

低荷重におけるハイドロゲルの複屈折位相差評価

Evaluation of birefringence phase difference of hydrogel at low load

佐藤 颯 (東京電機大) ○鈴木 潤 (東京電機大) ◎五味 健二 (東京電機大)

Hayate SATOU, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-ashai-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

Jun SUZUKI, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-ashai-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

Kenji GOMI, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-ashai-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

1. 緒言および目的

大動脈疾患, 大動脈弁狭窄症, 僧帽弁閉鎖不全症などの心血管疾患に対しては, カテーテルと呼ばれる細い管状の医療器具を血管内に挿入して治療を行う低侵襲手術が広く用いられている. この治療法は, 従来の開胸・開腹を伴う外科的手術に比べて, 身体への負担が少なく, 術後の回復が早いことに加え, 合併症のリスクも低いという利点がある.

一方で, カテーテル手術は細い血管内で繊細な操作を行う必要があり, 操作を誤ると血管を傷つけてしまうことや刺激によって血管攣縮(れんしゅく)と呼ばれる血管の狭小化⁽¹⁾を引き起こす危険性がある. ⁽²⁾血管攣縮が十分に改善されない場合, 手術を中断せざるを得ないこともある. このため, 術者は高度な技術と的確な力加減の習得が求められる, 実践的な訓練が必須である. そこで本研究は, 手術用ガイドワイヤ先端荷重によって訓練用モデルに加わる応力分布を可視化し, 数値的な力加減の訓練を可能にすることを目的とする. 本稿では, 低荷重下において, ハイドロゲル試料内部に生じる複屈折位相差分布をレーザ光弾性法で測定することで, 手術用ガイドワイヤ先端荷重(0.1 N)による応力分布の可視化が可能であることを示す.

複屈折位相差とは, 光学的異方性を持つ物体に光が入射した際に, 透過光に生じる位相のずれを指す. この位相差は物体内部の応力に比例するため, 位相差を測定することで応力を間接的に評価することができる. この原理を利用した手法が光弾性法であり, 試料を破壊せず, かつ非接触で微小な応力の可視化・測定が可能である. また, 本研究では人の血管の力学的特性に近いハイドロゲルを試料として採用した. ⁽³⁾

2. 実験装置および基礎理論

2.1. 実験装置

図1に透過型光弾性実験装置の構成を示す. 波長 1150 nm の He-Ne レーザは光源から水平方向に出射され, ミラーによって垂直方向に反射される. その後, レーザ光はアッテネータ, 偏光子, PEM(Photoelastic Modulator Systems), 1/4 波長板(Q1), 試料, 1/4 波長板(Q2), 検光子を通過し, 光検出子によって検出される. 検出されたレーザ光はSCM(Signal Conditioning Module)に電圧信号として入力され, 直流成分 I_{DC} および交流成分 I_{AC1} , I_{AC2} に分解される. 光強度である I_{DC} は電圧計, I_{AC1} はロックインアンプ(Lock-in amplifier 1F), I_{AC2} はロックインアンプ(Lock-in amplifier 2F)で測定される. これらの測定値より, 複屈折位相差と複屈折方向を算出する.

