

# 工学系12大学大学院単位互換e-ラーニング科目

磁気光学入門 第13回 磁気光学効果の応用(3)

その他の磁気光学デバイス

佐藤勝昭

# 磁気光学効果の応用(3)

- 光磁気記録(記録情報の読み出し)
- 光アイソレータ(光通信における方向性結合)
- 高圧電流測定(磁気光学センサ)
- 微小磁区観察(磁気光学顕微鏡)
- 空間光変調器(光画像処理)

第13回

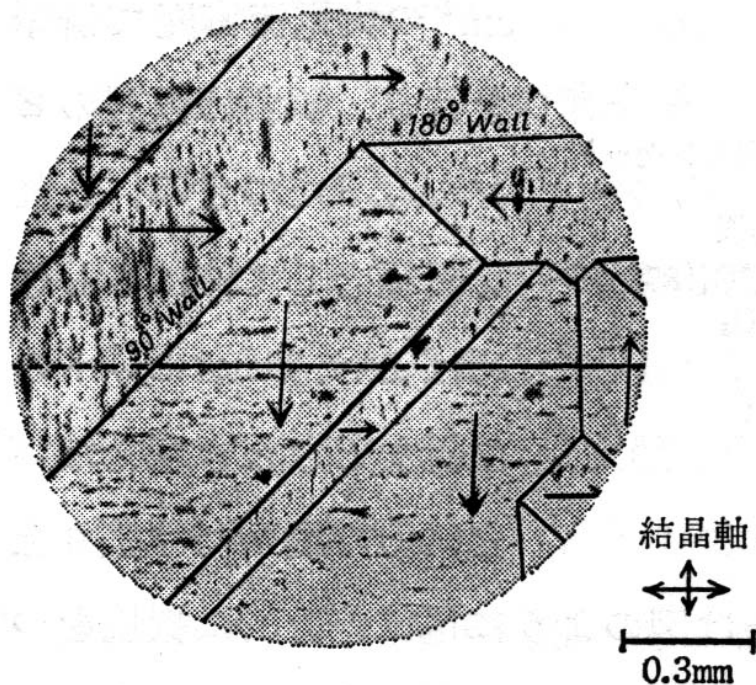
# 磁区観察

- 磁区観察には、磁性コロイドを用いるビッター法、MFM（磁気力顕微鏡）、ローレンツ電子顕微鏡、スピン偏極電子顕微鏡、走査SQUID顕微鏡、走査ホール顕微鏡、X線MCD顕微鏡などがあります。
- ビッター法、ローレンツ顕微鏡、SQUID顕微鏡、ホール顕微鏡は、磁性体からの磁束を観測するのに対し、磁気光学効果を用いるものは磁化そのものを観測します。
- MFMで磁区観察をすると、プローブからの磁束が微小磁区に影響を与えることがあります。
- 磁気光学効果を使えば、磁界の影響なしに磁区を観察できます。

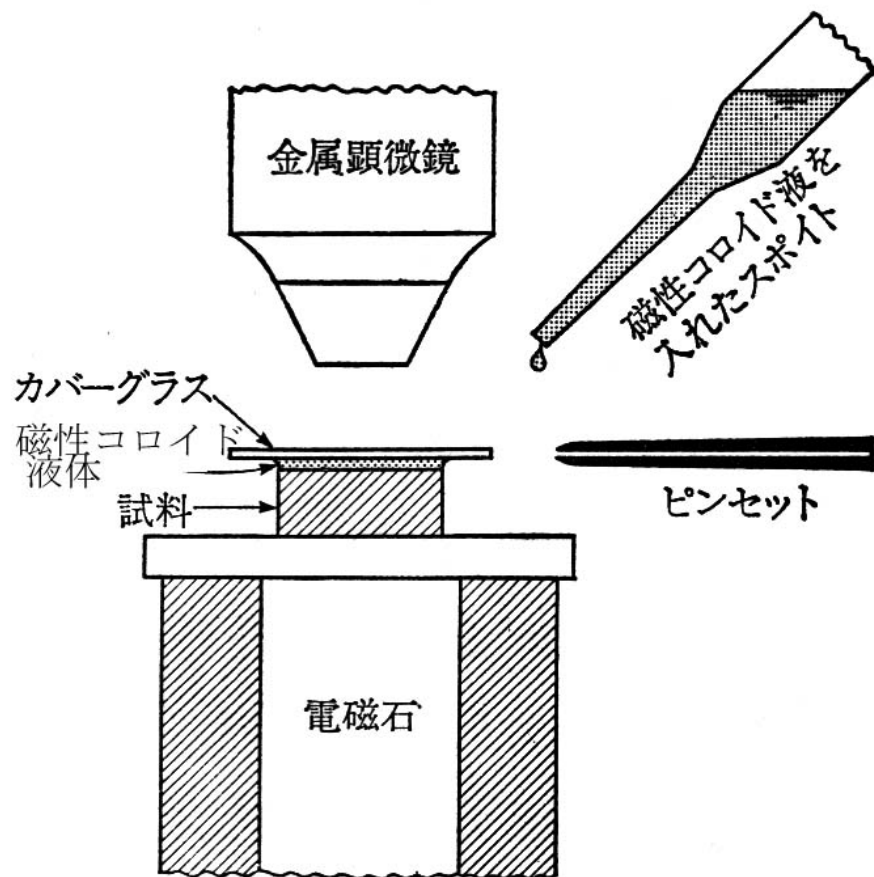
# 磁区観察法

- 粉末図形法(Bitter pattern)、電界研磨法
- 磁気光学顕微鏡
- 近接場磁気光学顕微鏡
- ローレンツ電子顕微鏡
- スピン偏極電子顕微鏡
- 干渉電子顕微鏡(電子線ホログラフィー)
- X線磁気光学顕微鏡
- 磁気力顕微鏡(MFM)
- スピン偏極走査型トンネル顕微鏡(SP-STM)

# ビッターパターン

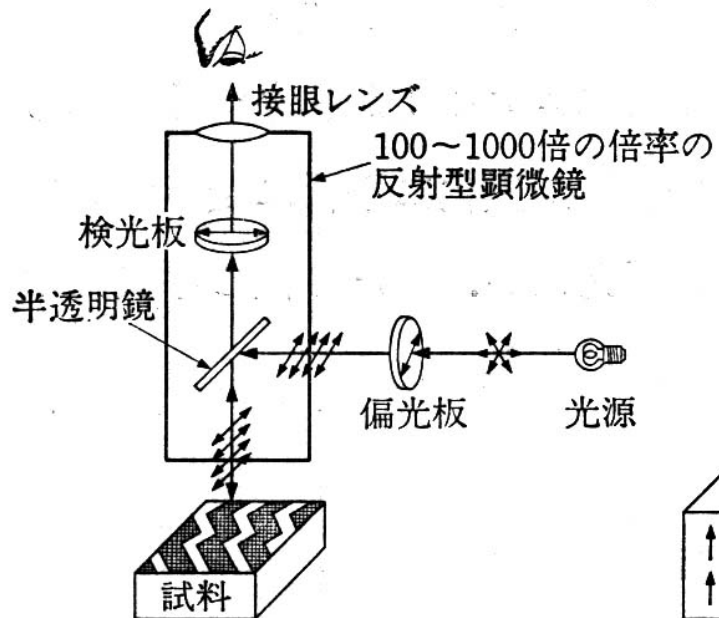


4% Si-Fe 単結晶 (001) 面で観察した磁区図形. 磁壁の黒線は墨入れをしてある. 中央に水平に入れた線は機械的にひいたすじの見える方を説明するためのもの.

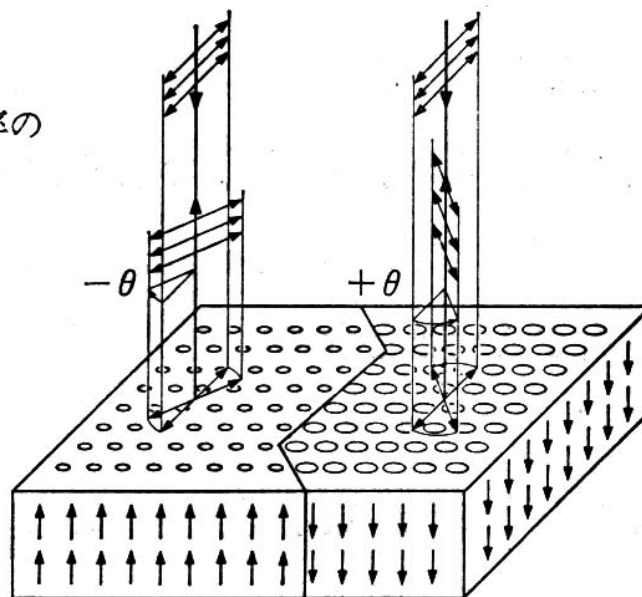


粉末図形観察法

# 磁気光学顕微鏡

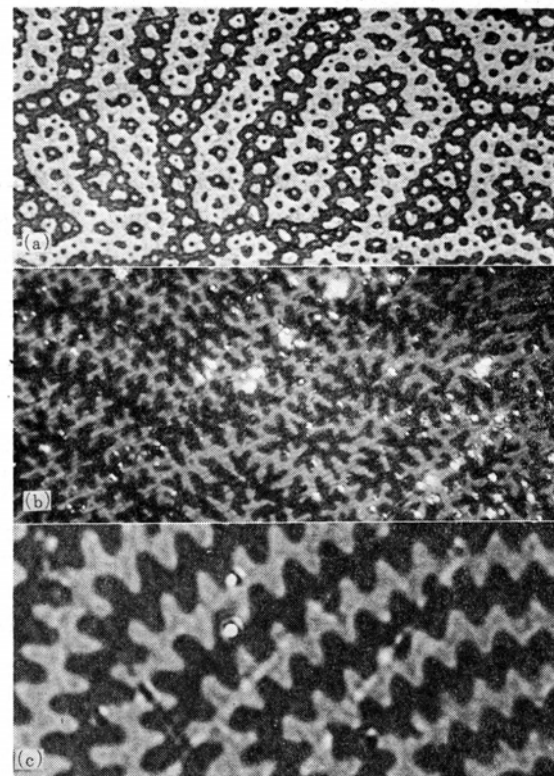


(a)



(b)

