

軟組織の力学特性測定システムの開発

横田秀夫 (理化学研究所)

北 善幸 (東邦大第2眼科、理研)

中村佐紀子 (理化学研究所)

山形 豊 (理化学研究所)

矢部比呂夫 (東邦大第2眼科、理研)

牧野内昭武 (理化学研究所)



背景

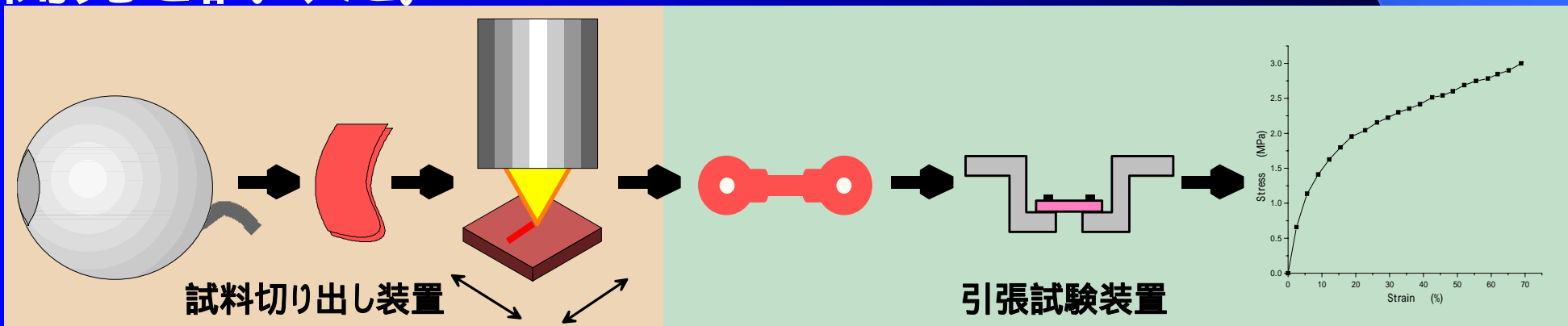
- 近年、社会の高齢化に伴い、加齢による網膜剥離症が増加している。
- この治療法として強膜内陥術(強膜を物理的に外側から締め付け変形させる)が用いられている。
- この術式では、眼球の締め付け量、縫合の位置、バックル材の種類によりその予後が左右されるが、その選定は医師の経験的な勘により判断されている。
- この力学的な変化を術前にシミュレーションすることにより、手術の最適解を求めることは患者のQOLの向上や、医療技術の発展のためにも重要であると考える。
- これらの事項に対し、我々の研究グループでは、有限要素法による網膜剥離手術の術前シミュレーションを目指した研究を進めている。
- 今回、シミュレーションの基礎となる眼球の力学的特性を取得するためのシステムの開発を試みた。

目的

眼球の非線形有限要素法シミュレーションを作るにはその構成組織の材料定数が必要である。今回、最も測定が困難であると想定される網膜の力学的な物性値の測定を目的とした引張試験を行うためのシステムの構築を試みた。

システム概要

- 我々は予備実験により、網膜の引張試験にはダンベル型の試料片が必要であることを確認している。
- また、生体試料は細胞の生死によりその力学的特性が変化し、乾燥や温度変化に敏感である。
- そこで、軟組織を自由形状に切り出す装置と、生きた状態の組織の力学的特性を計測する横型液中の引張試験装置を用いた軟組織の力学特性測定システムの開発を試みた。



試料切り出し装置

- 柔軟な網膜を自由形状に切り出すために、非接触の加工法であるエキシマレーザによるアブレーションを用いた加工装置の開発。
- 既存の装置では、加工範囲が固定されているために試料の移動を制御することにより自由形状を得る。
- ポリイミド樹脂を用いた加工精度の検証。
- 組織学手法を用いた網膜への影響を検証。
- 手術用ダイヤモンドナイフによる網膜の切断との比較。
- 開発した装置による網膜の切り出し。

試料切り出し装置概要



- 切断部 : L7270 (IC 薄膜除去装置)
浜松ホトニクス
- ガス媒体 : ArF
- 発振波長 : 193nm
- 周波数 : 10Hz
- 発振パルス幅 : 4nsec
- 最大エネルギー密度 : $3\text{J}/\text{cm}^2$
- 加工範囲 : $5 \sim 80 \mu\text{m}$
- 照射位置の制御 : PC による XY 電動
ステージの移動
- 位置決め精度 : $1 \mu\text{m}$

