

自動車ガラスの残留応力計測技術

株式会社 レーザー計測

はじめに

近年、自動車用のガラスはボディのスタイルの進化に伴い急速に発展することを余儀なくされている。フロントガラスは以前に比べて、大きな視界確保するために、ますます大きく、空気抵抗を減らすために角度が急になり、より曲面を描くようになってきている。この新しいデザインのフロントガラスを製作する時の適切な残留応力が、大きな問題になってきている。そこで、正確で効果的に残留応力を測定する装置が必要となってきた。ここに紹介する光弾性装置 (Grey-Field Polariscorp) は他の測定器では不可能であった、自動車用のガラスの残留応力を全視野で信頼性の高いデータを計測した。デモンストレーションにおいては非常に高い繰り返し再現性も示した。

フロントガラスのエッジ部から発生するクラックを防ぐために、エッジ部周辺に沿って圧縮応力を与えなければならない。圧縮応力部位に隣接して発生する残留引張応力は規定された範囲に収まらなければならない。もし規定の残留応力を超えた場合は、フロントガラスの装着時 (工場にて) や通常の使用時に加わる力によって、予想より早い損傷が発生し無償交換等のコストアップにつながる。フロントガラスを装着する前のエッジ部周辺の圧縮応力とその隣の残留引張応力の定量化は破損を防ぐための重要なステップである。

1. 光弾性について

1816年にイギリスのブリュースター (D. Brewster) がガラスを用いて光弾性を発見して以来、多くの研究者によって様々な改良や新たな方法の提案がなされてきた。ガラスを用いたのでは、光弾性感度も悪く、製作も困難であったが、20世紀にはいつから、コッカー (E.G. Coker) が実験のモデル材料としてセルロイドを用いることを提唱し工学面への応用のきっかけを作った。

さらに、1925~27年にかけて、辻二郎氏がセルロイドの5倍の光弾性感度をもつフェノライトを模型材料として取り入れ、単色光による写真フリンジ法を発表し、光弾性実験が容易にかつ正確になった。その後、応力凍結法、散乱光法などの三次元解析法が解明され、また、光弾性材料としてエポキシ樹脂やフタル酸ジアリル重合体 (DAP) などの重合系樹脂が開発されて、現在では、三次元応力状態も完全に解析しうる状態になってきている。

今日では、皮膜法による実物光塑性解析やモデル光塑性解析も行われるようになり、コンピュータと画像処理技術の著しい発展によってデジタル光弾性法として全域を自動解析する手法 (GFP シリーズ) も現れている。

2. 光弾性の原理

ガラス、エポキシ樹脂などの透明で均一な組織を持つ弾性体に外力を加えて応力を発生させると、結晶体で見られるような複屈折性があらわれる。本システムは、この性質を利用して応力、ひずみを測定する。右図のように光源から出た光は円偏光され測定対象物に入射される。この光は測定対象物を通過する間に、外力によって発生した主応力 σ_1 および σ_2 の方向で相対的に光の強さが変化する。その結果、測定対象物を透過した光は、楕円に偏光される。CCD カメラで偏光を捉え、楕円率を計算し、応力分布画像を得る。