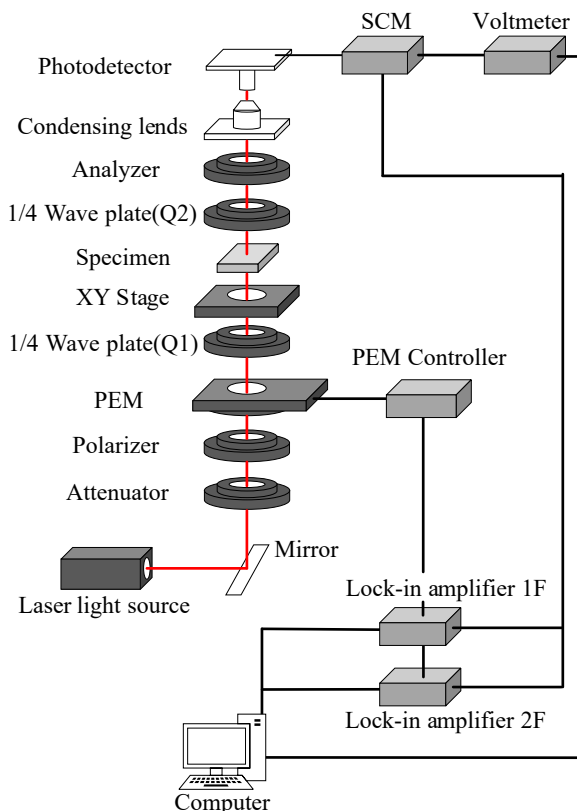


Fig 1 Schematic of the experimental apparatus

2.2. 複屈折位相差と応力の関係⁽⁴⁾

応力を受けていない場合の屈折率を n_0 , 応力を σ_1 , σ_2 , 応力方向に振動する偏光に対する屈折率を n_1 , n_2 とすると, 以下の式が得られる.

$$n_1 - n_0 = S\sigma_1 + T\sigma_2 \quad (1)$$

$$n_2 - n_0 = S\sigma_2 + T\sigma_1 \quad (2)$$

ただし, S , T は試料によって決まる定数である. 式(1)から(2)を引くと,

$$n_1 - n_2 = (S - T)(\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3)$$

となる. ここで C は光弾性定数である. 真空中の光の速度を c , 応力方向に振動する偏光が試料を通過する速度を v_1 , v_2 とすると,

$$c = v_1 n_1 = v_2 n_2 \quad (4)$$

となる. 試料の厚さを d とすれば, 両偏光の試料を通過する時間差 Δt は,

$$\Delta t = \frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} = \frac{d}{c}(n_1 - n_2) \quad (5)$$

となり, 偏光の角振動数を ω とすると, 複屈折位相差 γ は,

$$\gamma = \omega \Delta t = \omega \cdot \frac{d}{c}(n_1 - n_2) \quad (6)$$

となる. ここで光は単色光であり, その波長を λ とすれば $\lambda = (2\pi/\omega) \cdot c$ が得られるため, 式(6)は

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} C d (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7)$$

となる. λ , d , C はいずれも定数であるため, 複屈折位相差 γ は主応力差である $(\sigma_1 - \sigma_2)$ に比例することがわかる.

2.3. 複屈折位相差の導出⁽⁵⁾

図1に示した実験装置の光検出子(Photodetector)によって測定されるレーザの光強度 I は, 次式(8)で表される.

$$I = \frac{\alpha I_0}{4} \{1 + \sin \gamma (\sin \delta \cos 2\theta + \cos \delta \sin 2\theta)\} \quad (8)$$

α は測定点における試料の透明, I_0 はレーザの光強度, γ は測定点の複屈折位相差, θ は複屈折方向である. δ はPEMの複屈折位相差であり, 次式(9)で表される.

$$\delta = \delta_0 \sin \omega t \quad (9)$$

ここで δ_0 はPEM変調の振幅であり, PEMの交流印加電圧の振幅に相当する値である. ω はPEMの共振周波数の角速度であり, t は時間である. 式(9)を式(8)に代入してフーリエ級数展開することで次式を得る.

$$I = I_{DC} + I_{AC1} \sin \omega t + I_{AC2} \cos 2\omega t + I_{AC3} \sin 3\omega t + \dots \quad (10)$$

ここで, I_{DC} , I_{AC1} および I_{AC2} は以下である.

$$I_{DC} = \frac{\alpha I_0}{4} \{1 + J_0(\delta_0) \sin \gamma \sin 2\theta\} \quad (11)$$

$$I_{AC1} = -\frac{\alpha I_0}{2} J_1(\delta_0) \sin \gamma \cos 2\theta \quad (12)$$

$$I_{AC2} = \frac{\alpha I_0}{2} J_2(\delta_0) \sin \gamma \sin 2\theta \quad (13)$$