試料片の切り出し精度の検討

照射条件

試料: ポリイミド薄膜 (膜厚7.5, 12.5 μm)

照射レーザー : 193nm ArF エキシマ

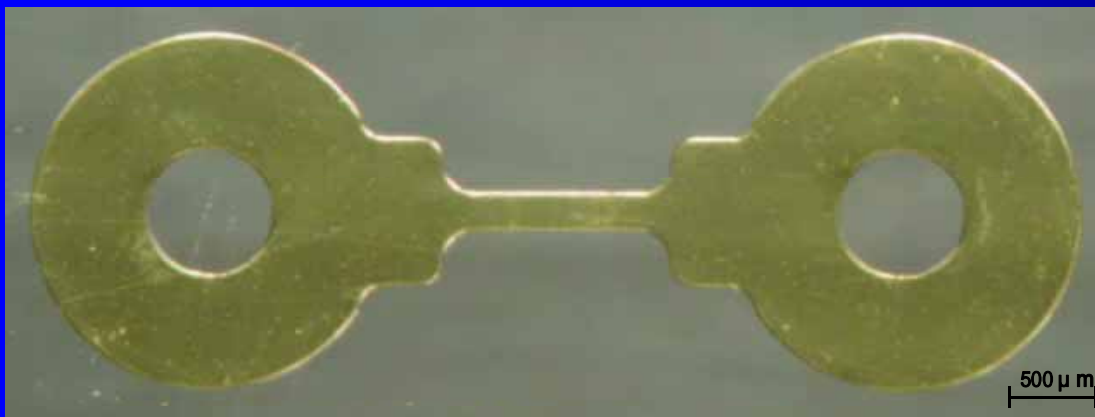
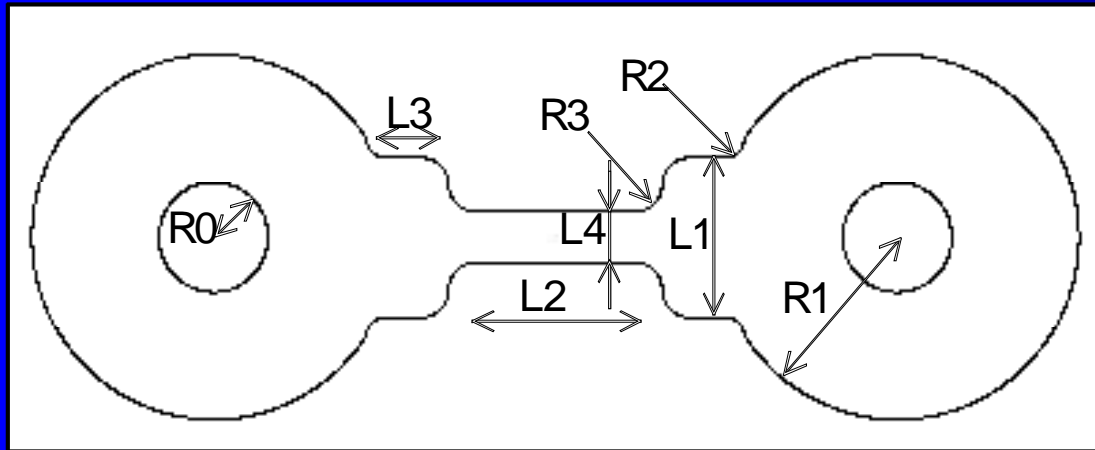
ステージ移動スピード : 13 $\mu\text{m}/\text{sec}$

