

# ニュートリノ崩壊光子検出器較正用 赤外線レーザーの ビームモニター装置の開発

---

福井大学 工学部 応用物理学科

王生 尚志

2022年度 TCHoU 素粒子構造研究部門 ワークショップ

2023/3/16(木)



# COBAND実験 (COsmic BAcground Neutrino Decay Search)



- ・ニュートリノの「質量」によって、質量固有状態 ( $m_1, m_2, m_3$ ) を持つ ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) に分類可能
- ・質量の大きいニュートリノが光子を放出して質量の小さいニュートリノに崩壊すると予言されている。

- ・ニュートリノ崩壊光子の予想エネルギー  $E_\gamma$

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} \equiv \frac{\Delta m_{32}^2}{2m_3}$$

→  $E_\gamma$  を計測することでニュートリノの質量を決定可能

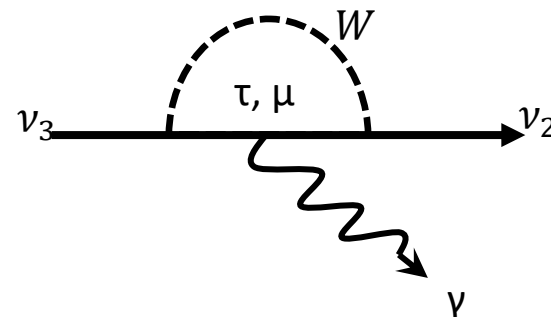


$m_1$ [meV]	$m_2$ [meV]	$m_3$ [meV]	$E_\gamma$ [meV]	波長 $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	8.7	51	25	50
50	51	71	18	70
71	72	87	14	86

ニュートリノ崩壊光子の波長及びエネルギー

**波長:  $\lambda = 50\mu\text{m} \sim 90\mu\text{m}$  (遠赤外領域)**

$$E_\gamma = 15 \sim 25 \text{ meV}$$



ニュートリノ崩壊のファイマン図

- ・ニュートリノ質量2乗差の値をもちいると  
 $\Delta m_{32}^2 = (2.51 \pm 0.05) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$   
 $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

- ・宇宙の密度ゆらぎの観測結果などから、95%の信頼度で

$$m_1 + m_2 + m_3 < 0.23 \text{ eV}$$

しかし、ニュートリノの寿命  $\tau$  はとても長く、崩壊確率は極めて低い。

(観測で  $\tau > 3 \times 10^{12}$  年、理論ではモデルによって  $10^{13} \sim 10^{17}$  年, 更にもっと長いものまで)

⇒ 観測するには大量のニュートリノが必要

宇宙背景ニュートリノ:

- ビッグバンによって宇宙が生まれたとき、光子や電子やクォークなどと共に大量に生成されたはず。
- 今でも大量に宇宙を飛び交っている (約  $300$  個/ $\text{cm}^3$ ) と考えられているが、未発見。

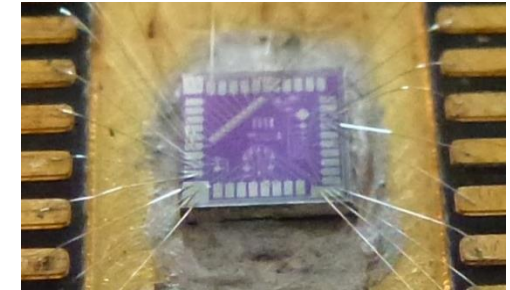


# 超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器

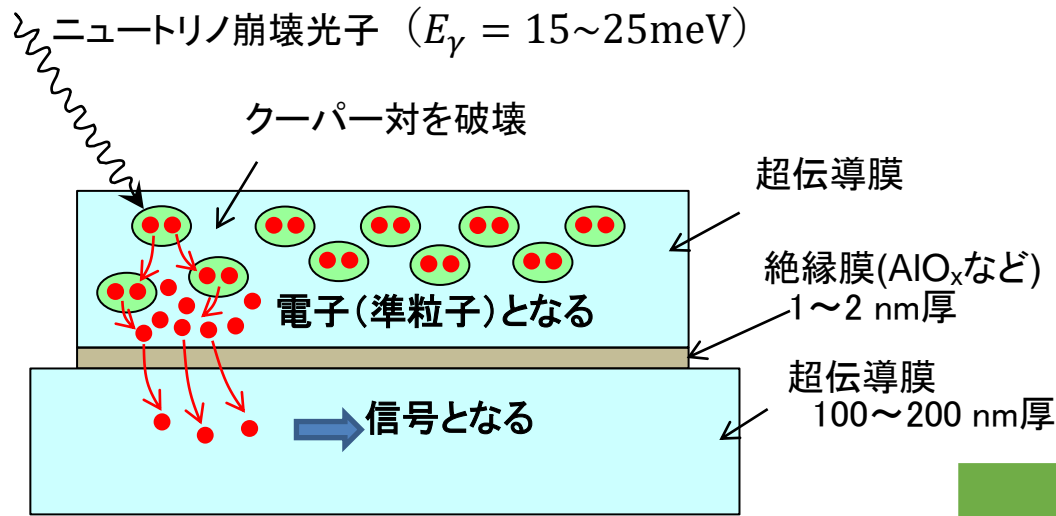
このような超低エネルギーの光子を精度良く検出する検出器として

超伝導トンネル接合素子( **Superconducting Tunnel Junction : STJ** )検出器に着目

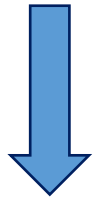
錐形STJ検出器



5mm角のチップの中に、  
いろんなサイズのSTJ



入射した光子のエネルギー  $\propto$  信号となる電子の個数



使用する超伝導体のエネルギー  
ギャップが小さいので

超低エネルギーの光子でも検出が可能

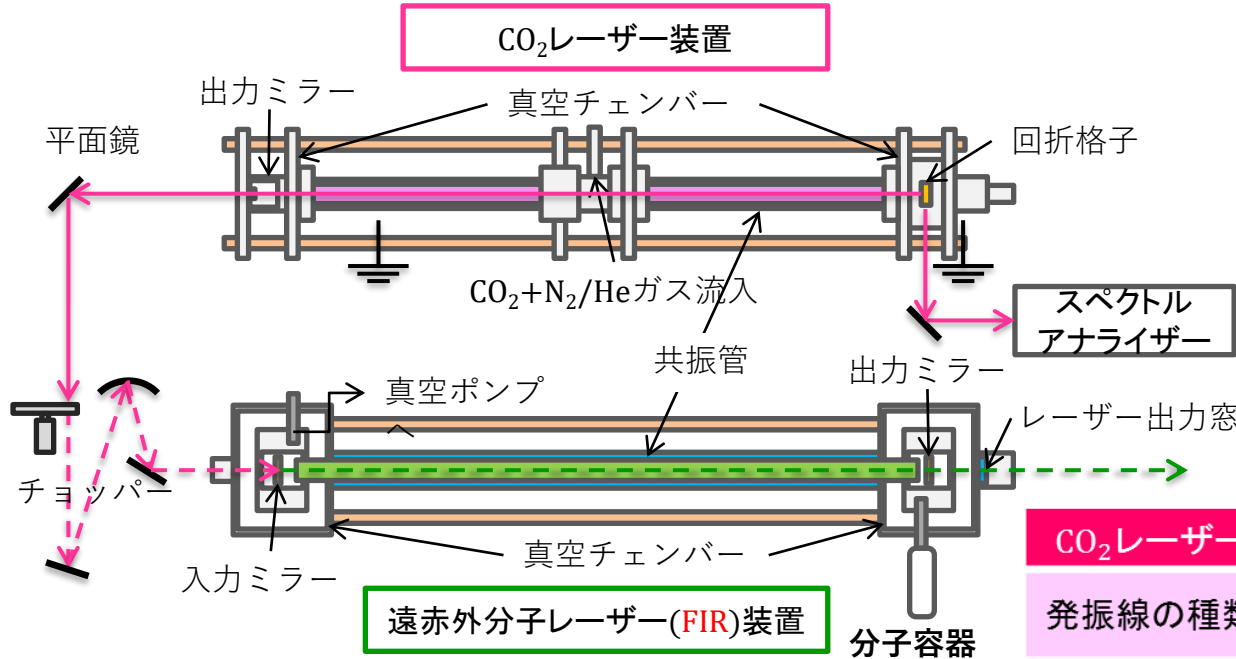
金属の種類	Nb	Al	Hf
転移温度 $T_c(K)$	9.23	1.20	0.16
エネルギーギャップ $\Delta(\text{meV})$	1.550	0.172	0.021