磁気カー効果を利用した磁区観察装置 (a) と、表面に垂直に磁化容易軸をもつ強磁性試料の磁区からの反射光の偏光方向の回転 (b)



磁気カー効果を利用して観察した MnBi c 面の磁区図形 (結晶の厚さは (a) が最も厚く, (b), (c) と薄くなる) (文献 19 による)

# 電子線ホログラフィ

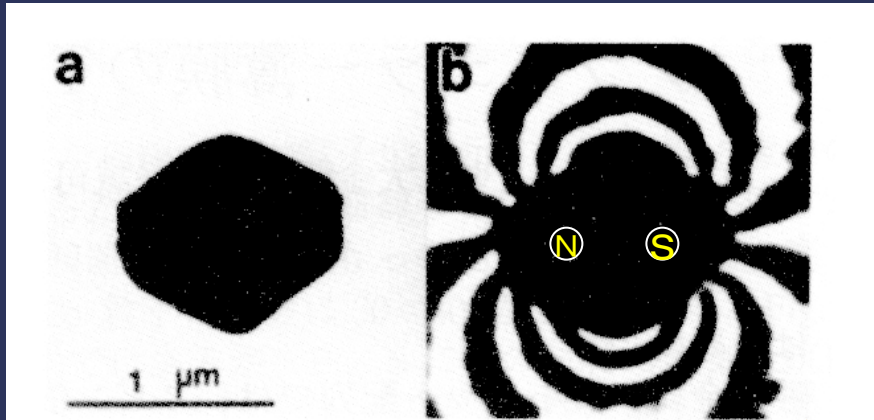


図2 バリウムフェライト単磁区粒子の干渉顕微鏡像

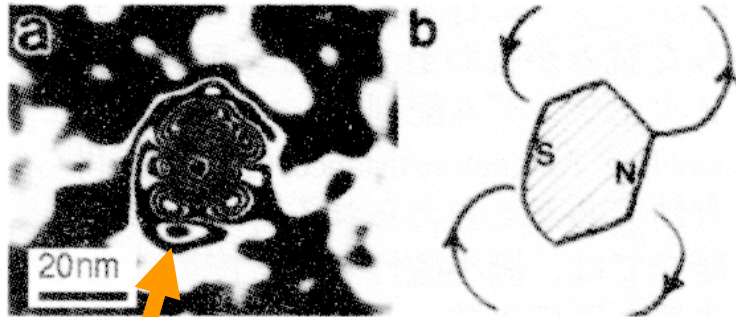


図3 コバルト単磁区粒子の干渉顕微鏡像 (位相 x10)

Co単磁区粒子

バリウムフェライト単磁区粒子

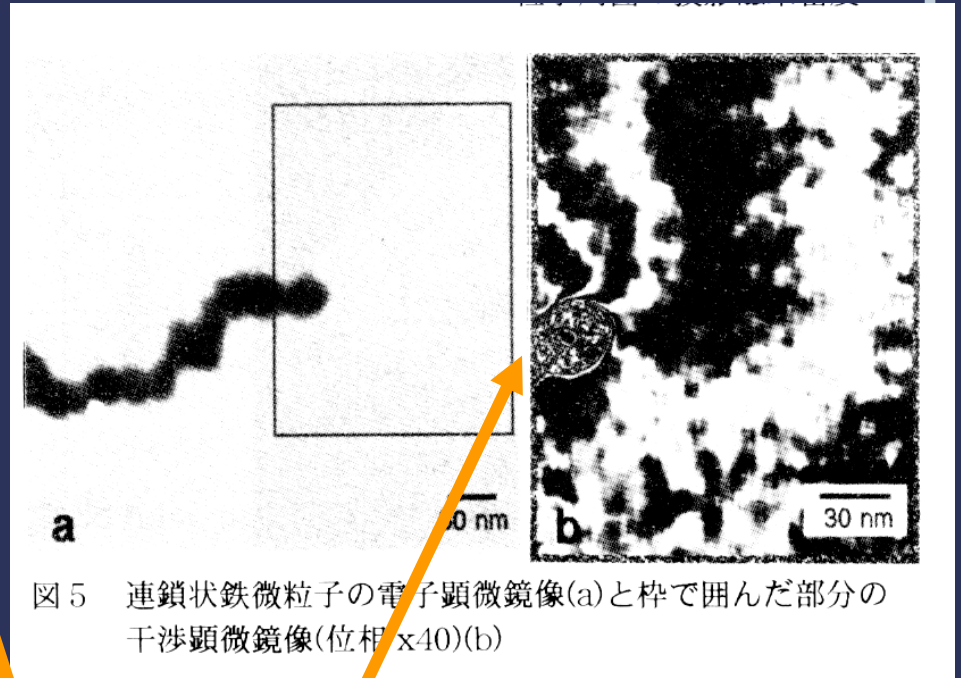
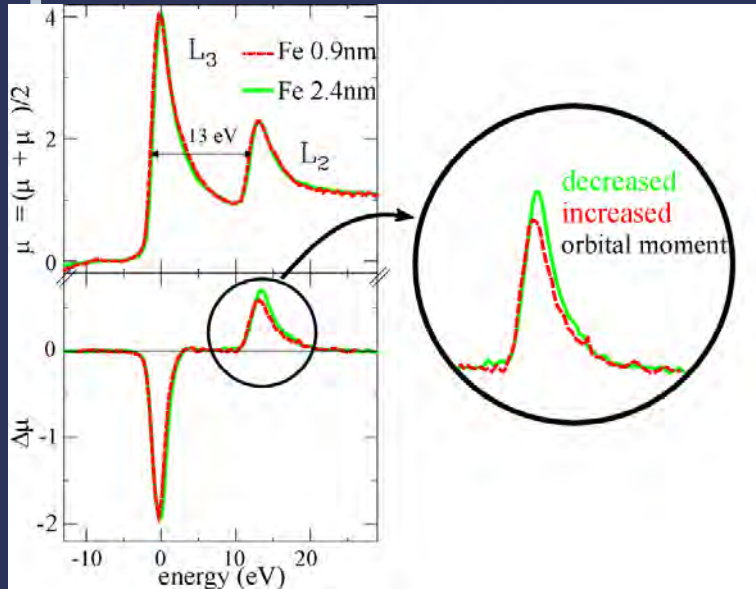


図5 連鎖状鉄微粒子の電子顕微鏡像(a)と枠で囲んだ部分の干渉顕微鏡像(位相 x40)(b)

