

ガラス応力測定

技術部 多田 健次

キーワード 倍強度ガラス 硫化ニッケル 遅延破壊 光弾性 光路差 干渉縞 表面応力

概 要

建築三大素材である鋼・コンクリート・ガラスのうちジャストは今まで鋼とコンクリートについて業務の対象としてきた。ガラスについては顧客からの調査依頼がなく業務対象としてこなかったが、2009年11月に問い合わせがあり、同年12月からガラスの調査業務を行った。ここではガラス調査業務のうち「ガラス表面応力測定」についてその背景と技術的な面について解説する。

1. はじめに

2009年7月に東京丸の内のM商事ビル屋上からガラスが下部の歩道に落下し、その破片が通行人に当たるといふ傷害事故が発生した。このことは大々的に報道され社会問題になったことは記憶に新しく、所有者にとって事故の対応・対策は急を要する案件となった。また、所有するビルの外装ガラスについて、破損した場合に粉々となり落下する危険性の高い高強度のガラス（設計上倍強度ガラスであるが強度的に強化ガラスとなっているものも含む）の使用有無の調査が全国的に行われた。その結果をもとに倍強度ガラスが使用されている数棟のビルに対して代表ガラスの表面応力が測定された。その調査で外装全面に倍強度ガラスを使用している東京駅前の某ビルについて、強化ガラス域の強度を有する倍強度ガラスが何枚か使用されていることが判明した。所有者はその某ビルを施工した大手ゼネコンに対して全面的な調査をするよう指示し、某ビルの新築時鉄骨UTを請け負ったジャストにその調査の技術的な相談と依頼がきた。これがジャストのガラス調査業務を開始したきっかけである。

2. ガラスの製造

建築に使用されている板ガラスの製造について簡単に述べる。ガラスの主原料は珪砂（ SiO_2 ）で、他成分としては熔融点降下目的にソーダ灰（ Na_2O ）、石灰（ CaO ）を加えられている。また着色目的のために酸化ニッケルや酸化コバルトが加えられたり、ガラス屑・破片（カレット）も添加される。これら原料を1600℃以上の熔融炉に投入し、高温低粘度になったガラスをいくつかの工程で成型し洗浄、乾燥して目的の形状・大きさに切断して板ガラスは完成する。成型の方法にはいくつかあるが、建築で使用する板ガラスの大部分が『フロート法』と呼ばれる方法で製造されている。建築で使用する板ガラスが一般的に『フロートガラス』と言われているのはこの成形法からである。

フロート法とは、高温低粘度となったガラスを連続的に熔融錫（ Sn ）の表面に浮かべ流し込み、高精度に管理された温度と時間で均一な厚みと幅のガラスに成形する成形法である。熔融錫が使用される理由は、錫がガラスより比重が大きく融点がガラスより低い金属のためである。このフロート法は1959年にイギリスのピルキントンプラザーズ社によって開発された成形法である。ピルキントンは世界最大のガラスメーカーであるが、今は日本板硝子の傘下になっている。

成形工程と乾燥・切断・洗浄工程の間に強度・遮光性・透明性・断熱性などの機能を持たせるための工程が入る場合があるが、応力測定と関連のある強化処理工程を以下にのべる。ガラスは脆い、割れやすいといった性質が一般的な見識であるが、ガラスは理論上他の建築素材の中で一番強度（引張り強さ）がある素材である。脆い、割れやすい性質は製造中にできるミクロな傷のため、見かけ上の耐力が落ちてしまうためである。この耐力低下を補いさらに耐力を高める為に、物理強化処理や化学強化処理を施す。強度を要求する板ガラスのうち建築で使用されているものの大部分は物理強化処理が採用されている。この物理強化処理とは、錫浴槽より流れてくる高温度のガラスの表面側と裏面側に還元ガスを吹きつけ急冷し、表面に圧縮応力、内部に引張り応力を残留させる処理である。

