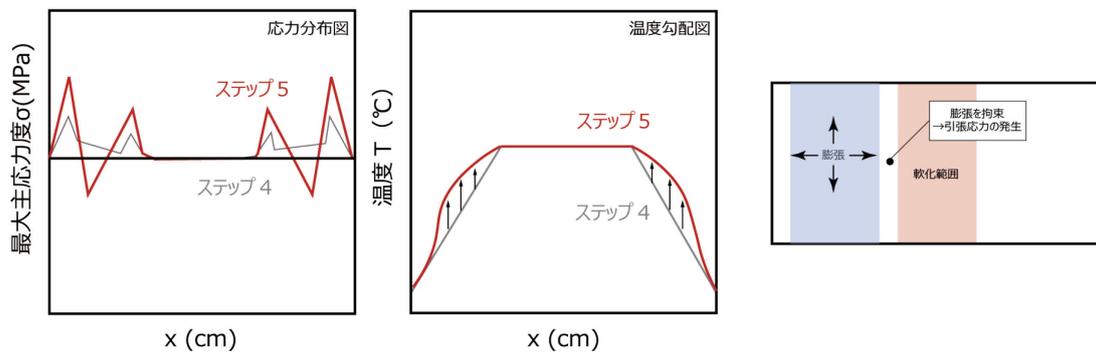


図 82 アニーリング中の温度勾配の変化による引っ張り応力の発生模式図

第5章. 温度勾配のパラメトリックスタディ

本章では、溶着実験結果で考察された温度勾配と残留応力の関係について検証するため、装置の関係上実験できなかった温度勾配となる温度勾配を作成し、4章で使用した解析手法を用いてパラメトリックスタディを行い、温度勾配と残留応力の関係性について考察を行った。

5.1 温度履歴の作成

実験で検証できなかった温度勾配を含め、様々な軟化範囲となる温度勾配を作成し、4章で用いた解析方法を用いて残留応力の分布の変化をパラメトリックスタディした。温度履歴の作成方法は、軟化範囲 L_F/W と L_A/W がそれぞれ0.07, 0.27, 0.47, 0.67, 0.93となる25通りの組み合わせの温度勾配を想定しており、軟化範囲の組み合わせを以下に示す。

$$\begin{aligned}
 (L_F, L_A) = & (0.07, 0.93), (0.27, 0.93), (0.47, 0.93), (0.67, 0.93), (0.93, 0.93), \\
 & (0.07, 0.67), (0.27, 0.67), (0.47, 0.67), (0.67, 0.67), (0.93, 0.67), \\
 & (0.07, 0.47), (0.27, 0.47), (0.47, 0.47), (0.67, 0.47), (0.93, 0.47), \\
 & (0.07, 0.27), (0.27, 0.27), (0.47, 0.27), (0.67, 0.27), (0.93, 0.27), \\
 & (0.07, 0.07), (0.27, 0.07), (0.47, 0.07), (0.67, 0.07), (0.93, 0.07),
 \end{aligned}$$

1例として $(L_F, L_A)=(0.27, 0.67)$ の時に作成した温度勾配を図83に示す。作成した全ての温度履歴を以下に示す。

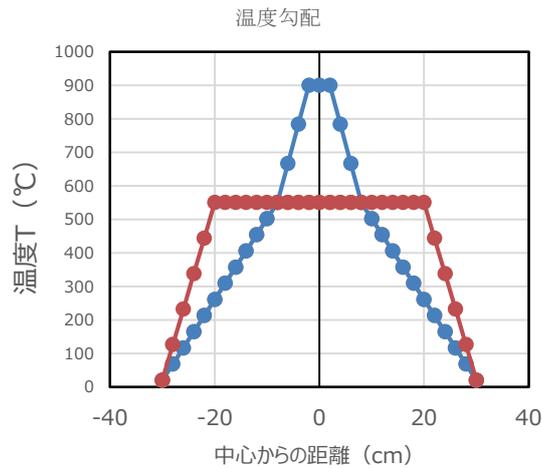


図 83 $(L_F, L_A)=(0.27, 0.67)$ の時に作成した温度勾配の例

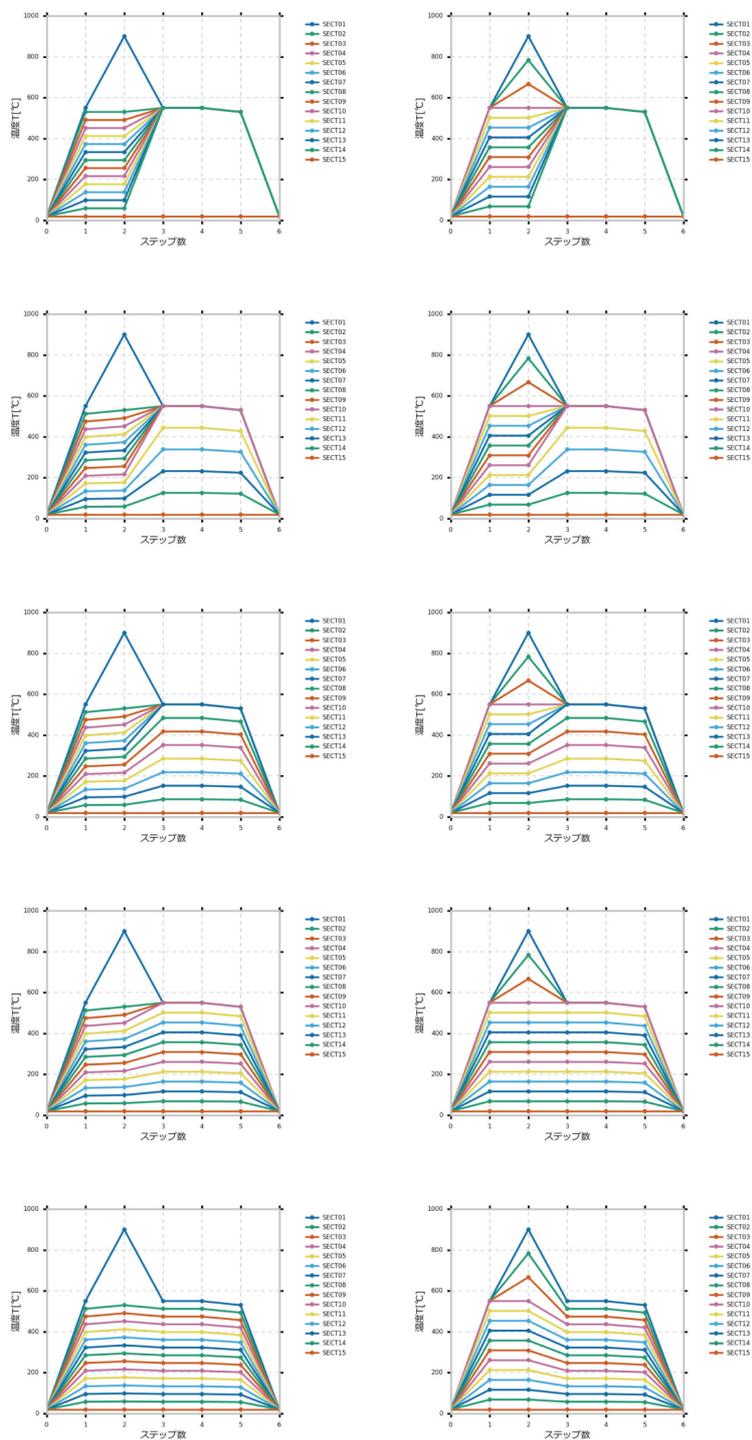


図 84 パラメトリックスタディに使用した軟化範囲 L_A, L_F の異なる温度履歴 (1)

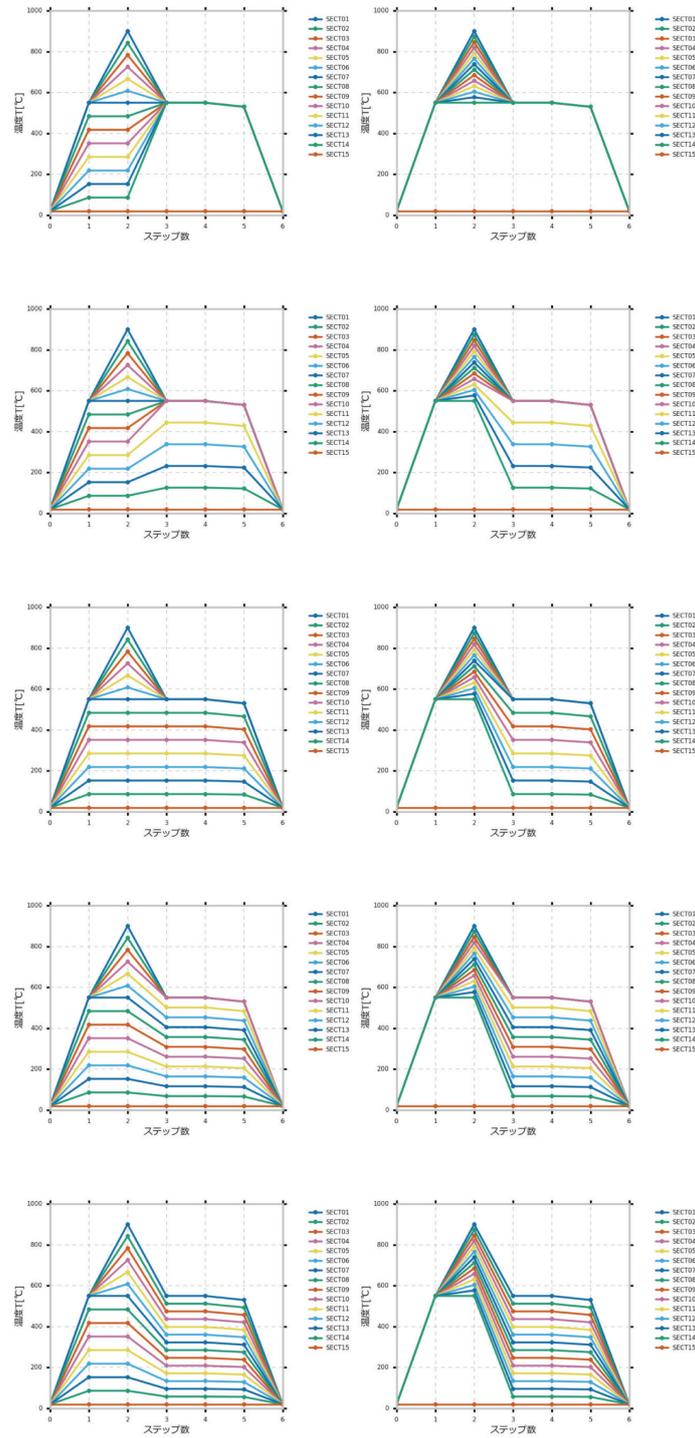


図 85 パラメトリックスタディに使用した軟化範囲 L_A, L_F の異なる温度履歴 (1)

5.2 解析結果

パラメトリックスタディした残留応力の解析結果を図 86、図 87、図 88 示す。図 86、図 87 の結果を見ると、アニーリング時の軟化範囲 $L_A = 0.27$ 以下では溶着部付近に残留応力のピークが見られ、 $L_A = 0.47$ 以上で溶着部の引張の残留応力はほとんど発生せず、溶着部の応力緩和がみられる。これは、アニーリング時の軟化範囲が狭いと溶着部の応力緩和が期待できず、溶着部から割れる可能性が高いことを示している。図 63 の実験結果では、 L_A が 0.4 より小さい場合全ての試験体が溶着部から割れを起こしており、定性的に実験結果と対応していることが確認できた。

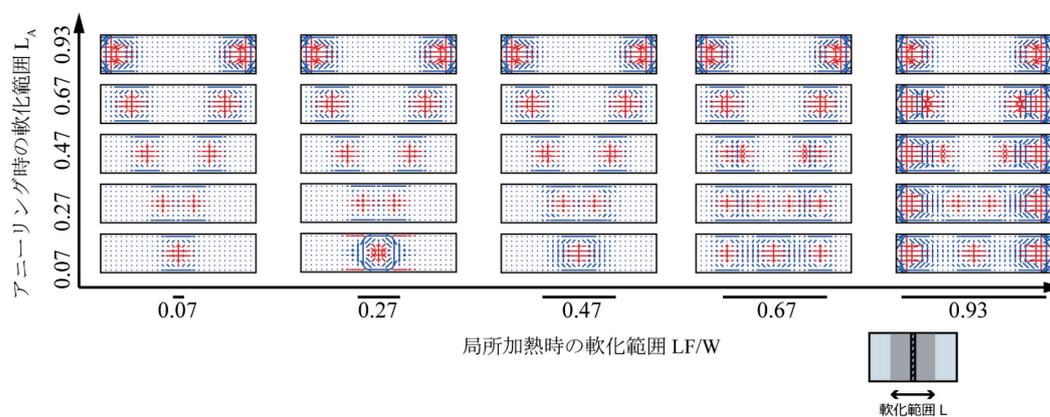


図 86 軟化範囲 L_F , L_A と引張残留応力度の解析結果の変化

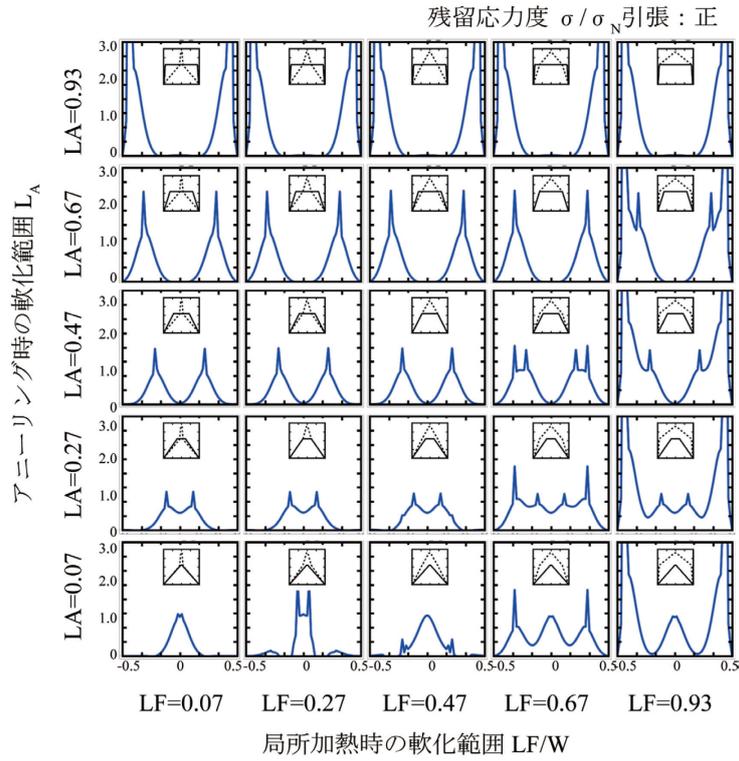


図 87 軟化範囲 L_F , L_A と残留応力分布の変化

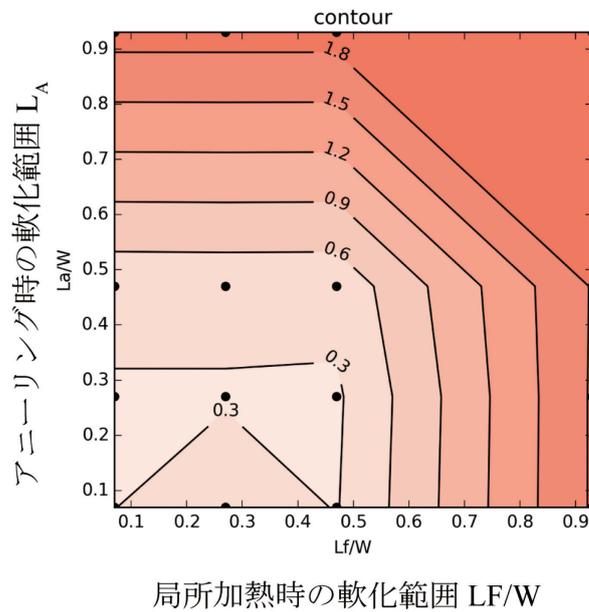


図 88 軟化範囲 L_F , L_A における最大残留応力度の等高線図

5.3 今後の課題

実験の残留応力分布との比較により、ガラスの温度特性や溶着実験の温度履歴を単純化した熱粘弾性解析がガラス溶着によって生じる残留応力の予測は十分に有効であることが確認できた。しかし、アニーリング時の温度勾配の変化があった場合、急激なピークを生じ、残留応力の最大値は実験値よりも大きくする傾向が見られた。この解析によって生じる急激な残留応力のピークは、ヤング率 E や線膨張係数 α などのガラスの材料温度特性を連続的に変化させ、温度履歴のステップをより細かくすることで解消される可能性がある。

また、今回の解析で用いたモデルは、ガラス転移点 T_g を超える高温の時、応力緩和によってそれまでの応力が0となり、ひずみはそのまま引き継ぐという仮定をしているが、実現象の応力緩和は応力だけでなくひずみも変化していると考えられ、ひずみの変化も考慮した応力緩和のモデル化も行う必要がある。

また、現在の使用している実験の温度履歴は、数 mm ガラス板と離れた部分の雰囲気温度であり、非接触でガラス板の温度を取得できる方法とすれば、解析による予測精度をさらに向上させることができると考えられる。

第6章. 総括

本研究では、溶着可能な温度条件を把握することを目的として、温度勾配と残留応力との関係について実験と解析によって検討を行った。解析を実験の残留応力の発生を概ね再現できた。また、温度勾配条件のパラメトリックスタディにより、クラック起点が変化の様子が確認でき、また軟化距離 L_A 、 L_F ともに狭い場合に残留応力が小さくなるという予測が得られた。しかしながら解析はガラス性質を単純化しており、精度を上げていくには異なる温度勾配の実験による残留応力値のサンプルを増やし検証していく必要がある。

参考文献

1. ガラス建築の設計手法. **建築技術**. 出版地不明 : 建築技術, 2004 年, 建築技術, ページ: 99.
2. SD : Space design : スペースデザイン 特集 ガラス建築 ; 新たなガラス建築の様相. 出版地不明 : 鹿島出版会, 1997 年, 第 397 巻, ページ: 93-96.
3. 構造材としてのガラス(新材料の利用可能性を切り拓く). 横田暉生. 1420, 出版地不明 : 一般社団法人日本建築学会, 1998 年, 建築雑誌, 第 113 巻, ページ: 34-37.
4. Louter P.C. **Fragile yet Ductile - Structural Aspects of Reinforced Glass Beams**. 出版地不明 : Delft University of Technology, TU Delft, 2011.
5. Michal Netušil, Eliasova Martina. **Hybrid steel-glass beams with polymer adhesive**. 出版地不明 : The Silesian University of Technology, 2012.
6. タン プンチュウ 淳佐藤. フロートガラスの縁部の局所加熱による溶着性状. **Summaries of technical papers of annual meeting 2013(材料施工)**. 出版地不明 : 建築学会, 2013. ページ: 1449-1450.
7. 滝口 雅之 佐藤淳. ガラス板溶着法における局所加熱の温度勾配条件 - **Analysis of Temperature Gradient in Glass Plates joined using Localized Fusing**. 出版地不明 : 学術講演梗概集, 2014. ページ: 781-782.
8. ガラスと鉄の融着機構. 田代仁. 6, 出版地不明 : 金属表面技術協会, 1952 年, 金属表面技術 , 第 3 巻, ページ: 195-200.
9. 「ガラスをつなぐ」大口径光ファイバ融着接続機. 明夫 田邊. 4, 出版地不明 : ニュ-ガラスフォーラム, 2008 年, **New glass** , 第 23 巻.
10. **Local Melting of Glass Material and Its Application to Direct Fusion Welding by Ps-laser Pulses**. Isamu Miyamoto, Horn, Jens Gottmann, Alexander. 1, 出版地不明 : **JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering**, 2007 年, 第 2 巻.
11. 山根正之, 安井至 , ほか. **ガラス工学 ハンドブック**. 出版地不明 : 朝倉書店, 2010.
12. 西村祐哉 佐藤淳. 局所加熱によるフロート板ガラス溶着法における温度勾配条件と熱応力解析手法の提案. 工学部建築学科, 東京大学. 2015. 卒業論文.
13. ガラスの強度 **Strength of Glass**. 今岡稔 長谷川洋. 2, 出版地不明 : 東京大学生産技術研究所, 1969 年, **生産研究**, 第 21 巻, ページ: 55-60.
14. 歪検査器の利用技術 (II) . 岸井貫. 4, 1986 年, **NEW GLASS TECHNOLOGY**, 第 5 巻.