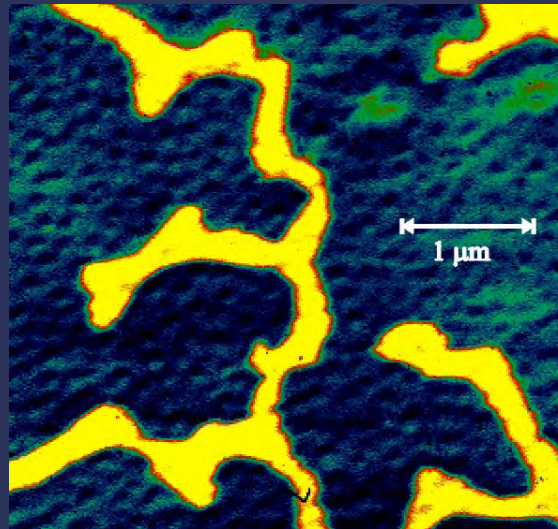
連鎖状Fe微粒子

丹司(名大)による

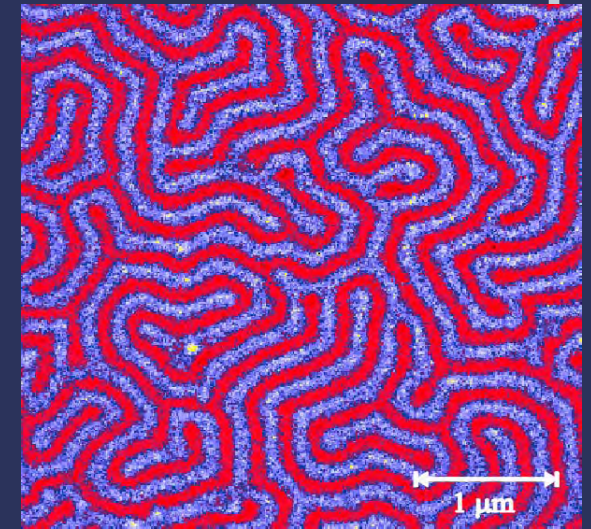
# X線磁気光学顕微鏡



**Fig. 1** Experimental determination of spin and orbital moments in thin Fe-layers via the X-MCD effect<sup>6)</sup>.



**Fig. 3** M-TXM image of a layered Gd/Fe system prepared onto 325 nm Polyimide substrate<sup>9,10)</sup>

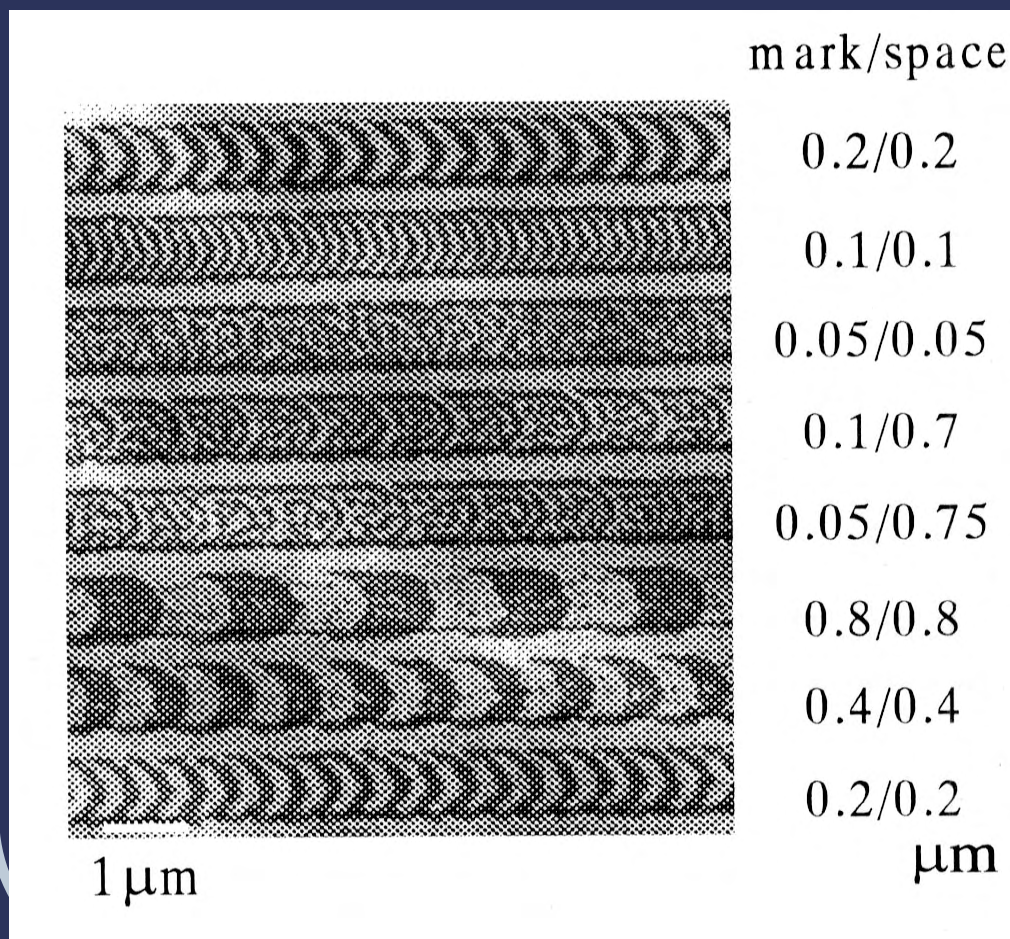


**Fig. 4** Same multilayered Gd/Fe system as Figure 3 prepared on 30 nm Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> membranes

Fischer(独)による



# 光磁気記録マークのX線磁気光学像



SiN(70nm)/ TbFeCo(50nm)/SiN(20nm)/  
Al(30nm)/SiN(20nm) MO 媒体

N. Takagi, H. Ishida, A. Yamaguchi, H. Noguchi, M. Kume, S. Tsunashima, M. Kumazawa, and P. Fischer: Digest Joint MORIS/APDSC2000, Nagoya, October 30-November 2, 2000, WeG-05, p.114.

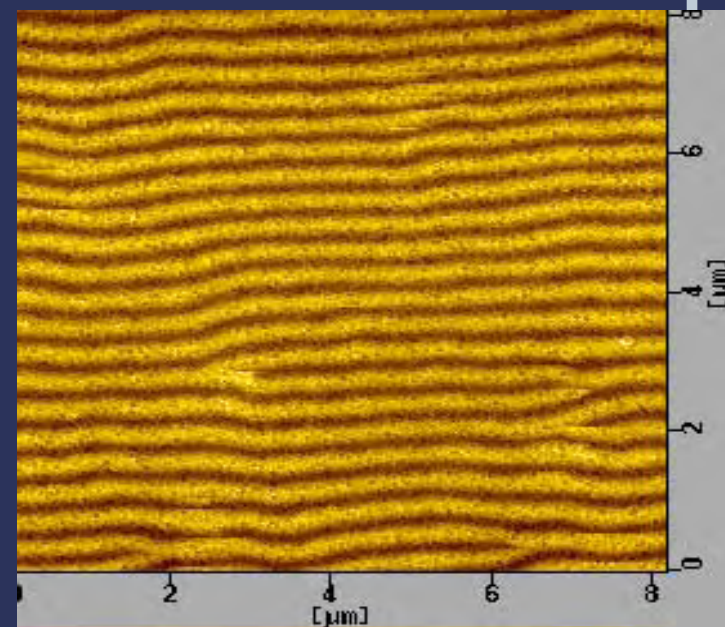
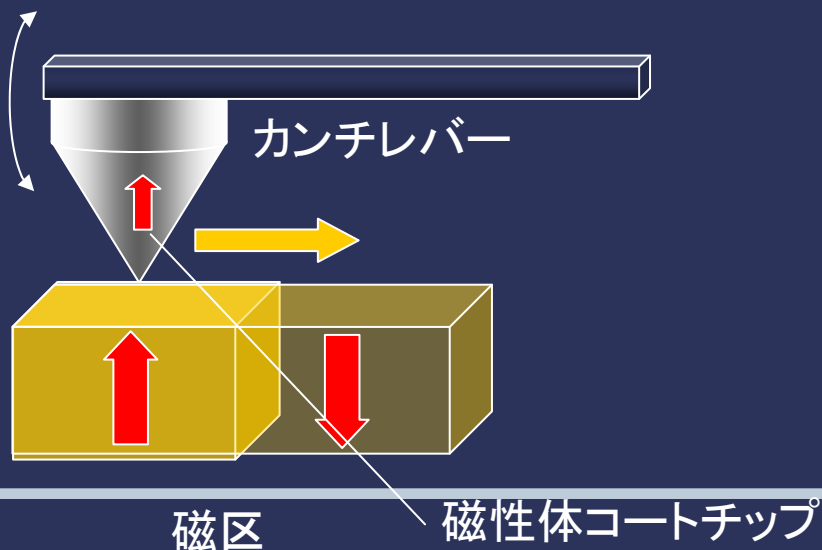
綱島(名大)らによる

# MFM像がプローブの影響を受ける例

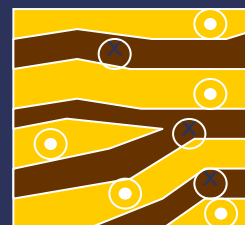
- 私の研究室では、ナノメートルサイズの磁性ドットを作製しています。
- 磁性体は軟磁性なので、初期磁化状態ではランダムに磁化されているはずです。
- しかし、MFMで観察するとプローブの磁化の影響を受けることがあります。

# 磁気力顕微鏡(MFM)とは

- 磁気力顕微鏡(MFM)は、微小な磁石を先端部にもつカンチレバーに働く磁気力を測定し画像化するしかけです。光学顕微鏡を使っては観測できない小さな磁区もMFMを使えば観測できます。

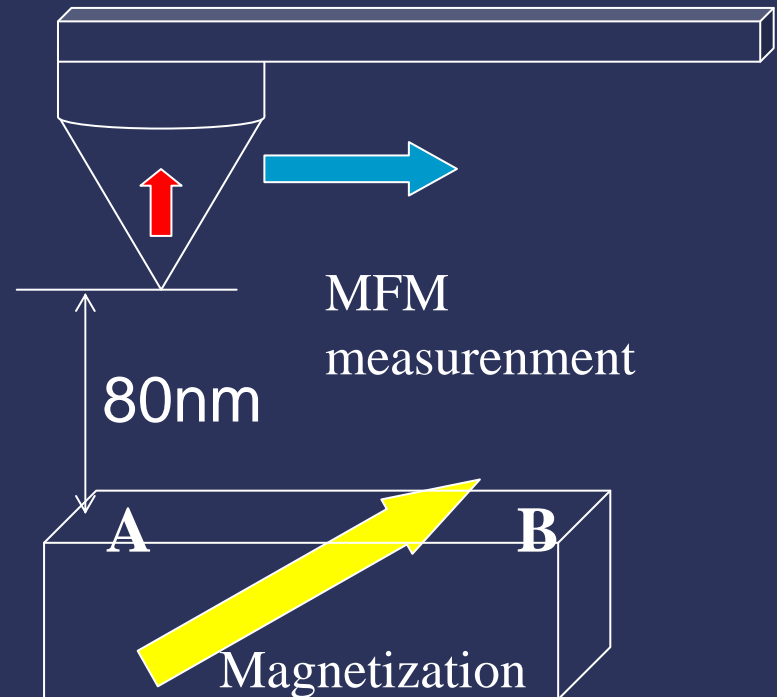
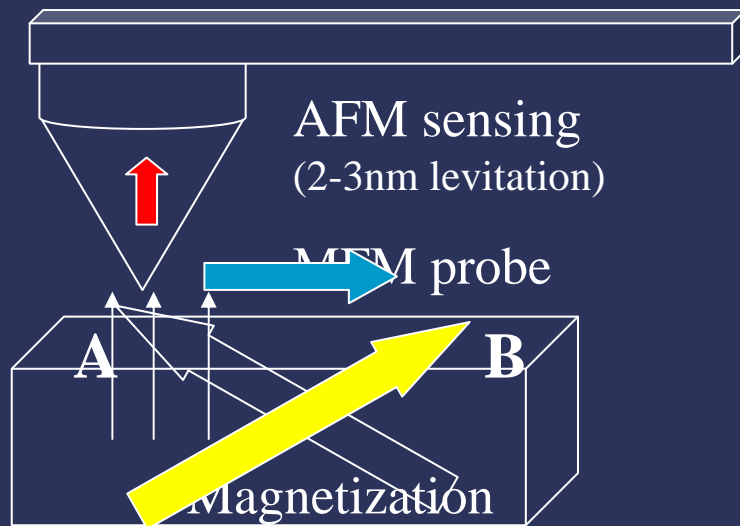