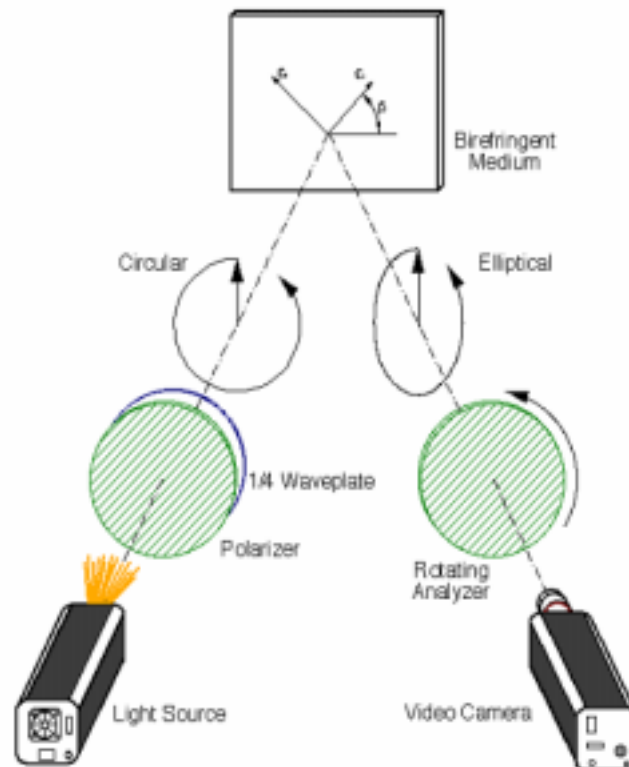


図 1

正確には光弾性で得られる応力情報は $(\sigma_1 - \sigma_2)$ などの主応力差と主応力方向で主応力 σ_1, σ_2 の各々の値を直接求めることは出来ない。しかし、構造物の縁（自由境界）では接線方向の応力のみが存在すること、また構造物の応力集中や欠陥などによる破壊はこの接線方向の応力によることが多いことを考えれば光弾性での応力分布状態により、構造上の欠陥や応力集中が一目で分かり、構造物の強度を評価できる。

3. 測定の方法

被測定物の状態によって右図のような三つの測定の形態がある。ガラスのような透明な物体は透過と反射で測定できる。金属のような不透明な物は、コーティングや専用のシートを貼り付けて計測する。

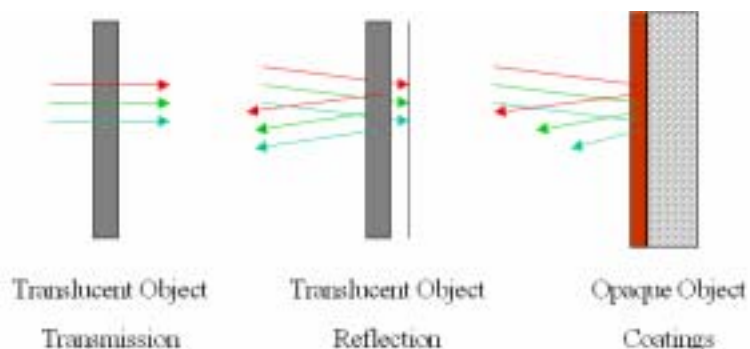


図 2

ガラス、エポキシ樹脂などの透明な弾性体は、円偏光した光を入射させ、透過する光を反対側で受光することで測定が可能である。透明でない測定物に対しては、変形によって複

屈折性を生じる光弾性樹脂を測定物の変形に追従して変形するように測定物表面に適用する。透明体の場合は、その厚みを不透明体はシートまたはコーティングの厚みと光弾性に関する係数を入力するとひずみ値や応力値が表示できる。

GFP では着色コーティング(Tint Coating)を使用することで、コーティングの厚さを補正する。

4. 光弾性装置の仕様と外観

モデル GFP1200

センサー部



図 3

イルミネータ



図 4

【システムパフォーマンス】

計測エリア：仕様による

空間分解能：400×300 ピクセル

計測感度：20 μ (1/100 フリンジオーダ)

フレームレート：15f/s (リアルタイム処理)