15. ガラス破壊時における破損パターンと破壊応力との関係. 菊田 雅司幸四郎, 都甲 英俊, 山内 辰夫水野. 1075, 出版地不明 : 窯業協会誌, 1985年, 第 93 巻, ページ: 144-150.
16. 樹脂モールド時残留応力の数値解析 (硬化後冷却時に発生する応力と変形の粘弾性解析) - Numerical Analysis of Residual Stress in Resin-Molded Products : 1st Report, Visco-Elastic Analysis of Stress and Deformation caused by Cooling after the Curing Process. 佐々木 康二直人, 天城 滋夫, 原口 芳広斉藤. 622, 出版地不明 : 日本機械学会論文集 A編, 1998年, 第 64 巻, ページ: 1660-1666.
17. IC パッケージ用樹脂の粘弾性特性と残留応力. 河田 裕志皓三池上. 532, 出版地不明 : 日本機械学会論文集 A編, 1990年, 第 56 巻, ページ: 2471-2478.
18. A Thermoviscoelastic Description of the Tempering of Glass. WEYMANND.H. 11, 1962年, Journal of the American Ceramic Society, 第 45 巻, ページ: 517-522.
28. 日本建築学会. ガラスの建築学. 出版地不明 : 学芸出版社, 2004.
29. 旭硝子株式会社. 旭硝子板ガラス建材総合カタログ 技術資料編. 2010.
30. ZachariasenW.H. The Atomic Arrangement in Glass. 出版地不明 : University of Chicago, 1932.
31. Relation Between Inelastic Deformability and Thermal Expansion of Glass in its Annealing Range. ToolA.Q. 9, 1946年9月, Journal of the American Ceramic Society, 第 29 巻, ページ: 240-253.
32. Shelby, J.E. *Introduction to Glass Science and Technology*. Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2005.
33. A Model of Structural Relaxation in Glass. NarayanaswamyO.S. 10, 1971年10月, Journal of the American Ceramic Society, 第 54 巻, ページ: 491-498.
34. Fictive Temperature and the Glassy State. MauroJ.C., LoucksR.J. , GuptaP.K. 1, 2009年, Journal of the American Ceramic Society, 第 92 巻, ページ: 75-86.
35. London Crown Glass Company. London Crown Glass. (オンライン) (引用日: 2012年11月11日.) http://www.londoncrownnglass.co.uk/London_Crown_Glass/History.html.
36. *Concerning the Annealing and Characteristics of Glass*. Tool, A.Q. and Valasek, J. 1919, Scientific Papers of the Bureau of Standards, Vol. 15, pp. 537-571.
37. Breaking of Window Glass Close to Fire. Keski-RahkonenO. 2, 1988年6月, Fire and Materials, 第 12 巻, ページ: 61-69.
38. Garvin, J.L. *A Building History of Northern New England*. Lebanon : University Press of New England, 2001.
39. An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires. SkellyM.J., RobyR.J. , BeylerC.L. 1, 1991年, Journal of Fire Protection Engineering, 第 3 巻, ページ: 25-34.
40. *Relaxation of Stresses in Annealing Glass*. Tool, A.Q. 2 1945, Journal of Research of the National

Bureau of Standards, Vol. 34, pp. 199-210.

41. *Why Glass Transition Remains an Unsolved Problem?* Ngai, K.L. American Institute of Physics Conference Proceedings. Vol. 832, pp. 64-72.

42. Stress and Volume Relaxation in Annealing Flat Glass. Narayanaswamy O.S., Gardon R. 7, 1970年7月, Journal of the American Ceramic Society, 第 53 巻, ページ: 380-385.

43. *The Annealing of Glass.* Adams, L.H. and Williamson, E.D. 6, 12 1920, Journal of the Franklin Institute, Vol. 190, pp. 835-870.

44. 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析. 上田 幸雄 武人 山川. 6, 出版地不明: 溶接学会誌, 1973年, 第 42 巻, ページ: 567-577.

45. 積層複合材料の非定常熱応力解析に関する研究: ガラス転移温度を考慮した熱応力解析モデル. 松本金矢, 座古勝, 田中茂. 585, 出版地不明: 日本機械学会論文集. A 編, 1995年, 第 61 巻, ページ: 986-992.

46. Stress and Volume Relaxation in Annealing Flat Glass. ROBERT GARDONS. NARAYANASWAMY O. 7, 出版地不明: Journal of the American Ceramic Society, 1970年, 第 53 巻, ページ: 380-385.

47. Effect of the Rate of Loading on the Breaking Strength of Glass. L.V. Black. 8, 1935年, Bulletin, American Ceramic Society, 第 15 巻, ページ: 274-275.

48. Strength and Static Fatigue of Abraded Glass Under Controlled Ambient Conditions: III, Aging of Fresh Abrasions. Southwick E. Mould and R. D.R. 542, 1959年, Journal of the American Ceramic Society, 第 42 巻.

49. 樹脂モールド時残留応力の数値解析: 第 1 報, 硬化後冷却時に発生する応力と変形の粘弾性解析. 佐々木 康二 直人, 天城 滋夫, 原口 芳広 齊藤. 622, 1998年, 日本機械学会論文集 A 編, 第 64 巻.

『光弾性実験法』辻二郎, 西田 正孝, 河田 幸三, 日刊工業新聞社, 1965

『見える力学一力と縞』松井源吾, 鹿島出版会, 1987

『プラスチックの粘弾性特性とその利用—成形不良対策法/発泡制御法—』新保 實, 共立出版, 2013

図表出典

本論で外部文献から引用した写真、図表引用元を参考文献に記載し、ウェブ公開用の本文では削除している。その他の写真、図表は東京大学佐藤淳研究室により撮影、作成されたものを使用している。

付録 1 発表論文

修士論文梗概

本研究に関する発表論文

滝口 雅之, 佐藤 淳 “ガラス板溶着法における局所加熱の温度勾配条件” [7]

Analysis of Temperature Gradient in Glass Plates joined using Localized Fusing

学術講演梗概集 2014(構造 I), 781-782, 2014-09-12

”

付録2 使用ソースコード

本研究で使用した解析のソースコードについて掲載する。

- 001.c Makeinp01.c と Hogan.exe を指定回数ループさせる。
- Makeinp01.c N.c からの等価節点力と前ステップから引き継いだ応力を読み込み、部材がガラス転移温度 T_g を超えるか温度判定を行い、inp ファイルの CMQ に入力し、inp ファイルを作成する。
- N.c 入力温度履歴から各 Section のステップごとの等価節点力を計算する

001.c

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "makeinp01.c"
#define quit 1                    /*0 で画面保持*/

void nextinp(int s,int t);
void mainstress();
void inputN(int tim,int sec);
void condition();

int main (){

    char non[100];
    int ret=0;
    char *cmdline1="Hogan004.exe" ;
    char *cmdline2="Hogan004_nonstop.exe" ;
    int i,j;

    printf("試験体番号は？¥n");
    fgets( number, 256, stdin );

    printf("1 回目¥n");
    nextinp(1,0);
```

```
for (i = 2; i < TIME ; i++) {

    if(quit==0)
        ret=system(cmdline1);
    else
        ret=system(cmdline2);

    if(ret!=0){
        printf("error ! ¥n");
    }

    printf("%d 回目 ¥n",i);
    nextinp(i,0);

}

printf("Last!!!!");

ret=system(cmdline1);

if(ret!=0){
    printf("error ! ¥n");
}

mainstress();

condition();

gets(non);
return ;

}
```

Makeinp01.c

```
#include <stdio.h>

#include <string.h>

#include <stdlib.h>

#include <fcntl.h>

#include <math.h>

#include "N.c"

#define DEFAULTINPUTFILE0 "C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\glassmesh_15.inp"

#define DEFAULTINPUTFILE "C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\glassmesh.inp"

#define DEFAULTINPUTFILE2 "C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\glassmesh.otl"

#define DEFAULTINPUTFILE3 "C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\coordinates.inp"

#define DEFAULTOUTPUTFILE "C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\glassmesh_02.inp"

#define DEFAULTOUTPUTFILE2
"C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\mainstress_50th_xkaeta.csv"

#define DEFAULTOUTPUTFILE3
"C:\Users\SATO\Documents\C\nextinp\condition_50th_xkaeta.txt"

#define NODE 915

#define ELEM 3434

#define PI 3.141592

struct organ org;

char number[30];

void condition(){

FILE *fout;

    fout=fopen(DEFAULTOUTPUTFILE3,"w");

    if(fout==NULL){

        printf("couldn't open the file\n") ;

        exit(EXIT_FAILURE);

    }

}
```

```

    }

    fprintf(fout,"E    %d tf/m2¥n",E);
    fprintf(fout,"Ea    %3.1f¥n",Ea);
    fprintf(fout,"a    %f¥n",alpha);
    fprintf(fout,"b    %3.1f¥n",beta);
    fprintf(fout,"アニール温度    %d °C¥n",soften);
    fprintf(fout,"引継ぎ %d (0 で全く引き継がない 1 で熱応力を入れる) ¥n",takeover);
    fprintf(fout,"弾性係数変化    %d (0 で変化する) ¥n",efact);

    fclose(fout);
}

void mainstress0{

    FILE *fin,*fin2,*fout;

    double ms[8][NODE]={{0}};
    double MS1[3][NODE],MS2[3][NODE];
    int con[NODE];
    double co[2][NODE];
    int i,j;
    double a,b;
    double n;
    char str[256];
    double epsilon = 1e-5;
    double p=sqrt(2.0);
    double deg;
    double rad=deg*PI/180.0;
    double MS3[4][NODE];
    double sig,sigma1,sigma2;

```

```

double maxsigma1,minsigma2;

double max,min;

double fai;

    fin=fopen(DEFAULTINPUTFILE2,"r");

        if(fin==NULL){

            printf("couldn't open the file¥n") ;

            exit(EXIT_FAILURE);

        }

    fin2=fopen(DEFAULTINPUTFILE3,"r");

        if(fin==NULL){

            printf("couldn't open the file¥n") ;

            exit(EXIT_FAILURE);

        }

    fout=fopen(DEFAULTOUTPUTFILE2,"w");

        if(fin==NULL){

            printf("couldn't open the file¥n") ;

            exit(EXIT_FAILURE);

        }

    fseek(fin,+0L,SEEK_SET);

    for (i = 0; i < 6; i++) {

        fgets(str,256,fin) ;

    }

for (i = 0; i < NODE; i++) {

    fscanf(fin2,"%d %lf %lf¥n",&con[i],&co[0][i],&co[1][i]);

}

```

```

for (i = 0; i < ELEM ; i++) {

fscanf(fin,"%d %d %d %lf %lf %lf %lf %lf %f\n",&(org.oelem.number),&(org.oelem.esect),&(org.oelem.enod1),

        &(org.oelem.ni),&(org.oelem.q1i),&(org.oelem.q2i),&(org.oelem.mti),&(org.oelem.m1i),&(org.oelem.m2
i));

fscanf(fin,"%d %lf %lf %lf %lf %lf %f\n",&(org.oelem.enod2),&(org.oelem.nj),&(org.oelem.q1j),&(org.oelem.q2j),
&(org.oelem.mtj),&(org.oelem.m1j),&(org.oelem.m2j));

a=co[0][org.oelem.enod2-101]-co[0][org.oelem.enod1-101];
b=co[1][org.oelem.enod2-101]-co[1][org.oelem.enod1-101];

if(fabs(a) < epsilon && fabs(b-0.01) < epsilon){

        ms[0][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
        ms[4][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}

else if(fabs(a-0.01) < epsilon && fabs(b-0.01) < epsilon){

        ms[1][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
        ms[5][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}

else if(fabs(a-0.01) < epsilon && fabs(b) < epsilon){

        ms[2][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
        ms[6][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}

else if(fabs(a+0.01) < epsilon && fabs(b+0.01) < epsilon){

        ms[3][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
        ms[7][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}
}

```

```

else if(fabs(a) < epsilon && fabs(b+0.01) < epsilon){
    ms[4][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
    ms[0][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}
else if(fabs(a+0.01) < epsilon && fabs(b+0.01) < epsilon){
    ms[5][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
    ms[1][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}
else if(fabs(a+0.01) < epsilon && fabs(b) < epsilon){
    ms[6][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
    ms[2][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}
else /*(fabs(a+0.01) < epsilon && fabs(b-0.01) < epsilon) */{
    ms[7][org.oelem.enod1-101]=org.oelem.ni;
    ms[3][org.oelem.enod2-101]=org.oelem.ni;
}
}

maxsigma1=minsigma2=0.0;

fprintf(fout,"%s",number);

for (i = 0; i < NODE; i++) {

/*      MS1[0][i]=-ms[1][i]/p-ms[2][i]-ms[3][i]/p;      /*X*/
/*      MS1[1][i]=-ms[0][i]-ms[1][i]/p-ms[7][i]/p;      /*Y*/
/*      MS1[2][i]=fabs(MS1[0][i]-MS1[1][i]);          /*0,90 主应力度差*/

/*      MS2[0][i]=-ms[0][i]/p-ms[1][i]-ms[2][i]/p;      /*X*/
/*      MS2[1][i]=-ms[0][i]/p-ms[6][i]/p-ms[7][i];      /*Y*/

```

```

/*      MS2[2][i]=fabs(MS2[0][i]-MS2[1][i]);          /*45,135 主応力度差*/

MS3[2][i]=0;

for(deg=0.0 ; deg<45.0 ; deg=deg+1.0){

    sigma1=-ms[0][i]*cos(PI/2-deg*PI/180.0)-ms[1][i]*cos(PI/4-deg*PI/180.0)-
ms[2][i]*cos(deg*PI/180.0)-ms[3][i]*cos(deg*PI/180.0+PI/4);

    sigma2=-ms[0][i]*cos(deg*PI/180.0)-ms[1][i]*cos(PI/4+deg*PI/180.0)-
ms[6][i]*cos(PI/2-deg*PI/180.0)-ms[7][i]*cos(PI/4-deg*PI/180.0);

    sig=fabs(sigma1-sigma2);

    if(sig > MS3[2][i]**1.05*) {

        MS3[2][i]=sig;

        MS3[0][i]=sigma1;          /*引張を正*/

        MS3[1][i]=sigma2;

        MS3[3][i]=deg;

    }

}

for(deg=45.0 ; deg<91.0 ; deg=deg+1.0){

    sigma1=-ms[0][i]*cos(PI/2-deg*PI/180.0)-ms[1][i]*cos(deg*PI/180.0-PI/4)-
ms[2][i]*cos(deg*PI/180.0)-ms[7][i]*cos(3*PI/4-deg*PI/180.0);

    sigma2=-ms[0][i]*cos(deg*PI/180.0)-ms[5][i]*cos(3*PI/4-deg*PI/180.0)-
ms[6][i]*cos(PI/2-deg*PI/180.0)-ms[7][i]*cos(deg*PI/180.0-PI/4);

    sig=fabs(sigma1-sigma2);

    if(sig > MS3[2][i]**1.05*) {

        MS3[2][i]=sig;          /* iteration  主応力度差*/

        MS3[0][i]=sigma1;          /* iteration  1*/

        MS3[1][i]=sigma2;          /* iteration  2*/

        MS3[3][i]=deg;

    }

}

```

```
if (MS3[0][i] > MS3[1][i]) {
    max=MS3[0][i]/20*9.80665*1000;          /*単位は N/mm2(MPa)*/
    min=MS3[1][i]/20*9.80665*1000;
    fai=MS3[3][i];
}
else{
    max=MS3[1][i]/20*9.80665*1000;
    min=MS3[0][i]/20*9.80665*1000;
    fai=MS3[3][i]+90;
}