2 μm  
ミクロンサイズ



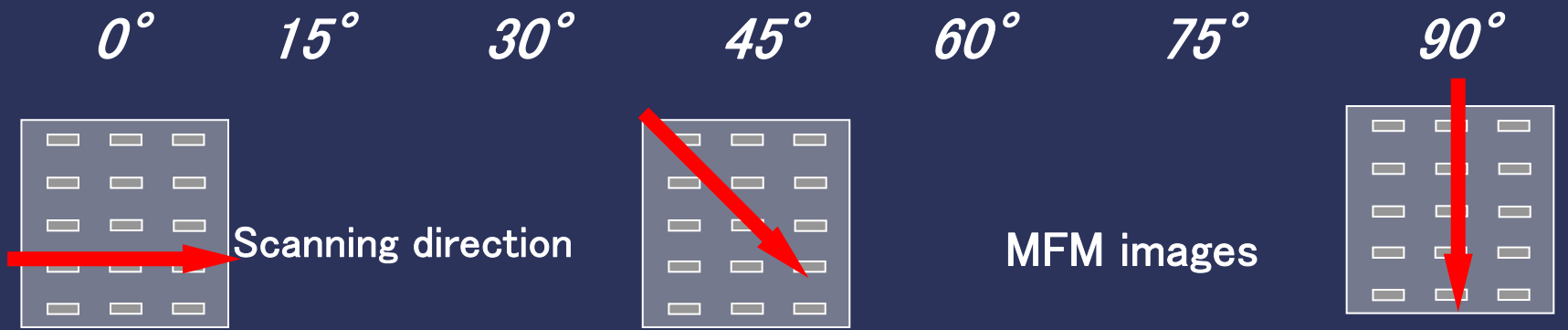
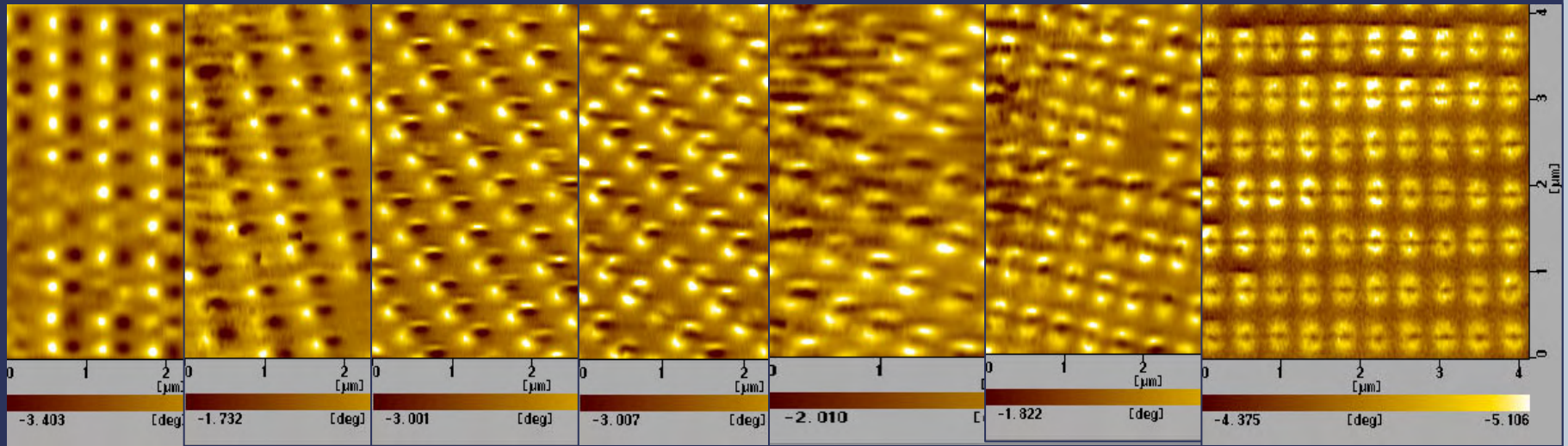
# MFM におけるプローブ走査

- MFMでは、AFMのカンチレバーの先に磁性体をコートしたチップをつけ、磁気力を検出します。
- 測定対象に影響があります。

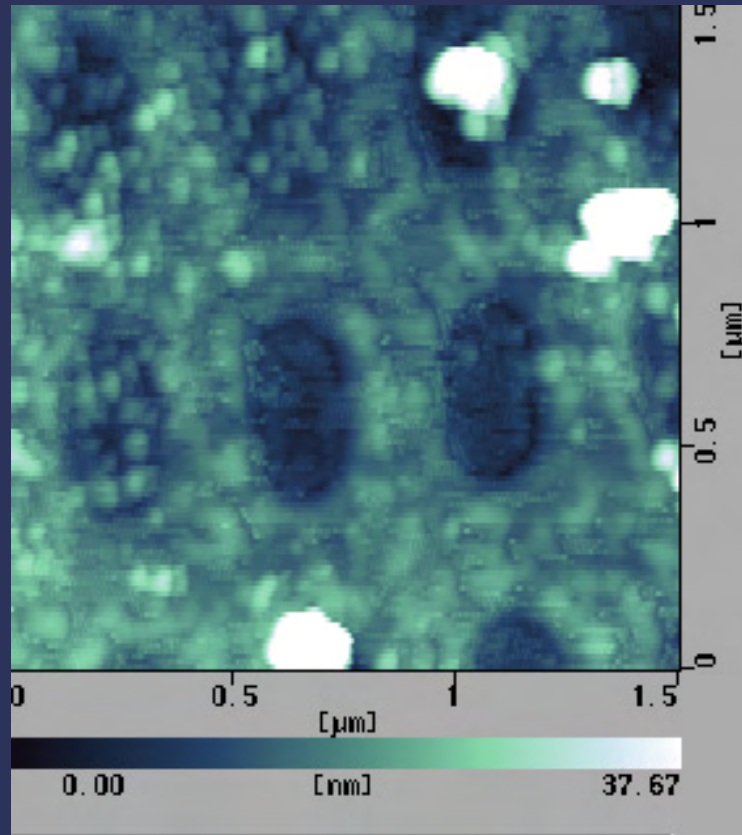


第1走査で凹凸情報を把握し、第2走査で、凹凸をなどって、磁気情報のみを観測

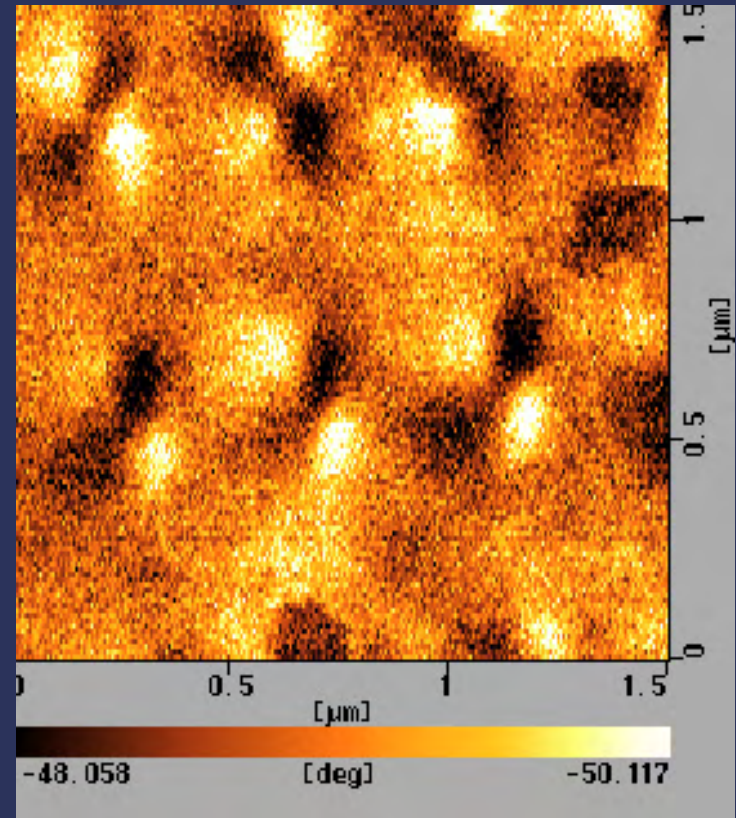
# プローブの走査方向に依存するMFM像 (高モーメントプローブ使用の場合)