しかし、開発中のため性能評価が必要  
(崩壊光子の波長は赤方偏移などを考慮して40~120 $\mu\text{m}$ を想定する。)



# STJ検出器性能評価に用いる光源

STJ検出器の性能評価に用いる光源として福井大学遠赤外領域開発研究センターのCO<sub>2</sub>レーザー励起の遠赤外分子レーザー装置(FIR)がある。



このレーザー装置は波長が**40~720 $\mu$ m**の発振可能線約**70**本の中から媒体分子を変更することで任意の**1**本を選んで照射できる。



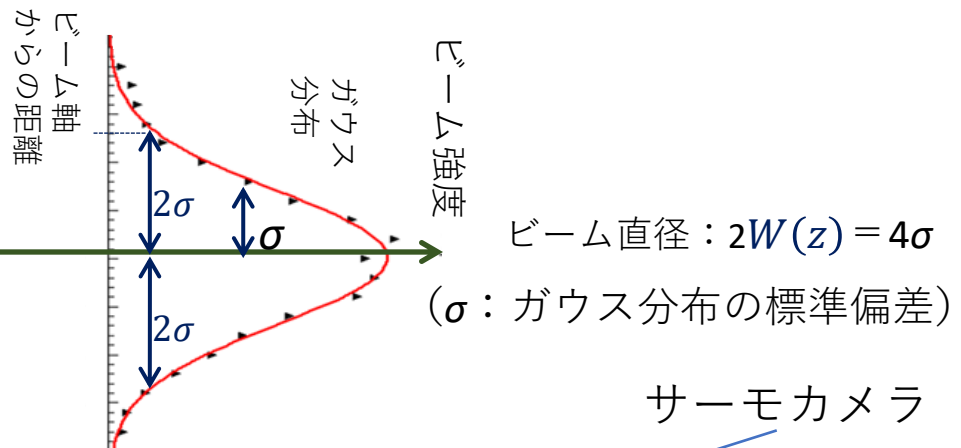
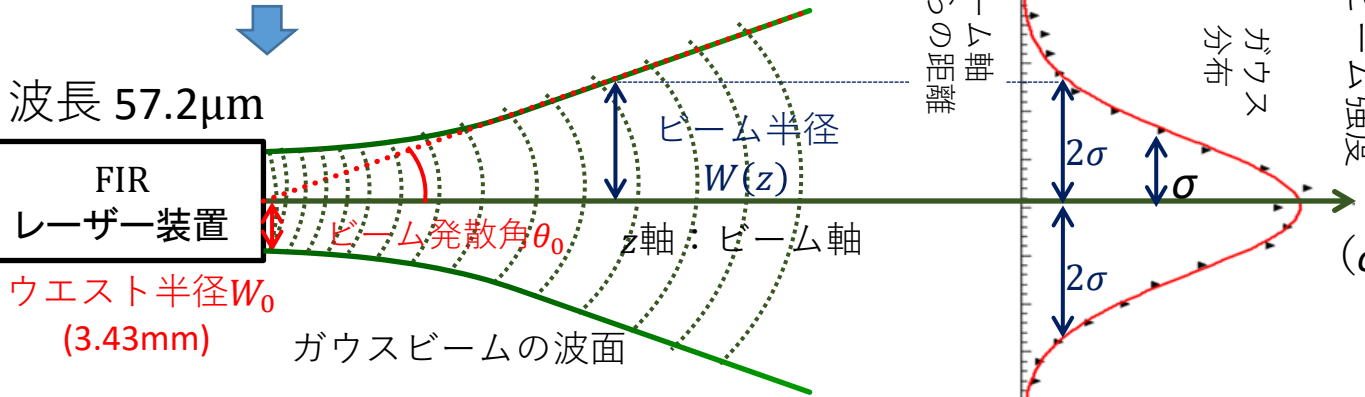
予想されるニュートリノ崩壊光子の波長**50 $\mu$ m~90  $\mu$ m**をカバーしている。

CO <sub>2</sub> レーザー	遠赤外分子レーザー			
発振線の種類	媒体分子	波長 [μm]	E <sub>γ</sub> [meV]	出力 [mW]
10R(18)	CD <sub>3</sub> OH	41.4	30.0	11
		43.7	28.4	9.4
9R(34)	CD <sub>3</sub> OH	52.9	23.5	9.2
9R(8)	CH <sub>3</sub> OD	57.2	21.7	72
9P(34)	CH <sub>3</sub> OH	70.5	17.6	23
9R(8)	CH <sub>3</sub> OH	77.3	16.1	2.8
		86.2	14.4	—
10R(16)	CD <sub>3</sub> OH	86.4	14.4	6.8
9P(30)	CH <sub>3</sub> OD	103.1	12.1	22
9P(36)	CH <sub>3</sub> OH	118.8	10.5	75



# ビームプロファイル・ビームパワー

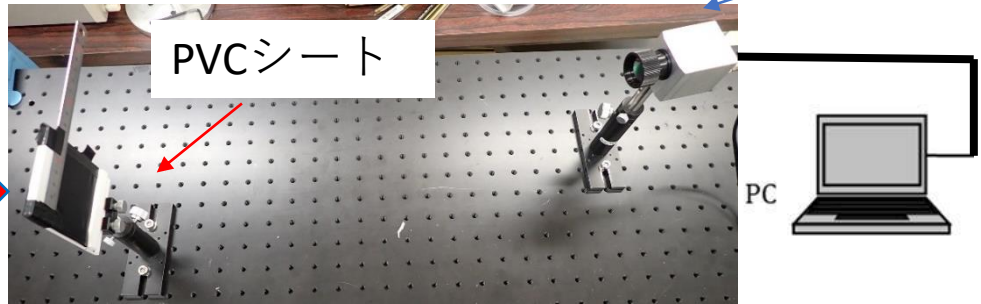
レーザーは**ガウスビーム**として伝搬する。



$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2}$$

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0}$$

レーザー光



STJ検出器を較正するために、FIRレーザーを発振させる。  
 ⇒ビームの直径やビームパワーの値が重要。  
 ⇒ビームプロファイル・ビームパワーを同時にモニターできる装置が必要。

PVC (ポリ塩化ビニル) シートや紙にFIRレーザーを照射して、温度が上昇することを利用してビームプロファイル・ビームパワー同時モニター装置を開発した。

※Heガスが不足しているため、FIRレーザーの代わりに可視光(He-Ne)レーザーを使用した。 4

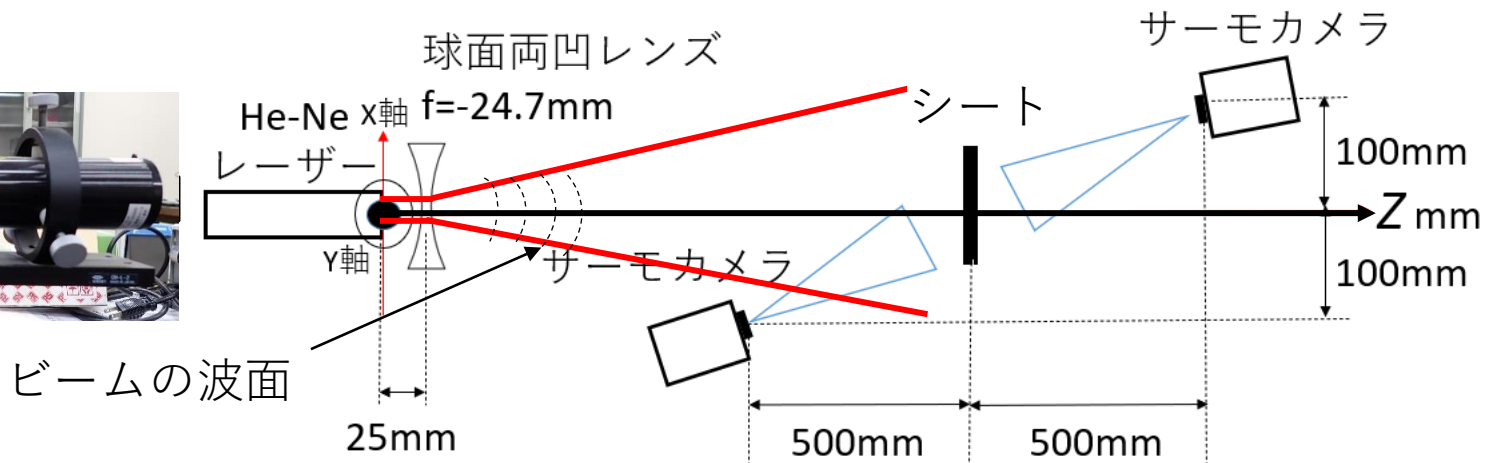
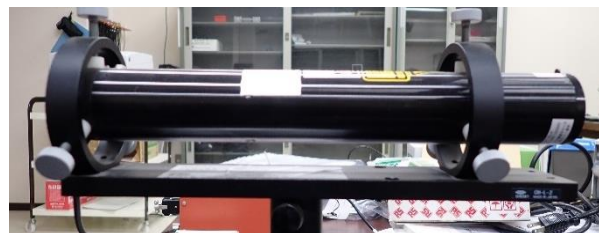
# ビームプロファイル・ビームパワーの測定実験



