

第2回(平成25年度第2回)CRCフォーラム(平成25年10月17日(木)開催)  
「表面に機能を与える高付加価値製造技術」

# 機能表面の応力評価

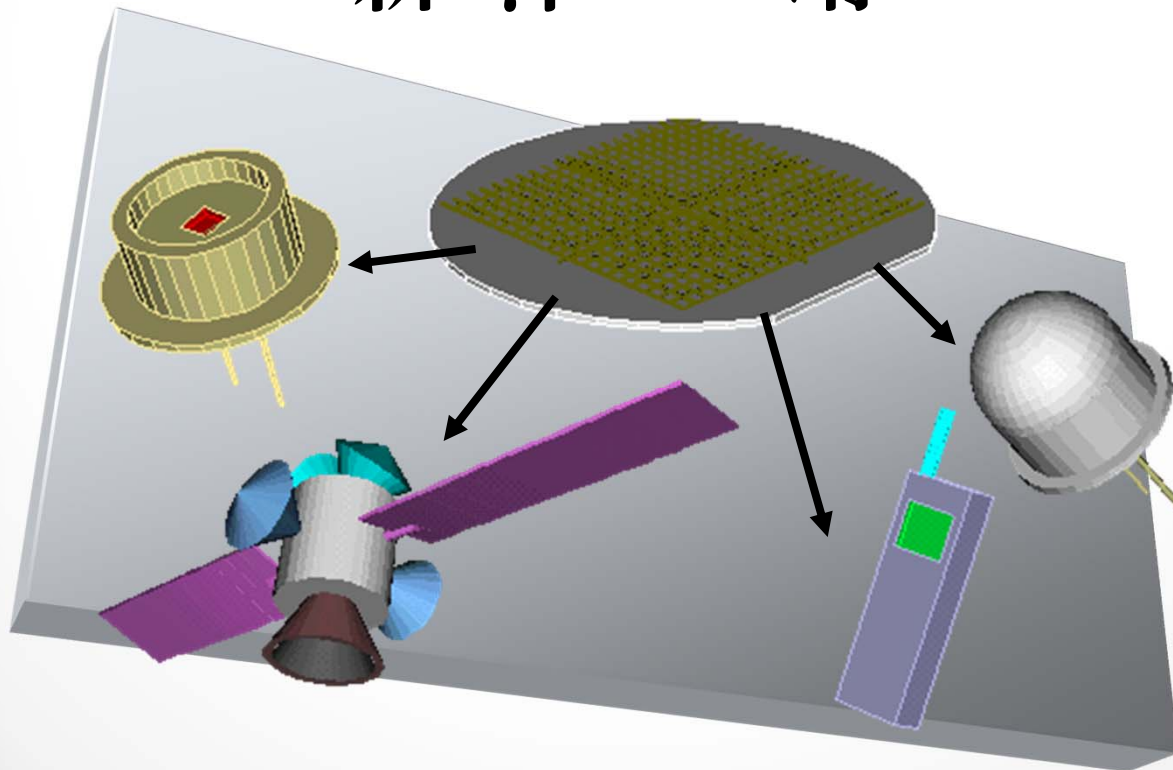
新津 靖 教授

情報環境学部情報環境学科

**TDU**  
東京電機大学

# 機能表面の応力評価

東京電機大学 情報環境学部  
新津 靖



# 材料表面と応力について

- 材料の強度はものづくりにとってもっとも重要な機能である。構造物の強度評価は、材料の応力評価と関連が高く、特に構造物の表面付近の応力がその強度を決めるといっても過言ではない。
- 表面の性質がその機能に大きな影響をおよぼす。化学反応はもちろんであるが、破壊や損傷といった現象も基本的に材料表面から発生することが多く、材料表面の応力やひずみの評価については多くの研究が成されてきている。

# 応力とは、応力は測れるのか(答えはNo)

応力あるいは応力場を直接測定することはほとんどの場合できない。応力を測るということは、応力によって生じた変形（ひずみや変位）や物性の変化を測り、間接的に「応力」を見積もっている。

応力は「力の流れ」、運動量流量である。水の流れのように濺んだり、集中したりする。ただし、水の流れよりも変化が激しい。

応力は状態量である。ひずみは履歴量である。ひずみと応力が一対一の関係にあるのは弾性状態のときである。

# 応力計測の光学的手法について

- 光学的手法のメリット

- 高速計測の可能性

- 分布計測・全視野計測の可能性

- 偏光や旋光性の利用の可能性

- レーザー（コヒーレント）光の利用

- .....

- 光学的手法の分類

- 偏光計測を利用した光弾性挙動(5)

- ラマン分光計測を利用したフォトン・フォノン相互作用(7)

- スペックル干渉計による表面のひずみ計測

- モアレ縞を用いた表面のひずみ計測

- 画像相関法を用いた表面のひずみ計測(11)

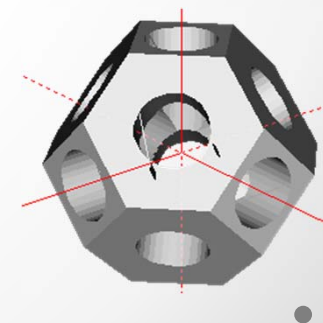
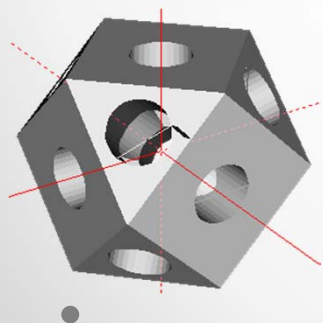
- 近接場光を利用した接触面応力の計測法(2)・・・その他...

- 

-

# 自己紹介

- 新津 靖 (56歳) 1956年 (昭和31年) 生 (本籍：山梨)
- 1979年 東京工業大学工学部機械物理工学科卒業
- 1981年 同大総合理工学研究科修士修了
- 1981年～1991年4月 同大 精密工学研究所 助手
- 1988年 工学博士
- 1990年 ミュンヘン工科大学研究員, レンスレア工科大学研究員
- 1991年～1997年 東京電機大学工学部機械工学科助教授
- 1997年～2000年 東京電機大学工学部機械工学科教授
- 2000年～ 東京電機大学情報環境学部教授
- 2001年 ネプラス株式会社 顧問
- 2002年～ ネプラス株式会社 代表取締役



# 研究経歴（計測関係）

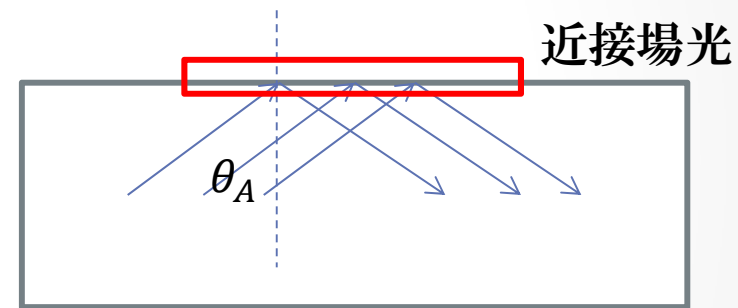
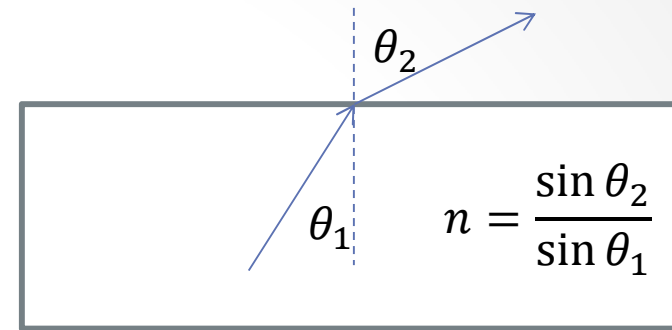
- (1) 高温複合変位計測装置
- (2) 画像処理を用いた接触面圧力分布計測システム
- (3) 画像処理を用いた極低温高精度変位計測システムの開発
- (4) 光切断法を用いた三次元全周形状計測システムの開発
- (5) レーザ光弾性法の開発
- (6) 赤外線レーザ光弾性法によるシリコンおよびGaAsウエハの残留応力評価法の確立
- (7) レーザーラマン分光法によるシリコン単結晶の応力評価
- (8) 教育用3次元ソリッドモデラーの開発と教育への実践
- (9) 裸眼立体ディスプレイ用のソフトウェア開発
- (10) 高精度3次元計測システムの開発
- (11) 画像相関法を用いた高精度変位計測およびひずみ計測

# 近接場光(エバネッセント光)

全反射は透過媒体の境界の屈折率差により起きる現象

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}}$$

ここで $\mu$ 、 $\epsilon$ は材質の透磁率、誘電率  
 $\mu_0$ 、 $\epsilon_0$ は真空の透磁率、誘電率



強力な近接場光の発生方法



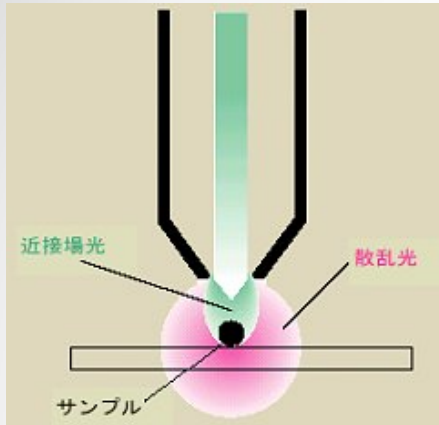
全反射条件 水 :  $\theta_A > 48^\circ$   
ガラス :  $\theta_A > 42^\circ$