モデル エッジマスター

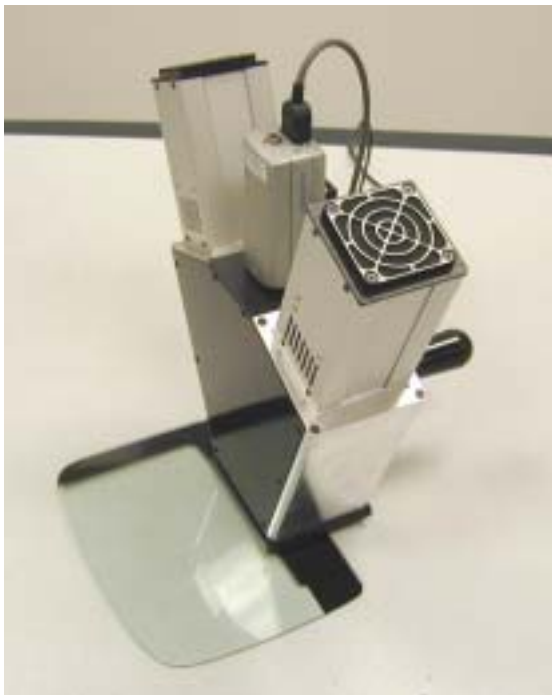


図 5

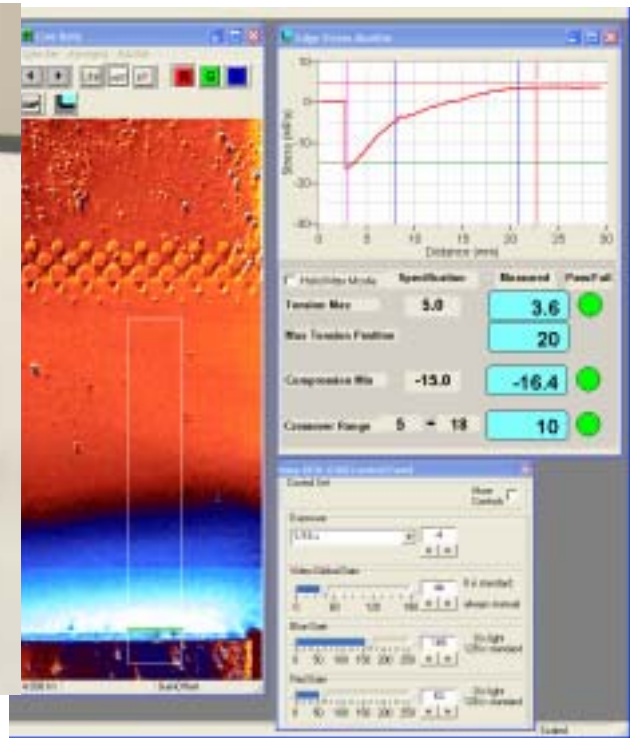


図 6

【システムパフォーマンス】

計測エリア：20×50 (mm)

計測感度：20 μ

フレームレート：15 f/s

寸法：350×300×100(mm)

重量：2.5kg

【ソフトウェア】

DELTA VISION ソフトウェア：

システムパラメータの制御、画像取得、ポスト処理機能。Windows Xp で動作

5. テスト手順

テスト用に選ばれたフロントガラスは清掃され、次にフロントガラスは力が加わらないように設置され計測を開始する。計測は非常に簡単で下図の様にフロントガラスをエッジマスターの計測用の溝に差し込むだけである。エッジマスターの両サイドの光源から円偏光の光がガラスに照射されフロントガラスのブラックバンドで反射し、応力に対応した楕円に偏光されセンサー部に到達する。計測結果はリアルタイムでモニター上に表示され、必要なデータは保存される。



図7 測定の様子

6. 測定結果

残留応力は予め決められたフロントガラスの 19 箇所を測定された。図 8 参照

4 つのコーナでは興味深い応力の分布が得られた。測定結果を表 1 に示す。今回のフロントガラスは 5.4mm の厚さで仕様は最小圧縮応力 10MPa、平均引張応力は 5.2MPa 以下、最大引張応力は 6.9MPa となっている。このほかにも、数種類以上のガラスで計測を行っている。

Location Number (see figure 2)	Edge Compression (MPa)	Residual Tension (MPa)
1	16.05	4.01
2	20.70	4.01
3	16.52	2.25
4	15.38	1.92
5	12.04	2.56
6	20.06	7.05
7	17.29	6.92
8	17.43	6.23
9	18.10	6.18
10	15.17	4.14
11	16.05	5.47
12	14.09	4.01
13	9.02	3.07
14	14.20	4.01
15	15.57	2.74
16	10.24	1.99
17	10.14	2.34
18	12.04	3.83
19	12.04	4.10
13/19 corner	17.33	2.83
14/9 corner	18.56	4.17
1/6 corner	5.43	3.34
5/10 corner	6.52	2.68
Average (1-19)	14.90	4.05
Maximum (1-19)	20.70	7.05