周波数 : 10Hz

照射エネルギー : 75 $\mu\text{J}/\text{pulse}$

加工範囲 (1エリア) : 78 μm

照射回数 (1エリア内) : 平均120発

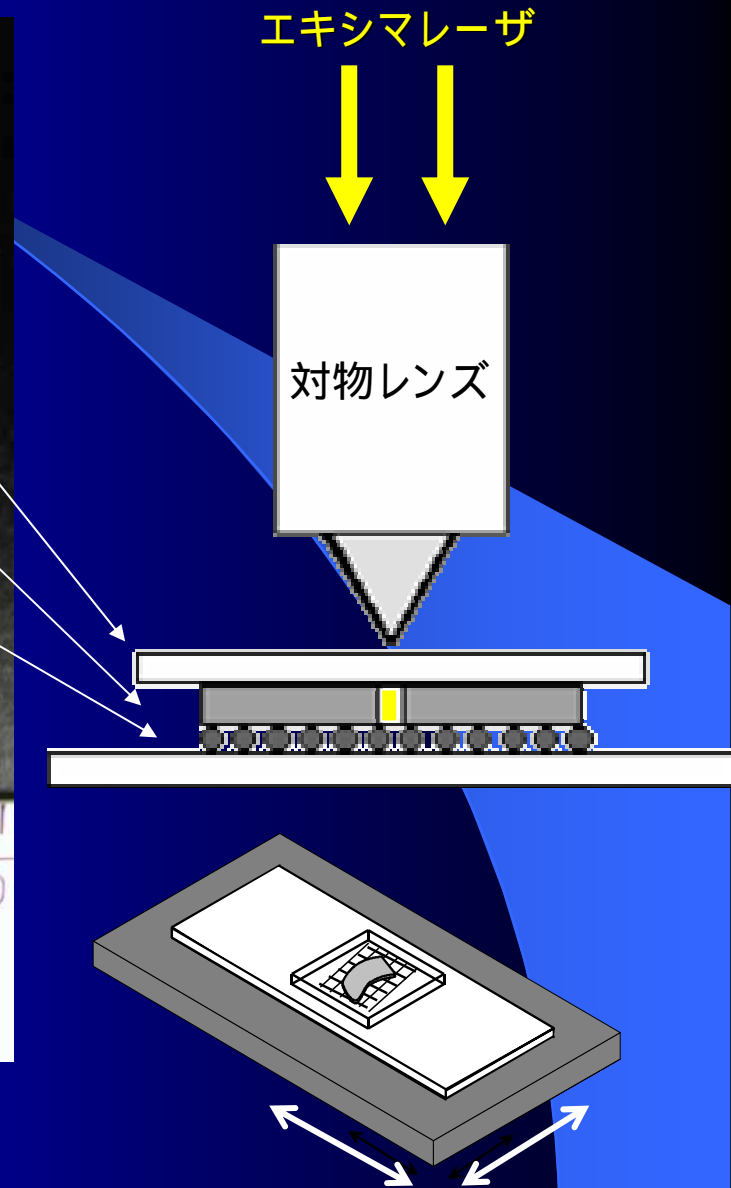
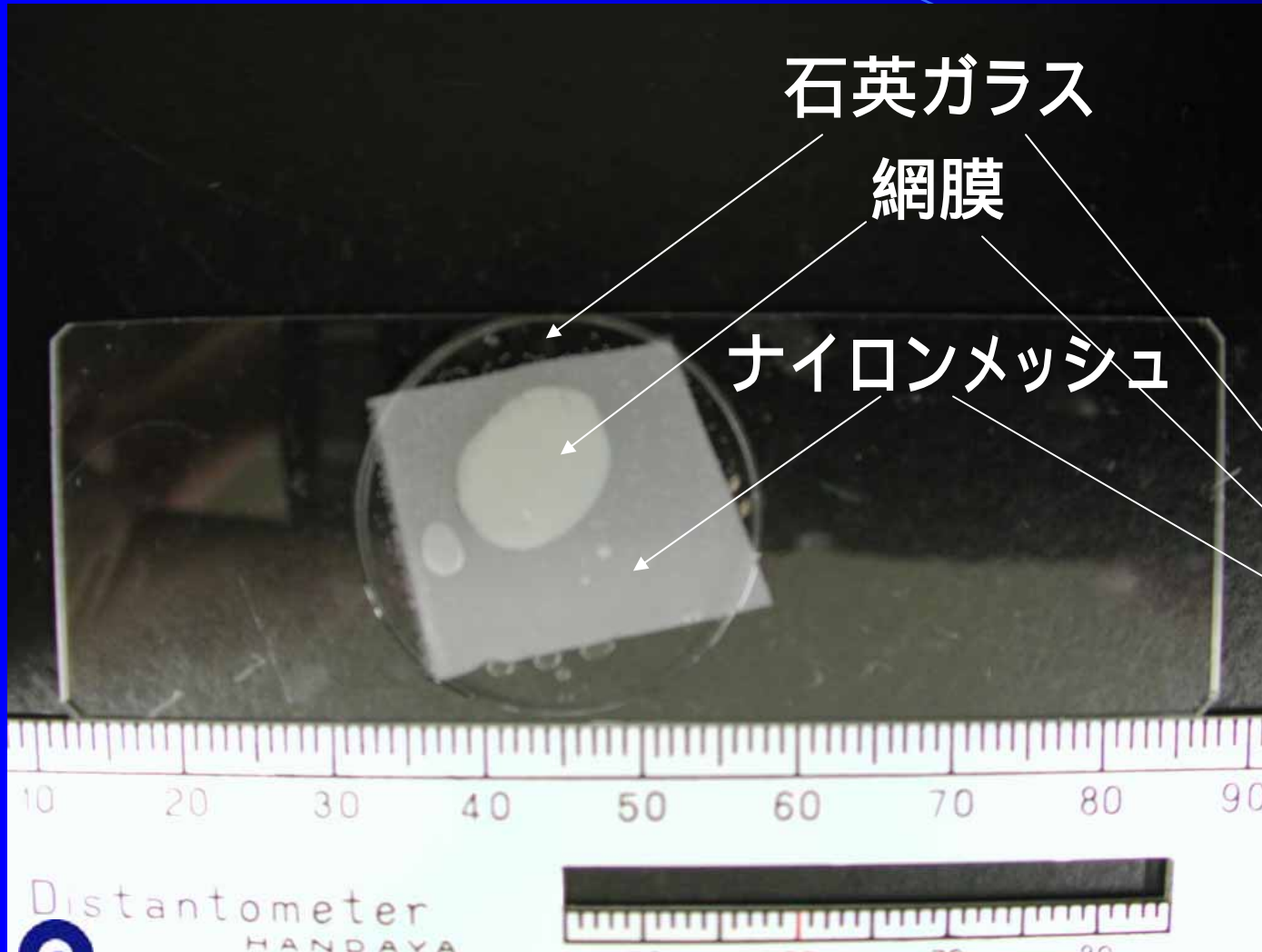