ファイバーの先端を尖らすと強い近接場光の集中が得られる

強い近接場光の発生している先端部分は高い電磁場  
にあり、原子・分子の捕捉などに応用される。

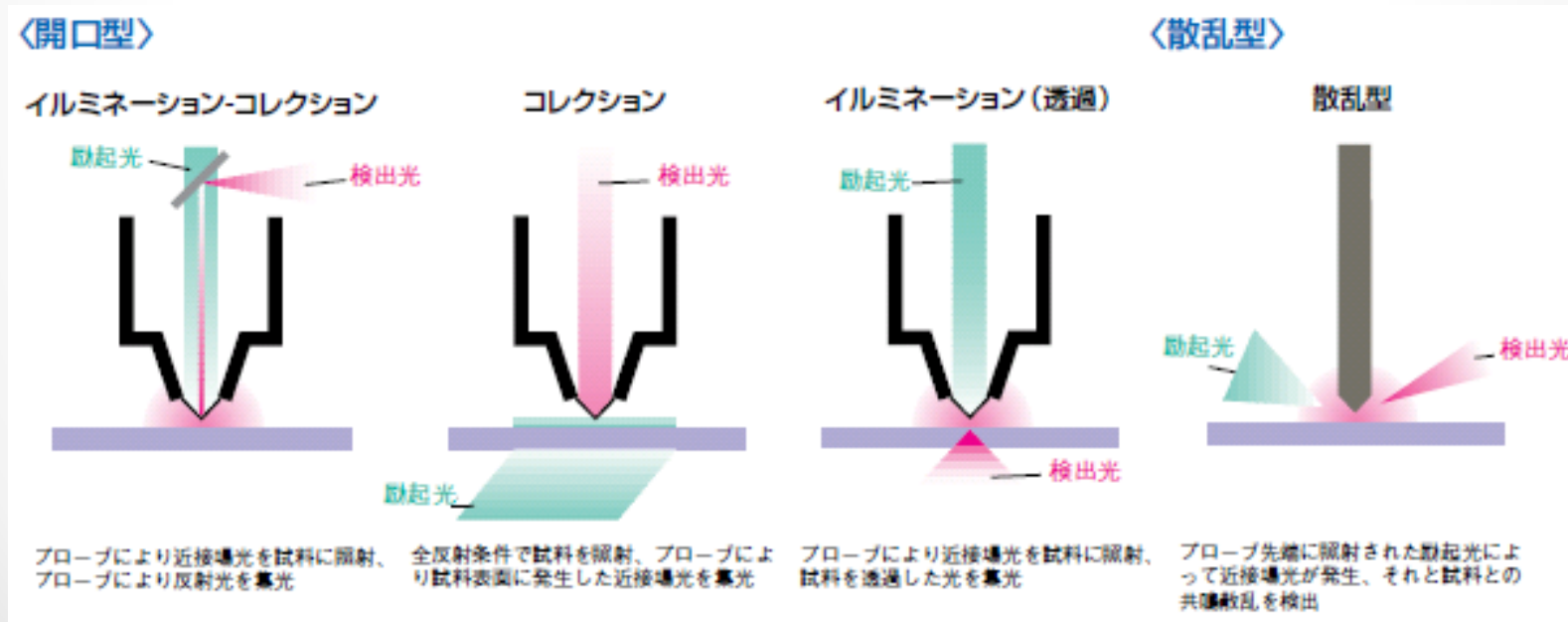


# 近接場光(エバネッセント光)



近接場光の利用は通常、ガラス先端(プローブ)に強力な近接場光を作り、試料などに接近させて発光させる。分解能はプローブの先端のサイズに依存し、波長よりも細かな分析や操作が可能となる。

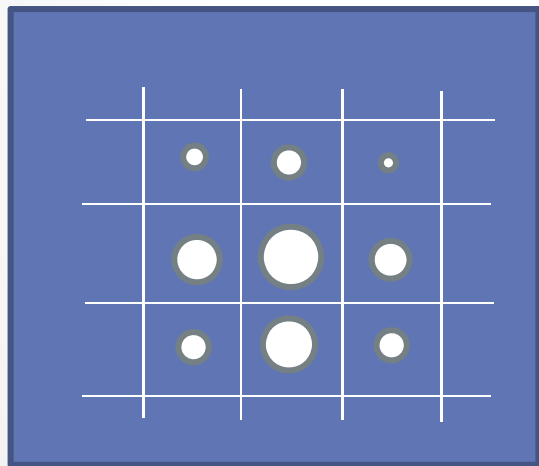
応力計測については複屈折近接場光学顕微鏡の開発が進められている。



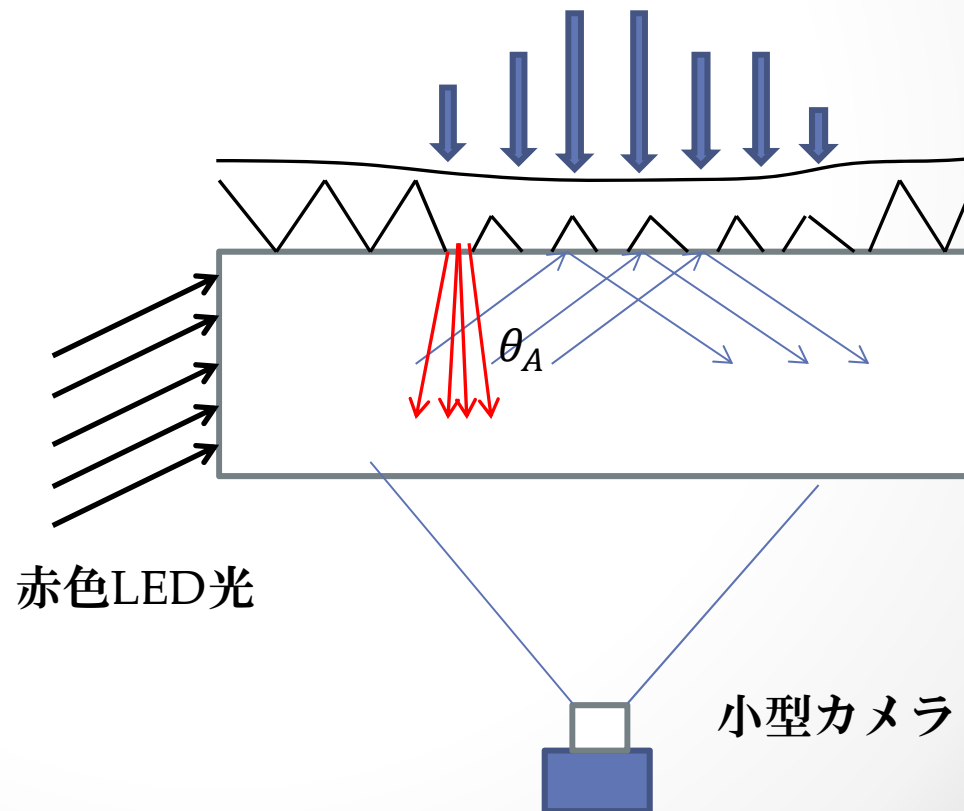
日本分光株式会社のホームページより

# 接触面応力計測(Tactile Stress)

ガラス表面と空気層などの境界面に近接場光がある場合は、光は漏れてこないが、境界面に全反射条件を乱すような刺激が加えられると、光が漏れてくる。この原理を利用して、コーン形状のゴムの変形量を光学的な像に変換し、接触面圧力分布を画像として得る方法である。

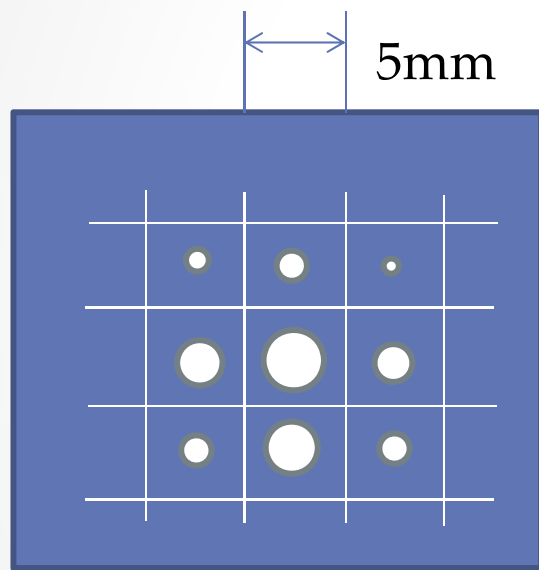


カメラ映像 (一部分)

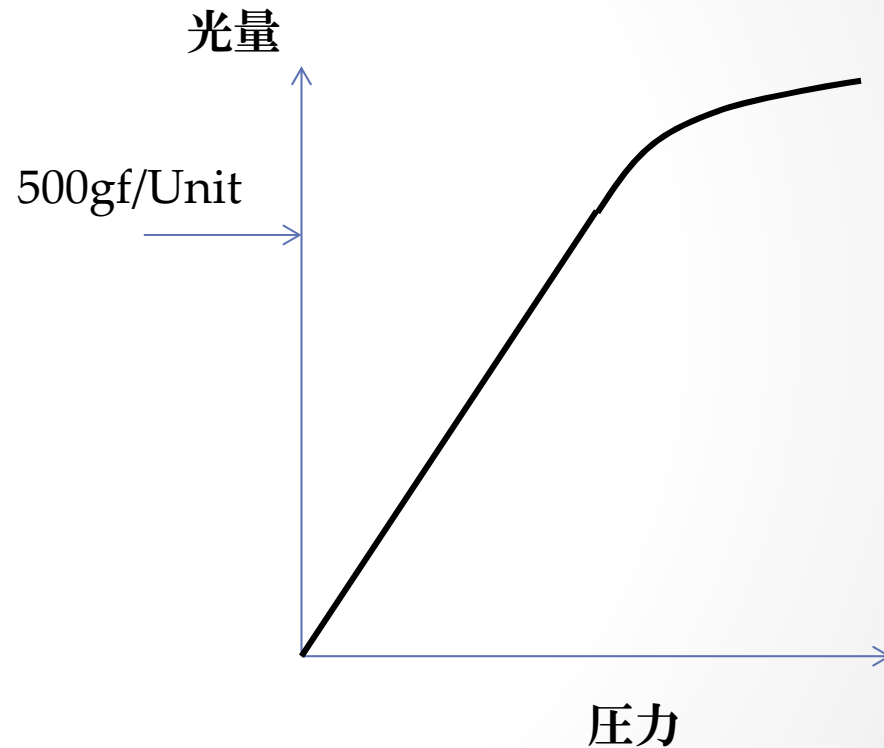


# 画像処理を用いた接触面圧力分布計測

特徴：感度が高い(1gf/unit程度可能)  
画像計測として高速計測が可能  
構造がシンプル



カメラ映像 (一部分)