/* if (max > maxsigma1) {
    maxsigma1 = max;
}
if (min < minsigam2) {
    minsigma2 = min;
} */

fprintf(fout, "%d,%4.2f,%4.2f,%6.4f,%6.4f,%6.4f,%4.1f¥n",
i+101,co[0][i],co[1][i],MS3[2][i]/20*9.80665*1000,max,min,fai);
}

fclose(fin);
fclose(fin2);
fclose(fout);
}
```

```

void nextinp(int s,int t){
                                                    /*s ステップ
目の inp をつくる*/

FILE *fin,*fin2,*fout,*ftherm ;

double *t1,*t2;

struct node node1;

fpos_t fpos;

char str[256];

char buf[256];

char non[100];

int i,j;

if(s==1){

    fin=fopen(DEFAULTINPUTFILE0,"r");

    if(fin==NULL){

        printf("couldn't open the file¥n") ;

        exit(EXIT_FAILURE);

    }

}

else{

    fin=fopen(DEFAULTINPUTFILE,"r");

    if(fin==NULL){

        printf("couldn't open the file¥n") ;

        exit(EXIT_FAILURE);

    }

}

    fin2=fopen(DEFAULTINPUTFILE2,"r");

    if(fin2==NULL){

        printf("couldn't open the file¥n") ;

        exit(EXIT_FAILURE);

```

```

    }

    fout=fopen(DEFAULTOUTPUTFILE,"w");
    if(fout==NULL){
        printf("couldn't open the file¥n") ;
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

/*温度読み込み*/

    ftherm=fopen(THERMINPFILE,"r");
    if(ftherm==NULL){
        printf("couldn't open the thermfile¥n") ;
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

    t1=malloc(sizeof(double)*(nsection+10));
    for (i = 0; i < nsection+1; i++) {
        t1[i]=i;
    }

    t2=malloc(sizeof(double)*(nsection+10));
    for (i = 0; i < nsection+1; i++) {
        t2[i]=i;
    }

    for (j=0; j < s; j++){
        fgets(str,256,ftherm);
    }

```

```

    for (j=0; j < nsection+1 ; j++) {
        fscanf(fttherm,"%lf",&(t1[j]));
    }

    for (j=0; j < nsection+1 ; j++) {
        fscanf(fttherm,"%lf",&(t2[j]));
    }

/*inp 冒頭引継ぎ*/
    fgets(buf,256,fin);
    fprintf(fout,buf);

    fscanf(fin,"NNODE %d¥n",&(org.nodes.nnode));
    fprintf(fout,"NNODE %d¥n",org.nodes.nnode);

    fscanf(fin,"NELEM %d¥n",&(org.elems.nelem));
    fprintf(fout,"NELEM %d¥n",org.elems.nelem);

    fscanf(fin,"NPROP %d¥n",&(org.props.nprop));
    fprintf(fout,"NPROP %d¥n",org.props.nprop);

    fscanf(fin,"NSECT %d¥n",&(org.sects.nsect));
    fprintf(fout,"NSECT %d¥n",org.sects.nsect);
    fprintf(fout,"¥n");

for(i=0;i<10;i++){
    fgets(buf,256,fin);
    fprintf(fout,buf);
}

for (i=1; i < org.props.nprop+1 ; i++) {

```

```

        for(j=0;j<2;j++){
            fgets(buf,256,fin);
            fprintf(fout,buf);
        }
        fgets(buf,256,fin);

        if (t1[i] > soften && t2[i] > soften && efact==0){
            fprintf(fout,"      E      7.3012¥n");
        }
        else{
            fprintf(fout,"      E      73.012¥n");
        }
        /*E を 10
分の 1 に*/

        for(j=0;j<2;j++){
            fgets(buf,256,fin);
            fprintf(fout,buf);
        }
    }

    fgets(buf,256,fin);
    fprintf(fout,"¥n");

    for (i = 0; i < org.sects.nsect; i++) {
        for (j = 0; j < 15; j++) {
            fgets(buf,256,fin);
            fprintf(fout,buf);
        }
    }
}

```

```

fgets(buf,256,fin);
fprintf(fout,"¥n");

/*node 書き込み*/
if(s==1){
    for (i = 0; i < org.nodes.nnode; i++) {
        fscanf(fin,"NODE %d CORD %lf %lf %lf ICON %d %d %d %d %d %d
VCON %f %f %f %f %f %f¥n",
                &(node1.nnode),&(node1.a.x),&(node1.a.y),&(node1.a.z),
                &(node1.b.x),&(node1.b.y),&(node1.b.z),&(node1.b.xy),&(node1.b.yz),&(node1.b.zx),
                &(node1.c.x),&(node1.c.y),&(node1.c.z),&(node1.c.xy),&(node1.c.yz),&(node1.c.zx));

        fprintf(fout,"NODE %d CORD %9.6f %9.6f %9.6f ICON %d %d %d %d %d %d
VCON %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f¥n",
                node1.nnode,node1.a.x,node1.a.y,node1.a.z,node1.b.x,node1.b.y,node1.b.z,node1.b.xy,node1.b.yz,node1.
b.zx,
                node1.c.x,node1.c.y,node1.c.z,node1.c.xy,node1.c.yz,node1.c.zx);
    }
}

else{
    /*otl の冒頭(elem 部分)読み飛ばし*/
    fseek(fin2,+0L,SEEK_SET);
    fgets(str,256,fin2);
    while(strncmp(str,"** DISPLACEMENT",15)!=0){
        fgets(str,256,fin2);
    }
}

```

```

for (i = 0; i < 3; i++) {
    fgets(str,256,fin2);
}

/*node 書き換え、変位引継ぎ*/

for (i = 0; i < org.nodes.nnode; i++) {
    fscanf(fin,"NODE %d CORD %lf %lf %lf ICON %d %d %d %d %d %d
VCON %f %f %f %f %f %f¥n",
          &(node1.nnode),&(node1.a.x),&(node1.a.y),&(node1.a.z),
&(node1.b.x),&(node1.b.y),&(node1.b.z),&(node1.b.xy),&(node1.b.yz),&(node1.b.zx),
&(node1.c.x),&(node1.c.y),&(node1.c.z),&(node1.c.xy),&(node1.c.yz),&(node1.c.zx));

    fscanf(fin2,"%d %lf %lf %lf %lf %lf %lf ¥n",&(org.onode.nnode),&(org.onode.a.x),&(org.onode.a.y),
          &(org.onode.a.z),&(org.onode.a.ksi),&(org.onode.a.eta),&(org.onode.a.omega));

    fprintf(fout,"NODE %d CORD %8.6f %8.6f %8.6f ICON %d %d %d %d %d %d
VCON %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f¥n",
          node1.nnode,node1.a.x+org.onode.a.x,node1.a.y+org.onode.a.y,node1.a.z+org.onode.a.z,node1.b.x,node
1.b.y,node1.b.z,node1.b.xy,node1.b.yz,node1.b.zx,
          node1.c.x,node1.c.y,node1.c.z,node1.c.xy,node1.c.yz,node1.c.zx);
}
}

fprintf(fout,"¥n");

/*熱応力計算*/

```

```

inputN0;

if(s==1){
    /*elem 書き換え*/
    for (i = 0; i < org.elems.nelem; i++) {

        fscanf(fin,"ELEM %d ESECT %d ENODS %d ENOD %d %d BONDS 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0¥n",
        &(org.elems.number),&(org.elems.esect),&(org.elems.enods),&(org.elems.enod1),&(org.elems.enod2));
        fprintf(fout,"ELEM %d ESECT %d ENODS %d ENOD %d %d BONDS 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0¥n",
        org.elems.number,org.elems.esect,org.elems.enods,org.elems.enod1,org.elems.enod2);

        fscanf(fin,"CANG %lf¥n",&(org.elems.cang));
        fprintf(fout,"          CANG %3.1f¥n",0.0);

        fscanf(fin,"CMQ %lf ¥n",
        &(org.elems.ni),&(org.elems.q1i),&(org.elems.q2i),&(org.elems.mti),&(org.elems.m1i),&(org.elems.m2i),
        &(org.elems.nj),&(org.elems.q1j),&(org.elems.q2j),&(org.elems.mtj),&(org.elems.m1j),&(org.elems.m2j));

        j=1;
        while (n[j] != org.elems.esect)    j++;

        fprintf(fout,"
CMQ %8.6f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %8.6f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f %3.1f¥n",
        N[0][j-1],0.0,org.elems.q2i,org.elems.mti,org.elems.m1i,0.0,
        -N[0][j-1],0.0,org.elems.q2j,org.elems.mtj,org.elems.m1j,0.0);
    }
}

```

```

        fscanf(fin,"TYPE %s¥n",org.elems.type);

        fprintf(fout,"        TYPE %s¥n",org.elems.type);

    }
}

else{

    /*otl の冒頭読み飛ばし*/

    fseek(fin2,+0L,SEEK_SET);

    for (i = 0; i < 6; i++) {

        fgets(str,256,fin2) ;

    }

    /*elem 書き換え*/

    for (i = 0; i < org.elems.nelem; i++) {

        fscanf(fin,"ELEM %d ESECT %d ENODS %d ENOD %d %d BONDS 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0¥n",

        &(org.elems.number),&(org.elems.esect),&(org.elems.enods),&(org.elems.enod1),&(org.elems.enod2));

        fprintf(fout,"ELEM %d ESECT %d ENODS %d ENOD %d %d BONDS 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0¥n",

        org.elems.number,org.elems.esect,org.elems.enods,org.elems.enod1,org.elems.enod2);

        fscanf(fin,"CANG %f¥n",&(org.elems.cang));

        fprintf(fout,"        CANG %3.1f¥n",0.0);

        fscanf(fin2,"%d %d %d %lf %lf %lf %lf %lf %lf ¥n",&(org.oelem.number),&(org.oelem.esect),&(org.oelem.
m.enod1),

```



```

org.oelem.nj,org.oelem.q1j,org.elems.q2j,org.elems.mtj,org.elems.m1j,org.oelem.m2j);

        }

        else{

                fprintf(fout,"
CMQ %8.6f %8.6f %3.1f %3.1f %3.1f %8.6f %8.6f %8.6f %3.1f %3.1f %3.1f %8.6f¥n",

                                N[s-1]j-
1]+org.oelem.ni,org.oelem.q1i,org.elems.q2i,org.elems.mti,org.elems.m1i,org.oelem.m2i,

                                -N[s-1]j-
1]+org.oelem.nj,org.oelem.q1j,org.elems.q2j,org.elems.mtj,org.elems.m1j,org.oelem.m2j);

        }

        fscanf(fin,"TYPE %s¥n",org.elems.type);

        fprintf(fout,"          TYPE %s¥n",org.elems.type);

    }
}

free(t1);
free(t2);

fclose(fin);
fclose(fin2);
fclose(fout);
fclose(ftherm);

    if(t==0){

        if (remove(DEFAULTINPUTFILE) != 0) {

            printf("couldn't remove file");

        }
    }

```

```
        if (rename(DEFAULTOUTPUTFILE,DEFAULTINPUTFILE) != 0) {  
            printf("couldn't rename file");  
        }  
    }  
}
```

N.c

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#define E 7301190          /*tf/m2*/
#define Ea 0.0            /*E の補正係数*/
#define A 20.0            /*mm2*/
#define alpha 0.000009
#define beta 1.0          /*alpha の補正係数*/
#define TIME 9
#define nsection 15 /*nsect*/
#define THERMINPFILE "C:\Users\YYSATO\Documents\YCYnextinp\Ytherm\Ytherm_50th_xkaeta.inp"
#define THERMOUTPUTFILE "C:\Users\YYSATO\Documents\YCYnextinp\Ythermalstress.inp"
#define soften 540
#define takeover 1       /*0 だと全く引き継がない 1 だと熱応力を入れる 2 で完全に引き継ぐ*/
#define efact 0          /*0 だと E が変化する*/

char non[100];
char str[256];
int n[nsection+1];      /*section 番号を格納*/
double N[TIME-1][nsection];

struct sect{
    int nsect;
    int t;
};

struct time{
```

```

    struct sect se;
};

struct code{
    double x,y,z;
    float ksi,eta,omega;
};

struct icon{
    int x,y,z,xy,yz,zx ;
};

struct vcon{
    float x,y,z,xy,yz,zx ;
};

struct node{
    int nnode;
    struct code a;
    struct icon b;
    struct vcon c;
};

struct elem{
    int nele;
    int number;
    int esect;
    int enods;
    int enod1,enod2;
    double cang;
    double ni,q1i,q2i,mti,m1i,m2i;
};

```

```

        double nj,q1j,q2j,mtj,m1j,m2j;

        char type[4];
};

struct prop{
        int nprop;

};

struct organ{
        struct time ti;

        struct node nodes,onode;

        struct elem elems,oelem;

        struct prop props;

        struct sect sects;

};

void inputN0                                /*熱応力の行列を作る*/
{

int i,j=0;
struct organ org;
double *t1,*t2;
FILE *fin,*fout;
fpos_t fpos;

t1=malloc(sizeof(double)*nsection+10);

```

```

for (i = 0; i < nsection+1; i++) {

    t1[i]=i;                                /*INITIAL*/
}

t2=malloc(sizeof(double)*nsection+10);
for (i = 0; i < nsection+1; i++) {

    t2[i]=i;                                /*INITIAL*/
}

fin=fopen(THERMINPFILE,"r");
if(fin==NULL){
    printf("couldn't open the file¥n") ;
    exit(EXIT_FAILURE);
}

fout=fopen(THERMOUTPUTFILE,"w");
if(fout==NULL){
    printf("couldn't open the file¥n") ;
    exit(EXIT_FAILURE);
}

for (i=0; i < nsection+1 ; i++) {          /*section 番号を格納*/
    fscanf(fin,"%d",&(n[i]));
}

j=0;
while( !feof(fin) && j< TIME-1){

```

```
for (i=0; i < nsection+1 ; i++) {
    fscanf(fin,"%lf",&(t1[i]));
}

fgetpos(fin,&fpos);

for (i=0; i < nsection+1 ; i++) {
    fscanf(fin,"%lf",&(t2[i]));
}

for (i = 1; i < nsection+1; i++) {
    if(t2[i] > soften && t1[i] > soften && efact==0)
        N[j][i-1]=E*Ea*A*alpha*beta*(t2[i]-t1[i])*0.000001;    /* tf */
    else
        N[j][i-1]=E*A*alpha*(t2[i]-t1[i])*0.000001;

    fprintf(fout,"%f %f %f \n",t1[i],t2[i],N[j][i-1]);
}

fprintf(fout,"\n");

free(t1);
free(t2);

fsetpos(fin,&fpos);
j++;
}
```

```
fclose(fin);
```

```
fclose(fout);
```

```
};
```

謝辞

本論文は、筆者が佐藤淳研究室に在籍した学士課程と修士課程において取り組んだガラス溶着の研究をまとめたものです。本論の作成にあたり、指導教員の佐藤淳准教授には大変ご面倒いただきました。研究室に所属する誰よりも活動的な様子にはいつも勇気を頂きました。ちょうど大学院の研究室の初動に立ち会うことができ、大学と大学院と含めて3年間研究室に所属できたことはとても幸運でした。どの学生よりも時間を使ってご指導いただき、エンジニアリングに対する姿勢を教えてくださいました。

副指導教員として清家剛准教授には、ガラス溶着の研究について長期的な視野でアドバイスを頂きました。清家先生とともに合同ゼミで藤田先生にはご面倒を見ていただきました。お二人に謝意を申し上げます。

荒木美香さんには、手探りで研究を進めていく中で立ち止まりがちな筆者の背中を常に押ししていただきました。このご援助がなければ、本論文はありませんでした。同研究室の金さん、谷口さん、都筑さん、古市さんをはじめ、佐藤淳構造設計事務所の方々には実験資料の作成方法や身近な相談事などご面倒を見ていただきました。

本研究にあたり使用したガラスは、旭硝子社様にご提供いただきました。また旭硝子の研究員の方にもサポートを頂きました。特に、大谷様には研究室のゼミにご参加いただき、本研究に関して常にご助言を頂きました。感謝申し上げます。

同研究室の同期、そして後輩には締め切りに追われながら楽しく過ごすことが出来ました。西村祐哉くんという優秀な後輩とともに研究に取り組めたこともとても刺激になりとても充実した研究生活となりました。

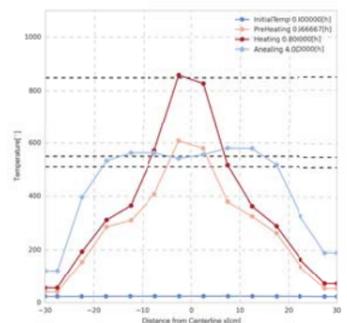
研究室に入る時に、フットワーク軽くあれと言われていましたが、こんなに動き続ける研究生活になるとは想像していませんでした。とても忙しく、そしてとても充実した毎日でした。