- サーモカメラを使用したビームプロファイル・ビームパワー測定実験  
レンズで拡大したビームを試料に照射し、サーモカメラで2つの視点から動画を撮影。  
シートをz軸上で動かし、それぞれの位置でビームパワーを測定する。



He-Neレーザーの波長:632.8nm  
ウエスト半径:0.325mm  
出力:1mW



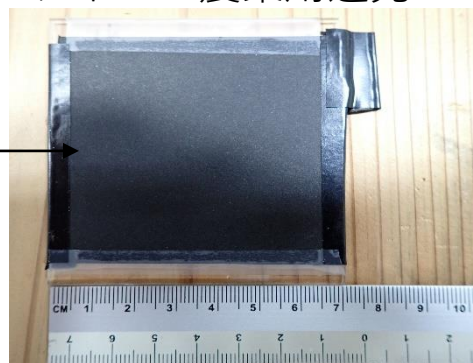
用いたシート:

黒色0.1mm厚のPVCシート (農業用ポリ塩化ビニールフィルム農業用遮光シート)

黒色0.5mm厚のPVCシート (塩ビシート)

黒色の0.09mm厚の紙(HEIKO色上質紙)

黒色の0.18mm厚の紙 (色画用紙)

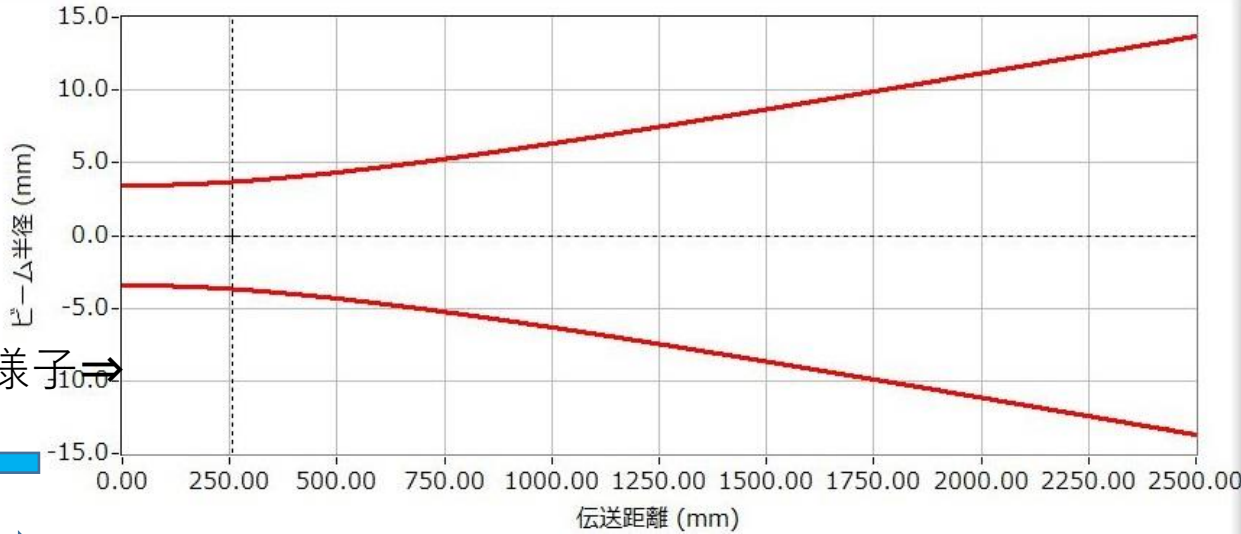




# ABCD行列によるシミュレーション

ABCD行列:ガウスビームの伝搬の様子をシミュレーションするために用いられる。

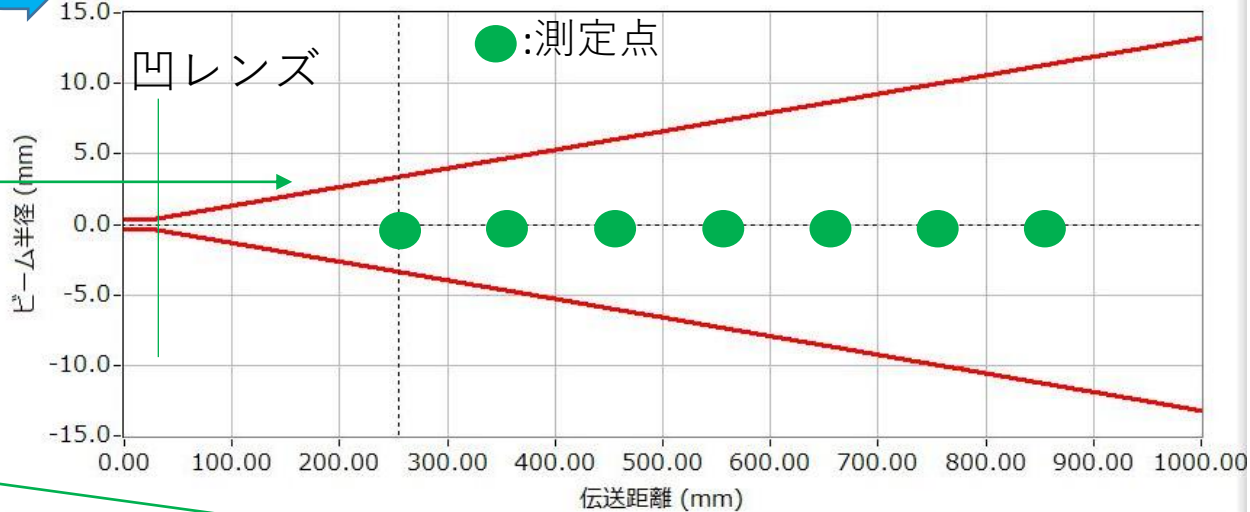
FIRレーザーのビーム伝搬の様子⇒



レンズで広げることでビーム伝搬の様子を似せている。



レンズを使って広げた、He-Neレーザーのビーム伝搬の様子⇒