# 300nm $\times$ 100nm微小磁性ドットのMFM像 (低モーメントプローブ使用、真空中測定)

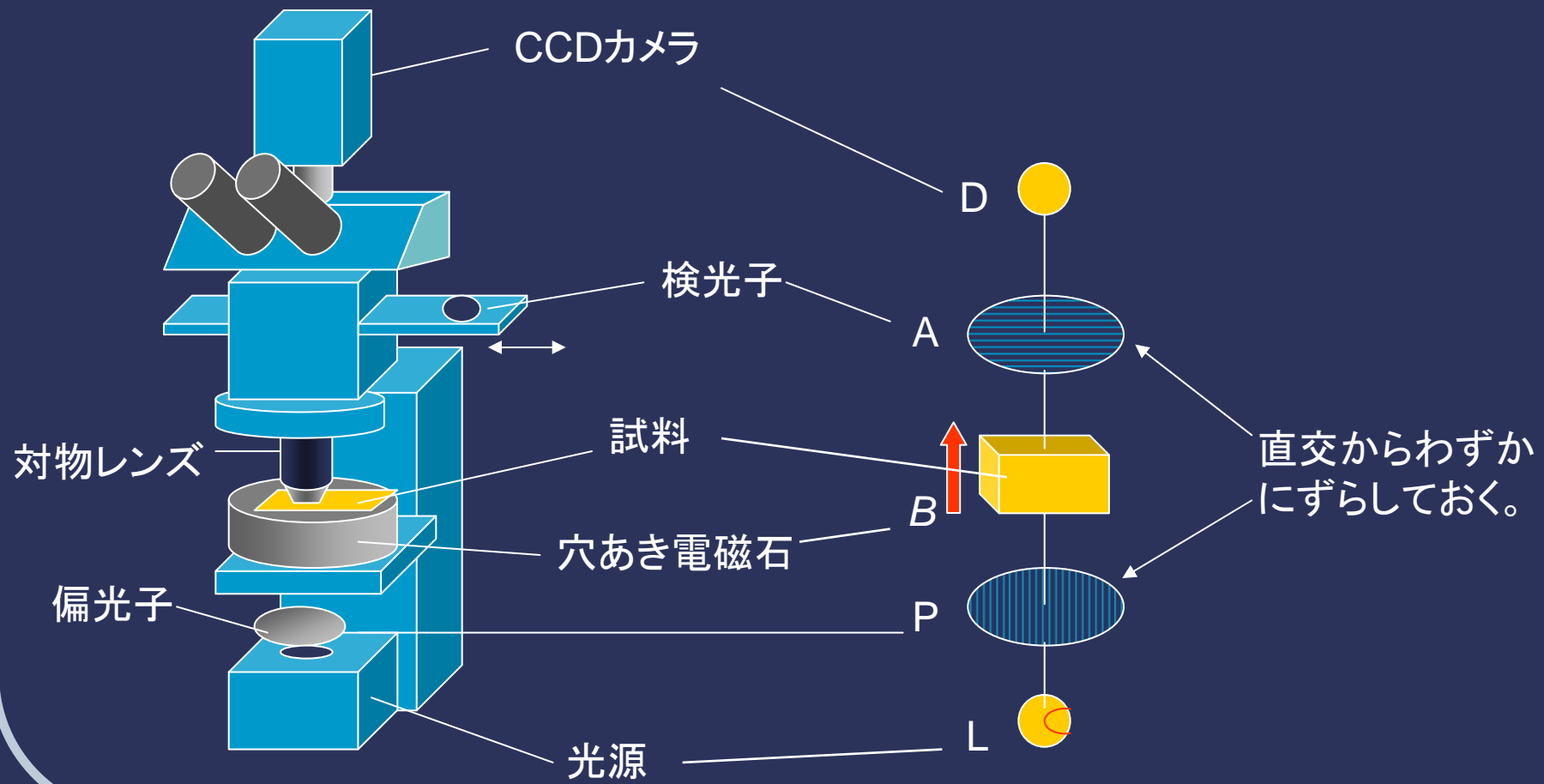


AFM



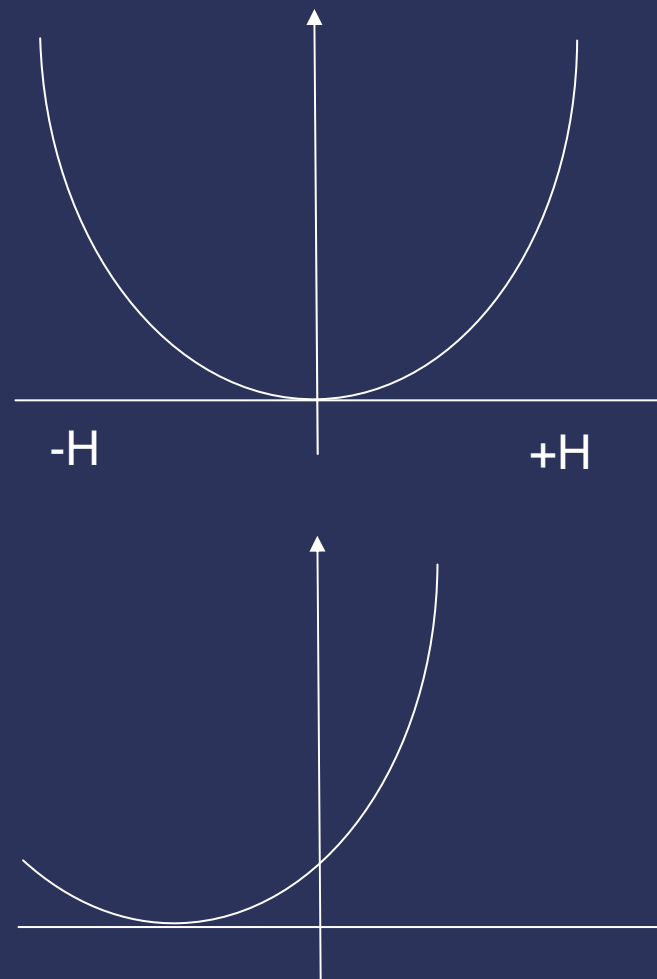
MFM

# 磁気光学顕微鏡



# 磁気光学顕微鏡による磁区観察

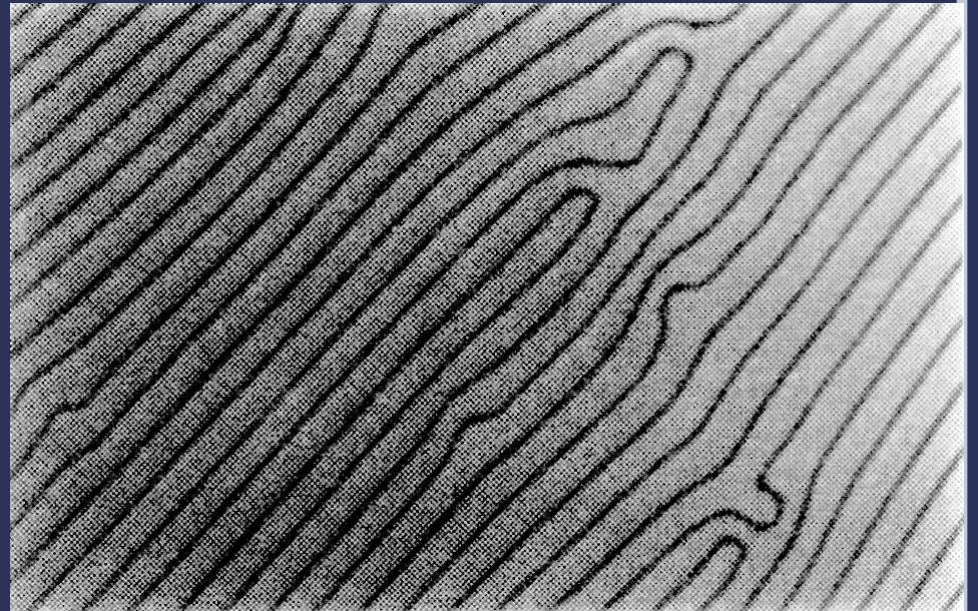
- クロスニコル条件では、磁化の正負に対して対称になり、磁気コントラストがでない  
ので、偏光子と検光子の角度を $90^\circ$ から $4^\circ$ 程度ずらしておく  
と、コントラストが得られる。





# 磁性ガーネットの磁区の 磁気光学効果による観察

- Bi添加磁性ガーネットは、大きなファラデー効果を示す赤外透明の磁性体です。(薄い膜なら可視光線も通すことは、物理システム工学実験でやったとおりです。)
- 垂直磁化を示すガーネット膜は、初磁化状態で縞状磁区、あるいは迷路磁区になります。
- 図は、ファラデー効果で観察した  $(\text{Gd,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  (LPE法で作製)膜の磁区です。

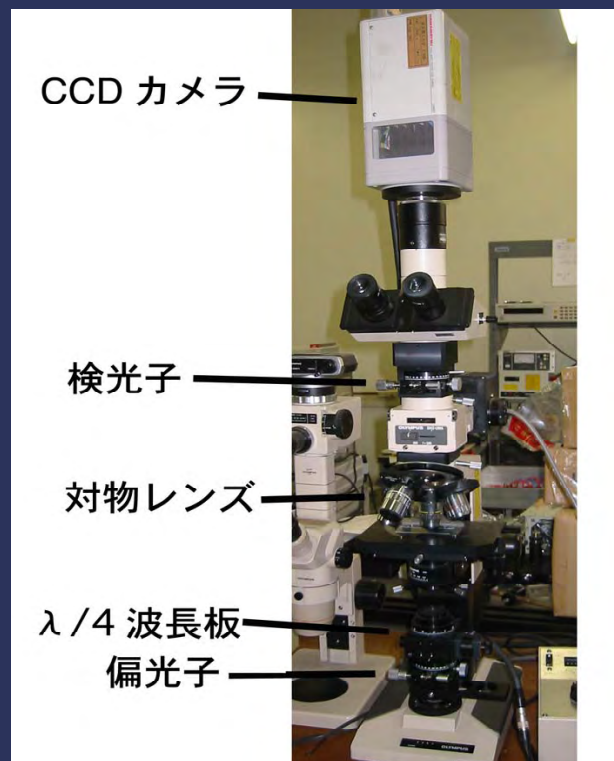


ファラデー効果で観察した  
 $(\text{Gd,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ の磁区  
NHK技研 玉城氏のご厚意による

# 磁気光学顕微鏡の高度化

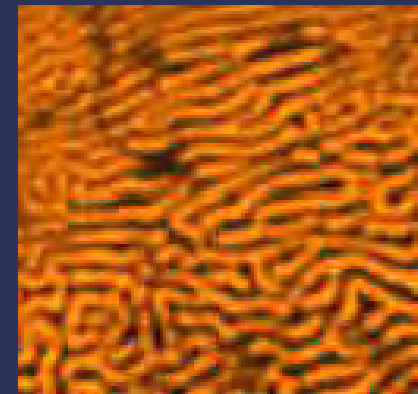
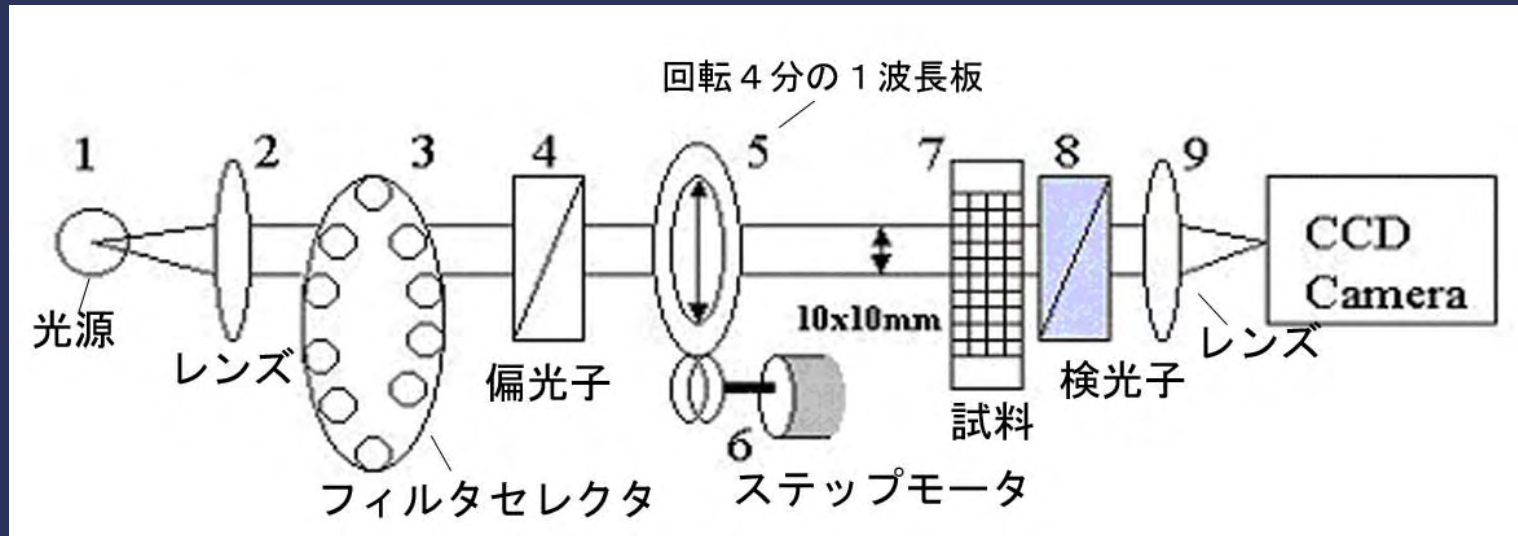
- 私たちは、磁気光学顕微鏡の感度を向上するとともに、不均一な試料において、各部分での磁気光学効果を定量的に評価するために、偏光変調法を使った顕微鏡を開発しました。
- 原理は、以前に測定法のところで紹介した円偏光変調法と同じなのですが、CCD画像なので、PEMのような速い変調が使えません。
- それで、1/4波長板を回転させて、右回り円偏光、直線偏光、左回り円偏光を交互に作り、画像上の差を計算することによって磁気光学効果を評価します。