最後に、少し長めの学生生活を送った筆者を見守り続けてくれた両親に感謝を申し上げます。

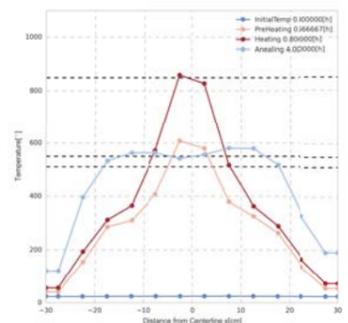
2016年7月19日

滝口 雅之

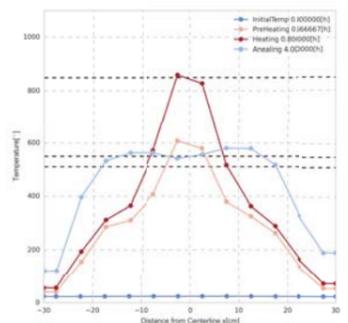
実験 x 方向積分



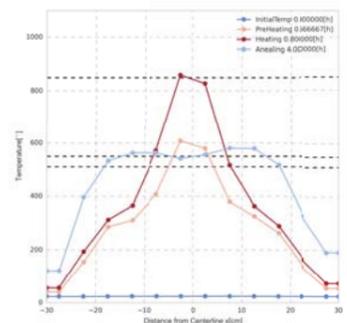
実験 y 方向積分



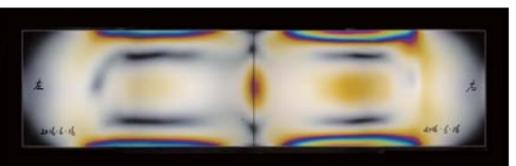
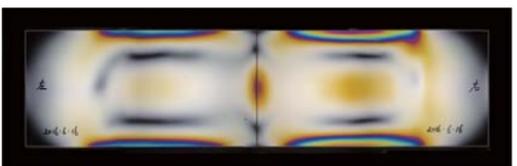
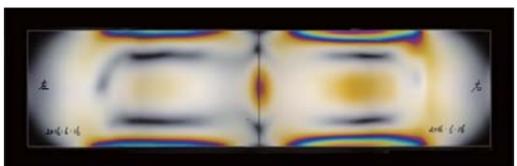
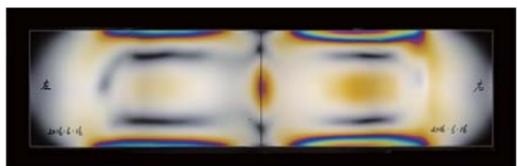
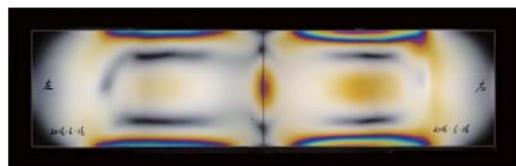
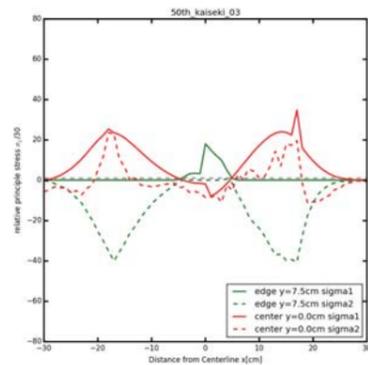
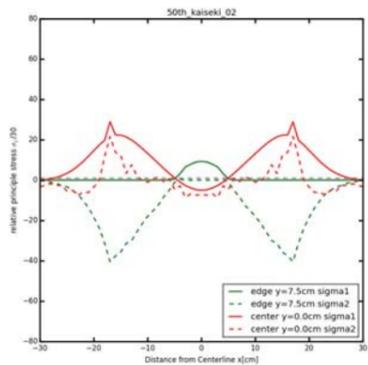
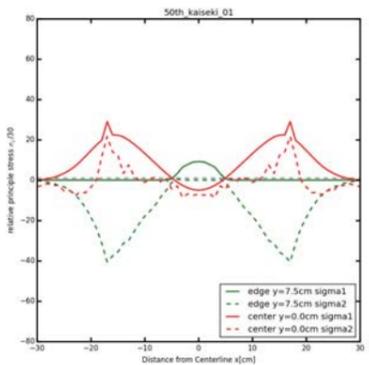
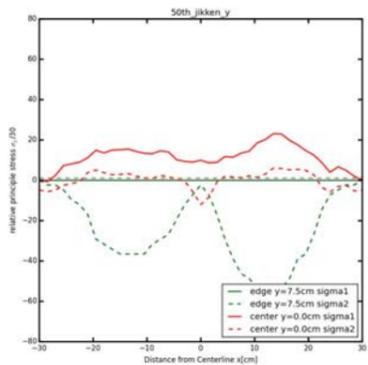
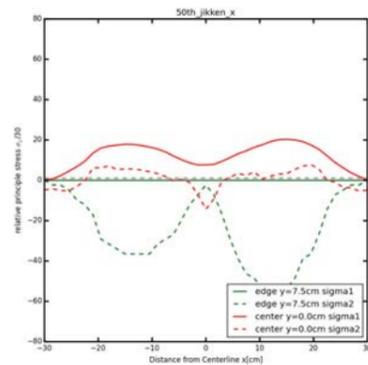
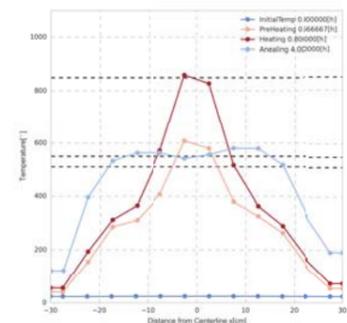
解析 01



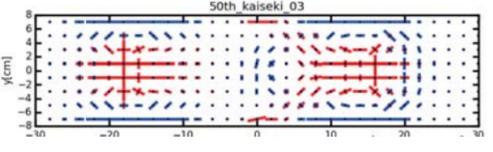
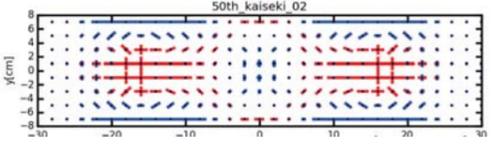
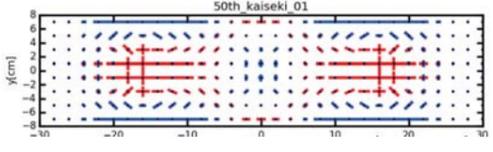
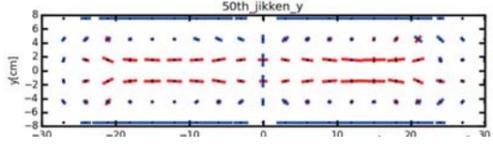
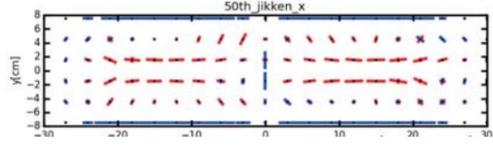
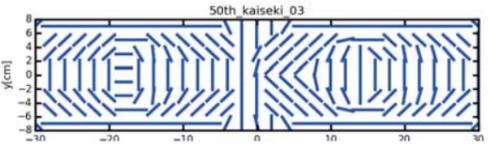
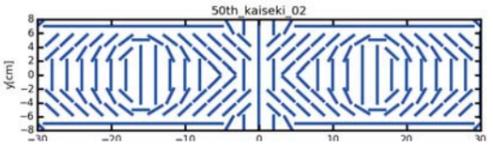
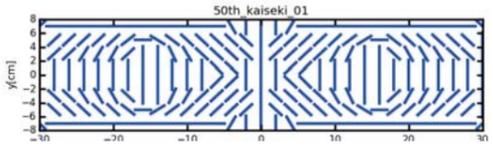
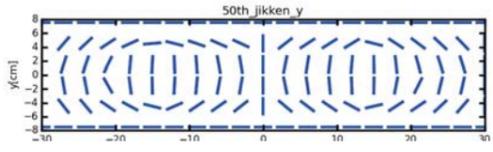
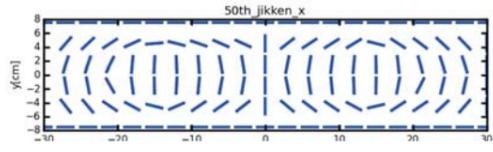
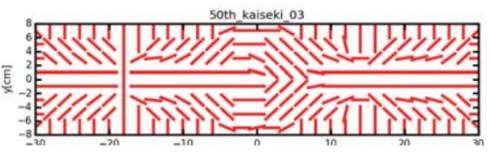
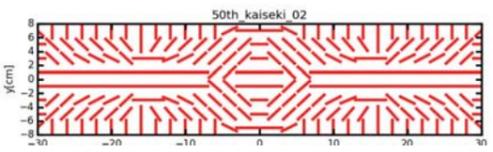
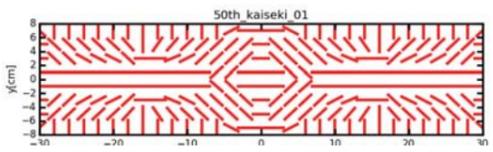
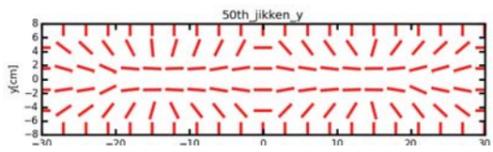
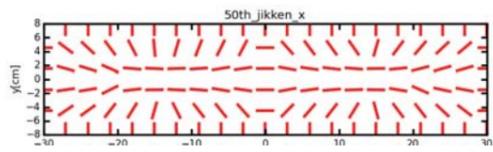
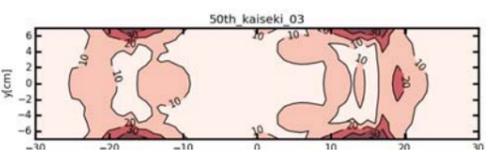
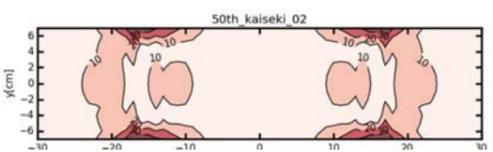
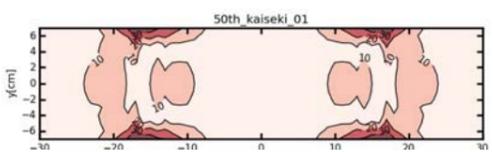
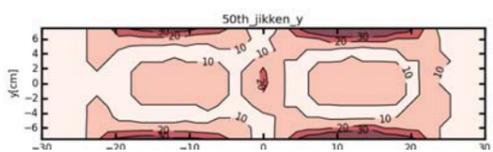
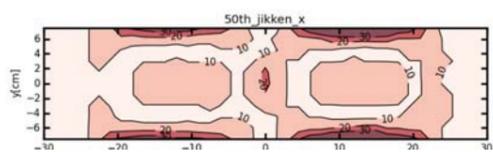
解析 02



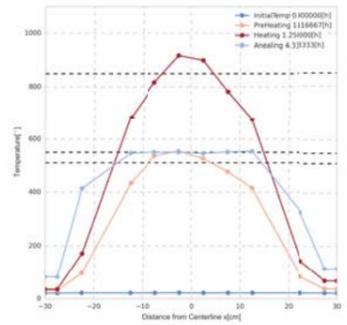
解析 03



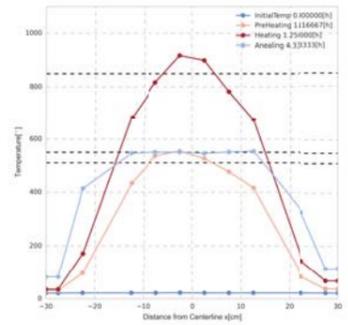
50th_等色線.png



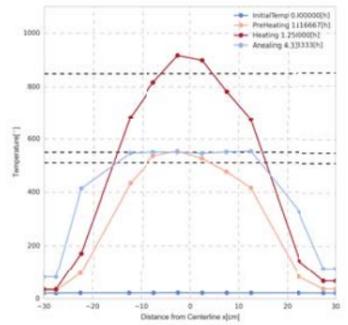
実験 x 方向積分



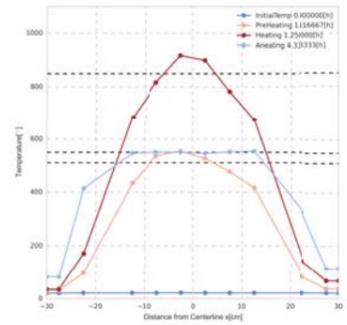
実験 y 方向積分



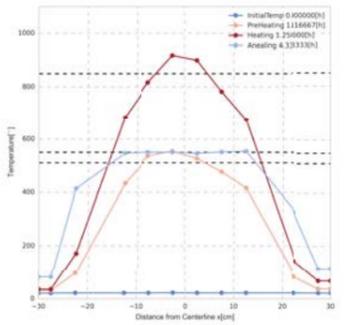
解析 01



解析 02



解析 03



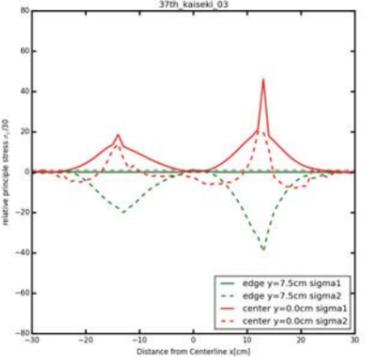
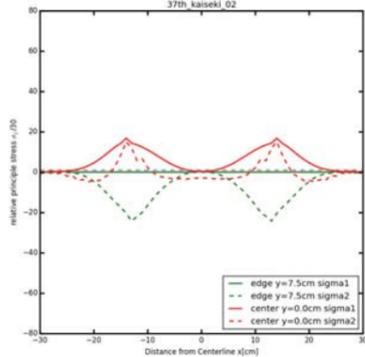
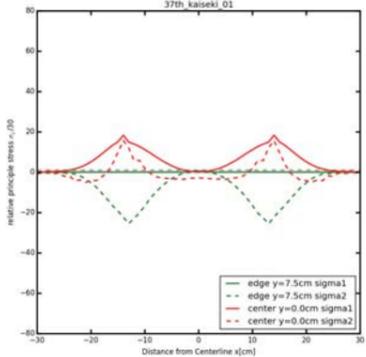
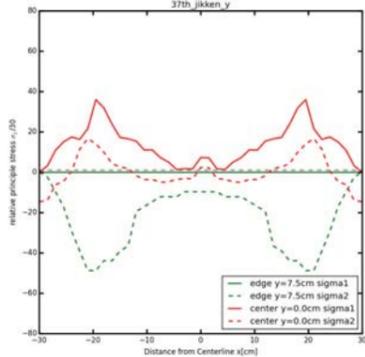
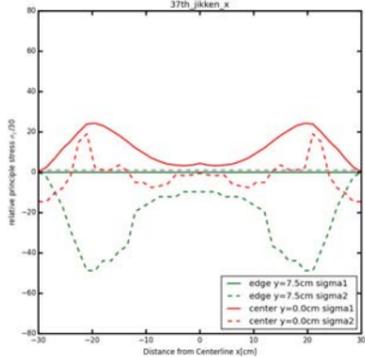
tempKobai_37th_temp.png

tempKobai_37th_temp.png

tempKobai_37th_temp.png

tempKobai_37th_temp.png

tempKobai_37th_temp.png



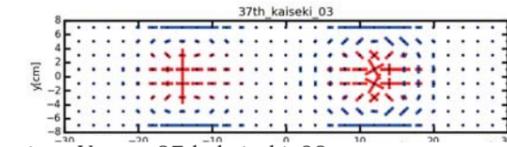
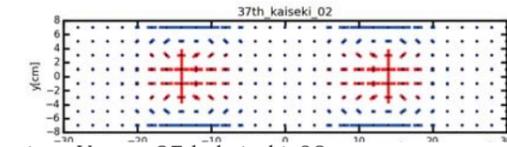
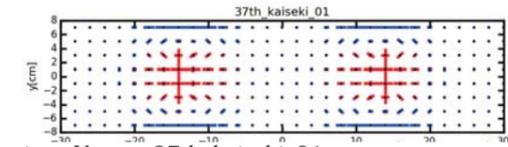
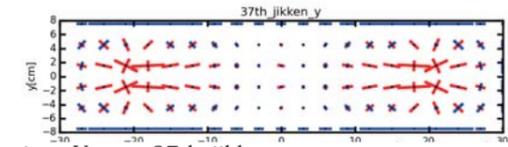
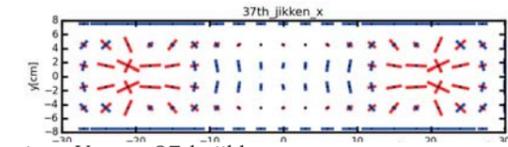
sigmaOresen_37th_jikken_x.png

sigmaOresen_37th_jikken_y.png

sigmaOresen_37th_kaiseki_01.png

sigmaOresen_37th_kaiseki_02.png

sigmaOresen_37th_kaiseki_03.png



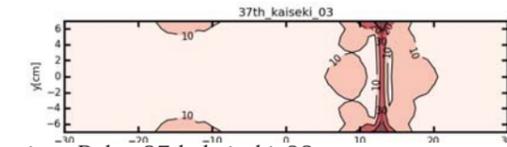
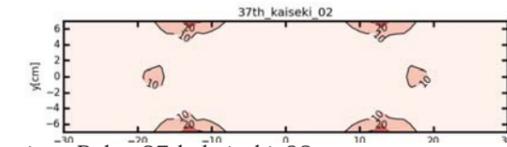
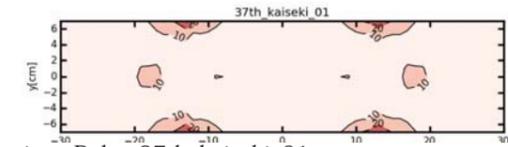
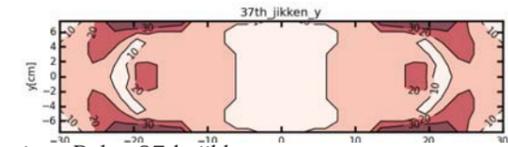
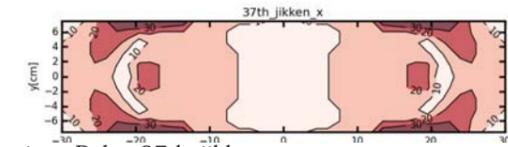
sigmaVector_37th_jikken_x.png

sigmaVector_37th_jikken_y.png

sigmaVector_37th_kaiseki_01.png

sigmaVector_37th_kaiseki_02.png

sigmaVector_37th_kaiseki_03.png



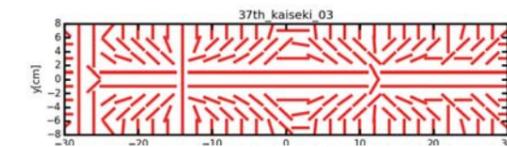
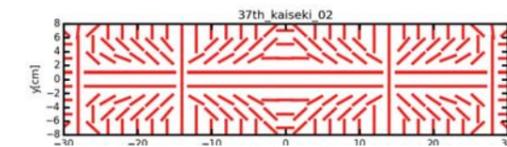
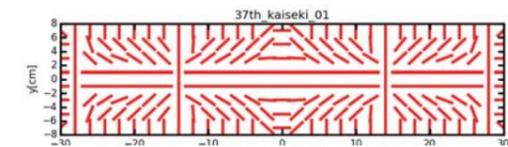
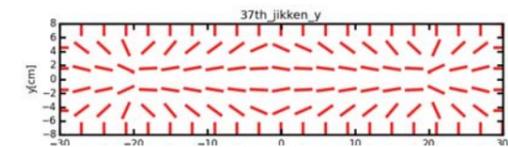
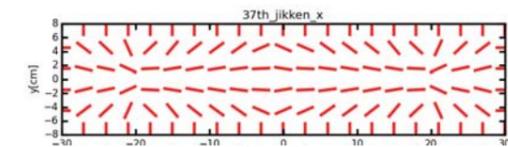
sigmaDelta_37th_jikken_x.png