一方、化学強化処理とはガラスをカリ塩の溶液に浸しガラス表面でガラス中の Na^+ と塩中の K^+ のイオン交換を生じさせ、ガラス表面に圧縮応力を発生させる方法である。 Na^+ と K^+ のイオン半径を比較すると K^+ が大きいため、元々 Na^+ が位置していたところにイオン半径が大きい K^+ が置換するため、ガラス表面の体積が膨張する事になる。それをガラスの内部が抵抗しようとするため表層に圧縮応力、内部に引張り応力が残存することとなる。

3. ガラスの破壊

ガラスは、コンクリートと同じく圧縮応力に強く引張り応力には弱い性質を有する素材である。そのガラスに強化処理を施し表面に圧縮応力を残存させることで部材耐力を高くしている。その応力状態は、ガラス断面で見ると図1のようにガラス厚の約20%の深さまでに圧縮応力が、それ以外の内部にそれと釣り合う大きさで引張り応力が分布している。仮にガラス表面に傷（クラック）があったとする。クラックの深さが図2左にあるように圧縮応力域までの深さであればクラックはそれ以上進展しない。しかし何らかの応力（叩いたり、熱応力など）が加わり、表面に残存している圧縮応力が小さくなってクラックが進展し、進展したクラックの先端が引張り応力の領域に達すると、その瞬間に一気にクラックが進展し破壊する。これがガラスが割れる現象のメカニズムである。

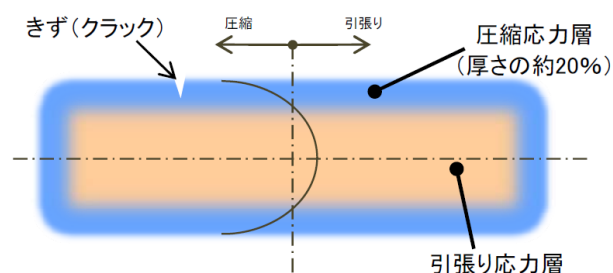


図1. ガラス断面応力状態図

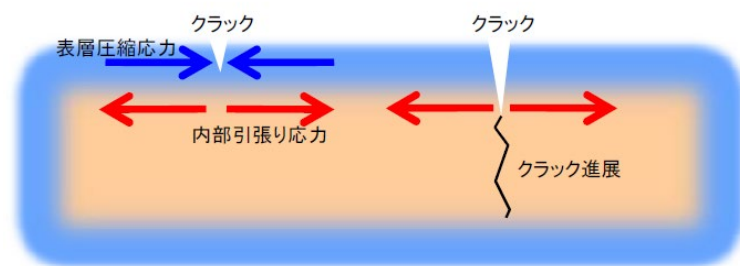


図2. ガラス破壊解説図

ガラスが故意でなく自然に破壊する現象（『自爆』または遅延破壊）が昔から報告されているが、次にこの『自爆』のメカニズムについて述べる。

ガラスの製造過程で硫化ニッケル（ NiS ）が混入することがある。この硫化ニッケルはある温度で相転移する物質でガラスが溶融している高温では α 相、常温では β 相に相転移し安定する。 α 相から β 相へと相転移すると体積が約4%増加する。通常ではこの α 相はガラスの製造過程で β 相へと相転移するが、まれに α 相が残存する場合がある。ガラスメーカーはこの残存 α 硫化ニッケルを β 相に転移させるため仕上げ処理前にヒートソーク処理（時間を掛けて300℃まで加熱保持し常温まで徐冷する）を施すのだが、この処理をしていてもごく稀に α 硫化ニッケルが残ることがある。この残存した α 硫化ニッケルは施工後の環境温度変化によって数週間から数年を経て β 硫化ニッケルへと相転移し、その際の体積膨張により微細なクラックが発生する。この α 硫化ニッケルが引張り応力層にあった場合、発生した微細なクラックによって応力解放が起き自爆することとなる。この硫化ニッケルは大きさも様々だが、残存するようなものは150 μm 程度である。これを検出することは可能であるが費用対効果の問題で現実にはノーチェックの状態ではガラスは出荷されているのが現状である。高層ビルに使用されているガラスが以上のような原因で自爆するようなことがあれば、その破片が落下し事故となる。