試料片の設計値と実測値

	R0	R1	R2	R3	L1	L2	L3	L4
Instruction	300	1000	100	150	878	878	200	278
Calculation	355	945	155	205	800	800	122	200
Measurement (7.5 μm)	347	950	--	--	798	814	111	213
Measurement (12.5 μm)	342	942	--	--	785	811	127	196

(μm)

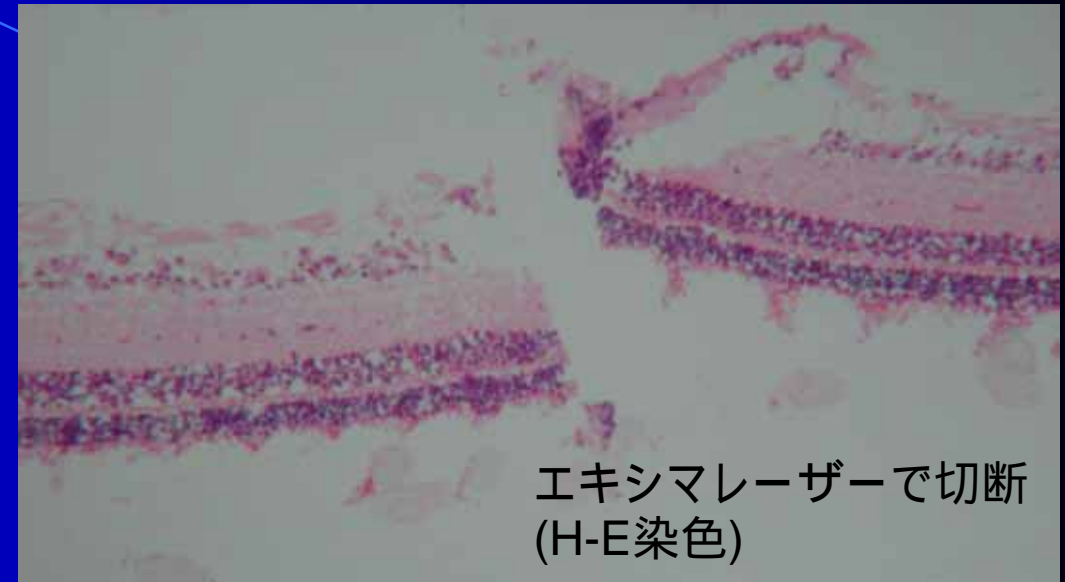
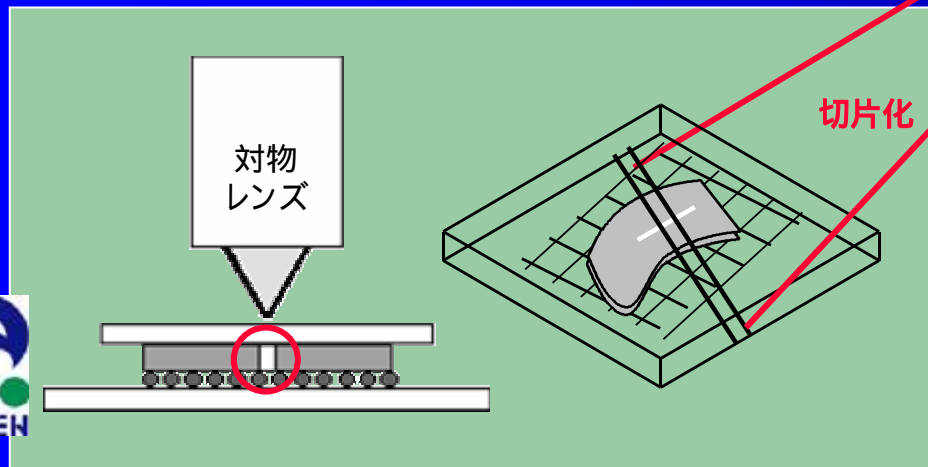
網膜の保持方法