sigmaDelta_37th_jikken_y.png

sigmaDelta_37th_kaiseki_01.png

sigmaDelta_37th_kaiseki_02.png

sigmaDelta_37th_kaiseki_03.png



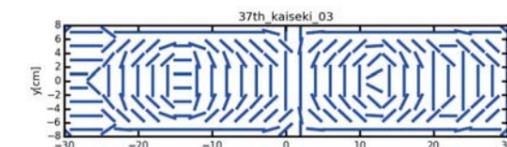
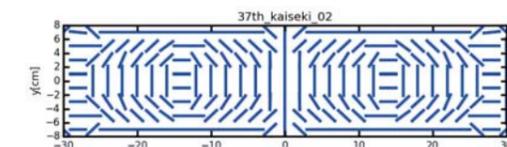
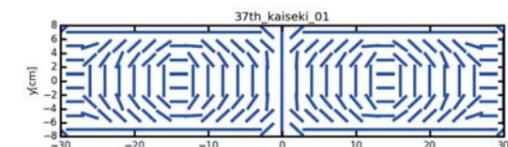
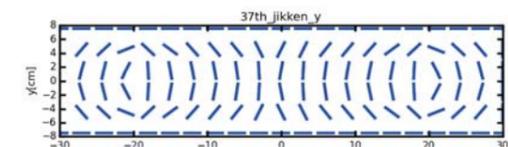
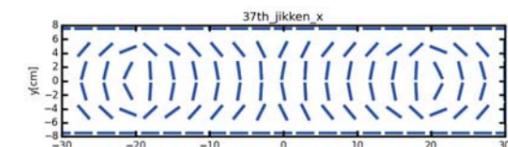
sigma1unitVector_37th_jikken_x.png

sigma1unitVector_37th_jikken_y.png

sigma1unitVector_37th_kaiseki_01.png

sigma1unitVector_37th_kaiseki_02.png

sigma1unitVector_37th_kaiseki_03.png



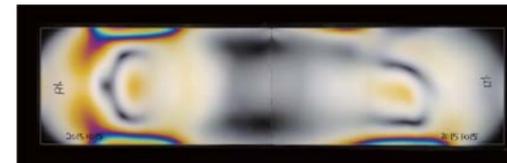
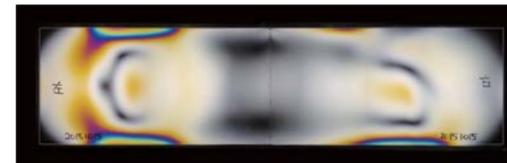
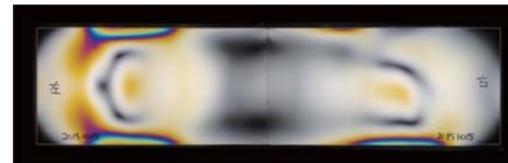
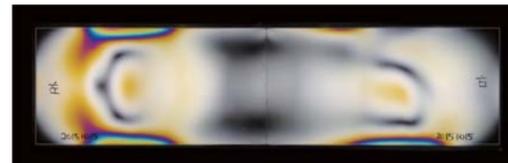
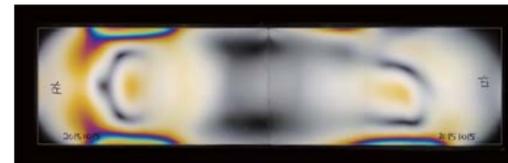
sigma2unitVector_37th_jikken_x.png