最近の高層ビルの外装ガラスにはその設計上の要求から『倍強度ガラス』が使用されるようになってきた。この倍強度ガラスとは一般的な板ガラス（通称フロートガラス）の2～3倍の耐力を持たせたガラスで、内在圧縮応力がJISに規定されている。なお強化ガラスはJISで規格されているが、応力に関する規定はない。一般的に市場にある強化ガラスの強度はフロートガラスの約3倍以上の強度を持っている。これら3種類（フロートガラス、倍強度ガラス、強化ガラス）のガラスの割れ方（破片の性状）は大きく異なり、その破壊性状と破片の形状写真を表1に示す。

表1. ガラスの破壊性状と破片形状

	フロートガラス	倍強度ガラス	強化ガラス
破壊性状	 破壊線は数本～数十本	 破壊線は数本程度	 破壊線は無数で交差
破片	 直線的で鋭利な形状	 若干丸みをおびた形状	 5 mm程度の小さな形状

高層ビルに使用されているガラスで問題となるのは破壊したときの性状と破片の形状である。強化ガラスは表1右に示すように破片が小さく破壊したときには落下してしまう。また、フロートガラスの場合

合は破片が鋭利なものとなり落下したときの危険度は非常に高い（表 1 左）。倍強度ガラスは破壊線が数本で複雑に交わらないのでブロックは大きく、サッシュ枠で押さえつけられていれば、すぐには落下しない（表 1 中央）。

設計要求は表 1 中央にある破壊性状であるが、残留圧縮応力が高すぎた場合には表 1 右の強化ガラスの破壊性状となり破片は小さい。このため高い位置から落下すると危険な状態になる。従って、倍強度ガラスが使用されている高層ビルではその残留圧縮応力値を管理・確認する事が必要となってくる。この強度は *JIS* にも規定されている数値でもあり、表面応力を測定することで間接的に強度を管理・確認することができる。

4. ガラスの表面応力測定

ガラス表面応力の測定装置は現在 2 種類存在しており、ジャストが使用しているガラス表面応力装置は図 3 に示すもので名称は『バビネ型ガラス表面応力測定装置』という。この装置は *JIS* 規格に記載されている応力測定法とは異なるが、その測定法よりも格段に測定精度が高い方法を用いている。残る測定法がその *JIS* に記載されている測定法で『示差屈折計』と呼ばれる装置である。どちらも基本原理は『光弾性』である。この光弾性というガラスの性質について少し解説しておく。

光弾性とは、光（電磁場）がある大きさ（ σ ）の応力（主応力方向 x 軸、それと直角方向 y 軸）が存在している物質中を伝播すると、 x 軸偏光と y 軸偏光の光速度に差が生じる現象のことであり、それらの差は作用している応力に比例する。このことを光弾性の法則またはブリュースターの法則という。速度差がある状況下で光が z 軸方向に微小距離 dz 進むことで生じる光路差を dR とすると、

$$dR = C \cdot Kc \cdot |\sigma_x - \sigma_y| \cdot dz \quad \dots \textcircled{1}$$

なる関係がブリュースターにより実験的に導き出された。 C は任意の定数、 Kc は物質固有の物理定数で光弾性常数という。

図 4 は xz 平面に応力が作用しているガラス中に斜めから 45 度直線偏光を入射させ表面 z 軸方向に光を伝播させた状況図である。光は横波であるから入射した直線偏光は x 軸と y 軸に成分分解できる。主応力軸は x , y , z 軸であるが、表面なので y 成分はゼロとなる。このことから x 軸と y 軸の成分偏光では光弾性の原理により速度差が生じ、それによって光路差が発生する。この光路差は z 軸方