I_{DC} , I_{AC1} , I_{AC2} はそれぞれ直流成分, 交流成分の第一高調波成分, 第二高調波成分である. また, $J_0(\delta_0)$, $J_1(\delta_0)$ および $J_2(\delta_0)$ はBessel関数である. $J_0(\delta_0) = 0$ となるように δ_0 を調整すると,

$$I_{DC} = \frac{\alpha I_0}{4} \quad (14)$$

となる. また, 式(12),(13)より I_{AC1} , I_{AC2} と I_{DC} の比を算出すると,

$$\frac{I_{AC1}}{I_{DC}} = A \cdot \sin \gamma \cos 2\theta \quad (15)$$

$$\frac{I_{AC2}}{I_{DC}} = B \cdot \sin \gamma \sin 2\theta \quad (16)$$

となり, これらは試料の透明度 α とレーザの光強度 I_0 に依存しない. また, A および B は試料の状態に依存しない装置定数である. よって, 複屈折位相差 γ および複屈折方向 θ は次式(17), (18)のように求められる.

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\sqrt{\left(\frac{I_{AC1}}{I_{DC} \cdot A} \right)^2 + \left(\frac{I_{AC2}}{I_{DC} \cdot B} \right)^2} \right] \quad (17)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{A \cdot I_{AC1}}{B \cdot I_{AC2}} \right] \quad (18)$$

以上より, 直流成分, 交流成分の第一高調波成分, 第二高調波成分の値を計測することで, 試料の屈折位相差及び複屈折方向を求められる.

3. 試料および実験方法

3.1. 試料

図2に本実験で使用したハイドロゲルモデルおよび局所荷重を加えるために用いたクリップの概要を示す. 正面図から確認できるように, クリップの端部は丸みを帯びており, 中央部が比較的平坦であるため, この中央部分を測定した. 荷重の付加に際しては, クリップを試料に対して斜めに挟むようにした.

3.2. 実験方法

3.2.1. クリップの荷重測定

図2に示すように, まず, 試料を挟む前のクリップの最も狭い箇所の幅(外側)を測定し, 次に試料を挟んだ状態で同じ箇所の幅(外側)を測定した. 得られた幅の変化量に相当する距離だけ, 図3に示す実験装置においてXYステージを水平方向に移動させ, フォースゲージによりそのときの荷重値を読み取った. この操作を5回繰り返して荷重値を取得し, その平均値を, 試料を挟んだ際にクリップが加える荷重とした.

3.2.2. 無荷重時複屈折位相差分布測定

試料を図1に示すXYステージに設置し, 図4に示すように, 無試料の領域を含む 9.8×13.8 mmの範囲で複屈折位相差を測定し, その分布の可視化を行った. 測定間隔はX, Y方向どちらも0.2 mmでXYステージを0.2 mm/secで移動させながら測定を行った. Y方向における測定回数は50回であり, X方向における測定列数は70列である. また, 無試料時の I_{DC} は10 Vである.

3.2.3. 荷重を加えた際の複屈折位相差分布測定

図2に示すように, 試料に対してクリップを用いて局所的に荷重を加え, 無荷重時と同様の方法で複屈折位相差の測定を行った. さらに, 荷重を加えた際の複屈折位相差と,