# 開発した磁気光学顕微鏡

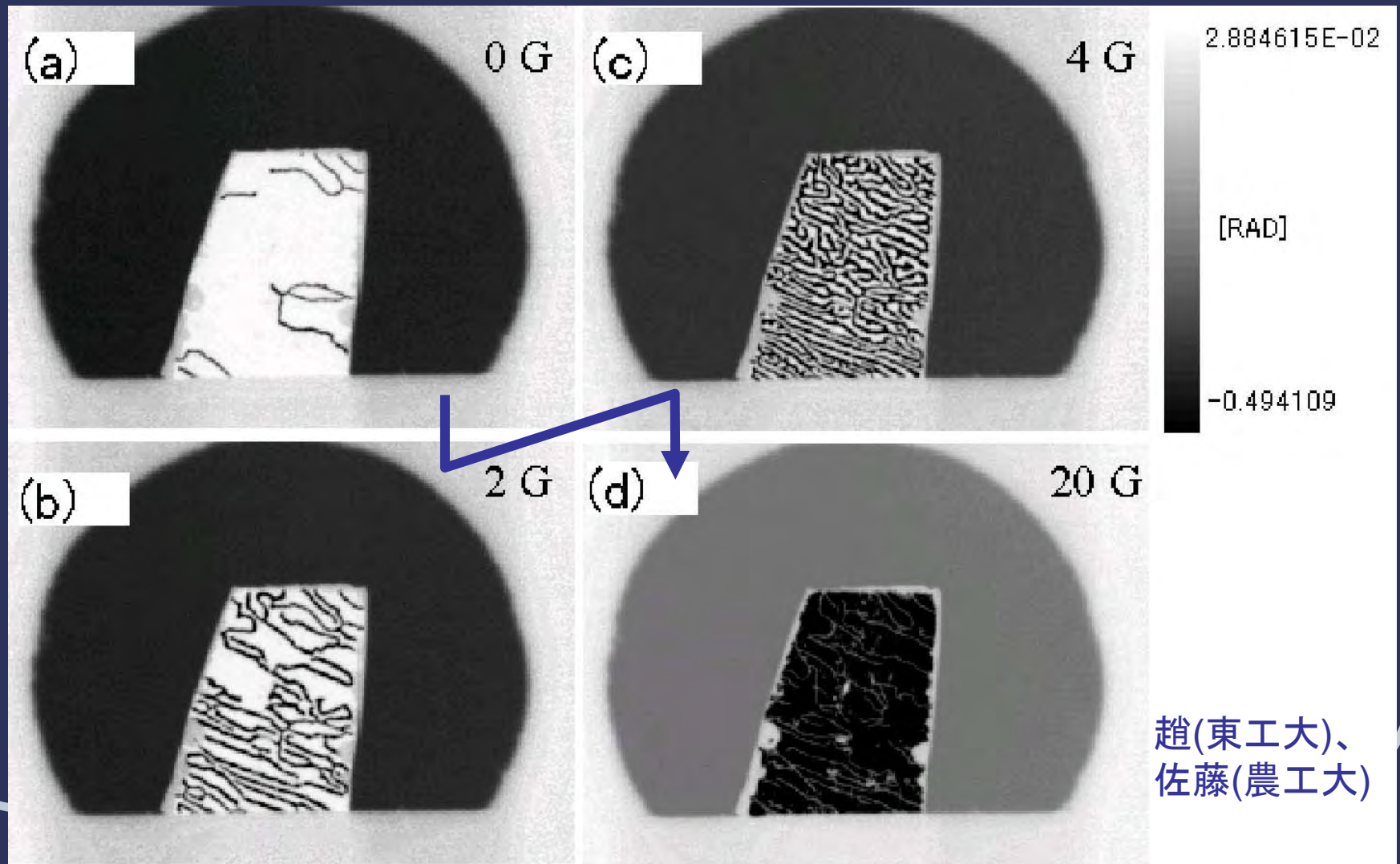


画像上の各点の強度が  
磁気光学効果の大きさに対応

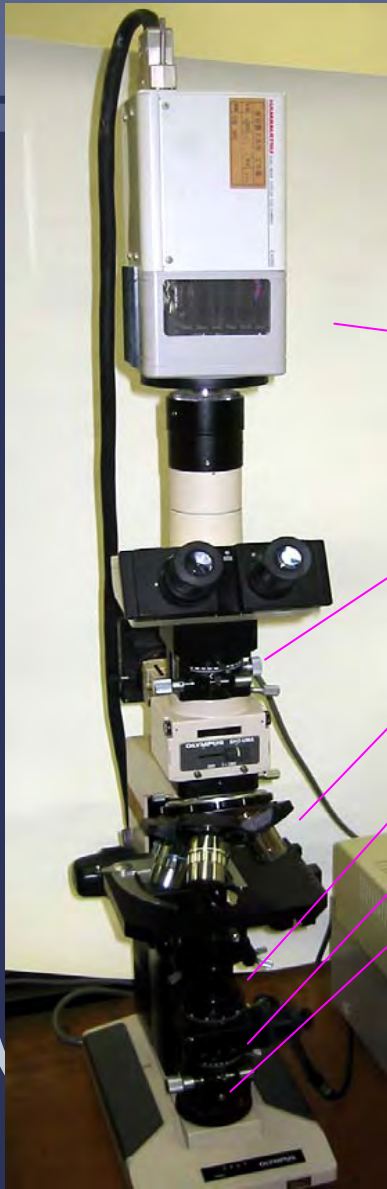
# CCDカメラによる磁気光学イメージング



# 磁性ガーネットの磁区の変化



# 磁気光学顕微鏡



顕微鏡 : Olympus BH-UMA

CCD : Hamamatsu C4880

検光子 : Glan-Thompson ( MG\*B10)

対物レンズ : NeoSPlanNIC  $\square \times 10, \times 50$

波長板 : ACP-400-700

偏光子 : Glan-Thompson ( MG\*B10)

波長選択 : 干渉フィルター

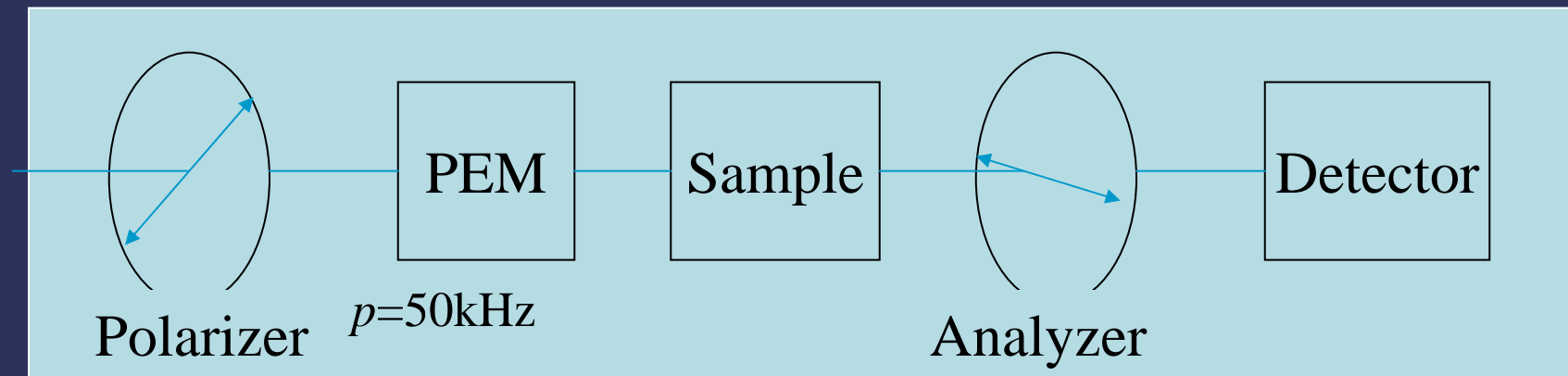
(450, 500, 550, 600, 650 nm)