図 3. ガラス表面応力測定装置

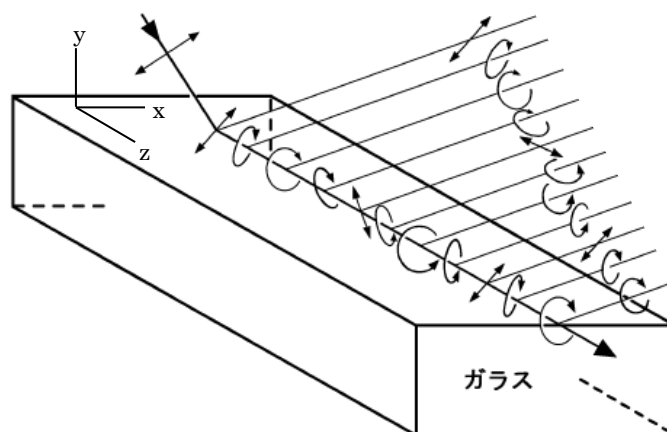


図 4. 光弾性による偏光モード変化

向に進むにつれて大きくなり、それによって（直線偏光）→（楕円偏光）→（円偏光）→（楕円偏光）→（入射光と偏光面が直交する直線偏光）→（楕円偏光）→（円偏光）→（楕円偏光）→（入射光と偏光面が平行な直線偏光）という変化を繰り返す（図4参照）。このモードは屈折射出光にそのまま保持されているので、 z 軸方向に光が進んだ距離とその位置での偏光モードを把握できれば光路差も計算でき表面応力を得ることができる。

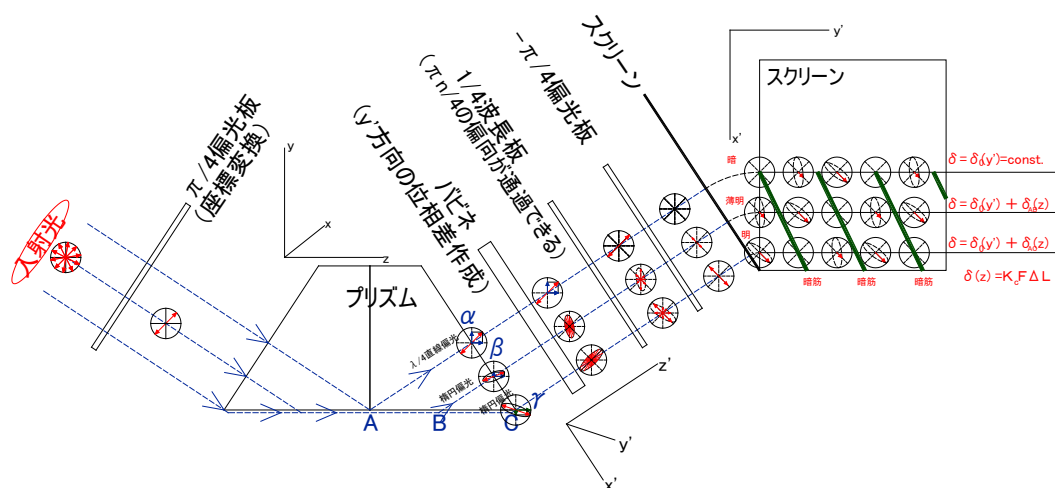


図5．バビネ型ガラス表面応力測定装置の概念図

図5にバビネ型ガラス表面応力測定装置の概念図を示す。構成は $\pi/4$ 偏光板、プリズム、バビネ、 $1/4$ 波長板と観察のためのスクリーンとなっている。入射光には単色レーザー光を使用し、その光を $\pi/4$ 偏光板に通過させ位相 $\pi/4$ の直線偏光を生成、その光をプリズムでガラスに入射させる。ここで「2. ガラスの製造」のところで述べたように、ガラスは製造時に熔融錫に接している側のガラス表面では錫がガラス中に溶け込み、表面に急激な屈折勾配を生成している。この急激な屈折率勾配がある表面近傍では『光導波効果』という現象が起き、光が表面近傍を伝播する性質を持つようになる。この錫が溶け込んだ層が光ファイバーのごとく光を離散的に伝播する。このため測定の制約である、バビネ型ガラス表面応力測定装置はガラス製造時に錫に接していた面（通称すず面、業界用語でボトム面）の表面応力しか測定できないことが理解できる。