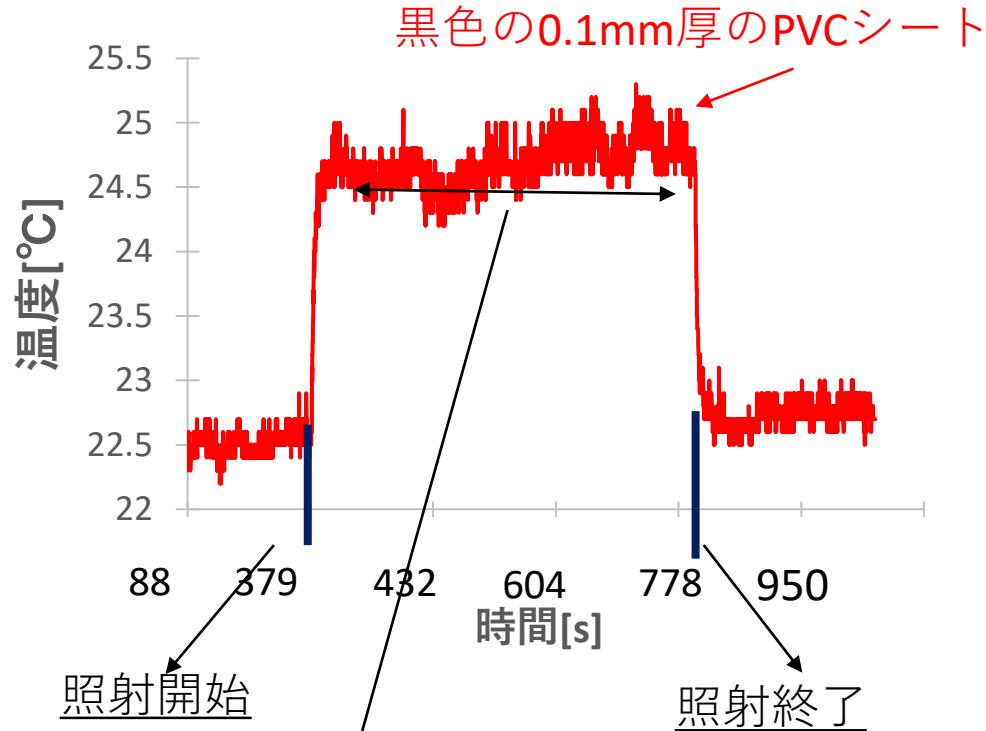
レーザーの出口から255mm位置では、ビームの直径が6.73mmであることを表している。

伝送距: 255.00 mm  
 ビーム: 6.73 mm  
 カーソル: X: 255.00, Y: 0.0  
 保存 停止

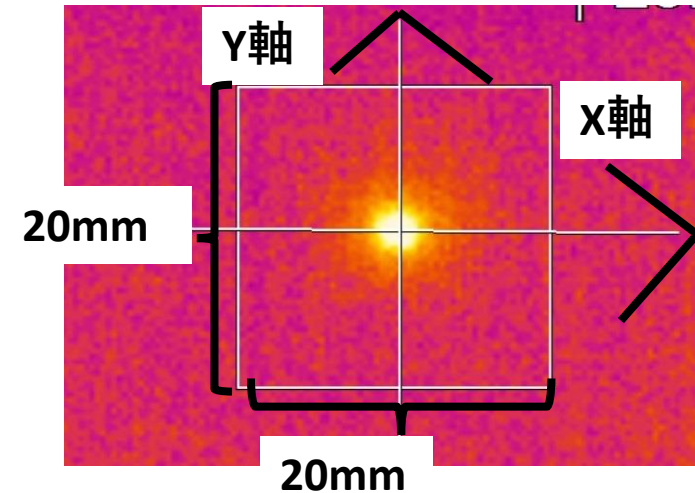


# 温度の時間変化とガウスフィット

・下図は、伝送距離 $Z=255\text{mm}$ の位置でシートの上流から動画撮影したデータである。

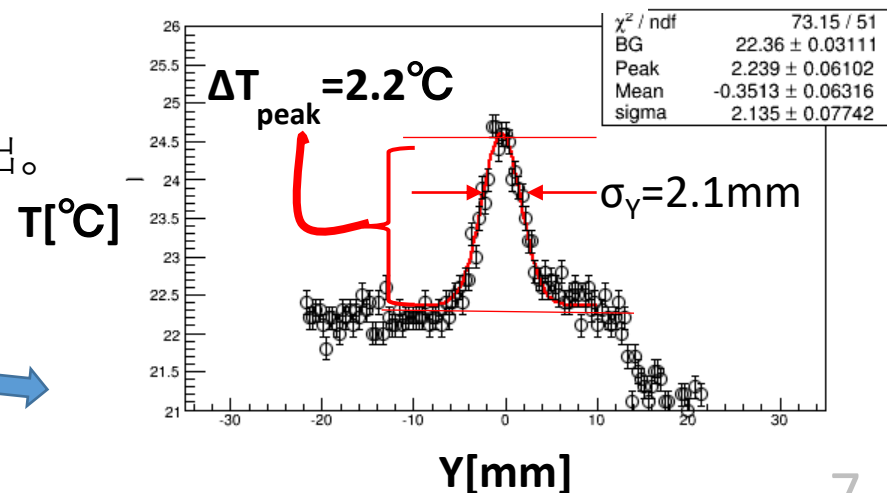


サーモカメラの  
スクリーン↓



熱平衡状態の区間から、温度の平均値を算出。

平均の点の温度分布について解析するため、  
ガウスフィットを行う。

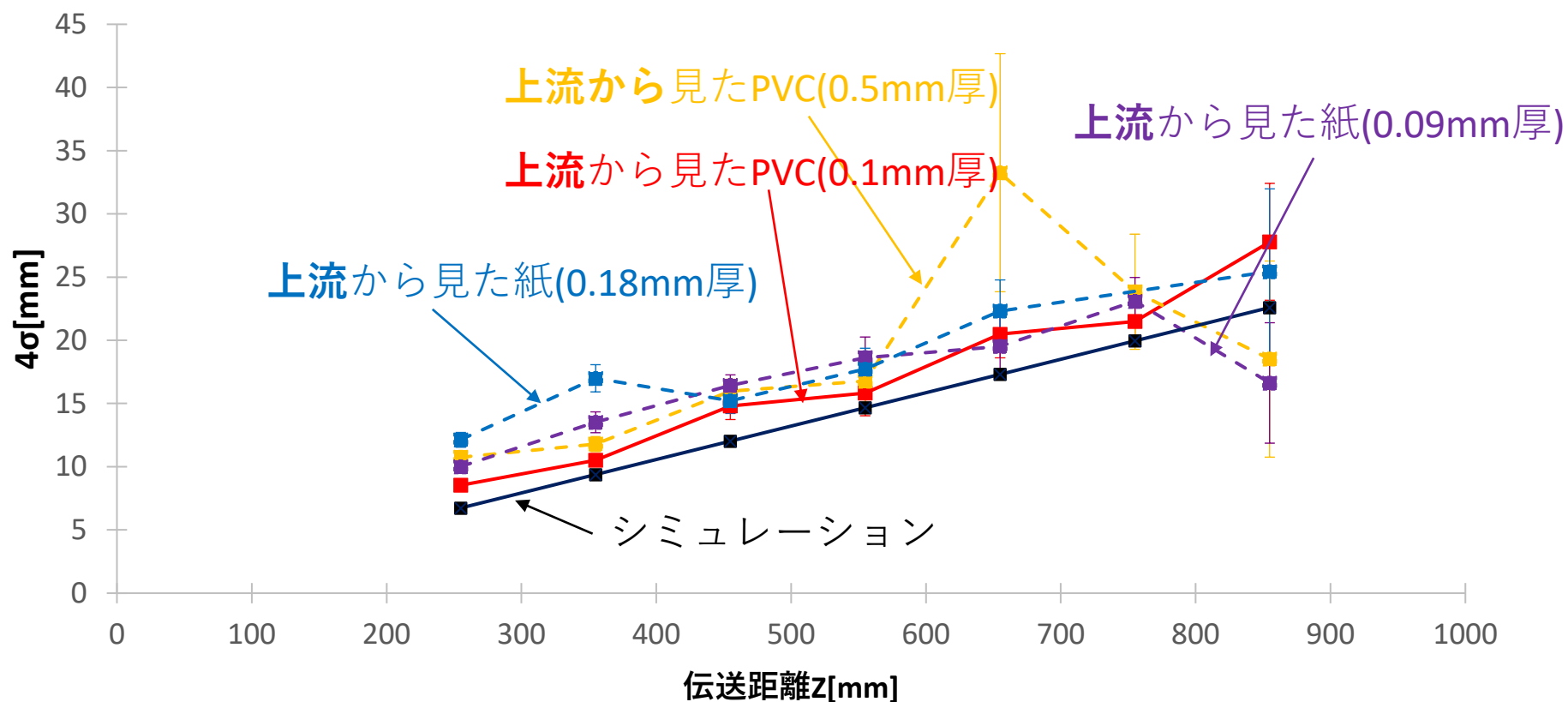




# ビームプロファイル— $4\sigma$ に着目して—



シミュレーションによって得られた $4\sigma$ (ビーム直径)の値と  
ガウスフィットによって得られたy方向の $\sigma$ を4倍したものを比較する。