無荷重時の複屈折位相差との差分を求めることで、荷重によって生じた複屈折位相差の変化を評価した。差分の算出は、Microsoft Excel 上で行った。

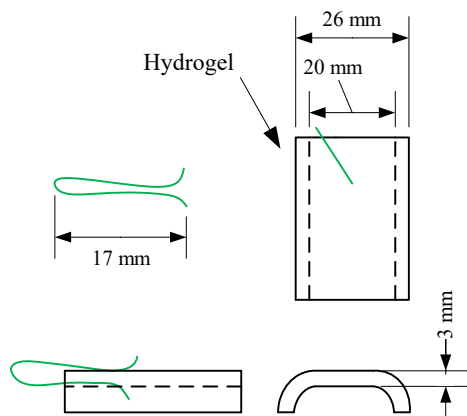


Fig 2 Schematic of the specimen

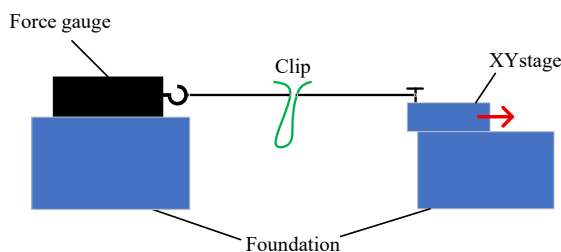


Fig 3 Schematic of the measurement apparatus

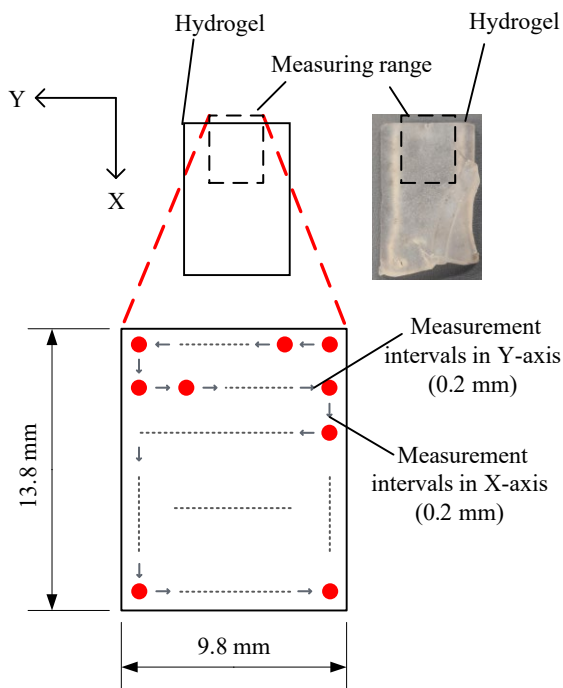


Fig 4 Measurement points

4. 実験結果および考察

4.1. クリップの荷重

まず、試料を挟む前と挟んだ状態でのクリップの最も狭い箇所の幅（外側）の測定結果を表 1 に示す。

Table 1 Difference in clip opening with and without sample

After clamping (mm)	Before clamping (mm)	Difference (mm)
3.40	3.10	0.30

次に、表 1 で示したクリップの変化量分を図 3 に示す XY ステージで水平方向に移動させ、フォースゲージにより測定した荷重値（計 5 回）および平均値を表 2 に示す。

Table 2 Force applied by the clip at the measured opening distance

No.	load (N)
1	0.632
2	0.624
3	0.628
4	0.624
5	0.620
average	0.626

表 2 よりクリップが試料に加える荷重を 0.626 N とした。

4.2. 無荷重時複屈折位相差分布

無荷重時の I_{DC} 分布、複屈折位相差分布をそれぞれ図 5、6 に示す。測定範囲は 9.8×13.8 mm であり、 I_{DC} 、複屈折位相差の大きさはそれぞれ 20 mV、20 nm ごとに配色した。

図 5 に示す I_{DC} 分布では大部分が 100-220 mV であることから、 $1.4 \leq X \leq 13.8$ mm の領域にハイドロゲルが存在すると思われる。また、 $X < 1.4$ mm の領域は 10 V 前後であり、 $1.4 \leq X \leq 13.8$ mm の領域と比較して明らかに高い値となっていることから、無試料領域及びハイドロゲルとの境目の領域であると思われる。

図 6 に示す無荷重時の複屈折位相差分布では 20-80 nm の領域が多くを占めており、上端部に 100-220 nm といった比較的高い複屈折位相差分布が見られる。複屈折位相差の値は場所によって異なっているが、連続的で納得のいく分布である。

4.3. 荷重を加えた際の複屈折位相差分布

荷重を加えた際の I_{DC} 分布、複屈折位相差分布をそれぞれ図 7、8 に示す。測定範囲及び図の配色は無荷重時と同様である。

図 7 の I_{DC} 分布において無荷重時と同様の考え方をすると $1.3 \leq X \leq 13.8$ mm の領域にハイドロゲルが存在すると言える。

局所荷重を加えた場合、荷重点付近で 140-200 nm の複屈折位相差を示した。また、荷重を加えている箇所から離れるほど連続的に複屈折位相差が小さくなっていることがわかる。