話を戻して、光導波効果により表面を伝播し再びプリズムにて屈折させ取り出し、バビネにより y' 方向に一定勾配の光路差 δ_0 を加え $1/4$ 波長板で直線偏光に変換し、さらに $-\pi/4$ 偏光板を通過させ観察する。もう少し各段階で詳しく見てみると、位相 $\pi/4$ の直線偏光がガラス表面 xz 面に対して斜めに入射すると、光導波効果によりガラス表面を伝播する。ここで、入射光は主応力軸 x と y 軸とに成分分解できる。この両者偏光成分間には光弾性効果により速度差が生じる。点Aで取り出された射出光 α はガラス中を全く伝播していないので、2つの偏光成分間には速度差は生じない。つまり光路差はゼロなので位相 $\pi/4$ の直線偏光となる。また、点Bでの射出光 β は距離ABを伝播しているので、その分2つの偏光成分には光路差 δ_{AB} が生じたため射出光は楕円偏光となる。点Cからの射出光 γ も同じで光路差 δ_{AC} のために楕円偏光となる。次にバビネという水晶くさび（ y' 方向にくさび型を配置する）に通過させ、 y' 方向に一定勾配の光路差を加える。このままでは色々なモードの射出光となっているので、 $1/4$ 波長板に通過させ楕円偏光や円偏光を直線偏光に変換する。そして最後に入射光の位相と真反対の位相板（ $-\pi/4$ 偏光板）に通過させ明暗條を生成させる。この明暗條は y' 軸方向に無数とあるが、 y' 軸はバビネにより一定勾

配の光路差が加えられているので、位置 y' により明暗條がずれる。観察すると斜めに黒い筋が何本かあるように合成され干渉縞が観察できる。このことを表 2 にわかりやすく示す。

表 2. 干渉縞の生成解説

	無 応 力 状 態	中 程 度 の 応 力 状 態	高 応 力 状 態
観 察 画 面			
解 説	x' 軸の光路差変化がなく、y' 軸はバビネによる光路差変化のみ。 最終的に通過してくるのは位相が $-\pi/4$ の偏光成分のみだから、暗條となるのは位相が $\pi/4$ の部分となる。 無応力のガラスを通過してきた光は光路差を持たないままバビネを通過する。最終的な光路差はそれらの合計となるので、バビネによる光路差のみとなる。従って、傾斜のない黒い筋がバビネによる光路差が $\lambda/4$ の部分に観察される。	x' 軸の光路差変化が少なく（暗條間隔が長い）、y' 軸はバビネによる光路差変化のみ。 x' 軸は中程度の応力があるガラスを通過してきた光の光路差変化があるので、その分黒い筋がずれたように観察される。	x' 軸の光路差変化が激しく（暗條間隔が短い）、y' 軸はバビネによる光路差変化のみ。 x' 軸は高い応力があるガラスを通過してきた光の光路差変化があるので、その分黒い筋がずれたように観察される。この場合中程度の応力状態に観察される黒い筋の傾きより大きく傾いた黒い筋が観察される。

次にバビネの役割について詳しく述べる。射出光をバビネに通過させない場合はガラス表面の x 方向は光の進行方向 (z 方向) に直角なので光路差が生じず z 方向のみの光路差を保持して偏光板を通過することになる。そのとき観察画面には図 6 に示すような、応力に応じたある一定間隔の暗條が観察される。JIS に記載されている『示差屈折計』はこの間隔を、入射光の暗條間隔と比較しその差から応力を算出する測定方法である。例えば 100MPa の圧縮応力が残存している光弾性常数 26.5(nm/cm/MPa) のガラス中を 1cm 進んだ光を観察した場合その差は 1.816nm と非常に小さい。このため示差屈折計は小型の望遠鏡が装備されていて、約 8000 倍に拡大し観察するような仕組みとなっている。それでも、その差は 0.015mm と小さく、示差屈折計での