sigma2unitVector_37th_jikken_y.png

sigma2unitVector_37th_kaiseki_01.png

sigma2unitVector_37th_kaiseki_02.png

sigma2unitVector_37th_kaiseki_03.png



37th_等色線.png

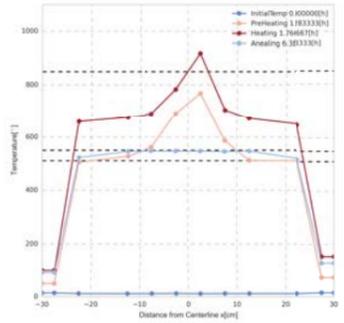
37th_等色線.png

37th_等色線.png

37th_等色線.png

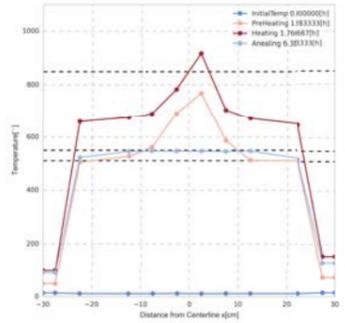
37th_等色線.png

実験 x 方向積分



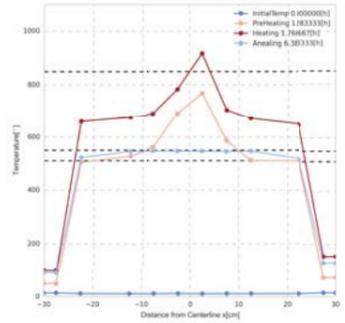
tempKobai_42th_temp.png

実験 y 方向積分



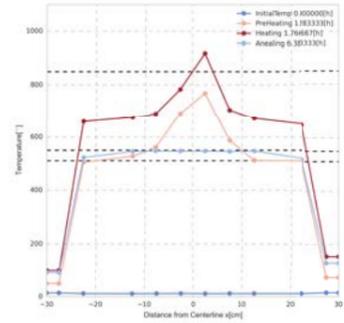
tempKobai_42th_temp.png

解析 01



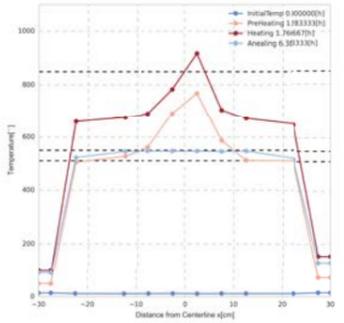
tempKobai_42th_temp.png

解析 02

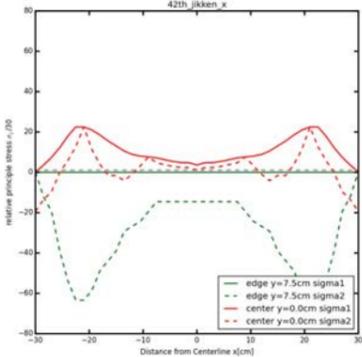


tempKobai_42th_temp.png

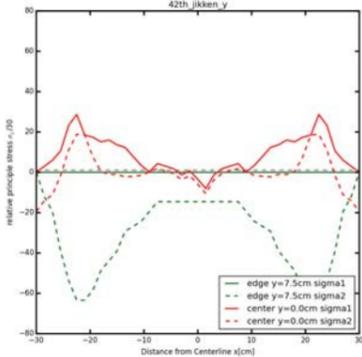
解析 03



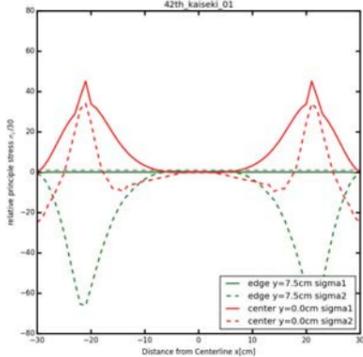
tempKobai_42th_temp.png



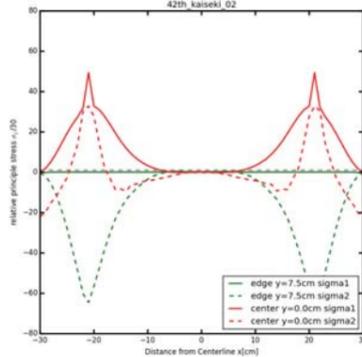
sigmaOresen_42th_jikken_x.png



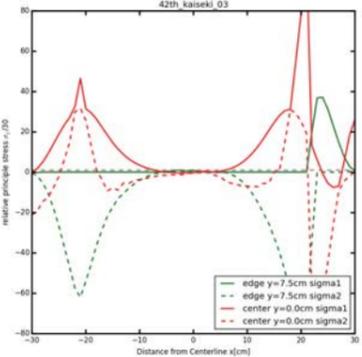
sigmaOresen_42th_jikken_y.png



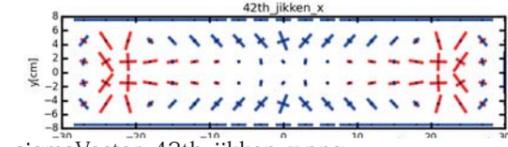
sigmaOresen_42th_kaiseki_01.png



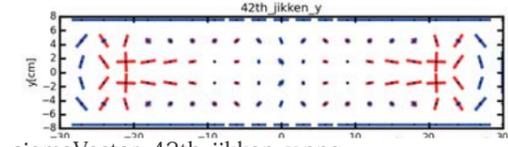
sigmaOresen_42th_kaiseki_02.png



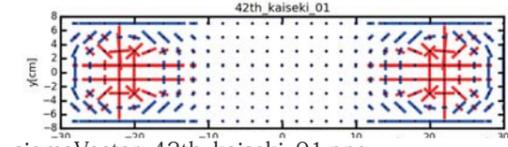
sigmaOresen_42th_kaiseki_03.png



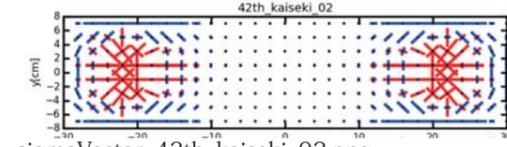
sigmaVector_42th_jikken_x.png



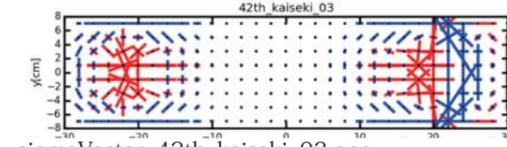
sigmaVector_42th_jikken_y.png



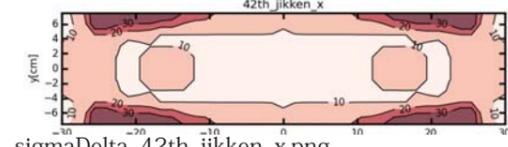
sigmaVector_42th_kaiseki_01.png



sigmaVector_42th_kaiseki_02.png



sigmaVector_42th_kaiseki_03.png



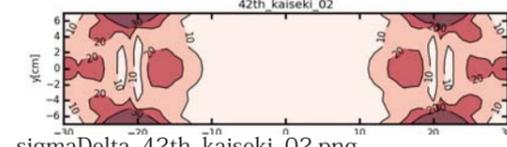
sigmaDelta_42th_jikken_x.png



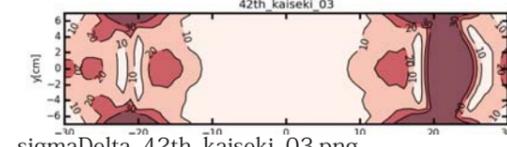
sigmaDelta_42th_jikken_y.png



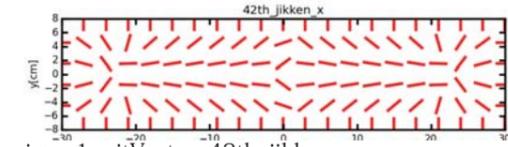
sigmaDelta_42th_kaiseki_01.png



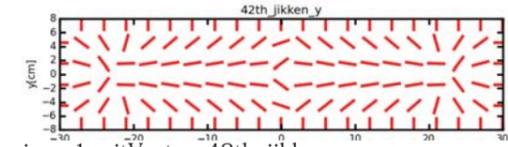
sigmaDelta_42th_kaiseki_02.png



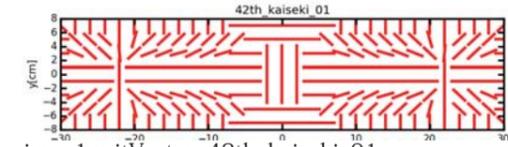
sigmaDelta_42th_kaiseki_03.png



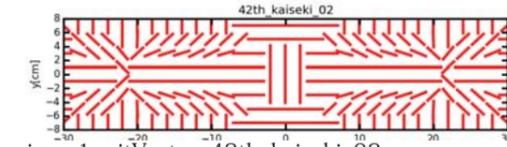
sigma1unitVector_42th_jikken_x.png



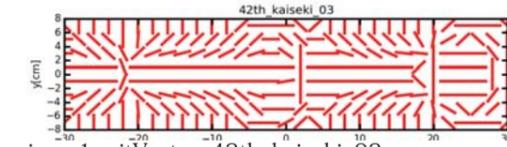
sigma1unitVector_42th_jikken_y.png



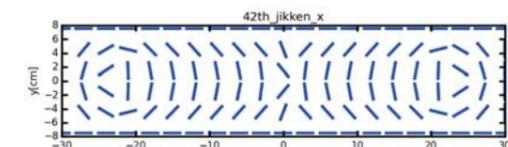
sigma1unitVector_42th_kaiseki_01.png



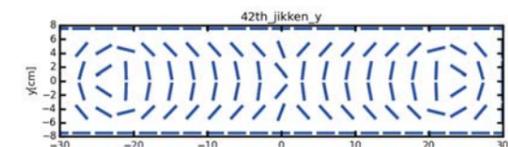
sigma1unitVector_42th_kaiseki_02.png



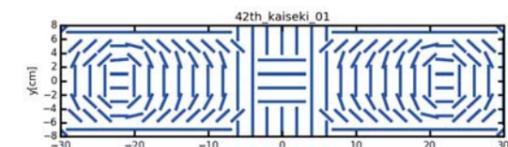
sigma1unitVector_42th_kaiseki_03.png



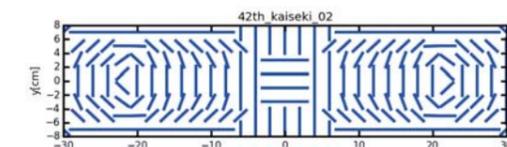
sigma2unitVector_42th_jikken_x.png



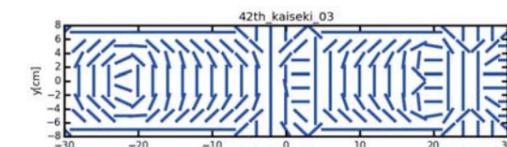
sigma2unitVector_42th_jikken_y.png



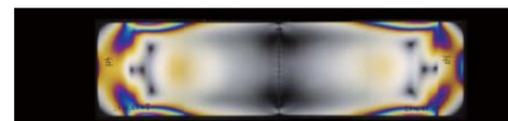
sigma2unitVector_42th_kaiseki_01.png



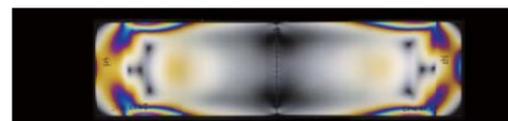
sigma2unitVector_42th_kaiseki_02.png



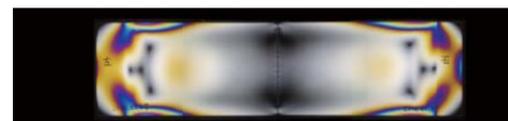
sigma2unitVector_42th_kaiseki_03.png



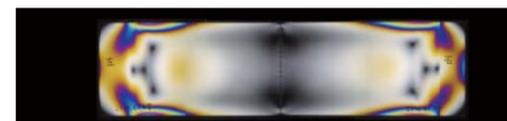
42th_等色線.png



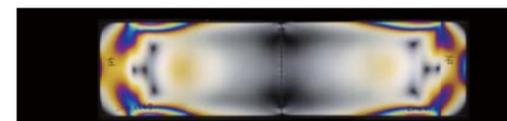
42th_等色線.png



42th_等色線.png

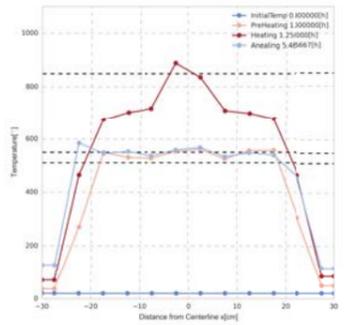


42th_等色線.png



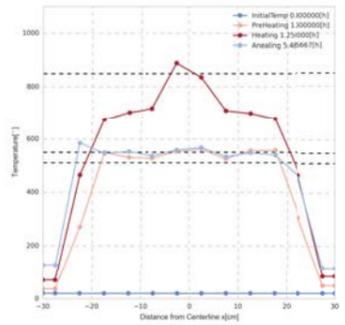
42th_等色線.png

実験 x 方向積分



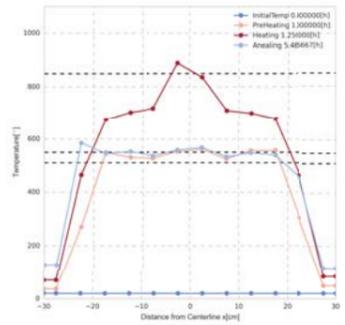
tempKobai_43th_temp.png

実験 y 方向積分



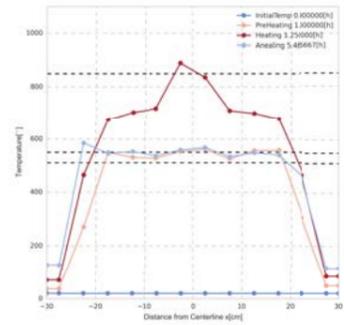
tempKobai_43th_temp.png

解析 01



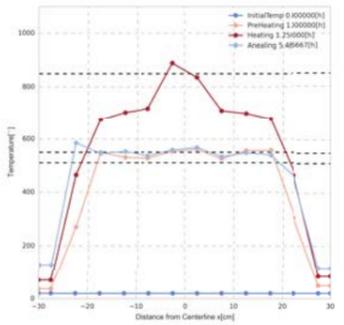
tempKobai_43th_temp.png

解析 02

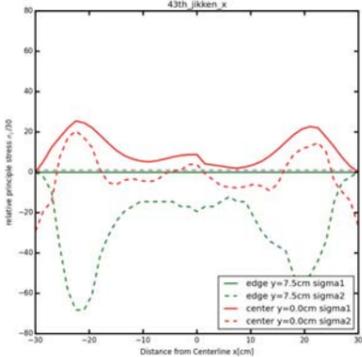


tempKobai_43th_temp.png

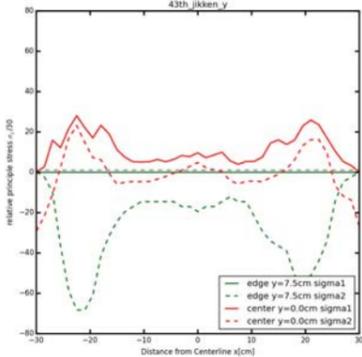
解析 03



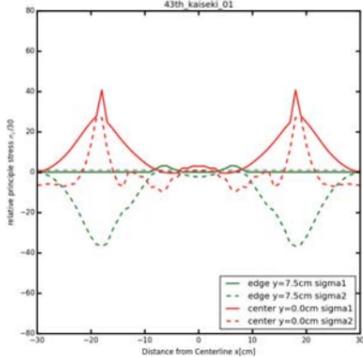
tempKobai_43th_temp.png



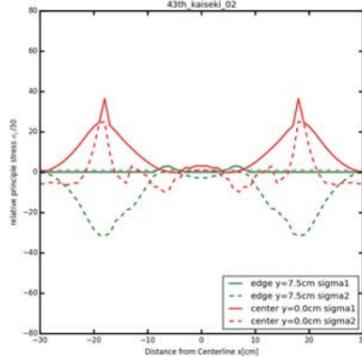
sigmaOresen_43th_jikken_x.png



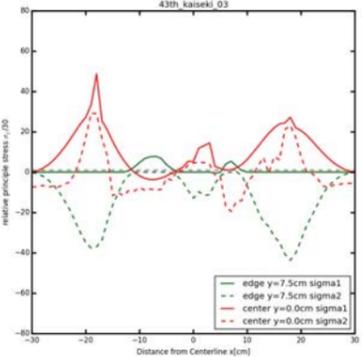
sigmaOresen_43th_jikken_y.png



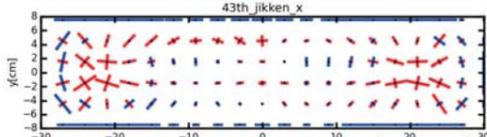
sigmaOresen_43th_kaiseki_01.png



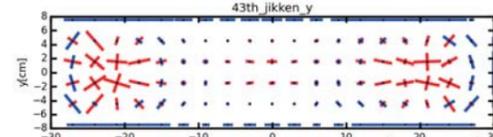
sigmaOresen_43th_kaiseki_02.png



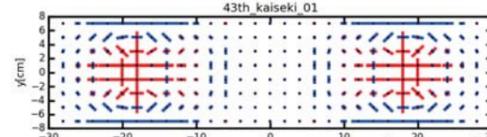
sigmaOresen_43th_kaiseki_03.png



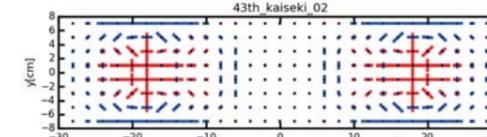
sigmaVector_43th_jikken_x.png



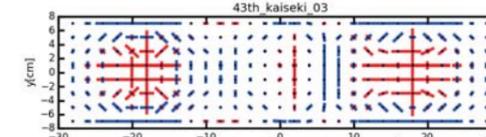
sigmaVector_43th_jikken_y.png



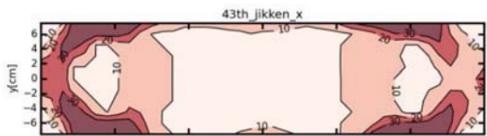
sigmaVector_43th_kaiseki_01.png



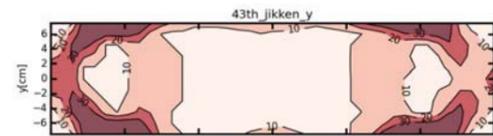
sigmaVector_43th_kaiseki_02.png



sigmaVector_43th_kaiseki_03.png



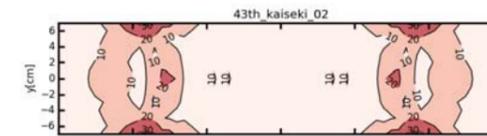
sigmaDelta_43th_jikken_x.png



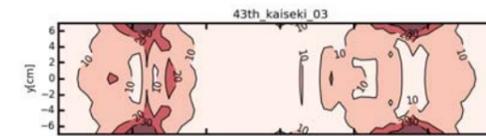
sigmaDelta_43th_jikken_y.png



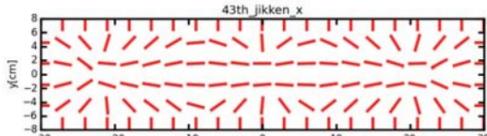
sigmaDelta_43th_kaiseki_01.png



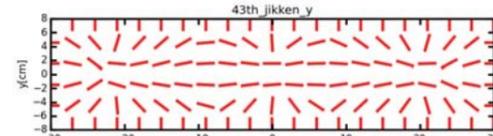
sigmaDelta_43th_kaiseki_02.png



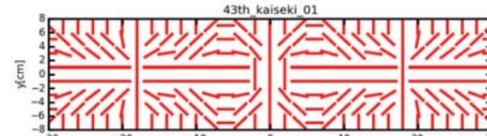
sigmaDelta_43th_kaiseki_03.png



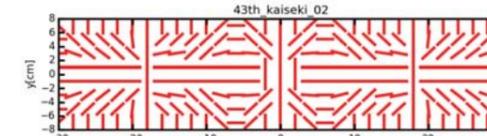
sigma1unitVector_43th_jikken_x.png



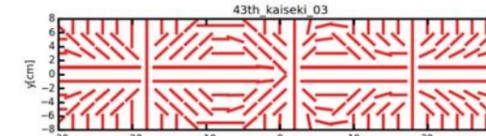
sigma1unitVector_43th_jikken_y.png



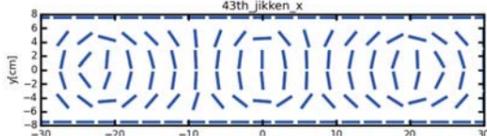
sigma1unitVector_43th_kaiseki_01.png



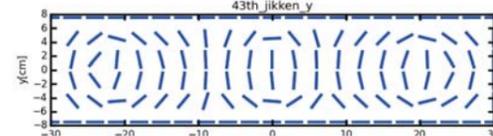
sigma1unitVector_43th_kaiseki_02.png



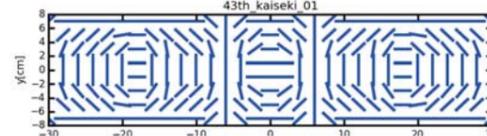
sigma1unitVector_43th_kaiseki_03.png



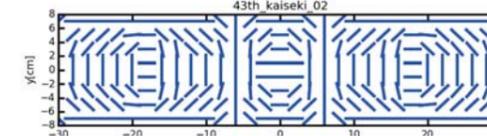
sigma2unitVector_43th_jikken_x.png



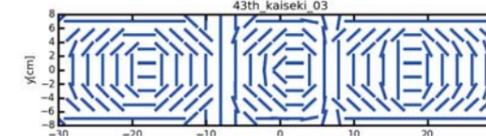
sigma2unitVector_43th_jikken_y.png



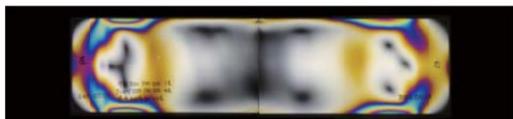
sigma2unitVector_43th_kaiseki_01.png



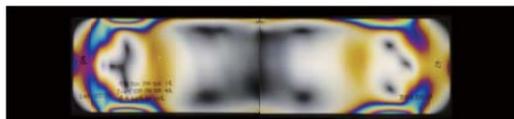
sigma2unitVector_43th_kaiseki_02.png



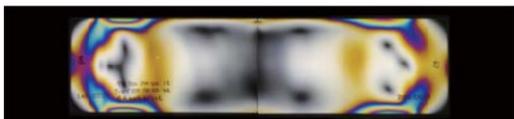
sigma2unitVector_43th_kaiseki_03.png



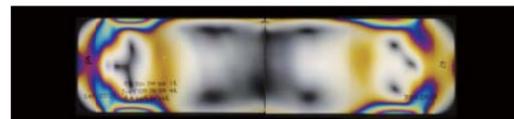
43th_等色線.png



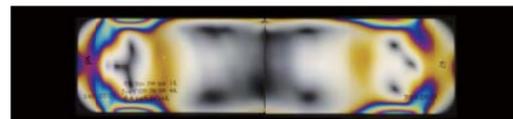
43th_等色線.png



43th_等色線.png

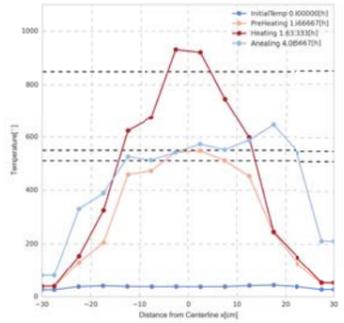


43th_等色線.png



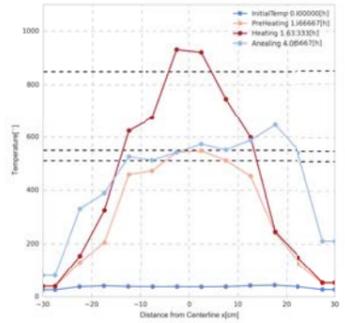
43th_等色線.png

実験 x 方向積分



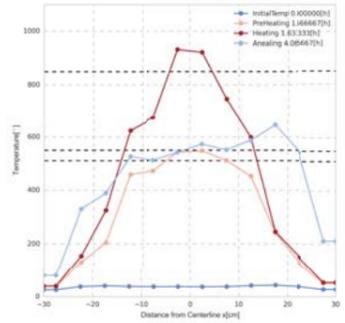
tempKobai_45th_temp.png

実験 y 方向積分



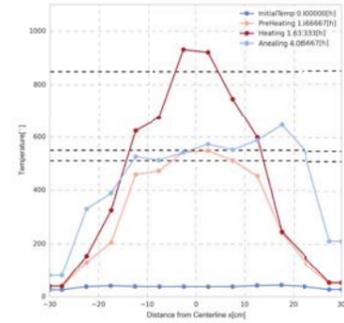
tempKobai_45th_temp.png

解析 01



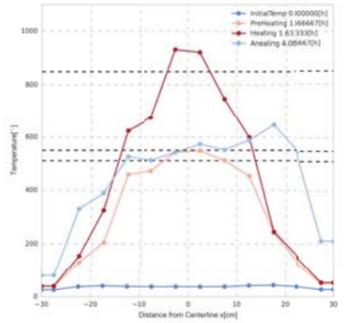
tempKobai_45th_temp.png

解析 02

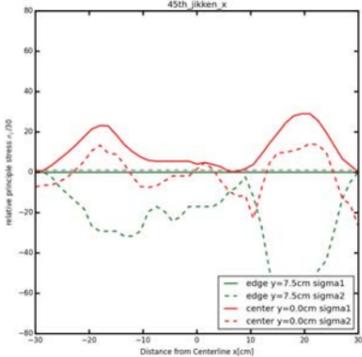


tempKobai_45th_temp.png