表1 フロントガラスの残留応力測定結果

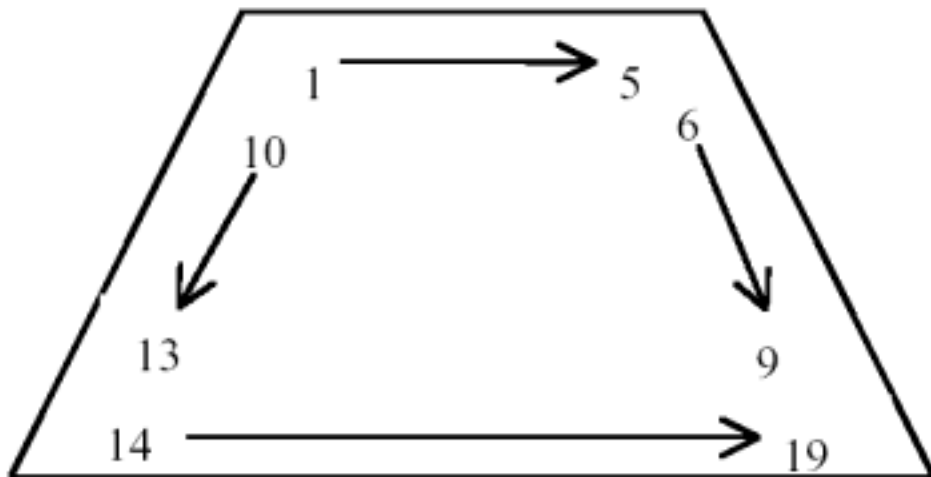


図8 測定場所

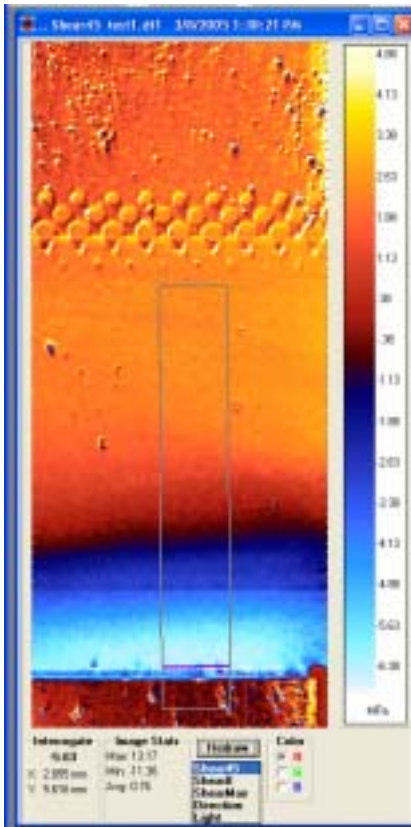


図 9

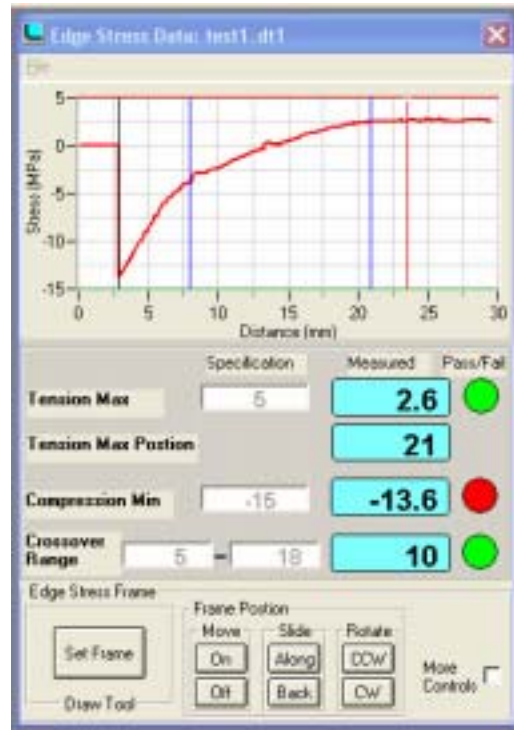


図 10 残留応力のプロファイル

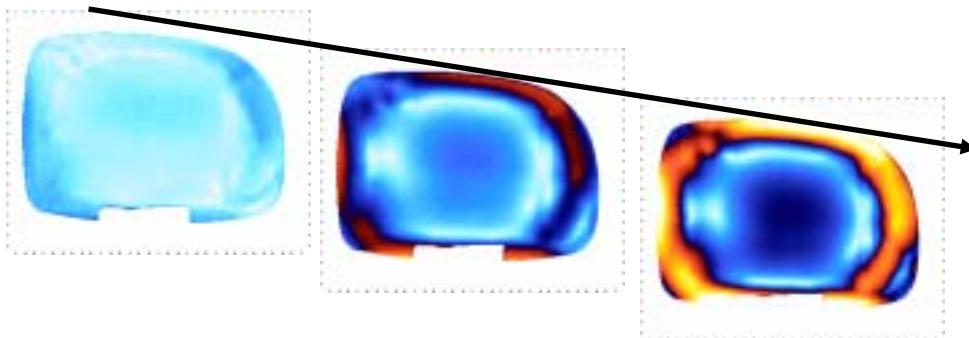
フロントガラスのエッジ部の残留応力の分布は図 10 のような特徴的な曲線になる。圧縮応力のピークから急激に引張応力へと移行しその後ガラスの中心に向かってゆっくりと応力の開放へと向かう。