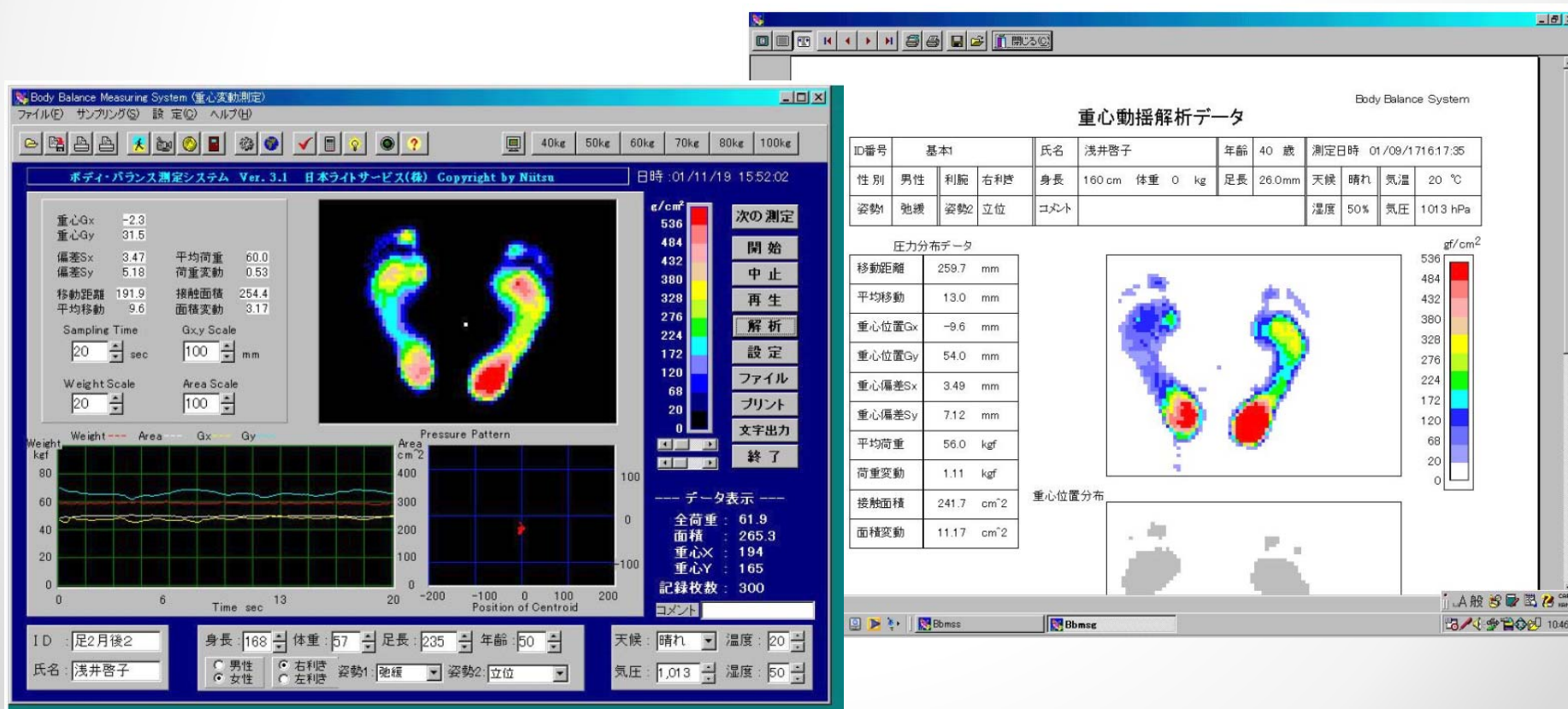
5×5mm<sup>2</sup>のマス(Unit)の光量を  
デジタル画像データから求める。  
(積算量)

光量から各Unitの圧力を求める

# 画像処理を用いた接触面圧力分布計測

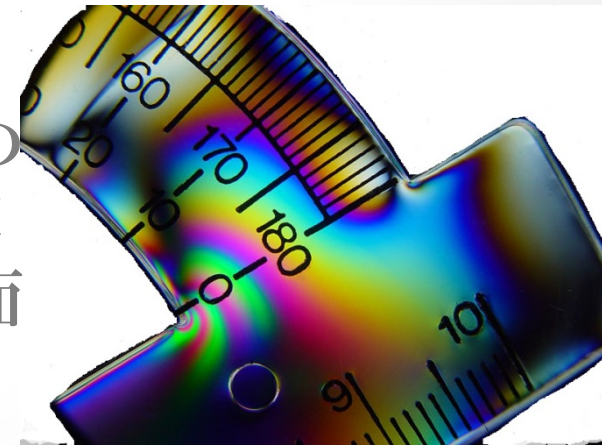
画像サイズ : 640 × 480 × 8bits  
 計測サイズ : 400 × 300 mm<sup>2</sup>  
 分解能 : 5 gf /Unit (20gf/cm<sup>2</sup>)  
 計測範囲 : 5 ~ 1,000gf/Unit

全領域だけでなく、部分領域の重心位置、接触面積などが計算可能



# レーザー光弾性法

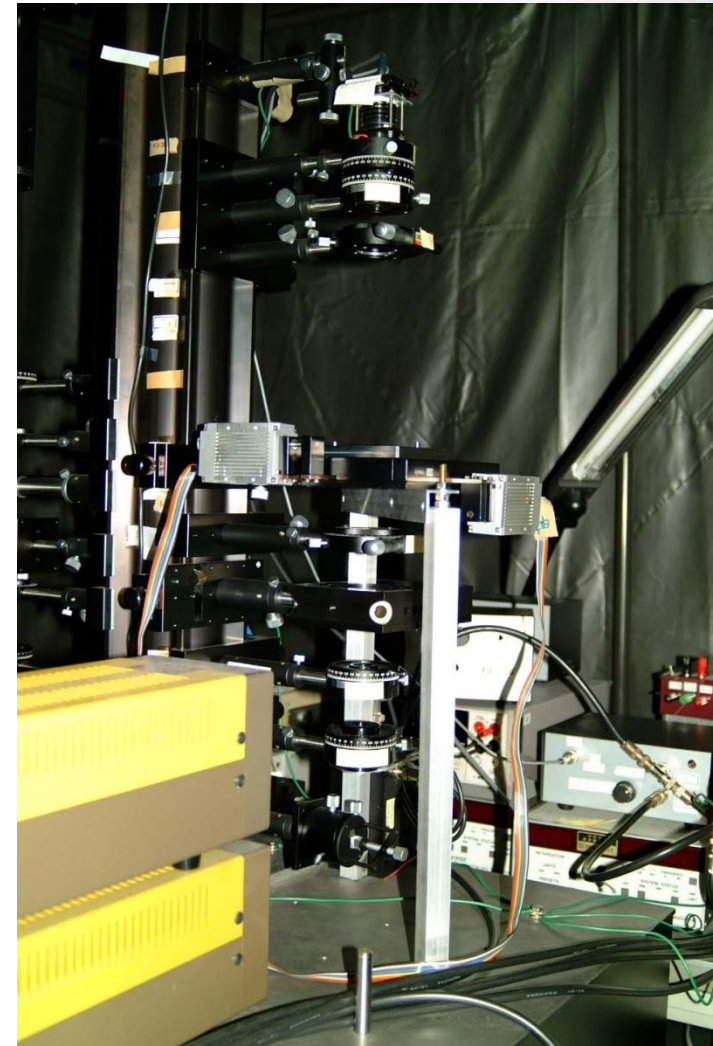
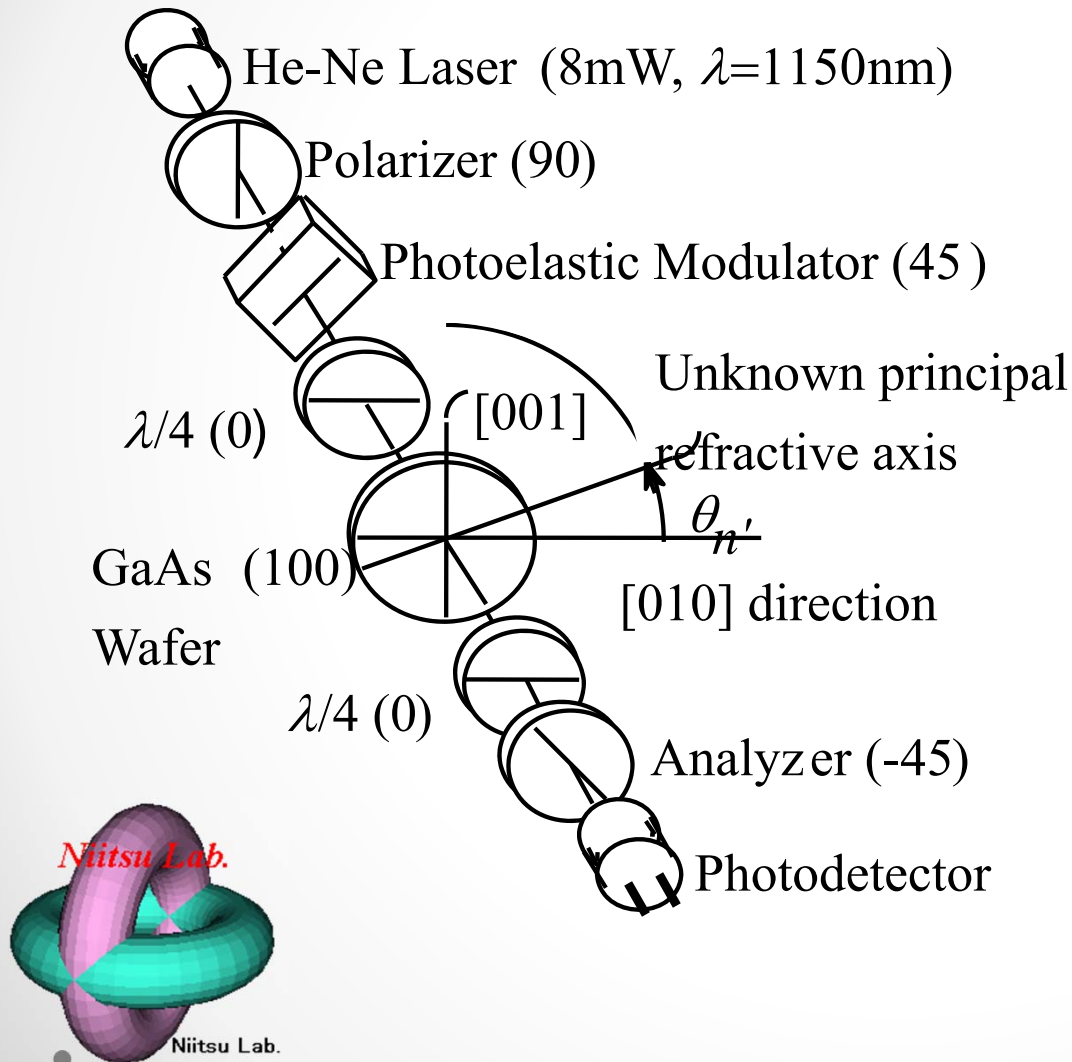
- 光弾性法は透明材料の光弾性現象を利用し、応力によって発生する複屈折量を光の位相差として計測するものである。具体的には屈折率の変化を測るのであるが、その絶対値の変化はひずみ量のオーダーなので不可能である。偏差の形で現れる量（誘電率の偏差テンソル成分）を計測することになる。
- 通常の光弾性実験は偏光板を2枚直交させて置き、その間に試料を置いて透過光の位相差を縞のカウントから求める。
- 光弾性法は透過光を使うことから、タイトルの表面の応力評価とは合致しない。ただし、レーザー光弾性法では位相差の分解能が非常に高いため $10\mu\text{m}$ 以下の薄い物体の透過光の応力も評価でき、表面付近の応力評価に応用可能である。