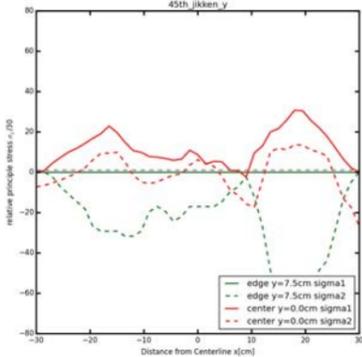
解析 03



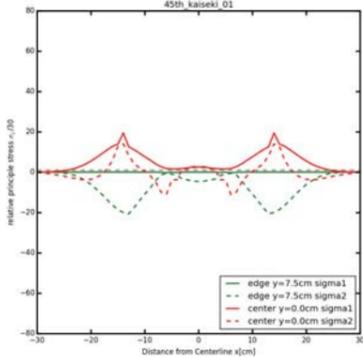
tempKobai_45th_temp.png



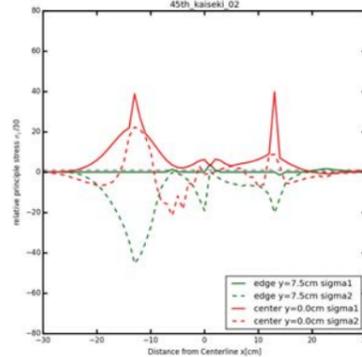
sigmaOresen_45th_jikken_x.png



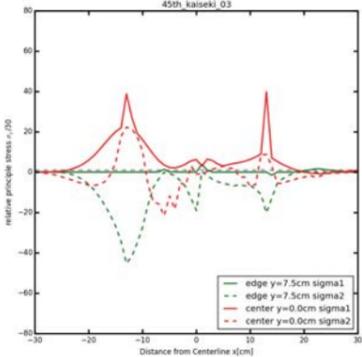
sigmaOresen_45th_jikken_y.png



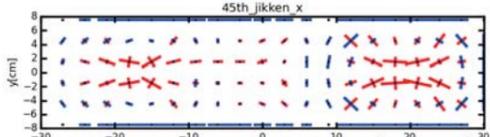
sigmaOresen_45th_kaiseki_01.png



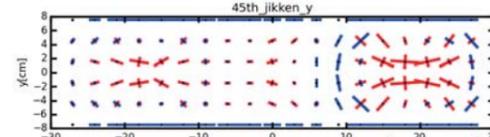
sigmaOresen_45th_kaiseki_02.png



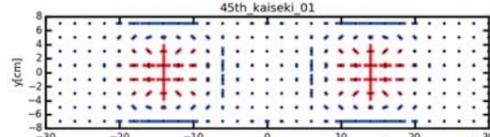
sigmaOresen_45th_kaiseki_03.png



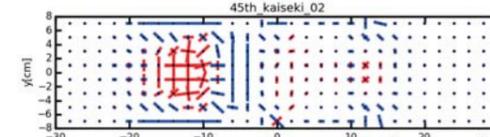
sigmaVector_45th_jikken_x.png



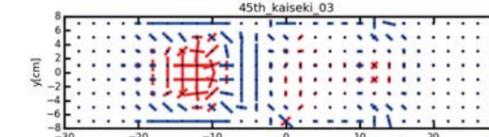
sigmaVector_45th_jikken_y.png



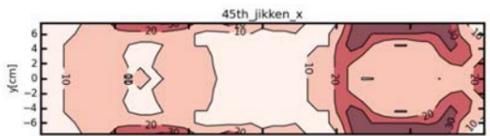
sigmaVector_45th_kaiseki_01.png



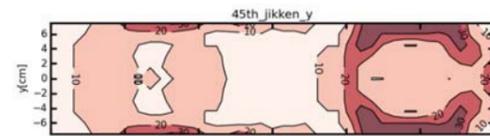
sigmaVector_45th_kaiseki_02.png



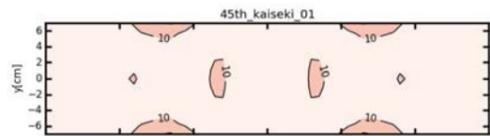
sigmaVector_45th_kaiseki_03.png



sigmaDelta_45th_jikken_x.png



sigmaDelta_45th_jikken_y.png



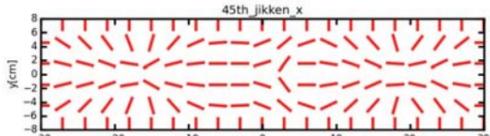
sigmaDelta_45th_kaiseki_01.png



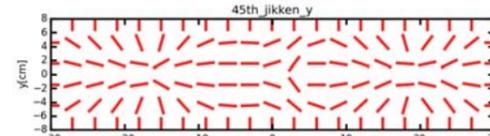
sigmaDelta_45th_kaiseki_02.png



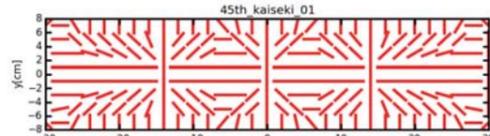
sigmaDelta_45th_kaiseki_03.png



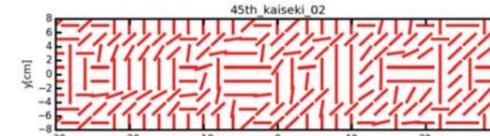
sigma1unitVector_45th_jikken_x.png



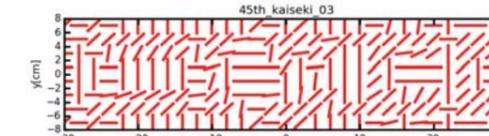
sigma1unitVector_45th_jikken_y.png



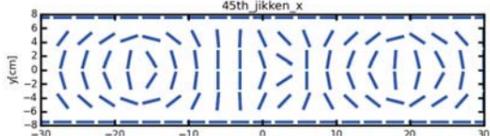
sigma1unitVector_45th_kaiseki_01.png



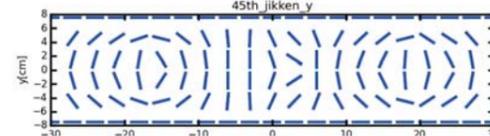
sigma1unitVector_45th_kaiseki_02.png



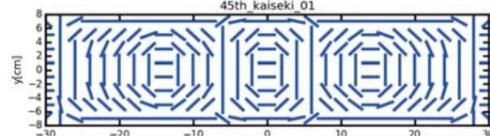
sigma1unitVector_45th_kaiseki_03.png



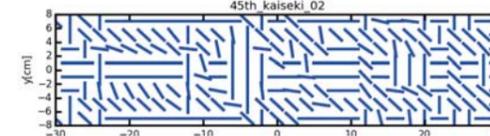
sigma2unitVector_45th_jikken_x.png



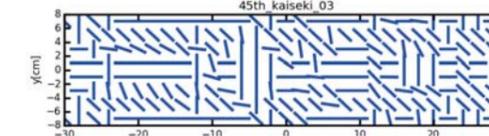
sigma2unitVector_45th_jikken_y.png



sigma2unitVector_45th_kaiseki_01.png



sigma2unitVector_45th_kaiseki_02.png



sigma2unitVector_45th_kaiseki_03.png



45th_等色線.png



45th_等色線.png



45th_等色線.png

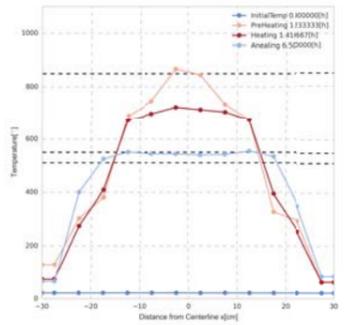


45th_等色線.png



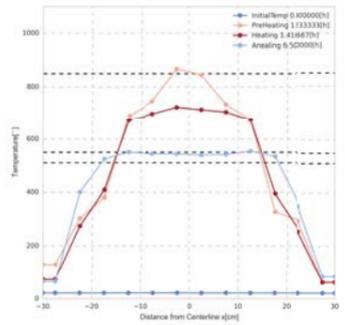
45th_等色線.png

実験 x 方向積分



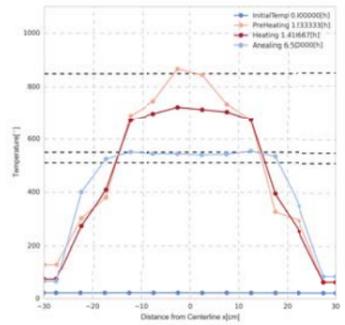
tempKobai_46th_temp.png

実験 y 方向積分



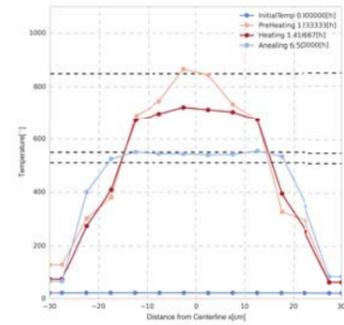
tempKobai_46th_temp.png

解析 01



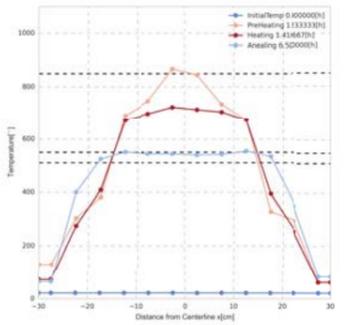
tempKobai_46th_temp.png

解析 02

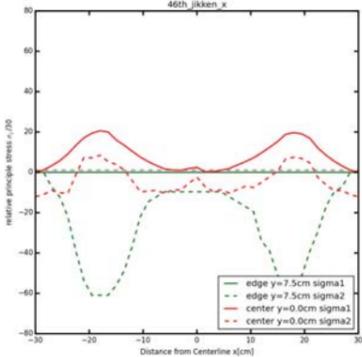


tempKobai_46th_temp.png

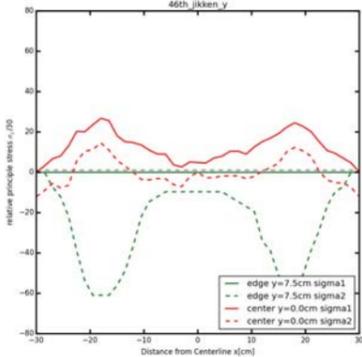
解析 03



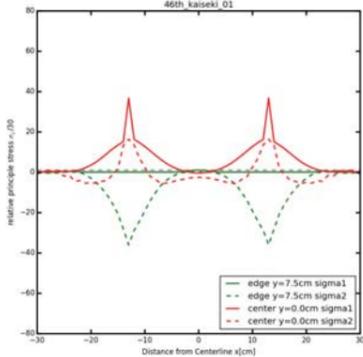
tempKobai_46th_temp.png



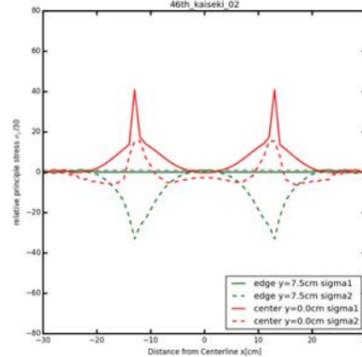
sigmaOresen_46th_jikken_x.png



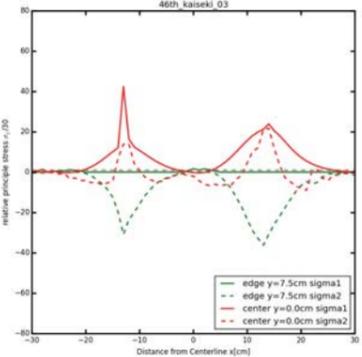
sigmaOresen_46th_jikken_y.png



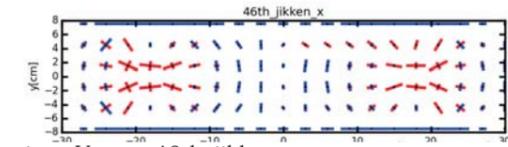
sigmaOresen_46th_kaiseki_01.png



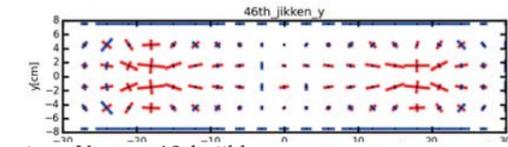
sigmaOresen_46th_kaiseki_02.png



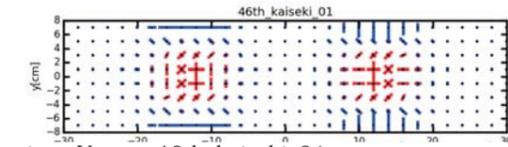
sigmaOresen_46th_kaiseki_03.png



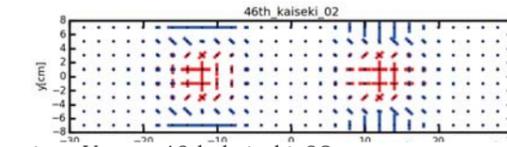
sigmaVector_46th_jikken_x.png



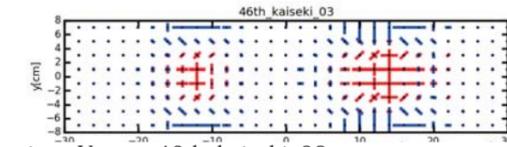
sigmaVector_46th_jikken_y.png



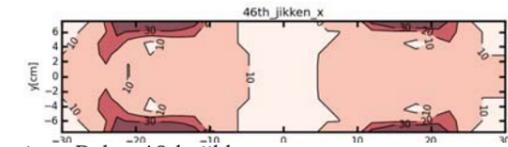
sigmaVector_46th_kaiseki_01.png



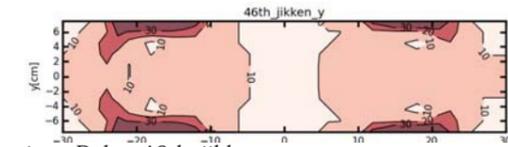
sigmaVector_46th_kaiseki_02.png



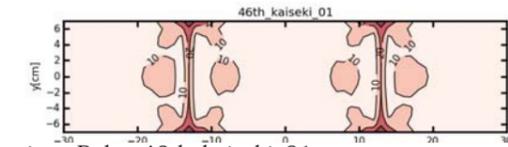
sigmaVector_46th_kaiseki_03.png



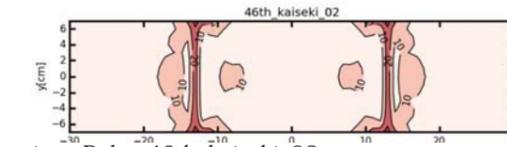
sigmaDelta_46th_jikken_x.png



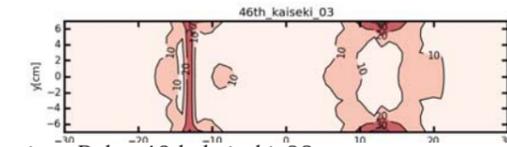
sigmaDelta_46th_jikken_y.png



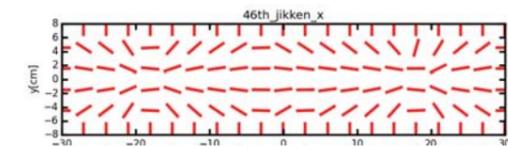
sigmaDelta_46th_kaiseki_01.png



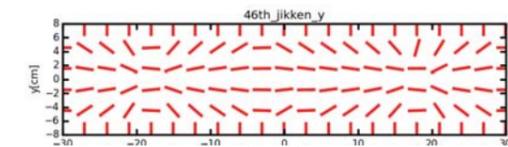
sigmaDelta_46th_kaiseki_02.png



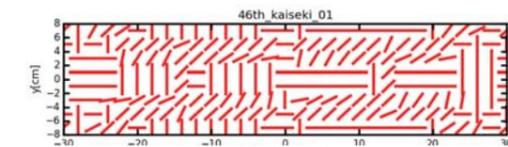
sigmaDelta_46th_kaiseki_03.png



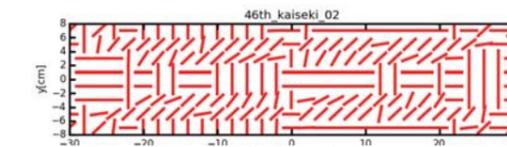
sigma1unitVector_46th_jikken_x.png



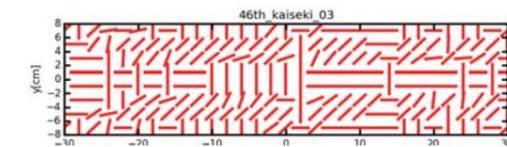
sigma1unitVector_46th_jikken_y.png



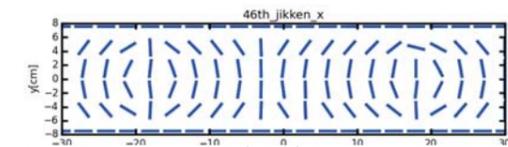
sigma1unitVector_46th_kaiseki_01.png



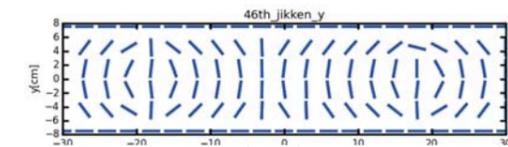
sigma1unitVector_46th_kaiseki_02.png



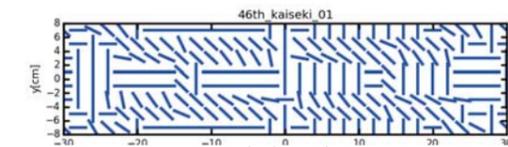
sigma1unitVector_46th_kaiseki_03.png



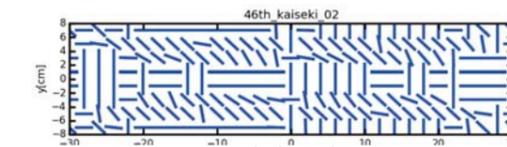
sigma2unitVector_46th_jikken_x.png



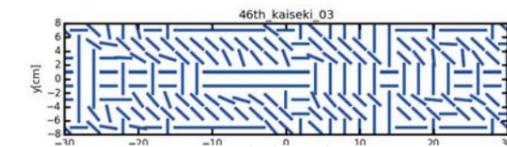
sigma2unitVector_46th_jikken_y.png



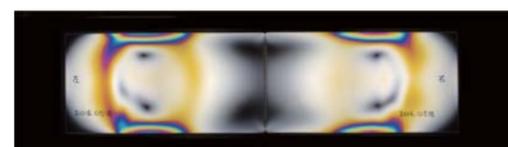
sigma2unitVector_46th_kaiseki_01.png



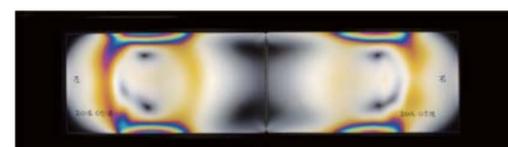
sigma2unitVector_46th_kaiseki_02.png



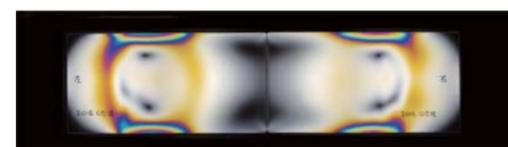
sigma2unitVector_46th_kaiseki_03.png



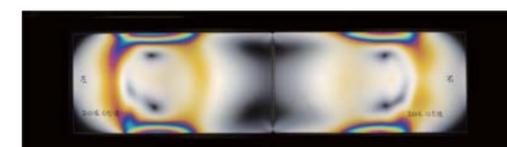
46th_等色線.png



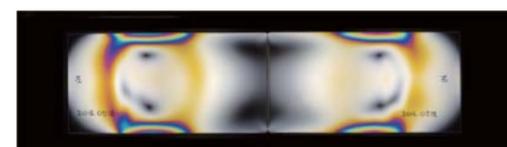
46th_等色線.png



46th_等色線.png

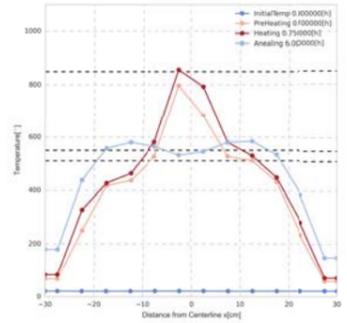


46th_等色線.png



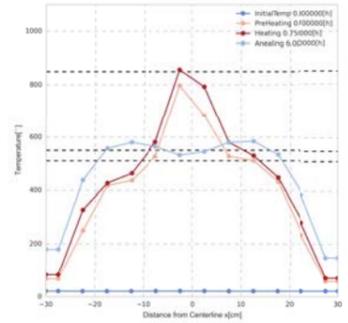
46th_等色線.png

実験 x 方向積分



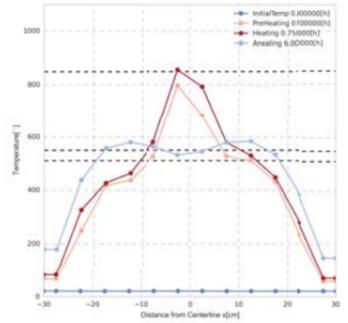
tempKobai_49th_temp.png

実験 y 方向積分



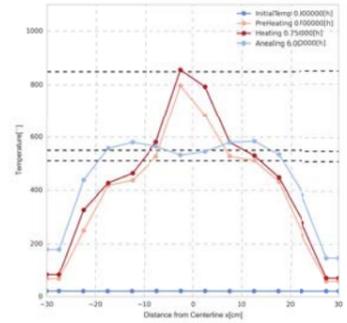
tempKobai_49th_temp.png

解析 01



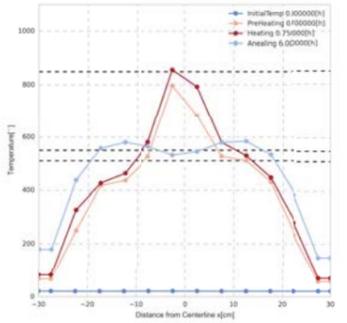
tempKobai_49th_temp.png

解析 02

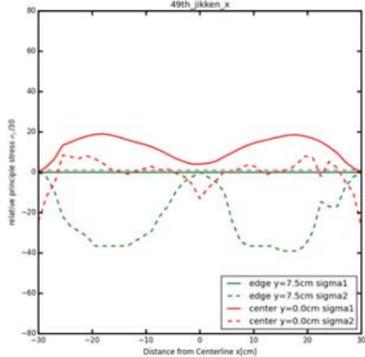


tempKobai_49th_temp.png

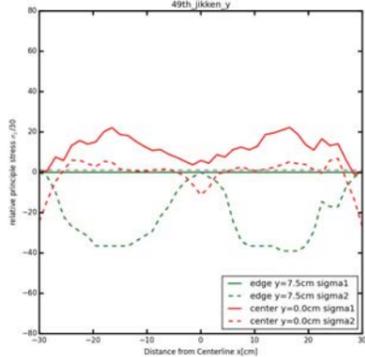
解析 03



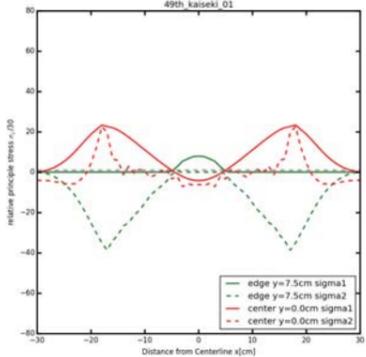
tempKobai_49th_temp.png



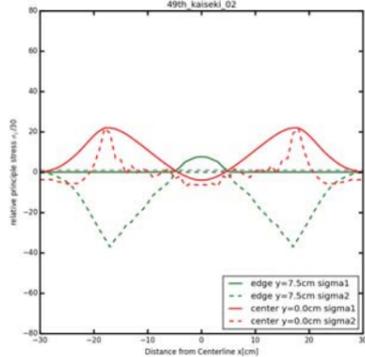
sigmaOresen_49th_jikken_x.png



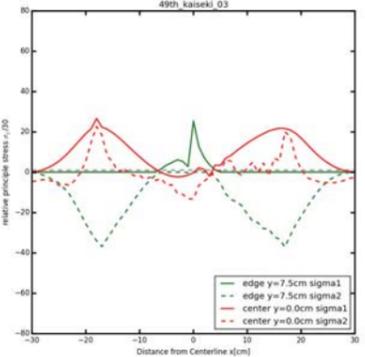
sigmaOresen_49th_jikken_y.png



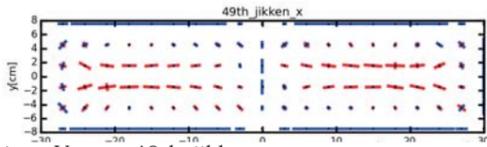
sigmaOresen_49th_kaiseki_01.png



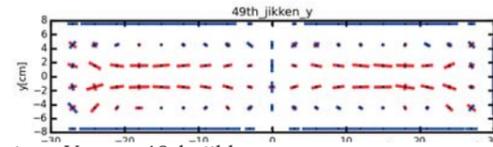
sigmaOresen_49th_kaiseki_02.png



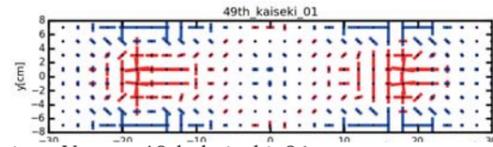
sigmaOresen_49th_kaiseki_03.png



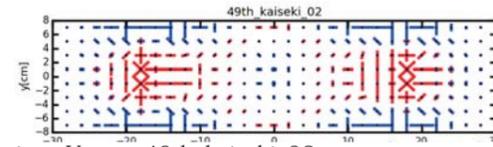
sigmaVector_49th_jikken_x.png



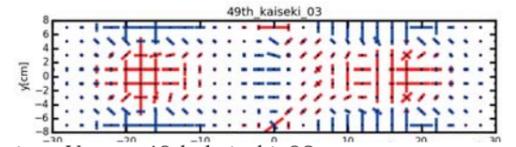
sigmaVector_49th_jikken_y.png



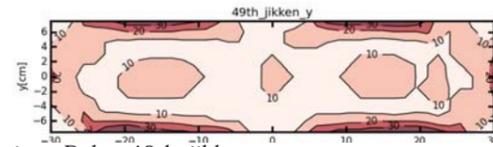
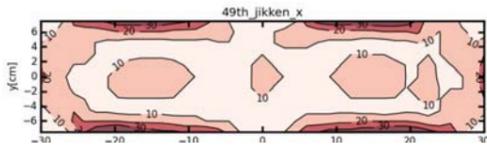
sigmaVector_49th_kaiseki_01.png