レーザー照射による網膜への影響

照射条件

- 照射レーザー : 193nm ArFエキシマ
- ステージ移動スピード : 13 $\mu\text{m}/\text{sec}$
- 周波数 : 10Hz
- 照射エネルギー : 25 $\mu\text{J}/\text{pulse}$
- 加工範囲(1エリア) : 78 μm
- 照射回数(1エリア内) : 平均120発
- 供試試料: 新鮮豚眼網膜



エキシマレーザーで切断
(H-E染色)



ダイヤモンドメスで切断
(H-E染色)

網膜の切り出し

試験片レーザ加工

ファイル(E)

R1

R2 周回数

R3

L1

L2

L3

L4 X:

n Y:

R0 exX

exY

注1 L1=L2+4*R3 とすること

送り待ち時間(sec)

加工箇所:

進行状況

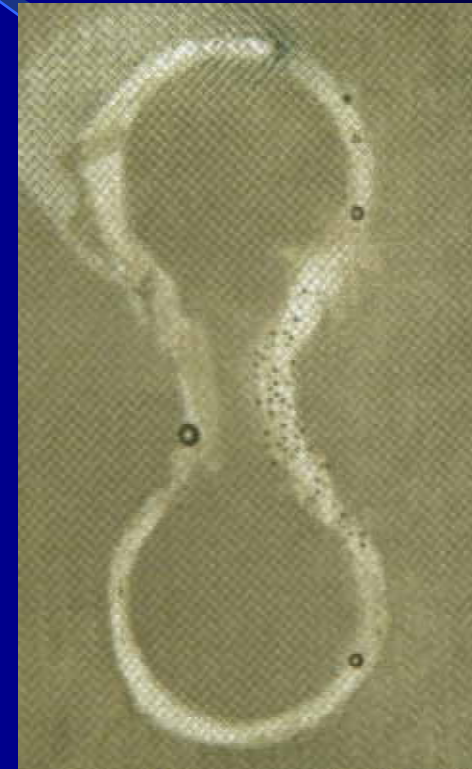
加工済み点数/総点数:

/ Points

経過時間:

推定残時間:

概略図



設計値

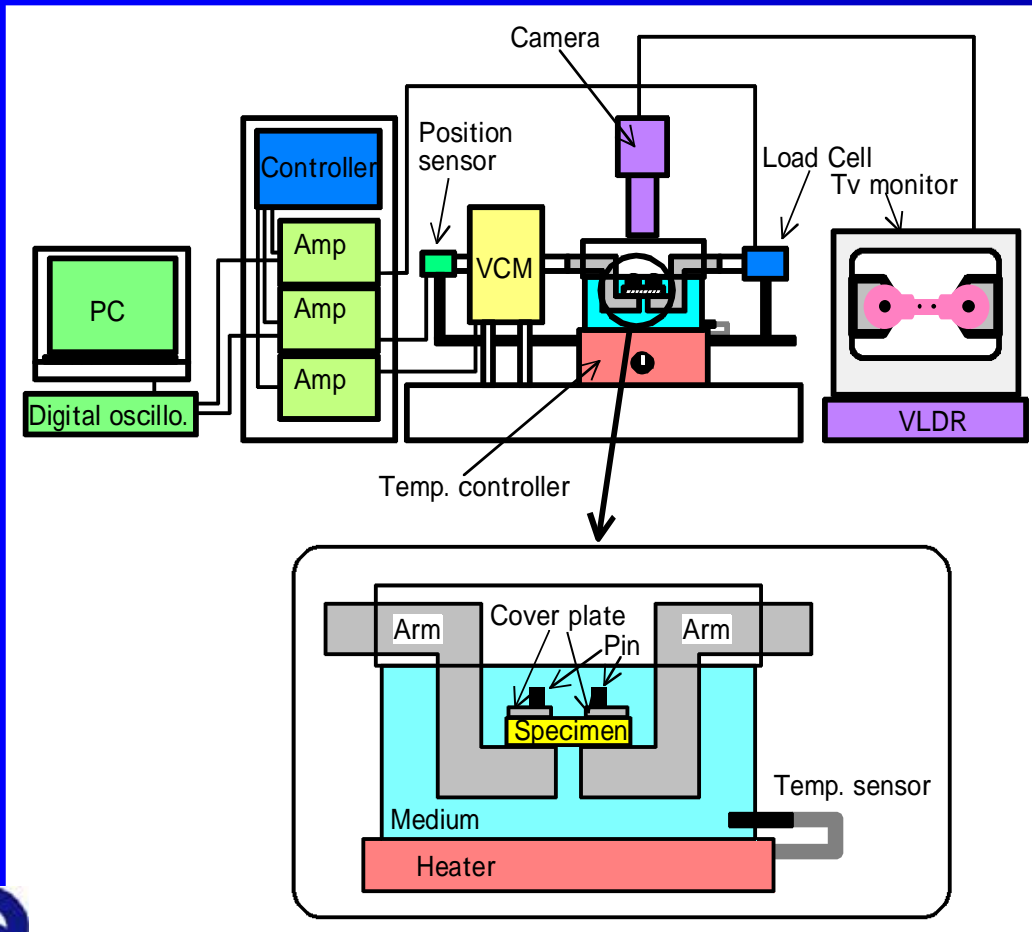
切断した網膜

引っ張り試験装置

- ミリメートルオーダーの大きさの生体試料を対象とした横型で液中の試料の力学的特性の取得が可能な装置の開発。
- ポリイミド樹脂試験片を用いた引張試験の検討。
- 同試験片による伸びー荷重曲線の取得。
- 同試験片による応力ー歪み曲線の取得。