どの試料もシミュレーションよりも数mm程、 $4\sigma$ が大きくなっている。  
⇒試料の温度分布を観ているため、試料の上で熱が拡散している。

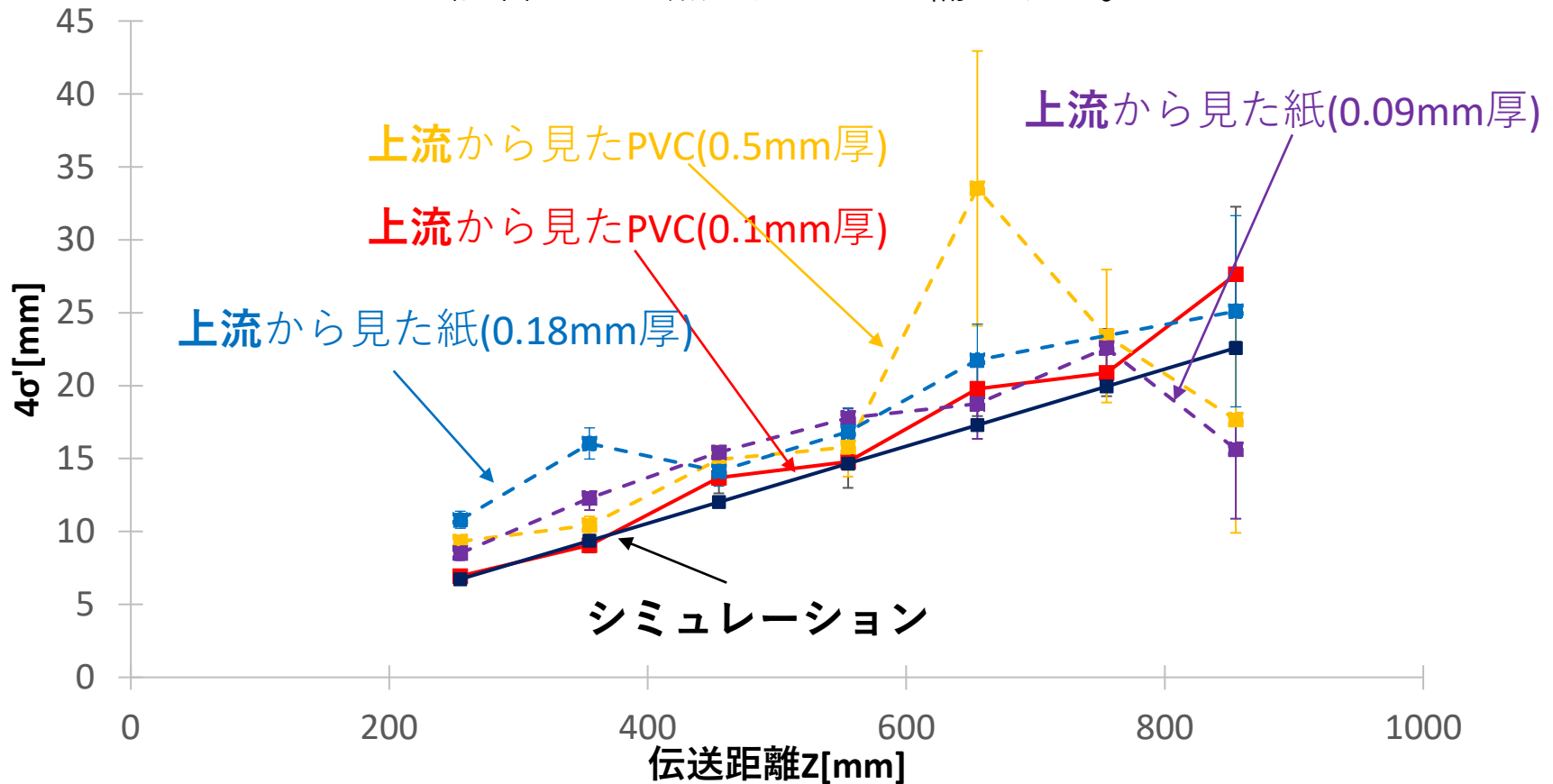
0.1mm厚のPVCが最もシミュレーションから得られた値に近い。

# 先行研究による補正

0.1mm厚のPVCシートで遠赤外分子レーザーのビームプロファイルをモニターするときの補正式(先行研究[1])

$$4\sigma' = 1.08 \times 4\sigma - 2.24$$

← 試料上での熱の広がりを補正する。



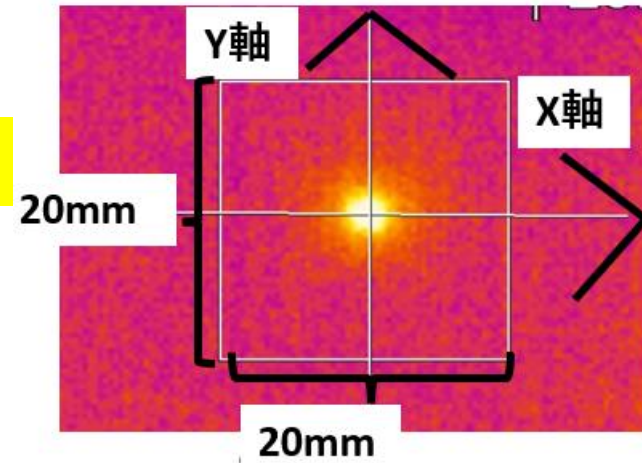
# ビームパワーモニターとしての性能評価

ビームパワーに比例する物理量である3次元のガウス分布からなる立体の体積を求めた。3次元のガウス関数を空間全体で積分することで以下の表式が得られる。

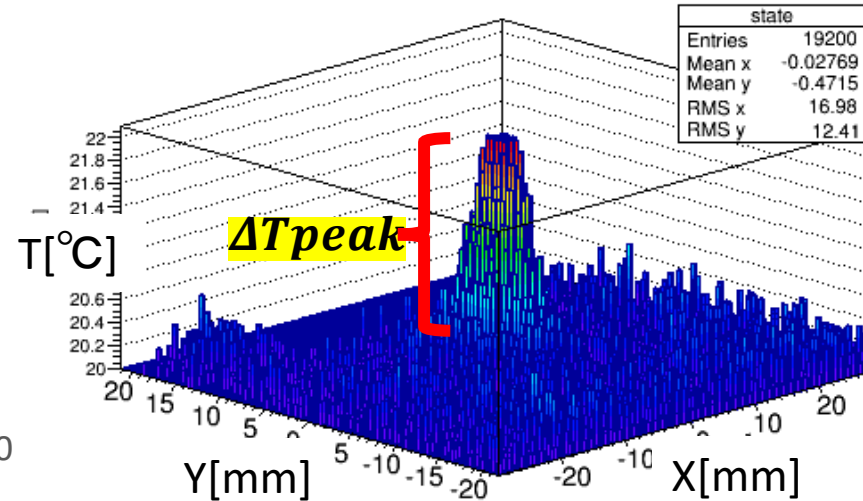
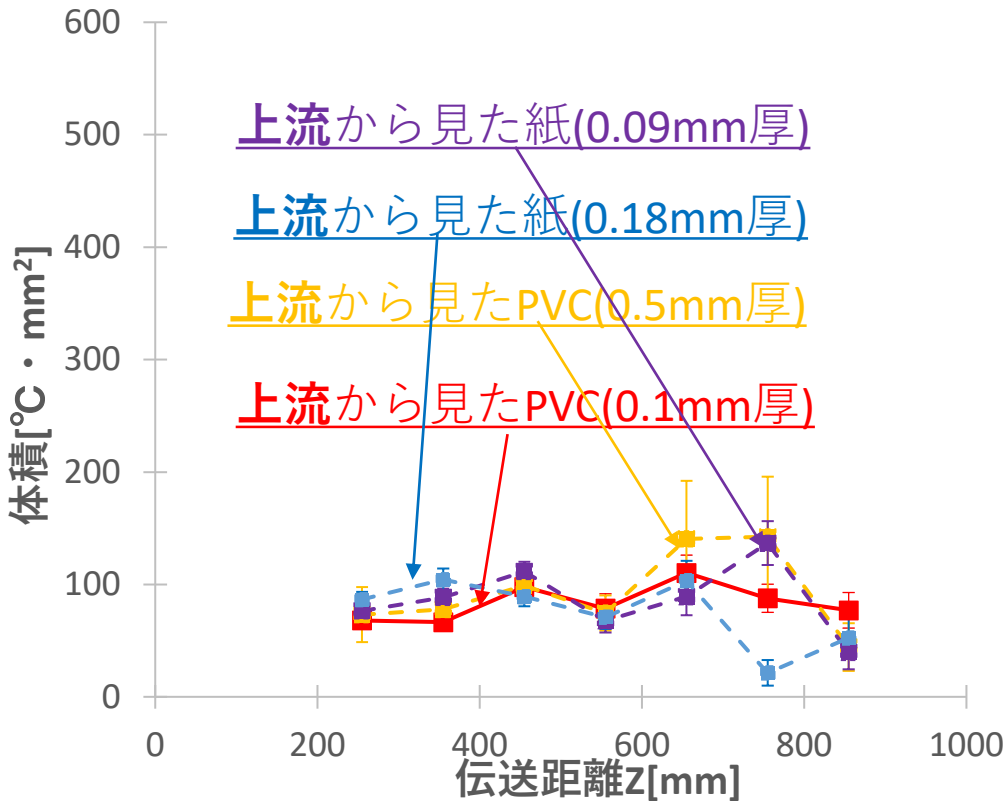
$$V = 2\pi \times \Delta T_{peak} \times \sigma_x \times \sigma_y$$