光源 : ハロゲン電球 20W

# 反射型磁気光学顕微鏡



# PEMを用いた円偏光変調法の説明



$$I(0) = I_0 T \{1 - 2\theta_F \cdot J_0(\delta_0)\}$$

$$I(p) = I_0 T \cdot 2\eta_F \cdot J_1(\delta_0)$$

$$I(2p) = -I_0 T \cdot 2\theta_F \cdot 2J_2(\delta_0)$$

$\eta_F$  ファラデー楕円率

$\theta_F$  ファラデー回転角

$T$  透過率

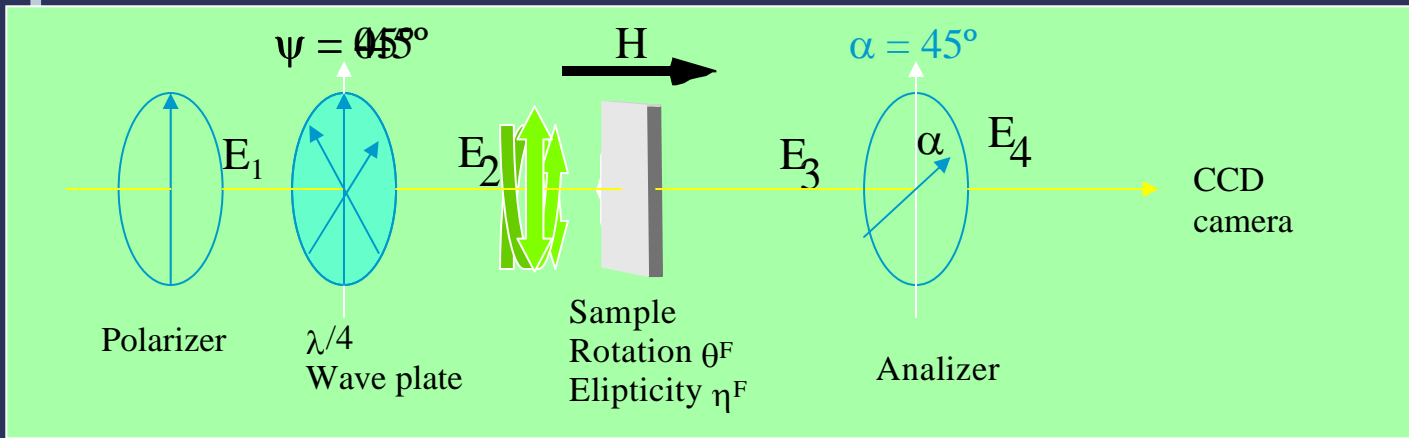
$J_n$  ベッセル関数

$p$  変調周波数

$\delta_0$  光学遅延の振幅



# λ/4波長板を使った測定法



$\psi = 0^\circ$  LP  
 $45^\circ$  RCP  
 $-45^\circ$  LCP

$$E_2 = ASQPE_1$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_F + i\eta_F \sin \theta_F & -\sin \theta_F + i\eta_F \cos \theta_F \\ \sin \theta_F - i\eta_F \cos \theta_F & \cos \theta_F + i\eta_F \sin \theta_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 + i \cos 2\psi & i \sin 2\psi \\ i \sin 2\psi & 1 - i \cos 2\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos \theta_F + \sin \theta_F - \eta_F (\sin(2\psi + \theta_F) - \cos(2\psi + \theta_F)) + i \{ \cos(2\psi + \theta_F) + \sin(2\psi + \theta_F) + \eta_F (\sin \theta_F - \cos \theta_F) \} \\ \cos \theta_F + \sin \theta_F - \eta_F (\sin(2\psi + \theta_F) - \cos(2\psi + \theta_F)) + i \{ \cos(2\psi + \theta_F) + \sin(2\psi + \theta_F) + \eta_F (\sin \theta_F - \cos \theta_F) \} \end{pmatrix} E_x$$

$$I(\psi) = (\cos \theta_F + \sin \theta_F - \eta_F (\sin(2\psi + \theta_F) - \cos(2\psi + \theta_F)))^2 + (\cos(2\psi + \theta_F) + \sin(2\psi + \theta_F) + \eta_F (\sin \theta_F - \cos \theta_F))^2 |E_x|^2 / 4$$

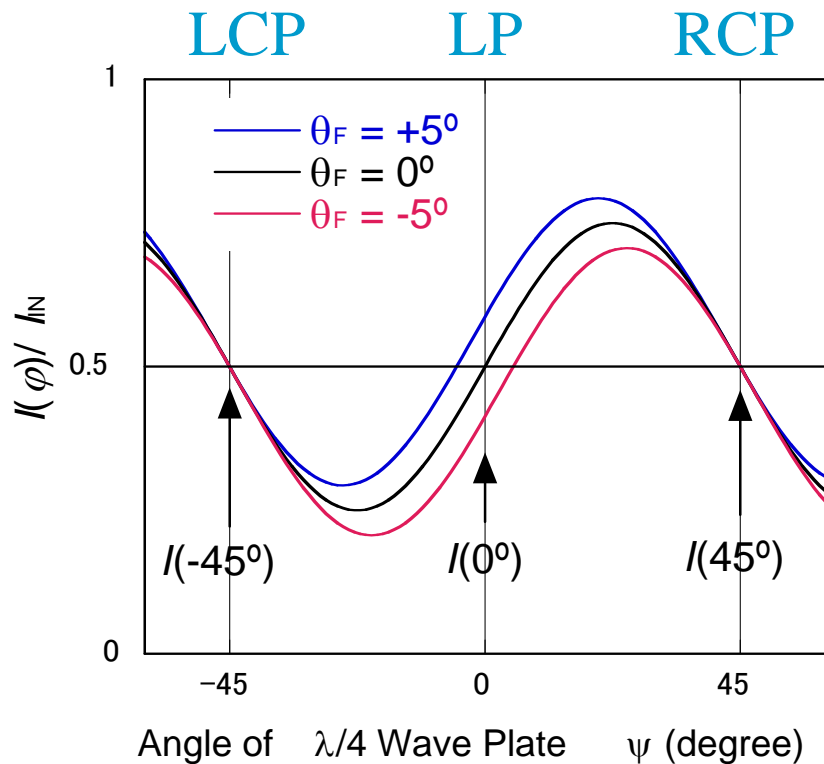
$$I(0^\circ)$$

$$I(45^\circ)$$

$$I(-45^\circ)$$

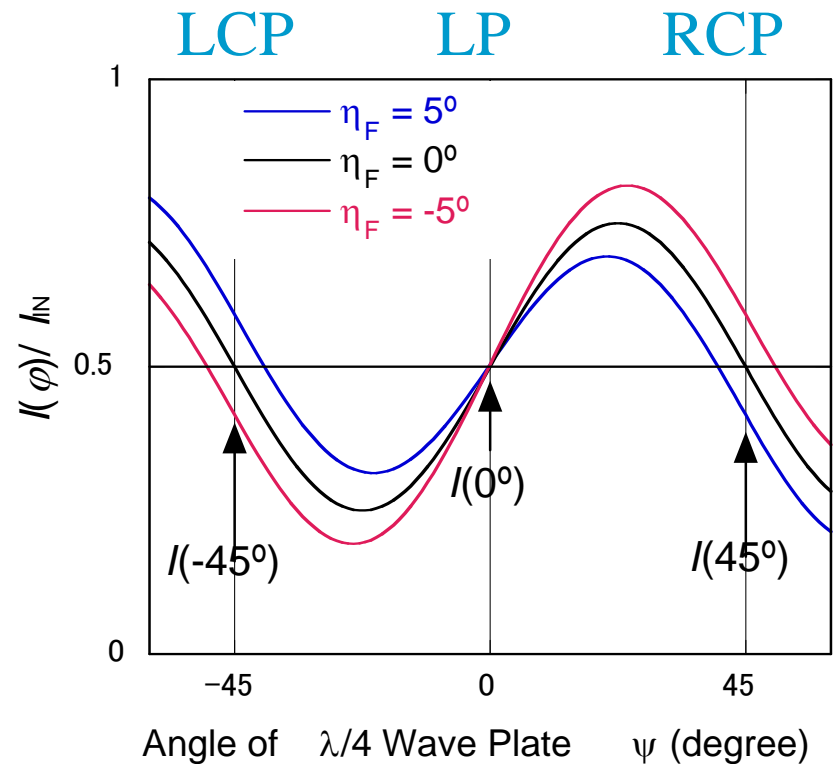
# 光強度 $I(\varphi)$ と磁気光学信号

## Faraday rotation



$$\theta_F = -5, 0, 5^\circ, \\ \eta_F = 0^\circ$$

## Faraday ellipticity



$$\theta_F = 0^\circ, \\ \eta_F = -5, 0, 5^\circ$$

# 磁気光学画像の求め方

## ファラデー回転角

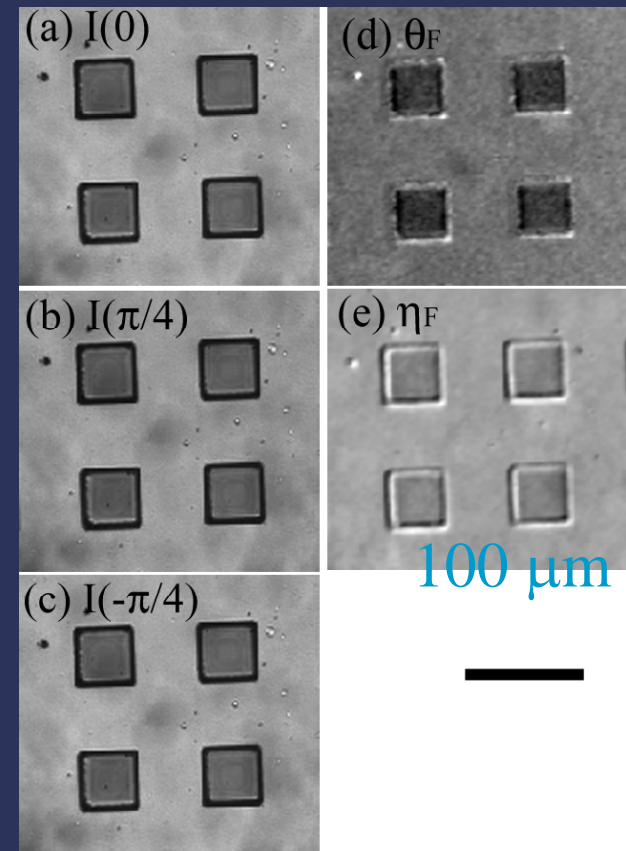
$$\theta_F = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left\{ -\frac{2I(0) - \{I(\pi/4) + I(-\pi/4)\}}{(1 - \eta_F^2) |E_x|^2} \right\}$$

$$\theta_F \approx \frac{1}{2} \left\{ \frac{2I(0) - [I(\pi/4) + I(-\pi/4)]}{(1 - \eta_F^2) [I(\pi/4) + I(-\pi/4)]} \right\}$$

## ファラデー楕円率

$$\eta_F = -\frac{1}{2} \{I(\pi/4) - I(-\pi/4)\} / |E_x|^2$$

$$\eta_F \approx -\frac{1}{2} \left\{ \frac{I(\pi/4) - I(-\pi/4)}{I(\pi/4) + I(-\pi/4)} \right\}$$



CCD カメラで撮った (a) $I(0^\circ)$ , (b) $I(45^\circ)$ , (c) $I(-45^\circ)$  および、画像処理で得られた (d)ファラデー回転と (e)楕円率。

# クロスニコル法との比較

	変調法	クロスニコル法
磁気コントラスト	○	○
$\theta_F$ & $\eta_F$ (同時測定)	○	×
定量性	○	△
像の明るさ	○ ( $0.25I_0$ )	△ ( $0.01I_0$ )
不均一試料	○	△

# ファラデー回転像を測定した試料

MODで作製した  $\text{Y}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$  (YBFGO)