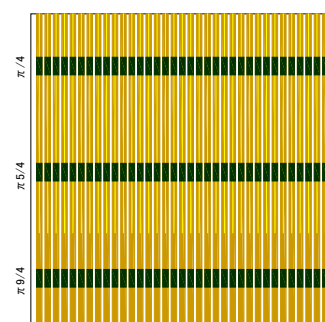


図 6. バビネなしの場合の暗條

測定誤差は非常に大きい事が理解できる。その誤差は装置によるが、およそ $\pm 30\text{MPa}$ である。現行 *JIS* ではこの示差屈折計を使用しガラスの応力を測定するようにと規定し、倍強度ガラスの残留圧縮応力値が 20MPa 以上 60MPa 以下と規定している中で、測定誤差が規定範囲に近い示差屈折計を使用するというのは疑問である。

バビネ型ガラス表面応力測定装置はバビネによって光の進行方向と直角方向に一定勾配の光路差を加えることによって示差屈折計の様な 1 次元的な表現を傾斜暗條模様（干涉縞模様）という 2 次元的な表現にしている。この干涉縞の傾きの意味を図 7 に示す。光弾性の法則式①より得られる次式

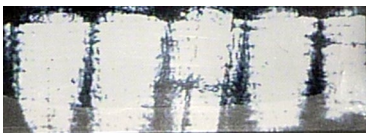
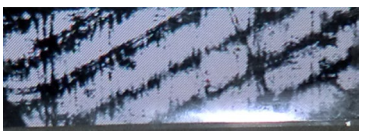
$$|\sigma_x - \sigma_y| = \frac{1}{C \cdot K_c} \cdot \frac{dR}{dz}$$

について、 σ_y はゼロである事と C は任意の定数であることより上式は以下ようになる。

$$\sigma_x = \frac{C}{K_c} \cdot \tan \phi \quad \dots \textcircled{2}$$

干涉縞の角度 ϕ を測定すればガラス表面に作用している応力が②式から算出できる。これがバビネ型ガラス表面応力測定装置の仕組みであり、測定誤差は測定値の $\pm 10\%$ 以内となる。倍強度ガラス範囲の応力であると最大で $\pm 6\text{MPa}$ の誤差で測定が可能ということになり、*JIS*の示差屈折計と比較してかなり精度が高くガラス表面応力を測定できることが理解できる。表 3 に実際のガラスをバビネ型ガラス表面応力測定装置で応力を測定する時に得られる干涉縞の傾斜を示す。

表 3. バビネ型ガラス表面応力測定装置による各種ガラス応力測定（干涉縞の傾斜）

フロートガラス	倍強度ガラス	強化ガラス
		
傾斜角度 = 6.5° 圧縮応力値 = 6.3MPa	傾斜角度 = 40.5° 圧縮応力値 = 47.0MPa	傾斜角度 = 62.0° 圧縮応力値 = 103.5MPa

実際の測定方法は、干涉縞が明瞭に見えるよう各所調整し、干涉縞と標線（図 8 参照）が平行となるように装置に付いている標線角度調整ダイヤルを回転させる。この時の標線角度を角度目盛盤から読み取り、その角度から②式により応力を算出（現場では換算表を使用）している。干涉縞はガラスやプリズムの表面状態、および錫の熔融拡散状態によって明瞭に出ない場合がある。