この式に、ガウスフィットで得られた値を代入。

体積が一定になっている⇒ビームパワーは常に一定。



体積のイメージ図↓

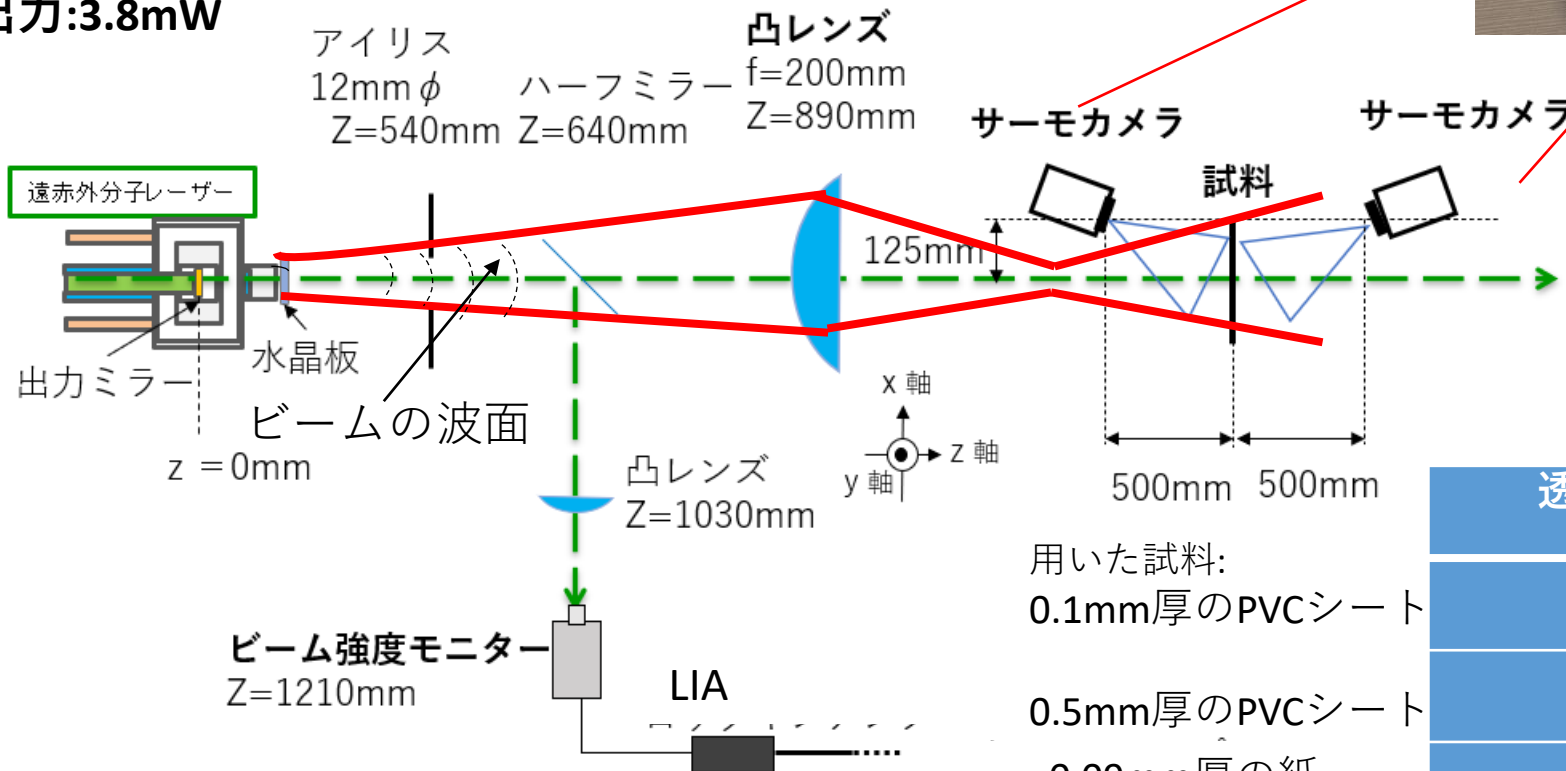


# ビームプロファイル・ビームパワーの測定実験



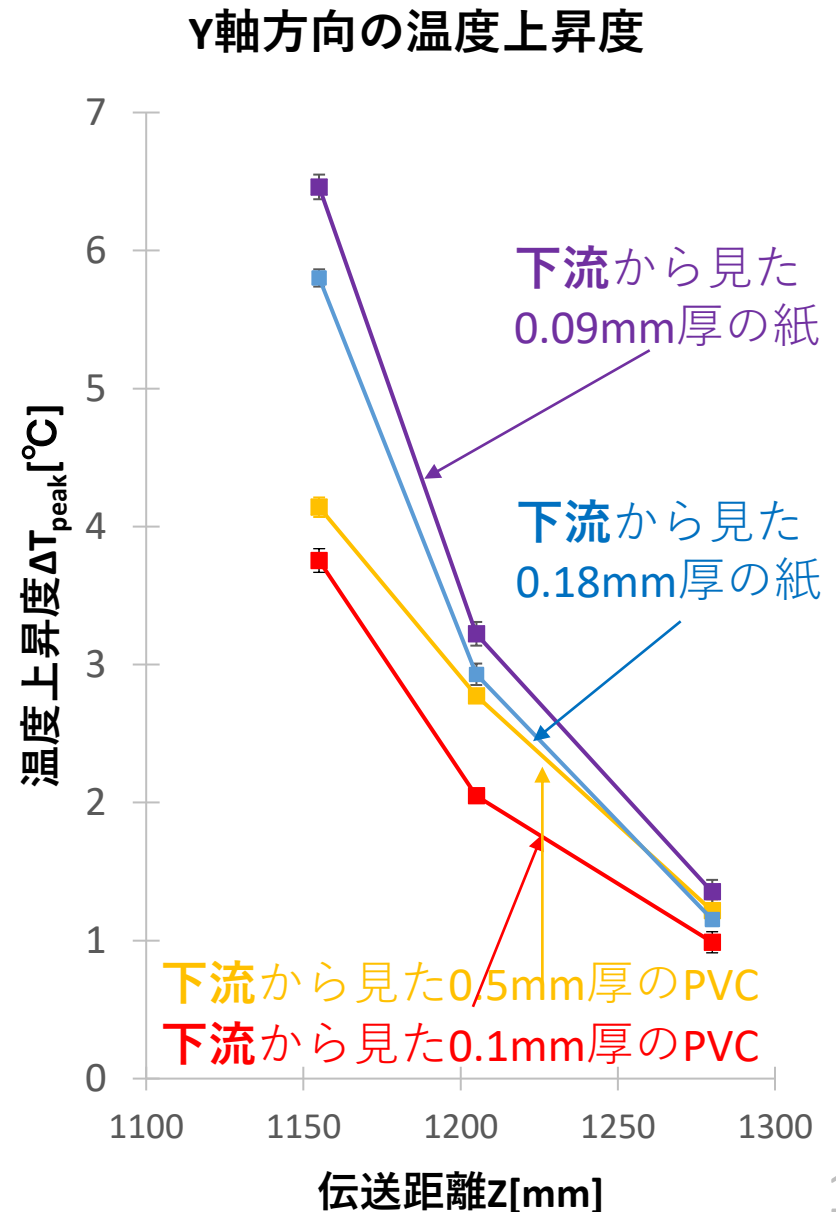
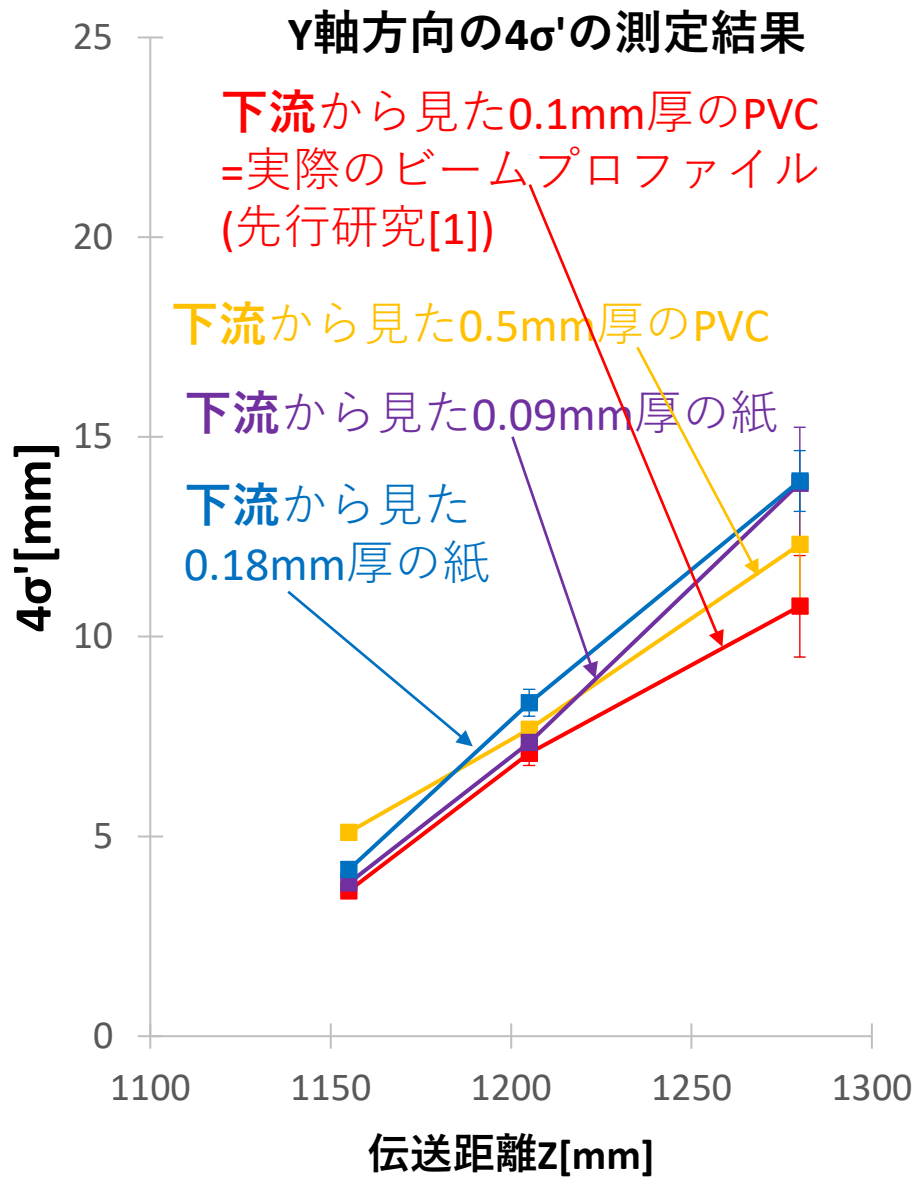
- サーモカメラを使用したビームプロファイル・ビームパワー測定実験  
凸レンズで集光したビームを試料に照射し、サーモカメラで2つの視点から動画を撮影。  
試料をz軸上で動かし、ビームパワーをモニタリングする。