通常の光弾性像

# レーザー光弾性法

- 走査型赤外線レーザー光弾性装置の構成図



# レーザー光弾性法

- レーザー光弾性法の特徴：
  - (1)入射光の波長が一定のため位相差＝光路差となり高い計測精度が得られる。
  - (2)縞解析ではなく光弾性変調器の加振周波数で測定光を分析することで直接電圧として位相差を得ることができる。このため波長の1000分の1程度の位相差を計測することができる。
  - (3)一点一点ずつ計測する必要がある。（今後の開発にもよる）
- レーザー光弾性法の可能性：
  - (1)同時多点計測は可能か？たとえば640×480点を同時計測など。
  - (2)1nmの位相差計測分解能を他の物理量の評価に応用できないか？

# レーザー光弾性法

計測される光強度にはPEMと試料の複屈折位相差が影響している。

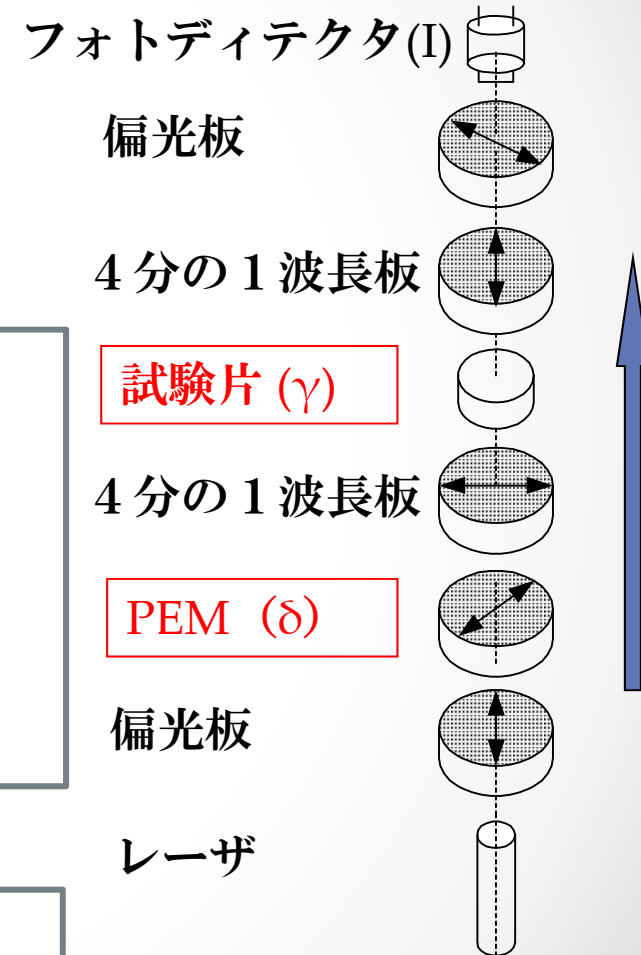
この中から資料の位相差を周波数分析から抜き出す。

$$I = \frac{\alpha I_0}{4} \{1 + \sin \gamma (\cos \delta \sin 2\theta - \sin \delta \cos 2\theta)\}$$

$$\gamma = \frac{2\pi C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) d$$

$$\delta = \delta_0 \sin \omega t$$

$$I = I_{dc} + I_{ac1} \sin \omega t + I_{ac2} \sin 2\omega t + \dots$$





# レーザー光弾性法

光弾性変調器の $\omega$ の変調により $\omega$ と $2\omega$ の成分が生成される。この2つの成分は1/4波長版で位相が $90^\circ$ ずれて、主応力差と主方向を同時に求めることができる。

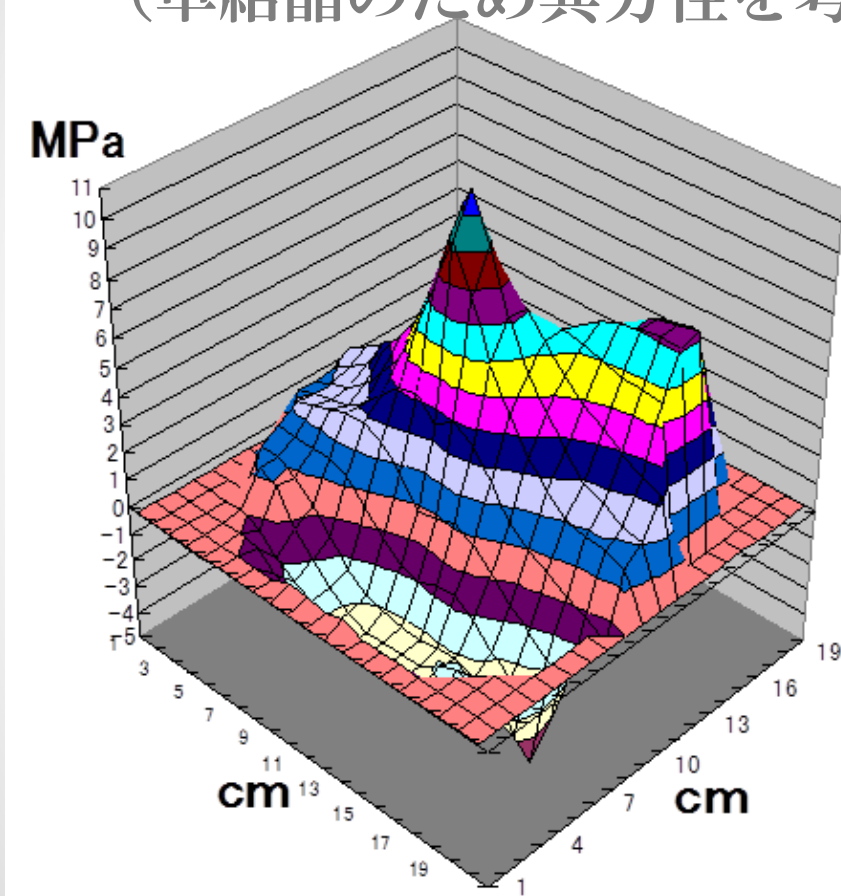
$$I_{dc} = \frac{\alpha I_0}{4}$$
$$I_{ac1} = \frac{-\alpha I_0}{4} J_1(\delta_0) \sin \gamma \sin 2\theta$$
$$I_{ac2} = \frac{-\alpha I_0}{4} J_2(\delta_0) \sin \gamma \sin 2\theta$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left[ \sqrt{\left( \frac{I_{ac1}}{I_{dc} A} \right)^2 + \left( \frac{I_{ac2}}{I_{dc} B} \right)^2} \right]$$
$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{A I_{ac2}}{B I_{ac1}} \right]$$
$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\gamma \lambda}{2\pi C d}$$