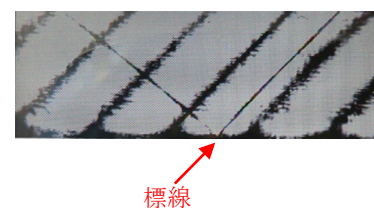


図 8. 標線

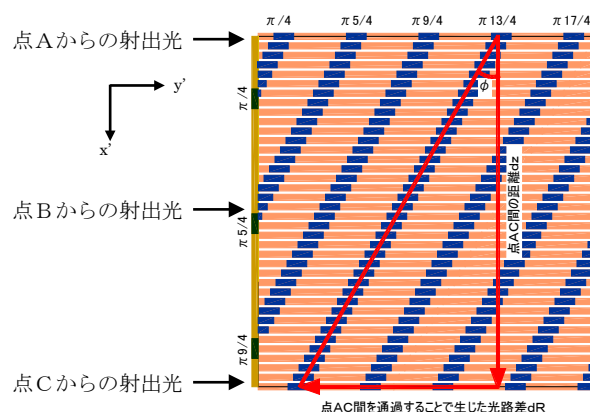


図 7. 干涉縞の傾斜の意味

5. あとがき

ガラスは鉄骨と異なり少品種多量生産品であり、メーカー内およびガラス業界内ではガラス個々の品質トレーサビリティがなされていないのが現状である。そういった状況下で今まで幾度となくガラスの自爆事故が発生している。ジャストが 2009 年からガラス調査で携わったビルでも既に今年だけで 4 件も自爆事故が発生している。したがって、今後はガラスも鉄骨と同じように個々の品質（表面応力もそのひとつ）を管理する動きとなるものと考えられる。ジャストで全面調査した東京駅前の某ビルのガラスメーカーでは今回の反省として、個々の品質を管理する動きをしており、この動向を見越して、ジャストでは鉄骨と同じようにガラスの現場受入検査ができるように今から技術の蓄積をしていきたいと考えている。現在ジャストがガラス調査目的で所有している測定機器は以下の表の通りである。

用途目的	残存する応力測定		歪みの存在確認 強化処理の有無確認	硝子構成 硝子厚測定 Low-e 面確認
装置名称	バビネ型ガラス 表面応力測定装置	ガラス断面応力計	携帯型反射歪計	硝子厚計
台 数	2	1	2	2

上の表を見ても分かるように、ガラスの表面応力だけでなく断面の応力分布も測定できる装置を保有している。また、応力の詳細数値は測定できないが強化処理が施してあるかないかの確認を簡単にできる歪計も、そしてガラスを構成している各層厚を測定する測定装置も保有しており、これらの装置を駆使しガラス調査に関する様々なニーズに応えられるようになっている。

この稿では光を使ったガラス表面応力測定について述べてきたが、その技術的な側面を見るにつれて『音－鋼材、コンクリート』と『光－ガラス』によく似た言葉や物理的特徴があることに気づくことができた。光弾性－音弾性、光路差－到達時間差、遅延破壊－遅れ割れ、偏光－S V・H波・・・など光も音も同じ波としての性質を持っているので似た性質を持っている事も理解できる。それでは、ガラスの表面応力測定と同じように鋼材の表面応力も測定できるのではないかと推理できる。つまり表面伝播光が『光弾性』により偏光成分間に速度差が生じるように、表面S H・S V波間に『音弾性』よりその速度差（時間差）が生じ、その時間差を測定し残留応力を算出できるということである。この理論は昔からあったが時間差を精密に測定する技術が著しく向上してきたためここ最近実現されつつある。また、鋼材にマイクロ波を入射しその導波効果を利用して鋼材表面にマイクロ波を伝播させ、そこに作用している応力により発生する光路差を測定ないしは干渉計にて観察することで応力を測定できるのではないかと想像もできる。これはまだ実現されていないようであるが・・・

話は少し逸れるが、地震学では地震波を分析（逆解析）し、震源域や震央、その大きさ、どのような場所を伝播してきたのかといった情報を得る技術がある。実際に過去の地震波データからその逆解析により将来起こる地震の震源地、規模、ある程度の時期まで事前に予測して的中させた事例もある。同じ様なことを建築物へ適応できないか・・・

このように他の分野には色々とヒントが隠れているので、何でも興味を持って知る考える事が大切だと思う。