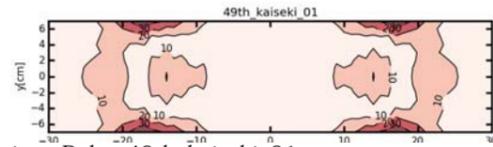
sigmaVector_49th_kaiseki_02.png



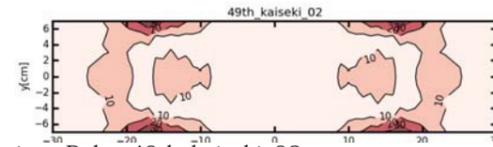
sigmaVector_49th_kaiseki_03.png



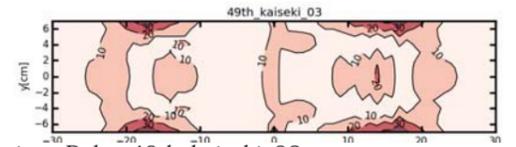
sigmaDelta_49th_jikken_y.png



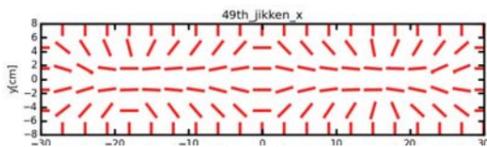
sigmaDelta_49th_kaiseki_01.png



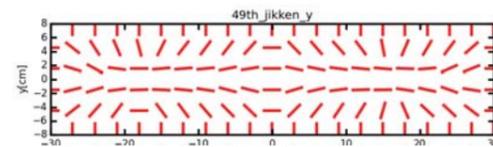
sigmaDelta_49th_kaiseki_02.png



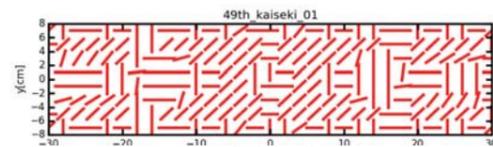
sigmaDelta_49th_kaiseki_03.png



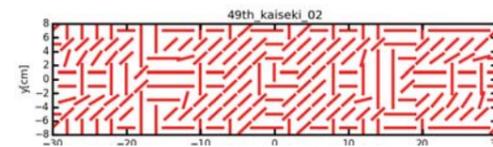
sigma1unitVector_49th_jikken_x.png



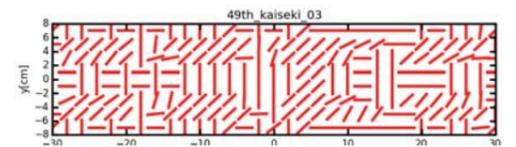
sigma1unitVector_49th_jikken_y.png



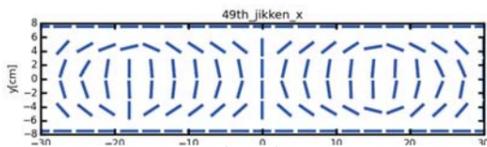
sigma1unitVector_49th_kaiseki_01.png



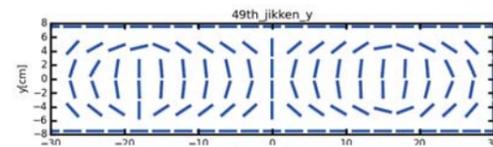
sigma1unitVector_49th_kaiseki_02.png



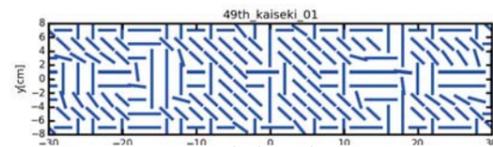
sigma1unitVector_49th_kaiseki_03.png



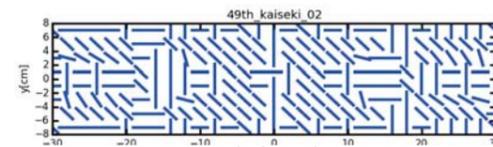
sigma2unitVector_49th_jikken_x.png



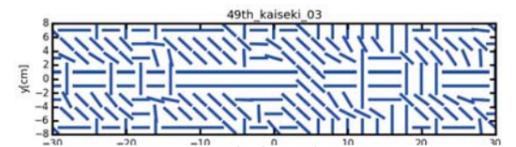
sigma2unitVector_49th_jikken_y.png



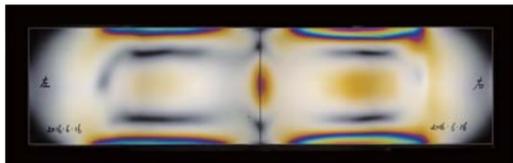
sigma2unitVector_49th_kaiseki_01.png



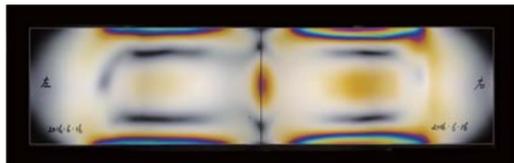
sigma2unitVector_49th_kaiseki_02.png



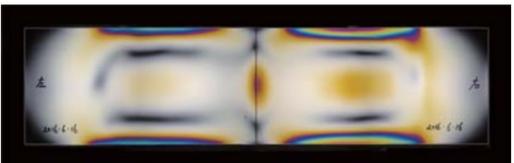
sigma2unitVector_49th_kaiseki_03.png



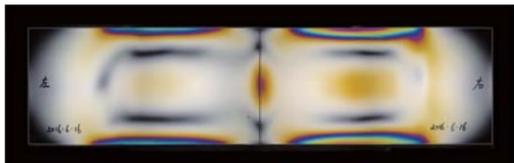
50th_等色線.png



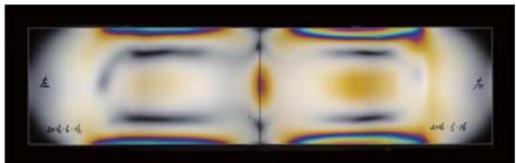
50th_等色線.png



50th_等色線.png



50th_等色線.png



50th_等色線.png

ガラス板溶着法における局所加熱の温度勾配条件

正会員 ○滝口 雅之*
同 佐藤 淳**

ガラス板 アニール 局所加熱
転移範囲温度 溶着 残留ひずみ

1. 研究概要

ソーダ石灰ガラスの局所的加熱は 200°C程度で割れを生じ^[1] 溶着は困難であると認識されているが、タンら^[2]はガラス板同士を局所的に加熱して一体化させる（以後、「溶着」）工法について基礎的研究を行い、割れの要因を指摘し、局所加熱と全体加熱を併用すること、またガラス転移範囲温度内でのアニールと呼ばれる温度保持と徐冷を適切に行うことでガラス板の溶着が可能であることを示した。これが実用化できれば、将来的に現場で大判ガラスや多面体シームレスガラスを製作することが可能となるが、溶着部から離れた領域（以後、「周辺部」）で転移範囲温度に達しない低温状態での溶着方法が課題であった。

本研究では加熱と冷却の全過程において溶着部から周辺部へ離れるに従って温度勾配をつけた場合でも溶着が可能であることを明らかにし、ひずみ分布から考察した応力発生モデルを提案する。

2. ガラス性質

2.1 転移範囲温度 (Tg)

一般にガラスは 融点で急激な変化を起さずガラス転移範囲（以後、Tg）と呼ばれる温度範囲で粘度が急激に変化し結晶状態に至る（図 1）。Tg からガラスが結晶化する際不安定な内部構造であるとひずみが残留し、割れの原因となる^[2]。使用する試験体の温度-粘度曲線は図 2 のようになっており Tg は 530~560°C程度^[3]とされている。

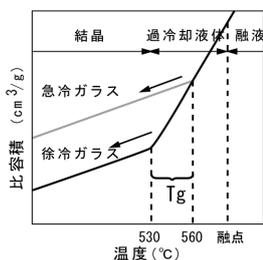


図 1. 比容積-温度図^[3]

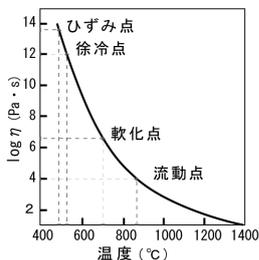


図 2. 粘度-温度曲線^[3]

2.2 アニール

ガラスを Tg で長時間保持すると、次第に収縮し内部構造がより安定しひずみが減少する。この Tg における温度保持によるひずみ緩和の操作をアニールと呼ぶ。温度勾配をつけた溶着では、溶着部のみ Tg で温度保持を行い局

所的なアニール（以後、「局所アニール」）を施し、熱ひずみを緩和することを目標とする。

3. 実験装置と方法

温度勾配条件を変えて 150mm×150mm×8mm のソーダ石灰ガラス板 2 枚の溶着を行う。

図 3、図 4 のように装置内にガラスの粒（カレット）と試験体を配置し、ニクロム線入り熱板ヒーターで予熱する。温度勾配を発生させるために熱板ヒーターを 3 つ利用し、勾配を急にする場合に装置内に間仕切りを入れて。そしてバーナー加熱口を開けバーナーで局所加熱し、試験体同士のエッジを溶着する。溶着を目視で確認できたらバーナー加熱口を閉め、Tg まで自然冷却した後アニールする。アニール後は自然冷却により常温に戻す（図 5）。

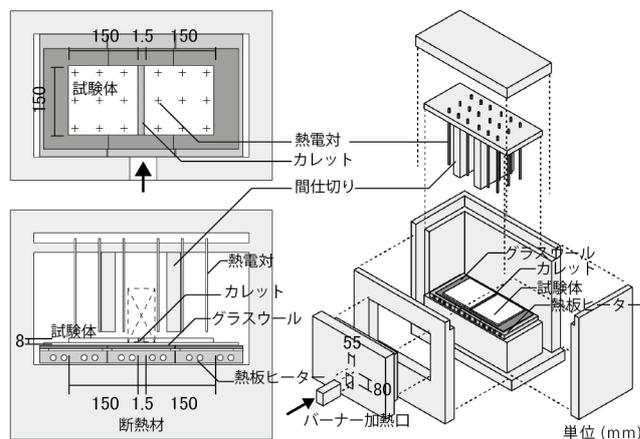


図 3. 実験装置断面図

図 4. 実験装置分解図

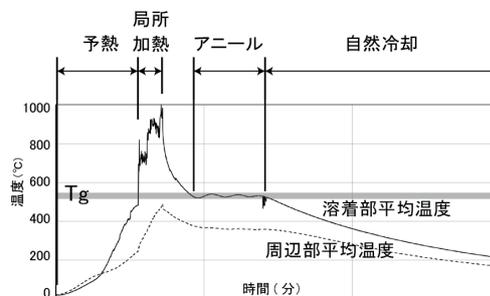


図 5. 温度勾配のついた溶着の温度履歴例
温度履歴では溶着部を 6 点の平均温度、周辺部を左右 3 点ずつの平均温度としている。

実験後、ひずみ検査器 LSM-7000LE の鋭敏色法を用いて残留ひずみ画像を取得し観察する。試験体外周部の応力方向は残留ひずみ画像の色を元に特定し、内部については割れの生じ方から応力の向きを推定する。

4. 実験結果

温度勾配条件を変え溶着に成功した試験体の実験結果を以下に示す。A は局所加熱時、B はアニール終了時である。温度勾配図と残留ひずみ画像の位置関係は上下で対応している。

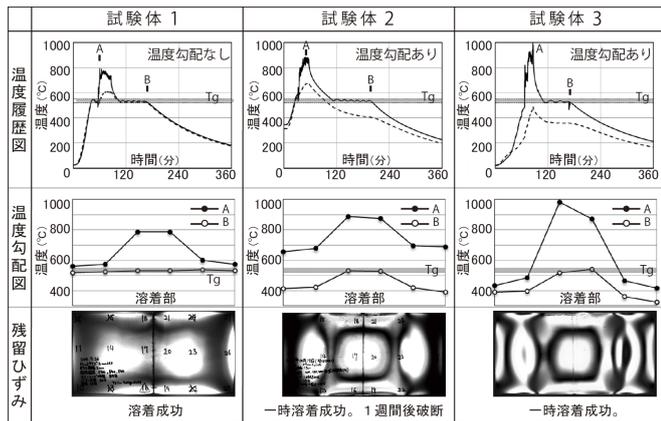


図 6. 実験結果一覧

4.1 既往研究と試験体 1 の比較

タンらの研究^[2]では加熱時に約 100°C の温度差で溶着に成功しているが試験体 1 は大きな温度差 (約 150°C) で成功した。

4.1 試験体 1 と試験体 2 の比較

図 8、図 9 は試験体 1、2 それぞれの残留ひずみ画像からトレースしたひずみ等高線図であり、黒いほどひずみが大きい。温度勾配をつけるとひずみ分布状態が異なっている。

4.2 試験体 2 と試験体 3 の比較

温度勾配を大きくして周辺部温度を T_g 未満に保つと、ひずみの値は増加しているがひずみ分布状態に大きな違いはなかった。

4.3 応力の向き

ガラスの割れの様子からひずみの大きい *1~3 の範囲の応力の向きを以下のように推定した。

- 図 7 の左図は試験体 2 の 1 週間後の割れであり、*1、*2 には溶着部が離れる向きに引張応力が働いている。
- 図 7 の右図は試験体 3 と同条件で割れた試験体である。*3 には図のような引張応力が働き、応力に垂直な向きに割れが曲がっていると推察できる。



図 7. 割れた試験体の応力の向き

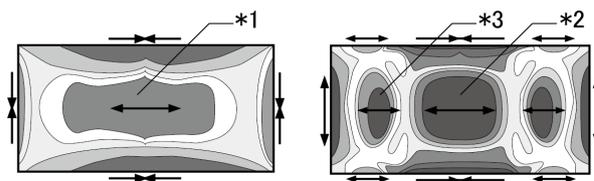


図 8. 試験体 1 のひずみ等高線図 図 9. 試験体 2 のひずみ等高線

5. 考察

5.1 応力分布モデル

温度勾配のない状態では図 10 の (i)、温度勾配のある状態では冷却すると図 11 の (ii) のような応力が発生する^[4]。この分布を元に図 12 は x と y 方向を (i)、図 13 は x 方向を (ii) を組み合わせて、y 方向を (i) を導いた。図 12、図 13 とともに x 方向の方が y 方向よりも応力が大きいと仮定し x と y 方向の応力を合成すると実験結果図 7、図 8 とよく対応している。

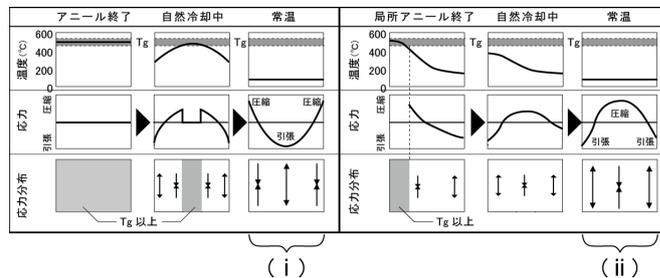


図 10. 温度勾配のない状態から冷却後で発生する応力^[4]

図 11. 温度勾配のある状態から冷却後で発生する応力^[4]

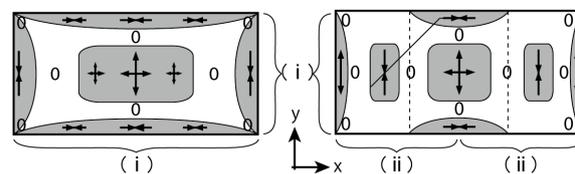


図 12. 温度勾配のない溶着の応力分布モデル

図 13. 温度勾配のある溶着の応力分布モデル

6. まとめ

本論は温度勾配をつけた局所アニールによってもひずみ緩和効果があり溶着できる可能性を示した。また、局所加熱の応力分布モデルを x と y 方向の応力の複合により導き、実験結果のひずみ等高線とよく対応することがわかった。溶着の際の残留ひずみを小さくするために、局所アニールによるひずみ緩和効果の検証が課題である。

[1]Skelly, M.J., Roby, R.J., An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires, Journal of Fire Protection Engineering 3.1(1991):25-34. [2]タンブンチュウ ほか、普通板ガラスの縁部の局所加熱による溶着性状 (2012) [3]山根正之 ほか、ガラス工学ハンドブック 朝倉書店、[4]岸井貫、ガラスの歪と歪の測定方法、ガラス工業新聞

*無所属

**東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授・博士 (工学)

*Non-Organization

**Assoc. Prof, Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.