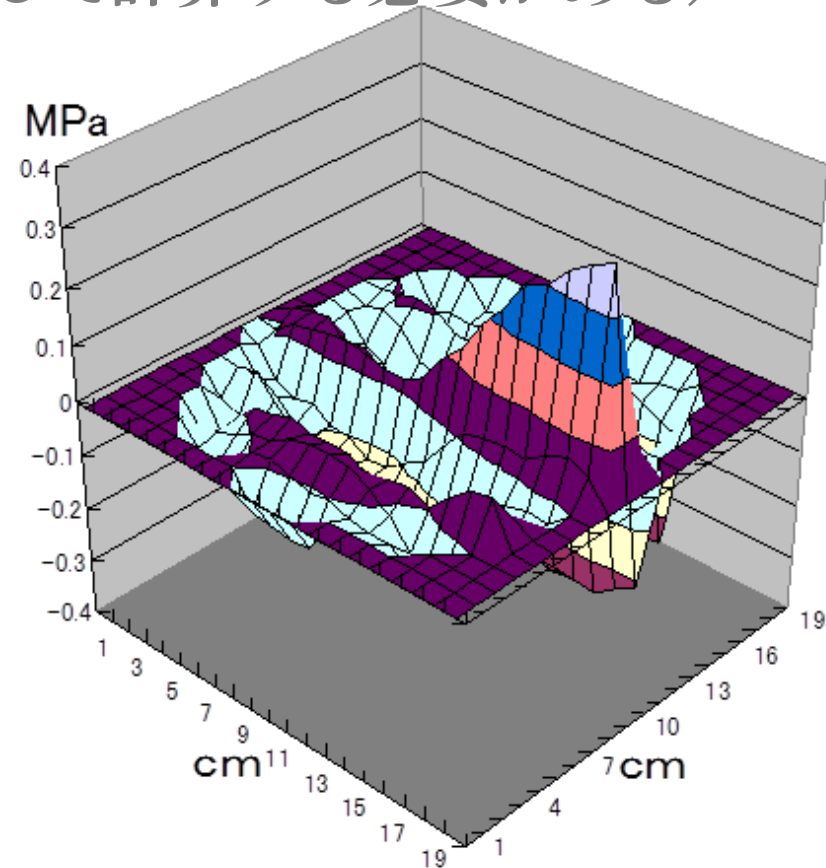
装置定数 A, B は1/4波長版で校正して求める

# レーザー光弾性法

- GaAsウエハの残留応力分布の計測・計算例 ( $\sigma_{xx}$ 分布)  
(単結晶のため異方性を考慮して計算する必要がある)



A : 研削後

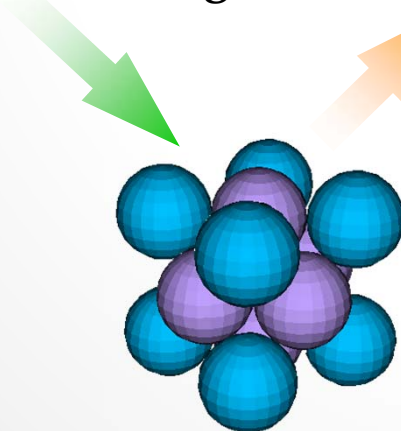


B : ドライポリッシュ後  
2  $\mu$ m 研磨

# レーザーラマン分光法

- 表面の浅い領域を高い空間分解能で応力の評価が可能な方法がレーザーラマン分光法である。1 $\mu$ 立方mの空間分解能が可能である。
- ラマン散乱光は、物質の結合力の情報を持っている。シリコン単結晶のような単一の結晶では結晶の固有振動数の情報に相当する。材料に応力が加わると材料はひずみ、方向により固有振動数が異なった状態になる。この固有振動数の変化が、ラマン散乱のピーク位置の変位を起こす。

Incident Ar<sup>+</sup> Laser Light



Scattered Light

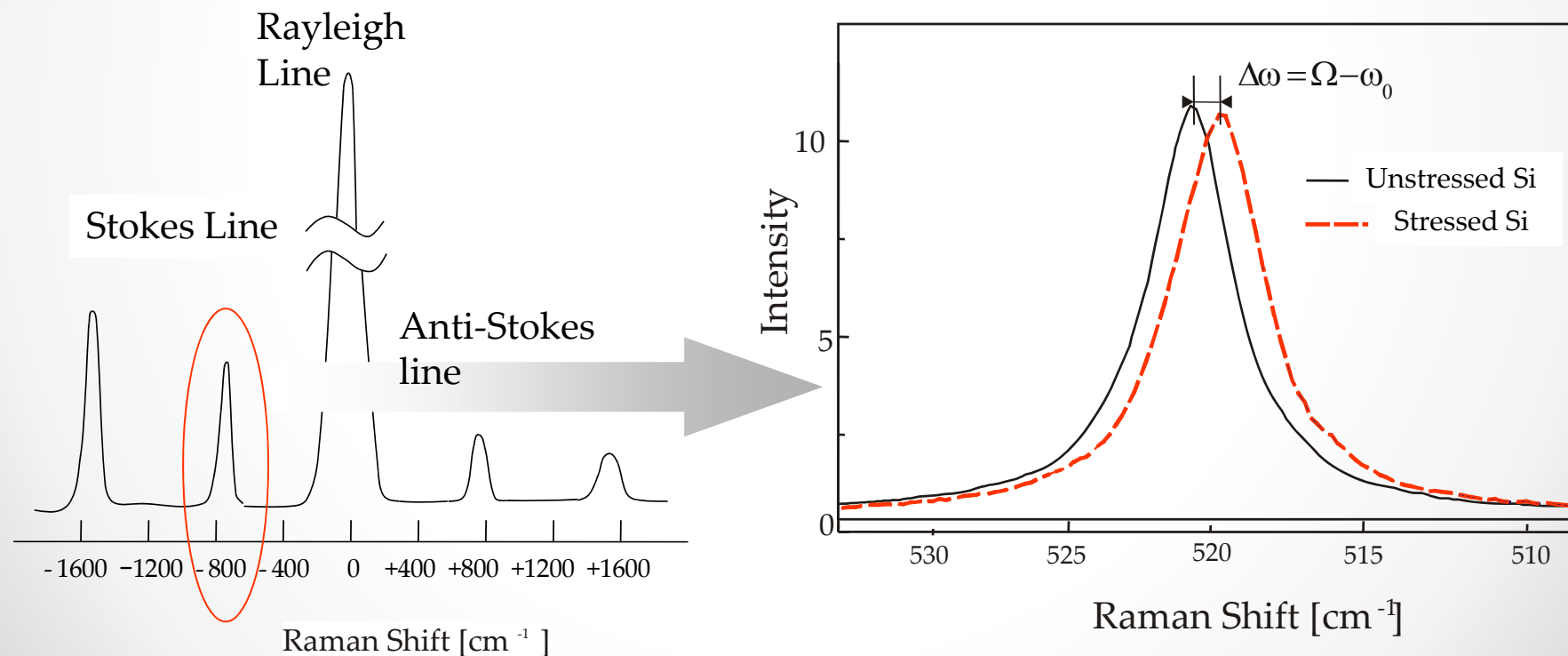
ラマン散乱とは・・・



入射光の周波数から物質に固有の振動数だけ高周波数側もしくは低周波数側にずれた弱い非弾性散乱光が得られる現象

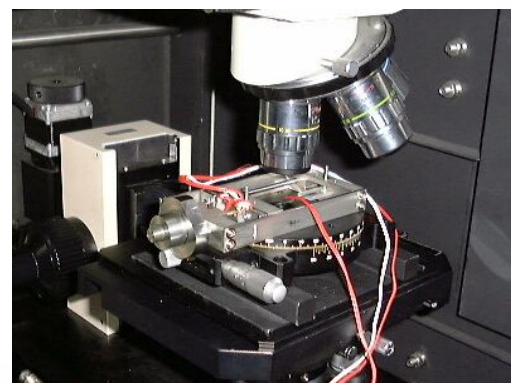
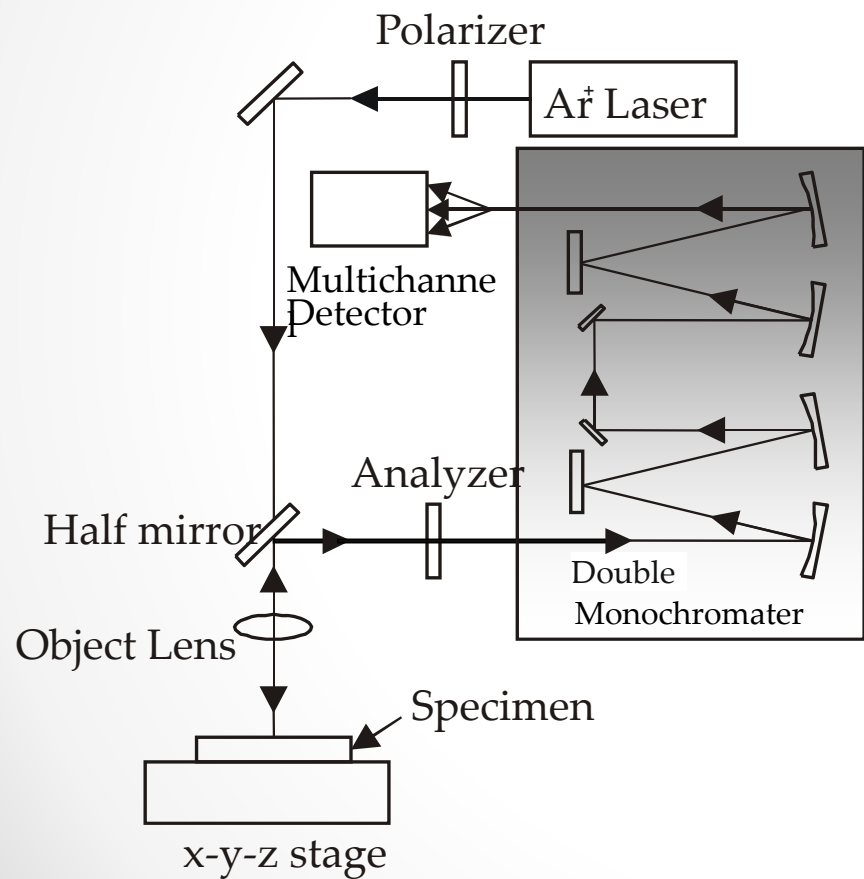
# レーザーラマン分光法

- シリコン単結晶の場合、ストークス線のピーク位置を $0.01\text{cm}^{-1}$ 程度の高分解能で測定する必要がある。分光器の分解能は最大（最少）でも $0.4\text{cm}^{-1}$ である。カーブフィッティング処理を使う。



# レーザーラマン分光法

- 装置構成



# レーザーラマン分光法

- 応力とラマンスペクトルのピーク位置の関係を求める。
- 結晶内原子の運動方程式から導かれるひずみと光学フォノン振動数の関係式を用いて、応力を間接的に評価する。
- 偏向配置と観測されるフォノンモードを求める。