遠赤外分子レーザーの波長:57.2 $\mu$ m  
ウェスト半径:3.4mm  
出力:3.8mW



用いた試料:  
0.1mm厚のPVCシート  
0.5mm厚のPVCシート  
0.09mm厚の紙  
0.18mm厚の紙

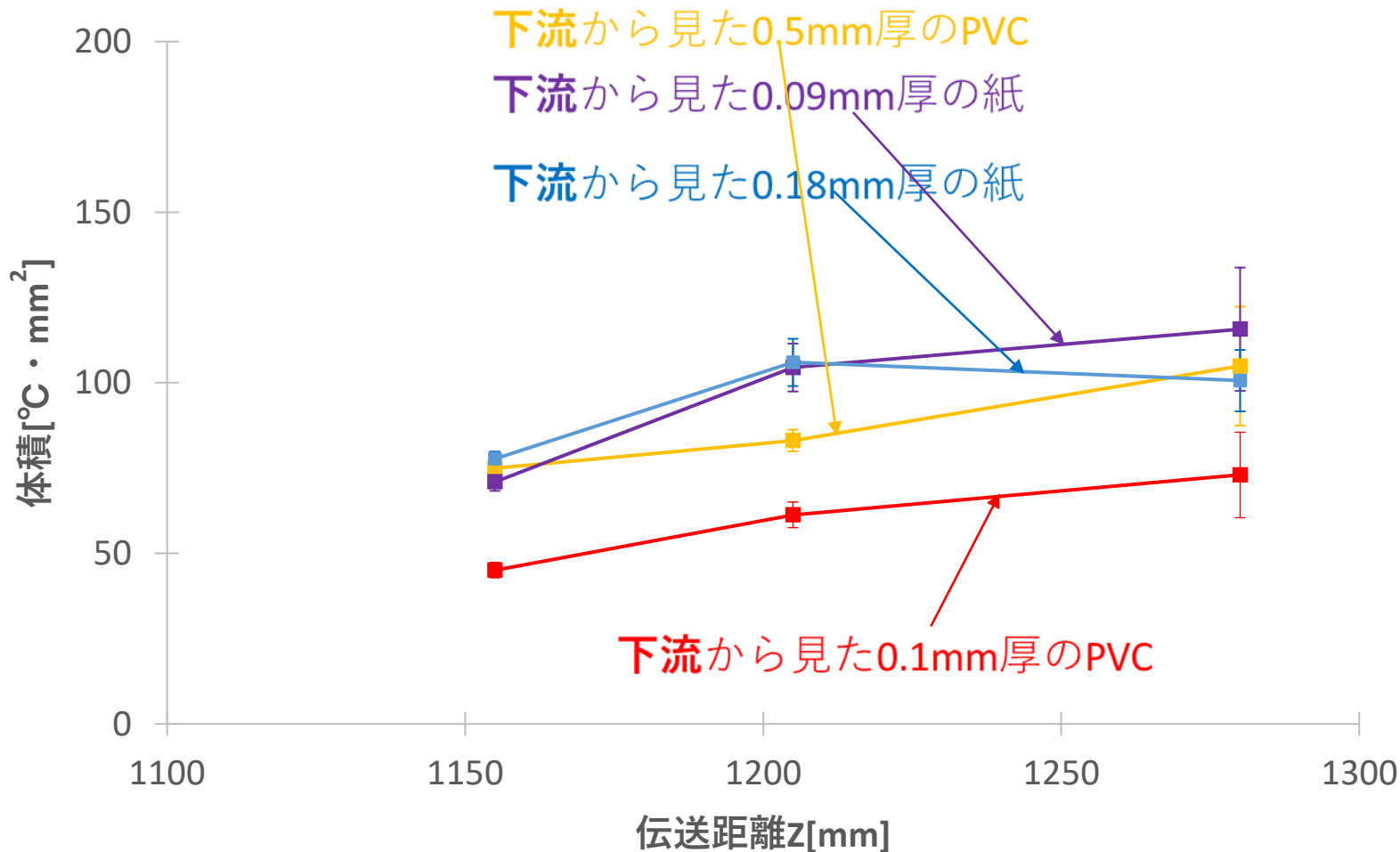
透過率[%]
42.8
1.43
2.15
0.12





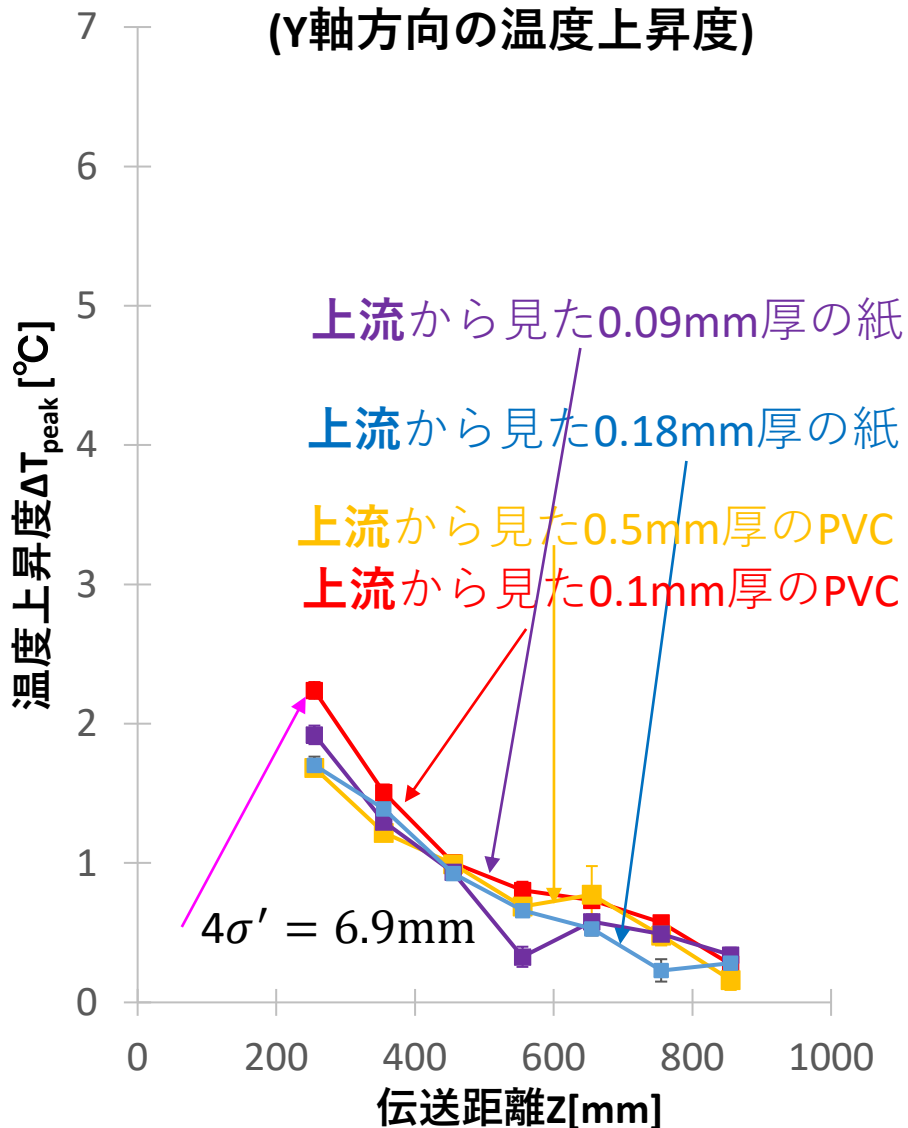
体積:  $V = 2\pi \times \Delta T_{peak} \times \sigma_X \times \sigma_Y$

## 体積の測定結果

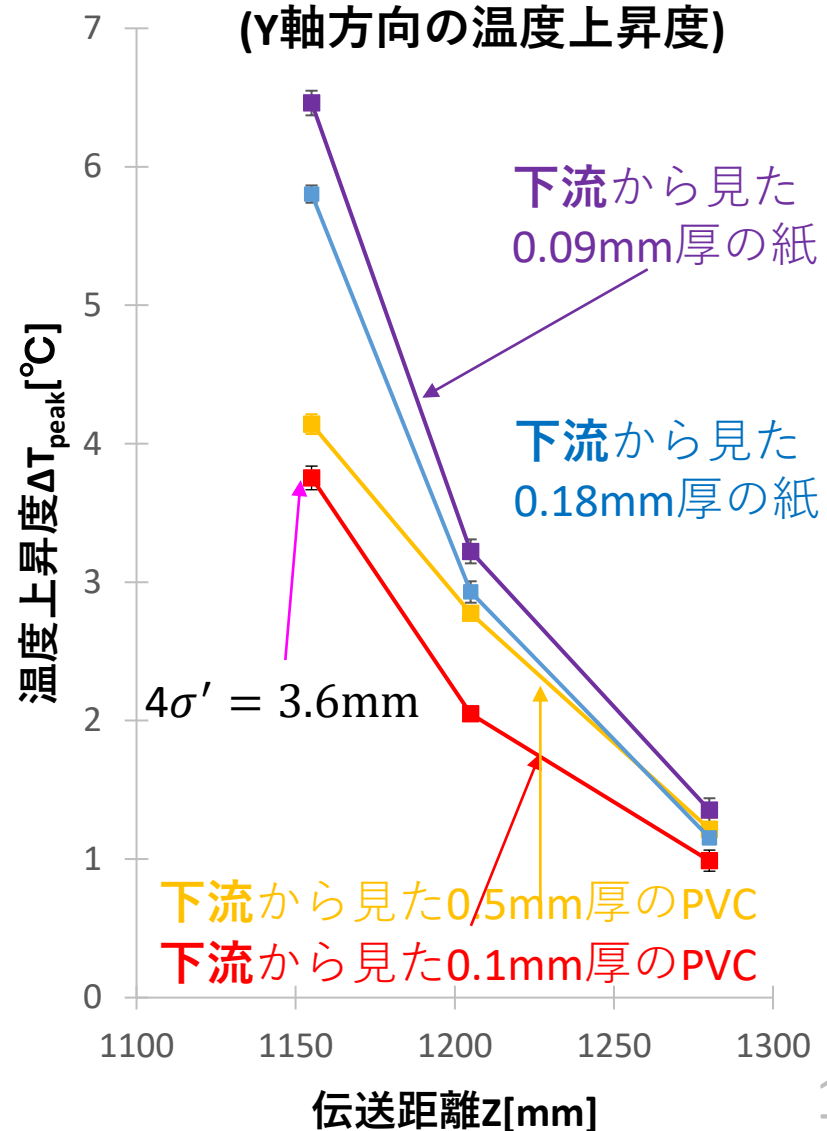




He-Neレーザー  
(Y軸方向の温度上昇度)



遠赤外分子レーザー  
(Y軸方向の温度上昇度)





○試料の上では熱が拡散するため、シミュレーションよりも $4\sigma$ が数mm大きくなる。

○可視光レーザー・遠赤外光レーザーの両方で、僅かな差ではあるが、0.1mm厚のPVCシートを用いた方が正確にビームプロファイルがわかる。

○遠赤外領域の光を用いた場合では、0.1mm厚のPVCシートがビームを半分程しか吸収しないため、体積も他の3種類と比べて、半分程になる。

⇒ビームが強い場合は、どの試料を用いてもよい。

ビームが弱い場合は、0.1mm厚のPVCシート以外の3種類の試料を用いた方がよい。

## 今後の課題

- ビームプロファイル・ビームパワー同時モニター装置の精度の向上を図る。
- 熱解析の研究