7. 結論

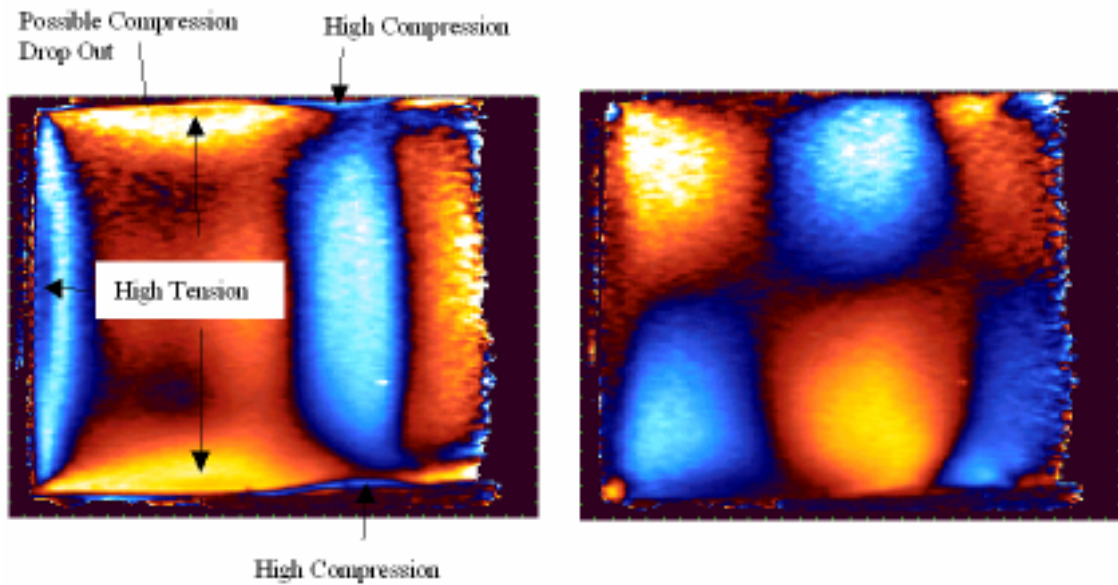
今回の測定により 2 箇所 (6 と 7) の仕様範囲外のポイントが判明した。他の測定ポイントは全て仕様内に収まっていた。この技術は非常に正確で信頼性があり測定者の技量に依存しないため、自動車用ガラス測定に有効である。

8. その他の測定例

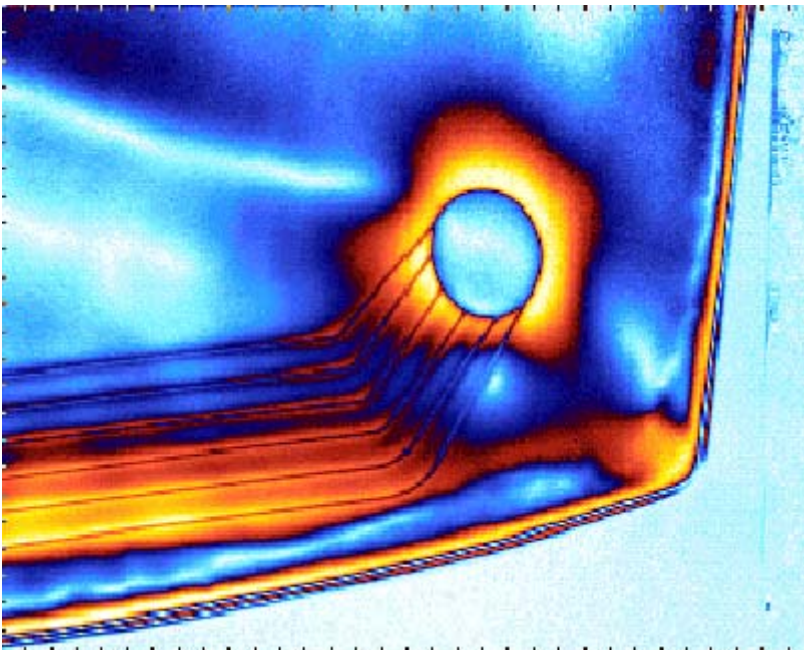
サイドミラーの温度変化による応力分



ガラスの残留応力の分布（約ガラスの半分エリア）



リアガラスの熱線部分の応力分布



以上

参考文献

Michael J. Zickel, Jon R. Lesniak, Daryl J. Trate, Ray LaBrecque, and Ken Harkins

"[Residual Stress Measurement of Automobile Windshields Using the Grey-field Polariscope](#)"

[SEM](#) Spring conference June 7-9 1999