## ● シリコン単結晶{100}面のラマンシフトと応力の関係

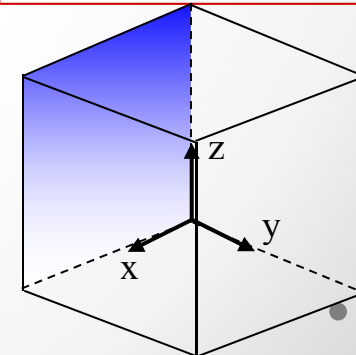
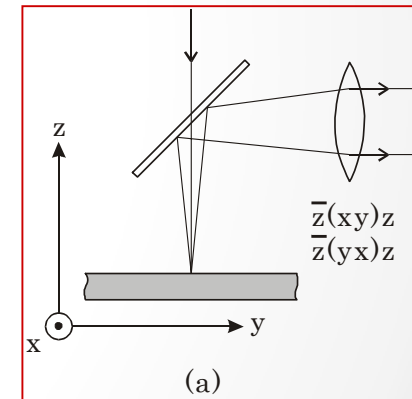
$$R^1 = \begin{pmatrix} 0 & d & 0 \\ d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & \alpha d \\ d & \alpha d & 0 \end{pmatrix} \quad R^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & \beta d \\ d & \beta d & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = \{pS_{12} + q(S_{11} + S_{12})\}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} = \frac{2\omega_0 \cdot \Delta\omega_1}{pS_{12} + q(S_{11} + S_{12})} = -5.0 \times 10^8 \Delta\omega'_1 \quad [\text{Pa} \cdot \text{cm}]$$

● Impossible to Detect  $\Delta\omega_2$   $\Delta\omega_3$

● by Back-Scattering Configuration



# レーザーラマン分光法

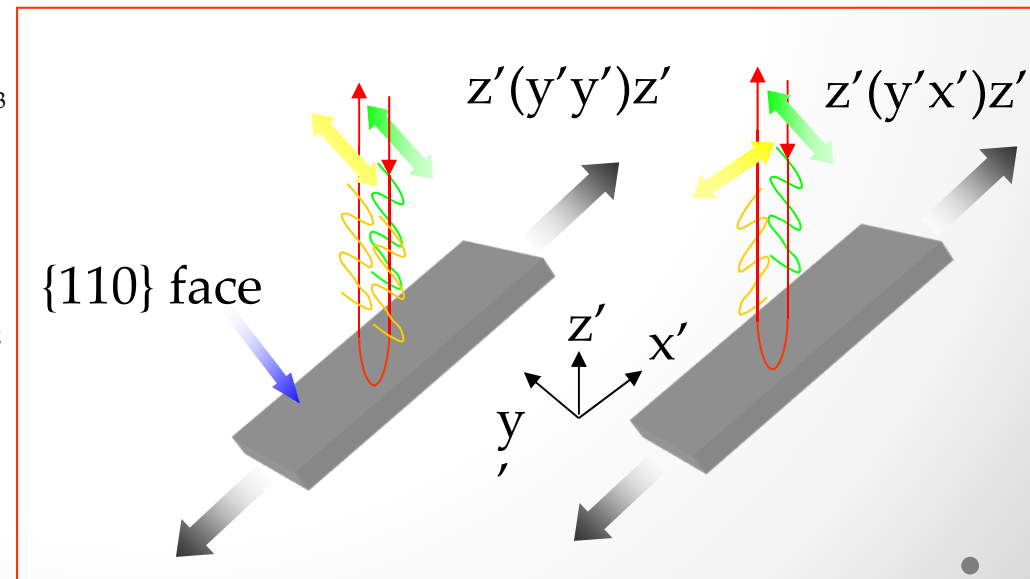
## 結晶面{110}面で観測されるスペクトル

### 単軸負荷方向<211>

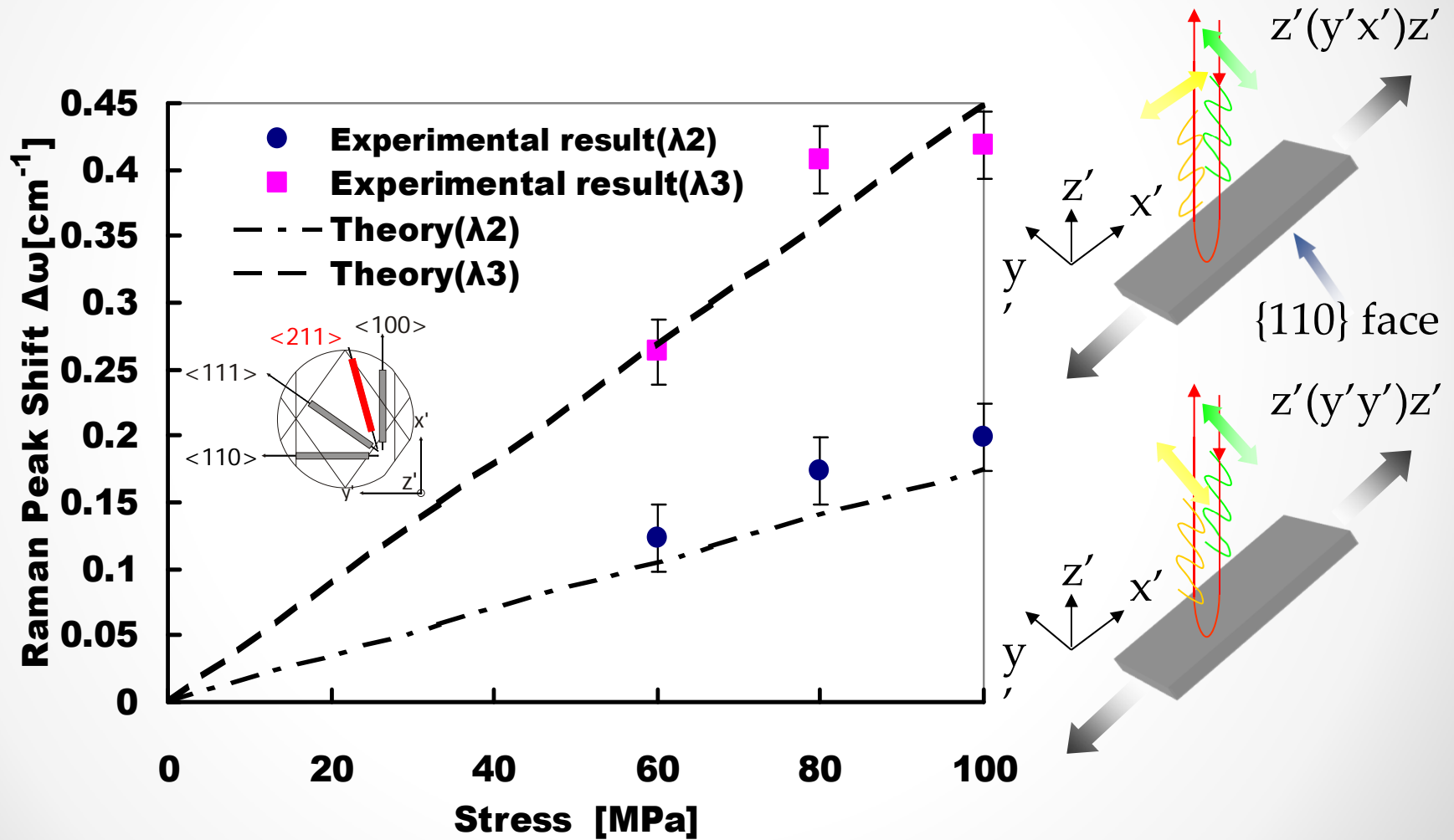
Configuration Of Polarization	Phonon mode	Stress dependence [MPa/cm <sup>-1</sup> ]
$z'(y'y')z'$	$TO_1(\lambda_3)$	1292.43
$z'(y'x')z'$	$TO_2(\lambda_2)$	494.57

$$\sigma_{\langle 211 \rangle} = \frac{12\omega_0}{(5p+7q)S_{11} + (7p+17q)S_{12} + rS_{44} + F} \Delta\omega_3$$
$$= -1292.43 \times \Delta\omega_3$$

$$\sigma_{\langle 211 \rangle} = \frac{12\omega_0}{(5p+7q)S_{11} + (7p+17q)S_{12} + rS_{44} - F} \Delta\omega_2$$
$$= -494.57 \times \Delta\omega_2$$



# {110}面, <211>方向負荷時の応力とラマンシフト量の関係



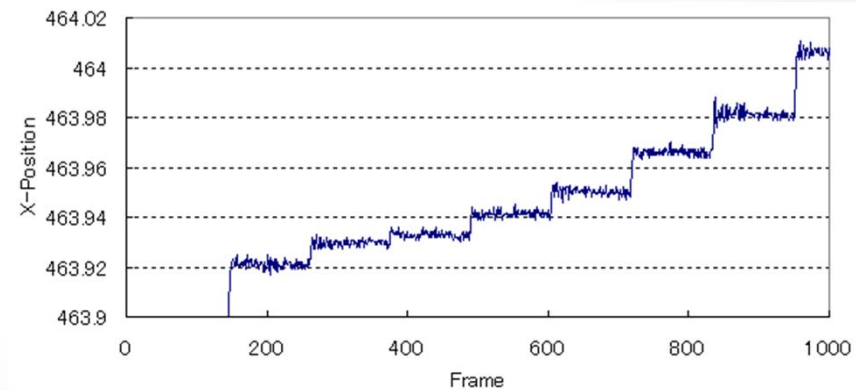
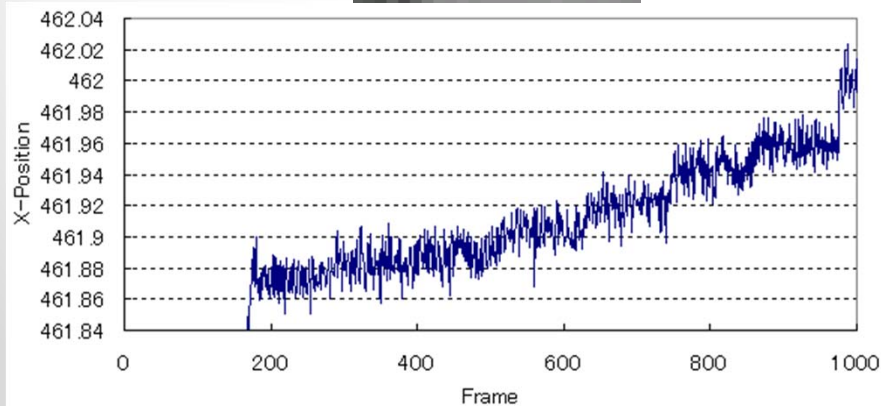
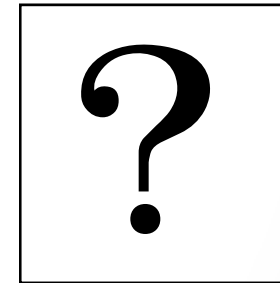
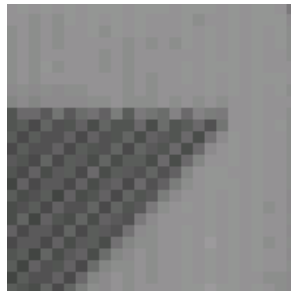