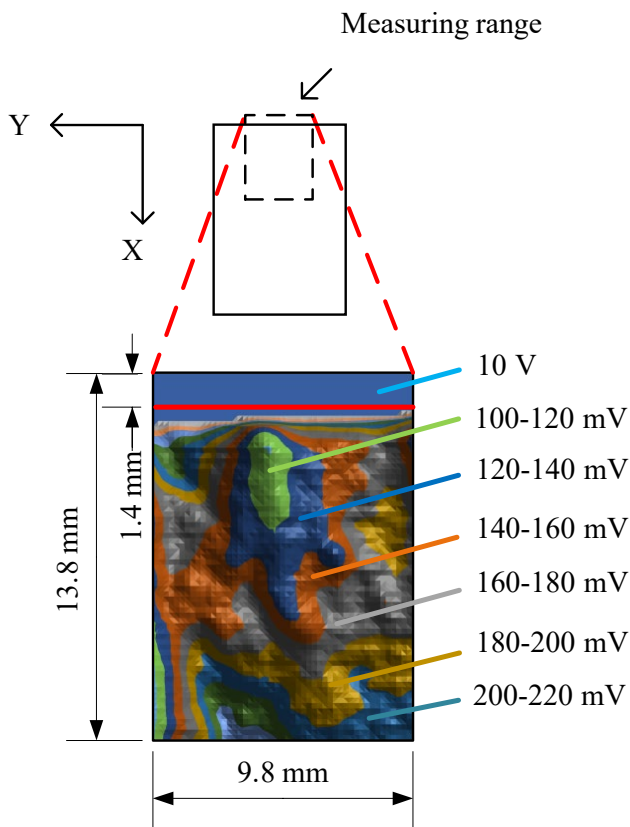


Fig 5 I_{DC} distribution under no load

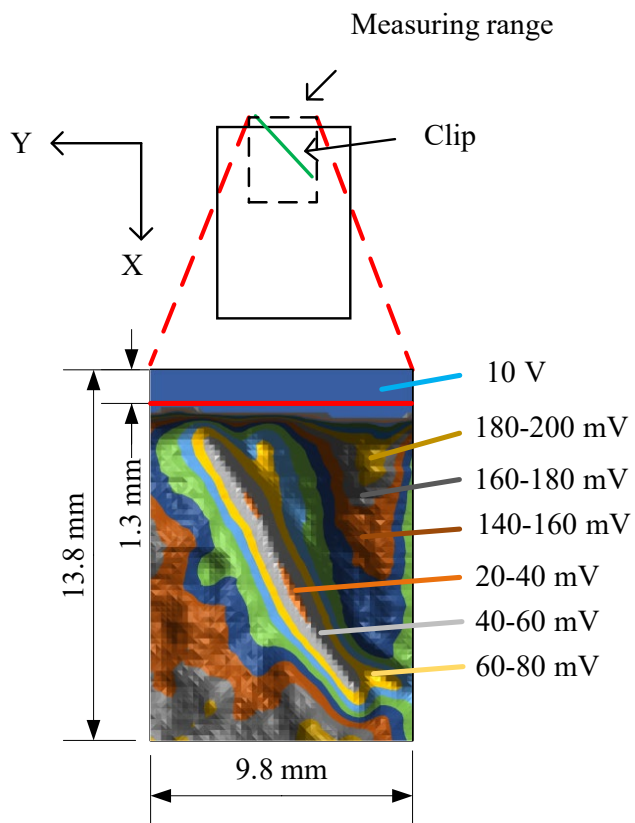


Fig 7 I_{DC} distribution under local load

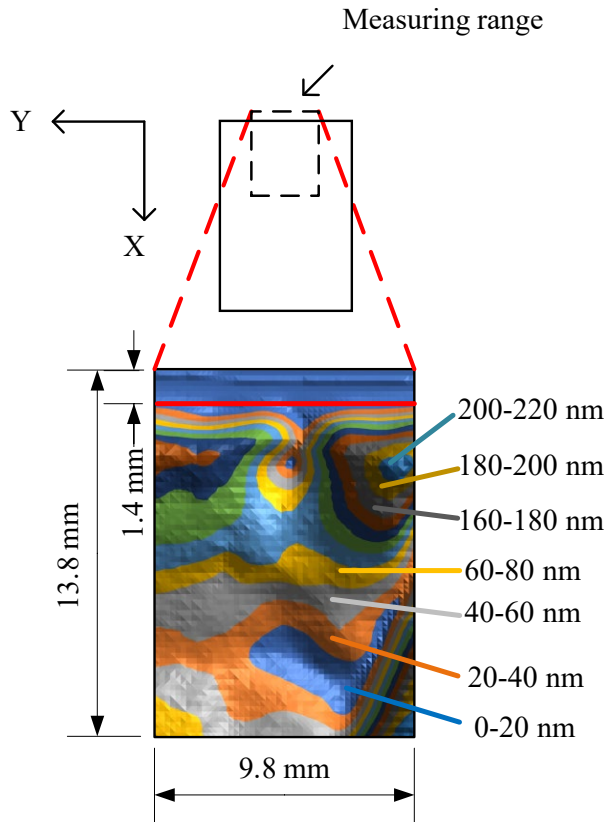


Fig 6 Retardation distribution under no load

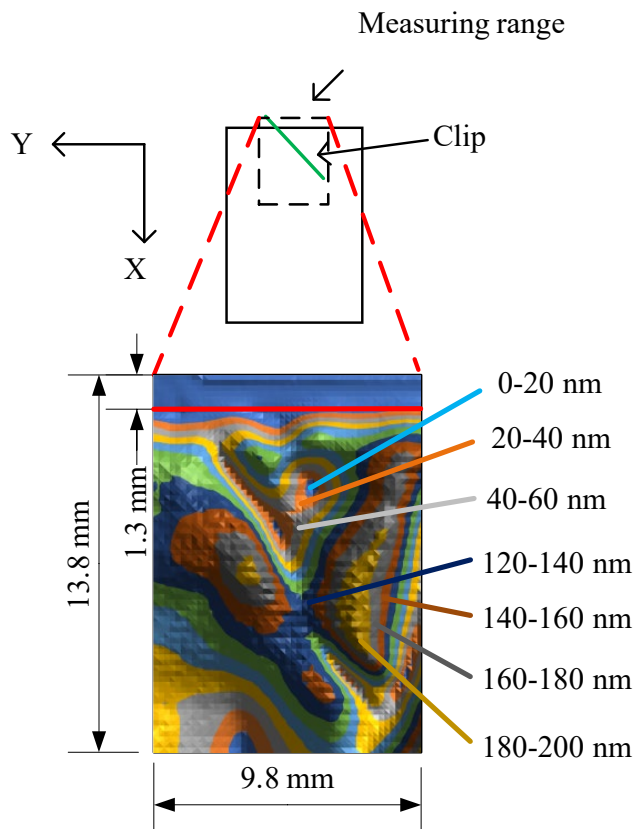


Fig 8 Retardation distribution under local load

4.4. 荷重時と無荷重時の複屈折位相差の差分

図9は荷重を加えた際の複屈折位相差と、無荷重時の複屈折位相差との差分を算出した結果であり、荷重によって生じた複屈折位相差の分布を示したものである。図10は図9の複屈折位相差分布をA方向から立体的に示した様子である。

図9ではクリップの両脇に高い複屈折位相差が集中していることを確認でき、荷重0.626 Nを加えた場合、100-160 nmほどの複屈折位相差が生じた。

上記の結果より手術用ガイドワイヤの先端荷重0.1 Nによって生じる複屈折位相差はおおよそ20 nmほどであると推測される。20 nmは本装置の測定範囲内であることから0.1 Nの荷重条件下でも同様に解析可能であると考えられる。