引っ張り試験装置

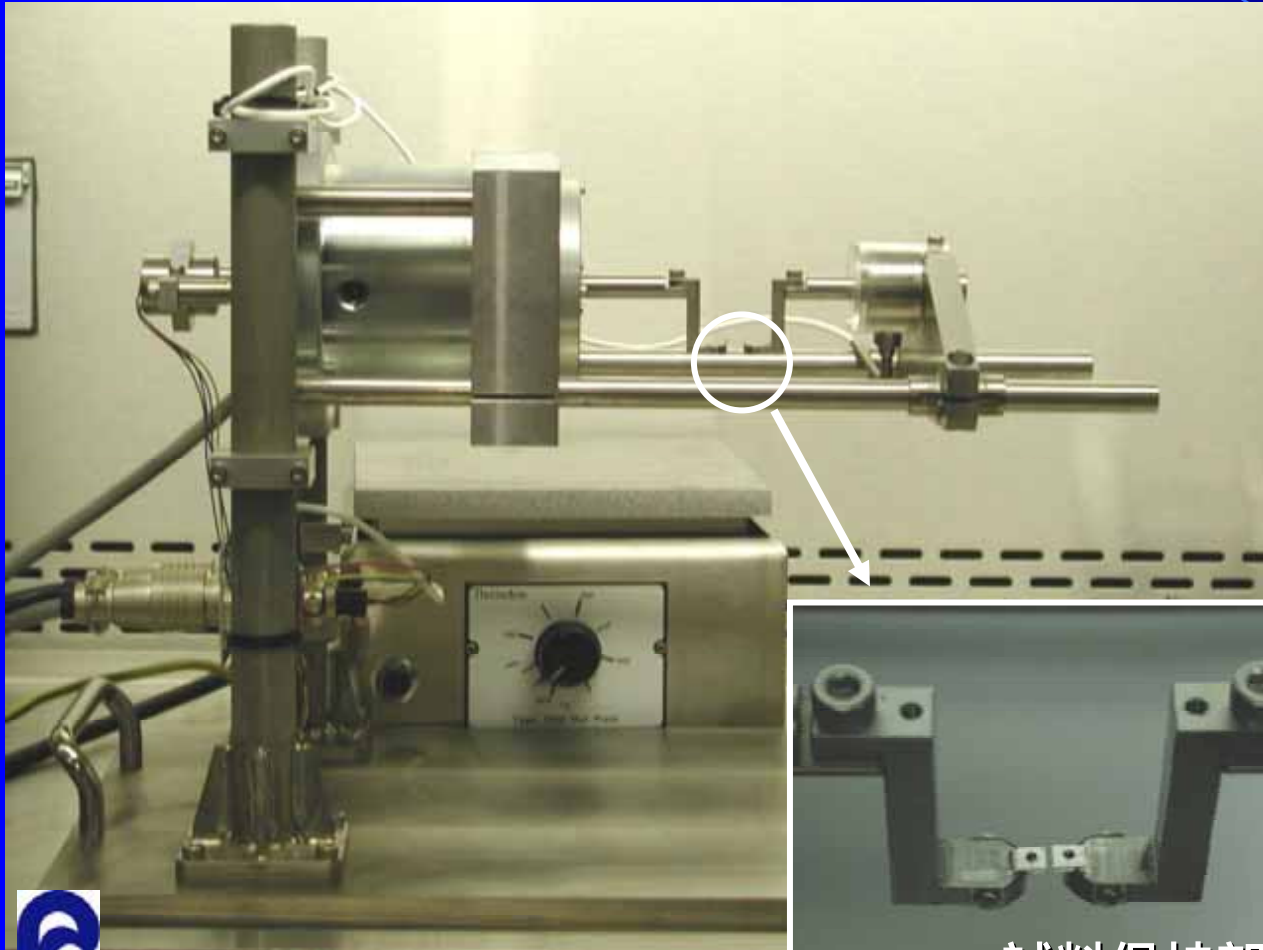
装置仕様



- アクチュエータ: VCM
 - 最大荷重: 10N
 - ストローク: $\pm 2\text{mm}$
- 荷重検出器: ロードセル
 - 最大荷重: $\pm 1\text{N}$
 - 最小分解能: 10mN以下
- 位置検出器: 差動トランス
 - ストローク $\pm 2\text{mm}$
 - 最小分解能: 20 μm 以下
- 制御: 荷重or位置
 - 繰り返し波形: 正弦波、矩形波
 - 繰り返し速度: 0.1 ~ 30Hz
- 試料液槽: ポリカーボネイト
 - 制御温度: RT ~ 100
- 試料保持: 位置決めピンと接着剤