# 画像計測(画像相関法)

- 近年、画像入力装置の低価格化やコンピュータ処理の高速化により、画像を用いた計測やデータ分析が盛んになっている。
- 応力ひずみ計測に関係する技術や原理としては、
  - (1) レーザースペックル法
  - (2) モアレ干渉縞法
  - (3) デジタル画像相関法(DIC: Digital Image Correlation)がある。これ以外には「光弾性法」や「振動温度分布」などがある。ここでは、デジタル画像相関法(DIC)について言及する。
- ここでは計測なので、DICは部分画像のサブピクセル位置同定に使う。すなわち、部分画像の移動量を0.01ピクセル単位で計測するような方法である。(そんなことが可能なかと思う人がいると思いますが、そこそこ可能です。)

# 画像計測(画像相関法)

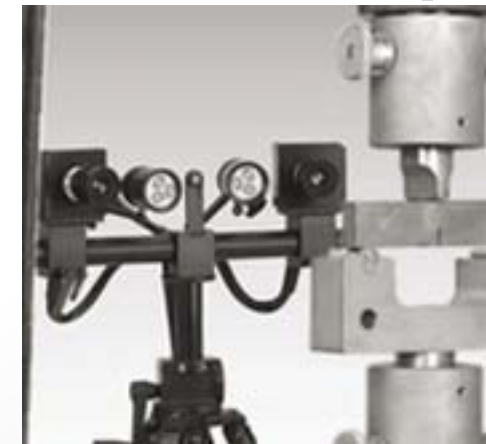
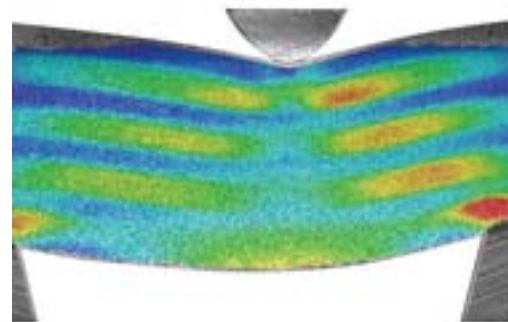
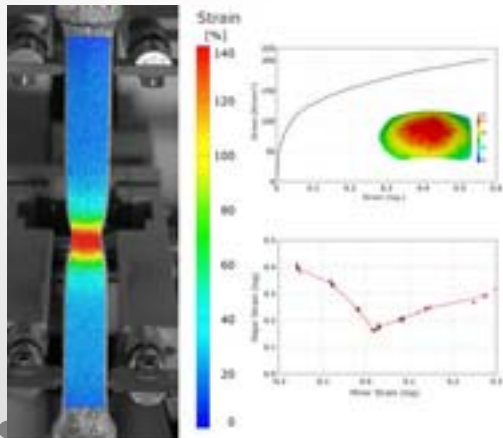
パターンマッチングを3次元計測に応用するために6年前に種々のパターンについてサブピクセル計測を試した。以下がそのときに驚いた結果である。パターンのサイズは確か32×32、動作はリニアアクチュエータで0.1mm→0.1mm→0.2mm→0.2mm→0.3mm→0.3mmのようであった。グラフの縦軸は1目盛は0.02ピクセルである。



# 画像計測(画像相関法)

通常の写真相関法によるひずみ（変位）計測：

- (1) 計測対象の面にランダムパターンを塗布する。（水玉模様）
- (2) カメラをセットする。1台の場合は通常正面から3Dの場合は、2台を左右に25~45°傾けて設置する。
- (3) 画像上の計測範囲の設定、カメラの調整、カリブレーション
- (4) 負荷実験を負荷前から撮影する。
- (4) ランダムパターンを部分領域に分けて、変位分布とひずみ分布を求める。



Homepage of Gom Optical Measuring Techniques

# 画像計測(画像相関法)

画像相関法の原理：

初期画像のテンプレートと探索範囲の部分画像の相互相関を計算し、相関値が最大の位置が最も似た画像となる。この最大値と周囲8点の相関値から、サブピクセルの最大相関座標を求める。

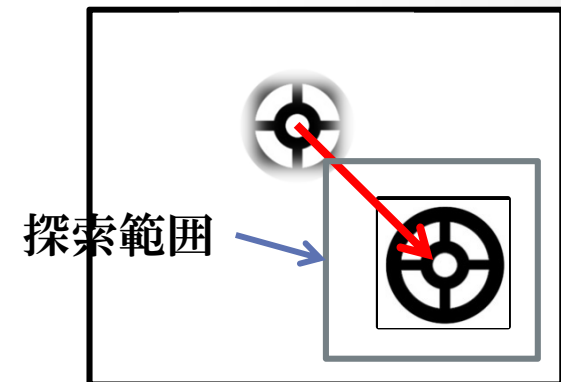
正規化相互相関 (0~1.0)

$$S_{NCC} = \frac{\sum_{y \in h} \sum_{x \in w} f(x, y) \cdot g(x, y)}{\sqrt{\sum_{y \in h} \sum_{x \in w} f(x, y)^2} \sqrt{\sum_{y \in h} \sum_{x \in w} g(x, y)^2}}$$

平均差の正規化相互相関 (-1.0 ~ 1.0)

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i+u, j+v) - \bar{I}) \times (I_t(i, j) - \bar{I}_t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i+u, j+v) - \bar{I})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_t(i, j) - \bar{I}_t)^2}}$$

部分画像領域  
(変形前)  
テンプレート



部分画像領域  
(変形後)

# 画像計測(画像相関法)

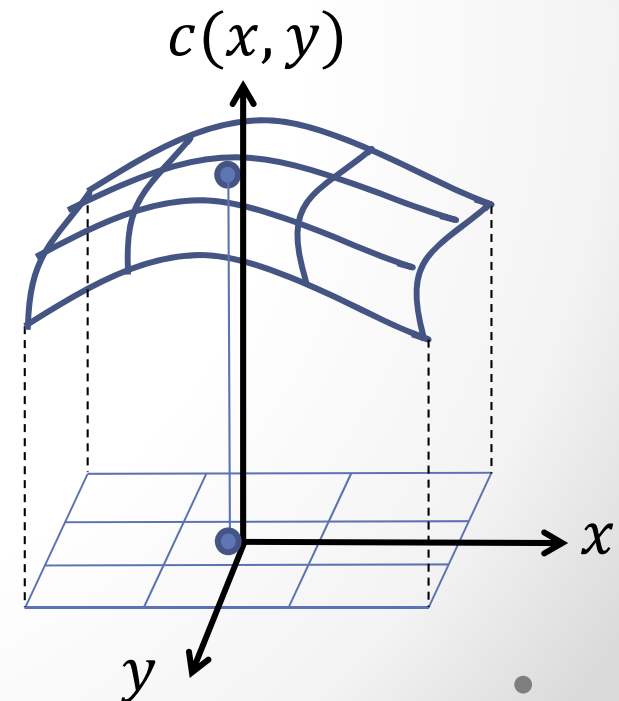
サブピクセル位置の同定は9点の相関値を2次曲面近似する。係数 $a_n$ は最小二乗法により簡単に求められる。

$$C(x, y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6$$

中央の最大値位置からのサブピクセル座標  $(u_{sub}, v_{sub})$  は以下の式で与えられる。

$$u_{sub} = \frac{1}{4a_1a_2 - a_3^2} (-2a_2a_4 + a_3a_5)$$

$$v_{sub} = \frac{1}{4a_1a_2 - a_3^2} (-2a_1a_5 + a_3a_4)$$



# 画像計測(画像相関法)

面内変位計測法：（私のやり方；疑似3次元計測）

- (1) 4点以上の既知の座標点  $(x_i, y_i)$  を設定する
- (2) それらの点の画像上の座標  $(X_i, Y_i)$  を求める
- (3) 視線方程式からカメラパラメータ  $C_{ij}$  を求める
- (4) 変位を測定したい点を指定する
- (5) 負荷実験等を行い測定点の追跡を行う  $(X, Y)$  を求める
- (6) 絶対座標  $(x, y)$  を視線方程式から求める
- (7) 変位を求め3点以上の変位からひずみを計算する