また、図9の四角枠内に生じた20-80 nmほどの複屈折位相差は、荷重点から離れた位置で孤立していることから、ハイドロゲルの初期位置のズレによって算出されたノイズだと考えられる。図5および図7より、無荷重時の無試料領域が1.4 mm、荷重時の無試料領域が1.3 mmであったことから0.1 mmほどの初期位置のズレが発生した。ハイドロゲルの配置を手作業で行った際に生じたものであると推測される。例えば、試料の特徴的な位置を目印に測定範囲を補正することで、この問題は解決できると考えられるため本質的問題ではない。

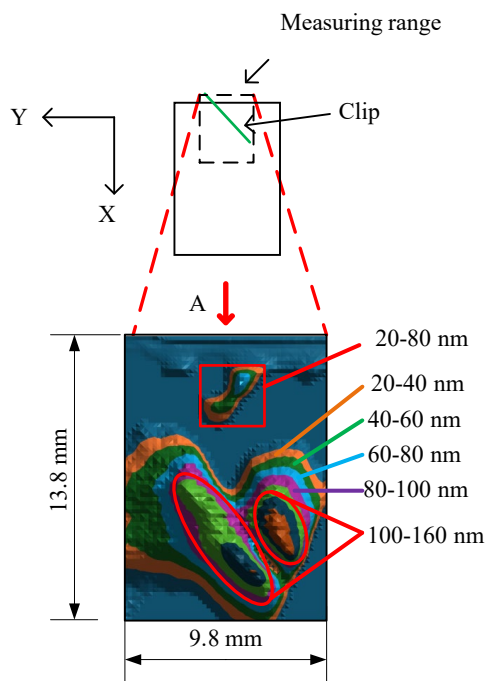


Fig 9 Retardation difference distribution between local load and no load

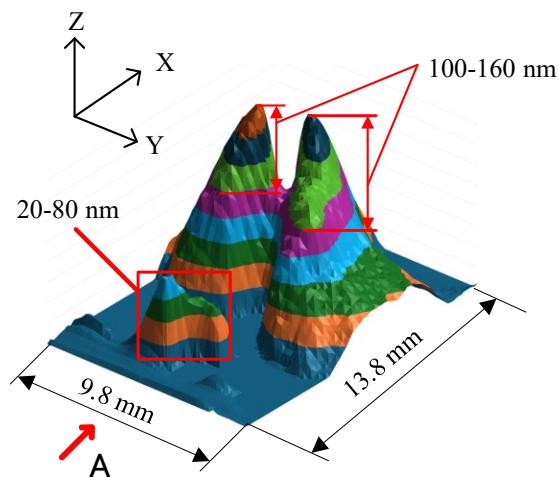


Fig.10 Retardation difference distribution between local load and no load

5. 結論

本研究では、手術用ガイドワイヤ先端荷重(0.1 N)における応力分布の可視化を目的として、ハイドロゲルの複屈折位相差分布を無荷重時と局所荷重を加えた状態で測定した。その結果、0.621 Nの荷重を加えた際に、試料内部に100～160 nm複屈折位相差が生じた。このことから、手術用ガイドワイヤ先端荷重である0.1 Nの場合には、おおよそ20 nmの複屈折位相差が生じると推定される。この値は本装置の測定範囲内であることから、手術用ガイドワイヤ先端荷重(0.1N)による応力分布を可視化できる可能性を示せた。

参考文献

- (1) 鈴木重晴, 脳血管スパズム, 蘇生, 13(1995), pp.104-111.
- (2) 斎藤博哉, 血管造影の基本理論 3. 合併症と術後管理, 日本IVR学会総会「技術教育セミナー」(2006), pp.86-90.
- (3) 松村貴志, 新美達也, 斎藤拓也, 法兼義浩, 岡田典晃, Material Jetting 法によるハイドロゲル立体造形と医療機器モデルへの応用, Ricoh Technical Report No.43(2018), pp.111-119.
- (4) 五味健二, 赤外線レーザー光弾性の開発と半導体ウエハの応力測定への応用, 博士論文, (2001), pp.24-25.
- (5) 五味健二, 赤外線レーザー光弾性の開発と半導体ウエハの応力測定への応用, 博士論文, (2001), pp.20-21.