引っ張り試験装置模式図

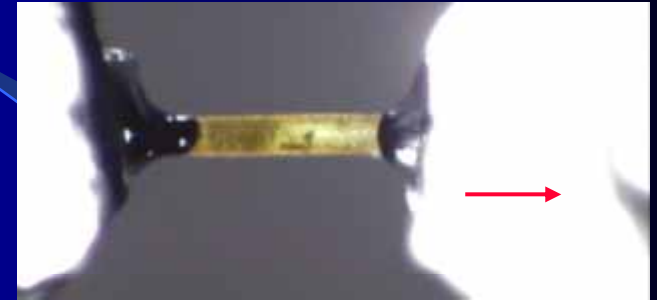
引張試験装置



装置外観

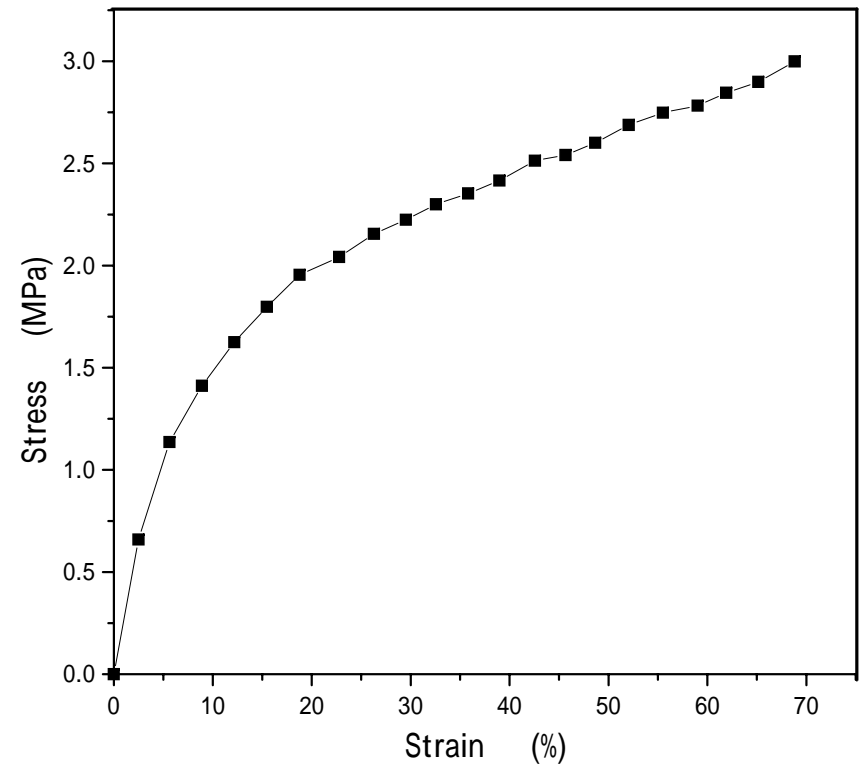
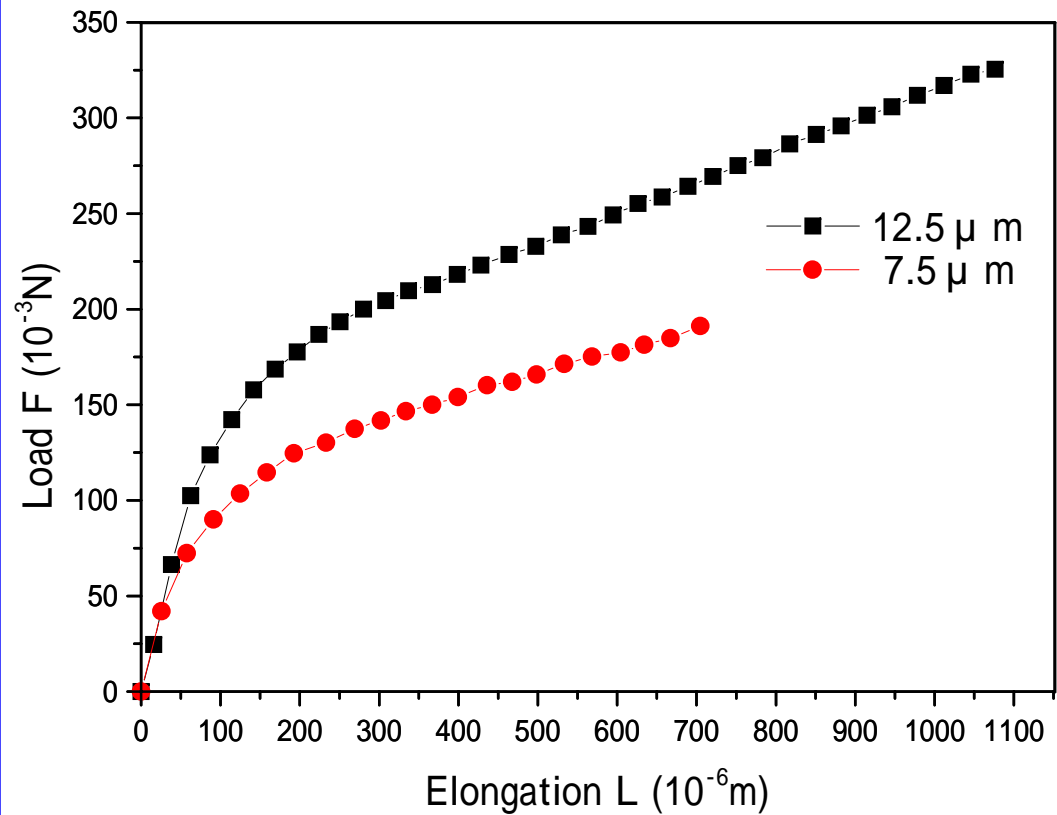


試料保持部



引張試験の様子

引っ張り試験結果



膜厚によるポリイミド樹脂の伸びー荷重曲線

ポリイミド樹脂の応力ーひずみ曲線

結果

● 試料の切り出し

- 本システムによる試料切り出し装置によりポリイミド薄膜を設計値に基づく自由形状に切り出すことができた。
- 柔軟な網膜を熱の影響を与えず鋭利に切断できた。
- ダイヤモンドメスでは、切断時に網膜の挫滅・変位があり、自由形状に切り出すことも出来なかった。
- 網膜を自由形状の試験片として切り出すことができた。

● 引張試験

- 引張試験装置により自由形状に切り出したポリイミド試験片の伸びー荷重曲線を測定することができた。
- 測定値を元に歪みー公称応力曲線を求めることができた。

結論

- エキシマレーザーを用いた試料切り出し装置は軟組織の自由形状の試験片を作製するのに有用である。
- 横型引張試験装置はミリメートルオーダーの試料片の引っ張り試験に有用である。
- 上記事項より、今回開発したシステムは、軟組織の力学的特性の計測に有用であると考えられる。