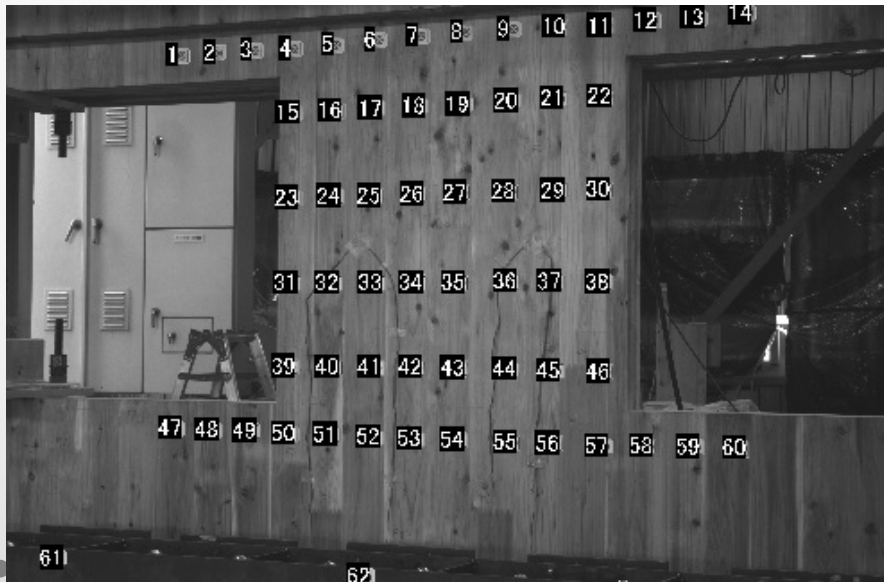
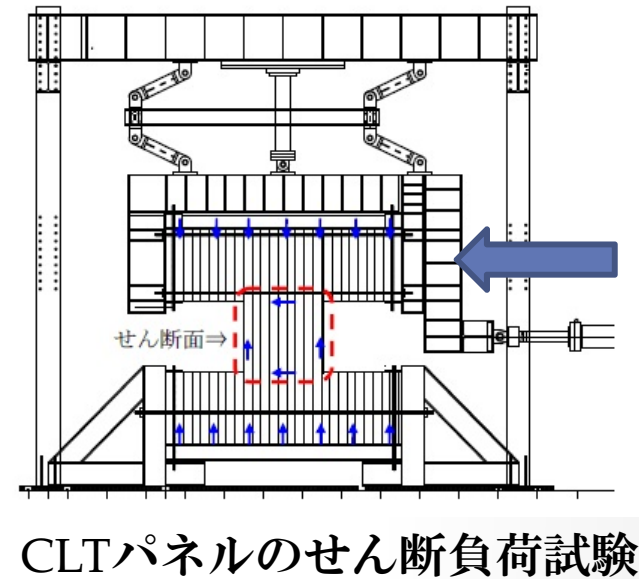
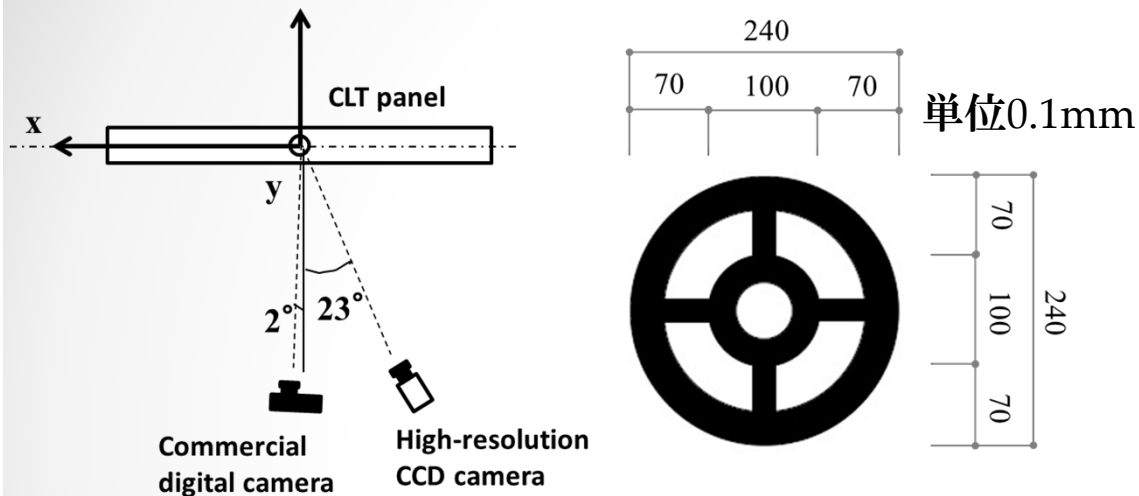
疑似3次元カメラパラメータを求めるための視線方程式

$$\begin{cases} C_{11}x_i + C_{12}y_i + C_{14} - C_{31}x_iX_i - C_{32}y_iX_i = X_i \\ C_{21}x_i + C_{22}y_i + C_{24} - C_{31}x_iY_i - C_{32}y_iY_i = Y_i \end{cases}$$

この視線方程式はスクリーン座標と絶対座標の関係を表す。ただし、 $z=0$ の面上

# 画像計測(画像相関法)

変位計測とひずみ計測の例：



使用したカメラ

(a)高解像度CCDカメラ：ORCA-HR

(4000×2624ピクセル)

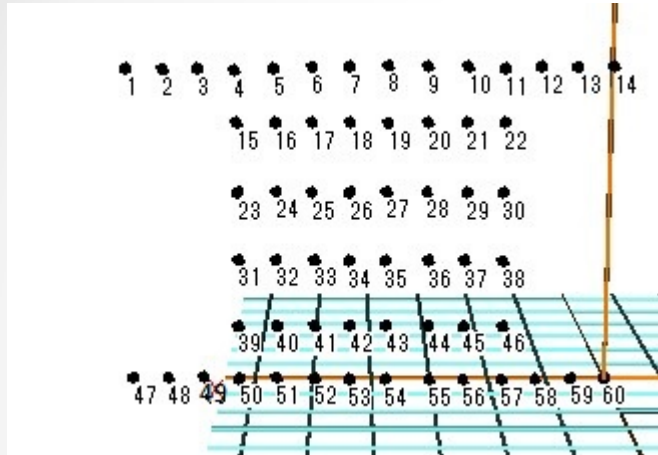
(b)一眼レフカメラ：D7000

(4928×3264ピクセル)

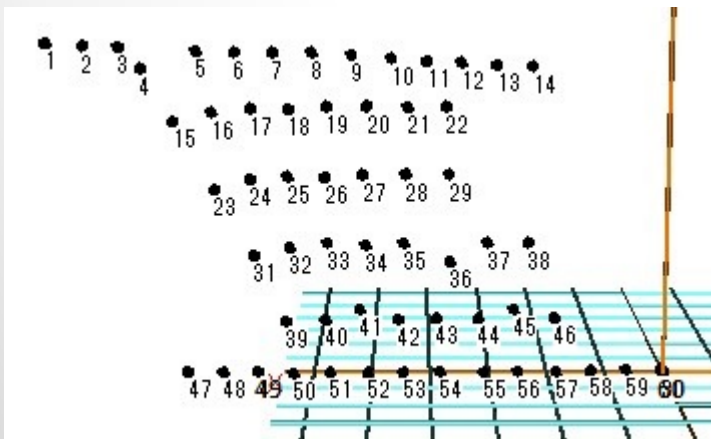
Marker設置点数：60点

# 画像計測(画像相関法)

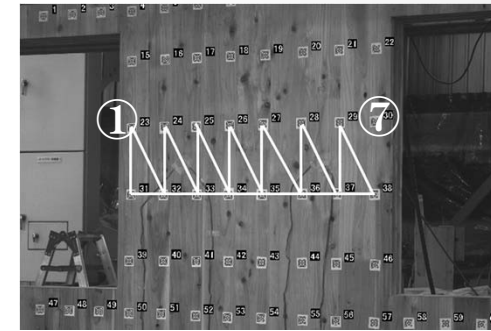
## 変位とひずみの計測結果



変形前 (相対座標変位 5 倍)

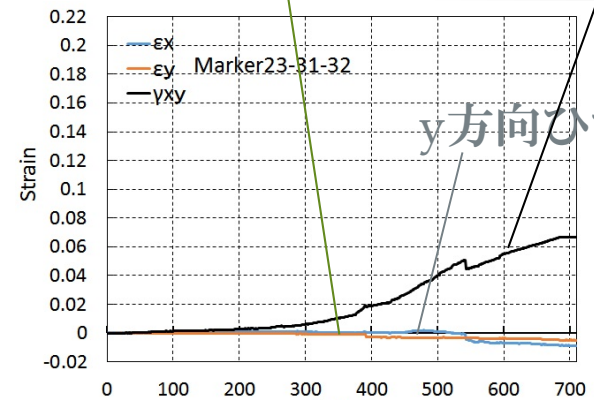


変形後 (相対座標変位 5 倍)



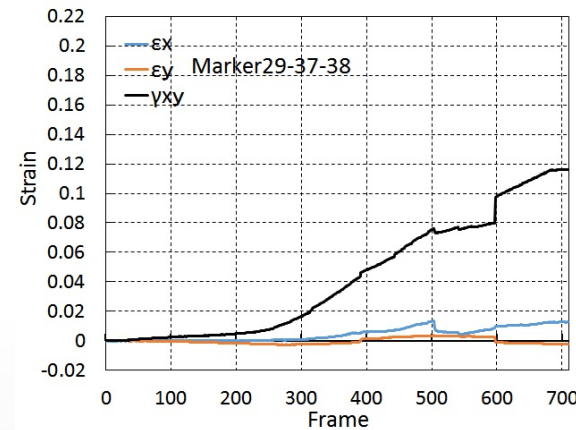
x方向ひずみ

せん断ひずみ



y方向ひずみ

要素①の  
ひずみ

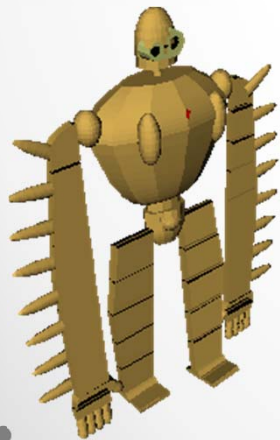


要素⑦の  
ひずみ



# まとめ

- 近年の要素技術とコンピュータ技術の進歩は目覚ましい。この進歩を応力ひずみ計測に応用する時期と考える。
- 私個人としては、60歳までにコンピュータ技術（3次元CAD）に関係するテーマを仕上げ、60歳からレーザー光弾性を再開したいと考えている。
- DICについては、いくつかアイデアはあるが、すでに多くの研究が成されており、院生らや他の研究者に任せたいと考えている。



Nitsu Lab.