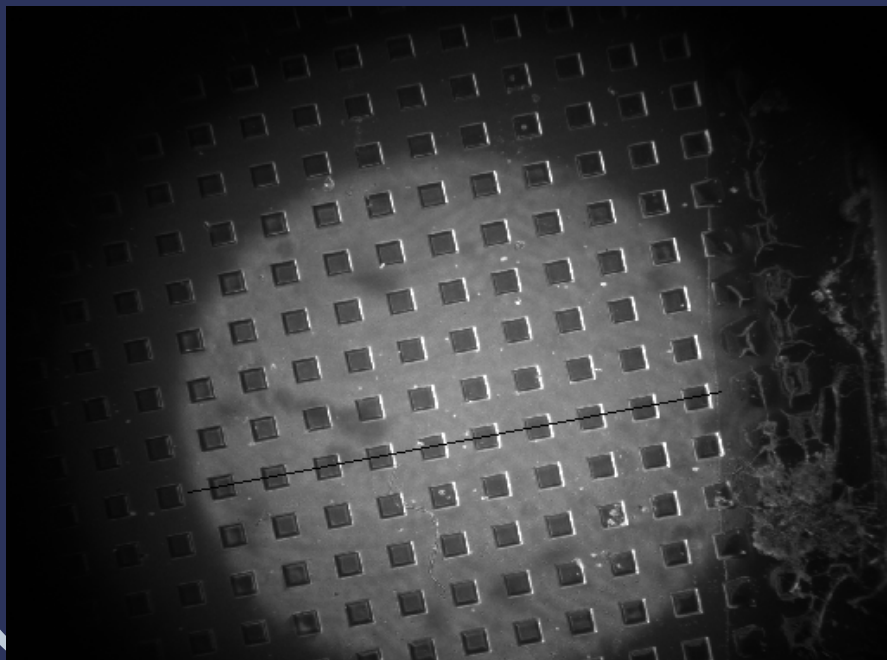
正方形ドット配列

サイズ

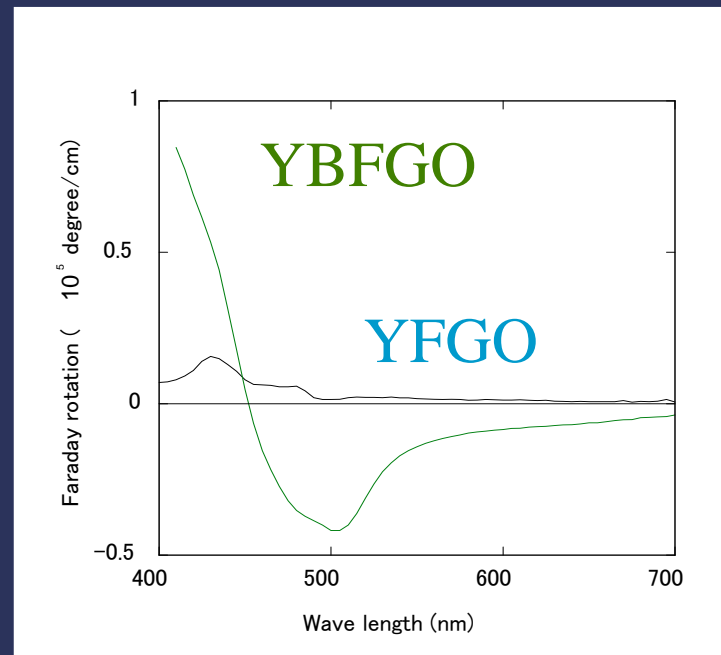
$50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$

膜厚

200nm



通常の磁気光学効果像

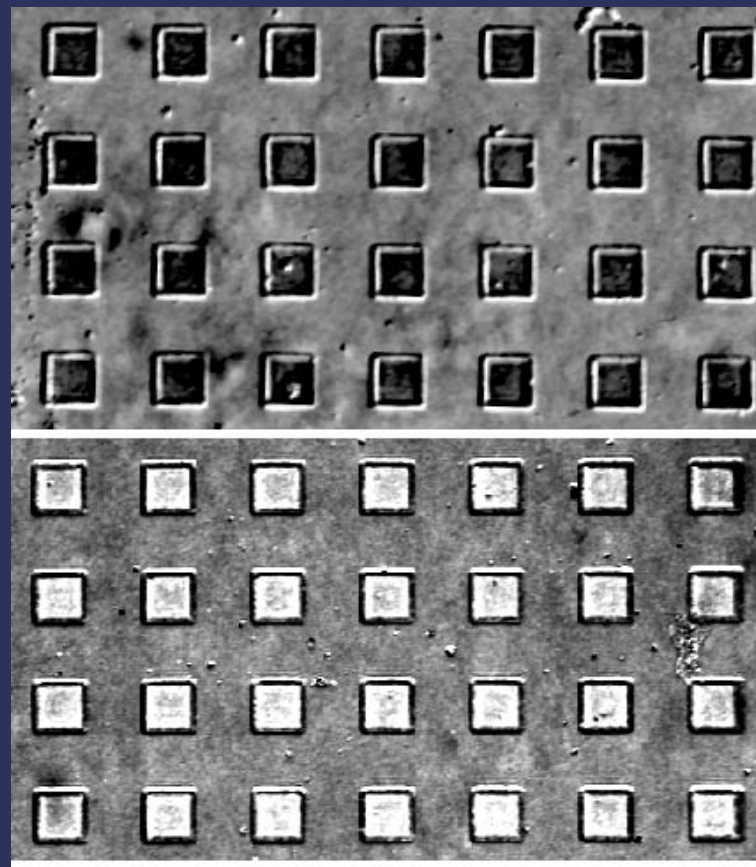
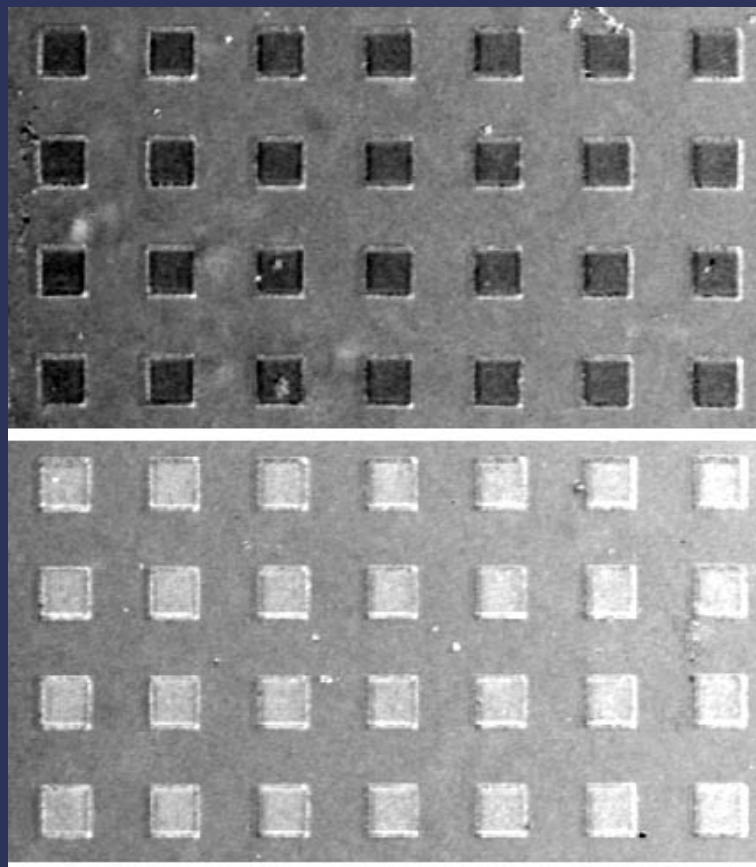


YBFGOの磁気光学スペクトル

# ファラデー回転角像

# ファラデー楕円率像

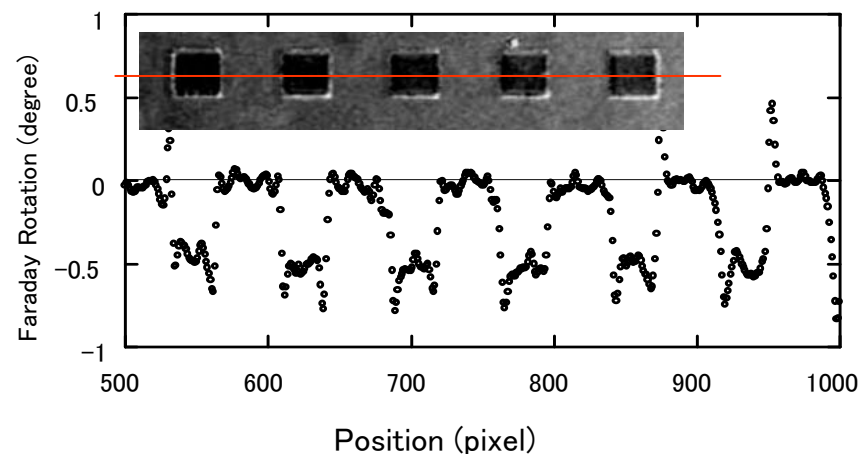
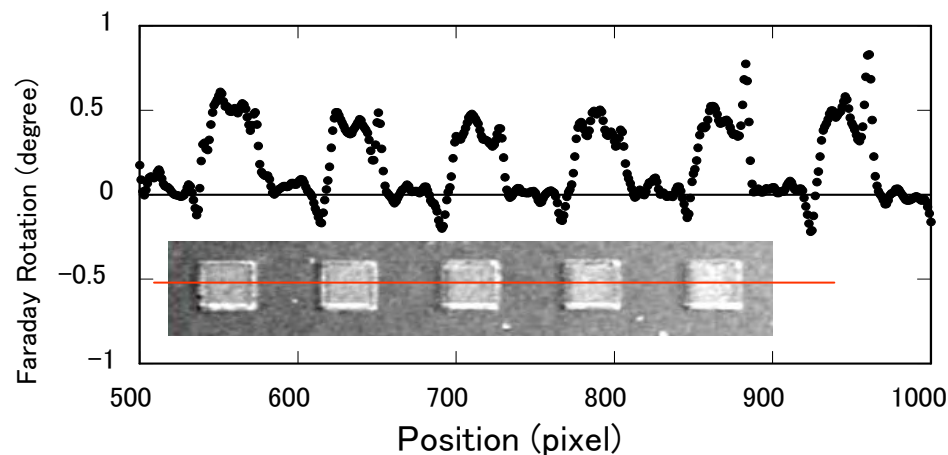
磁化反転



磁化反転によるファラデー効果の画像の反転

波長500 nm

# ファラデー回転角の定量測定

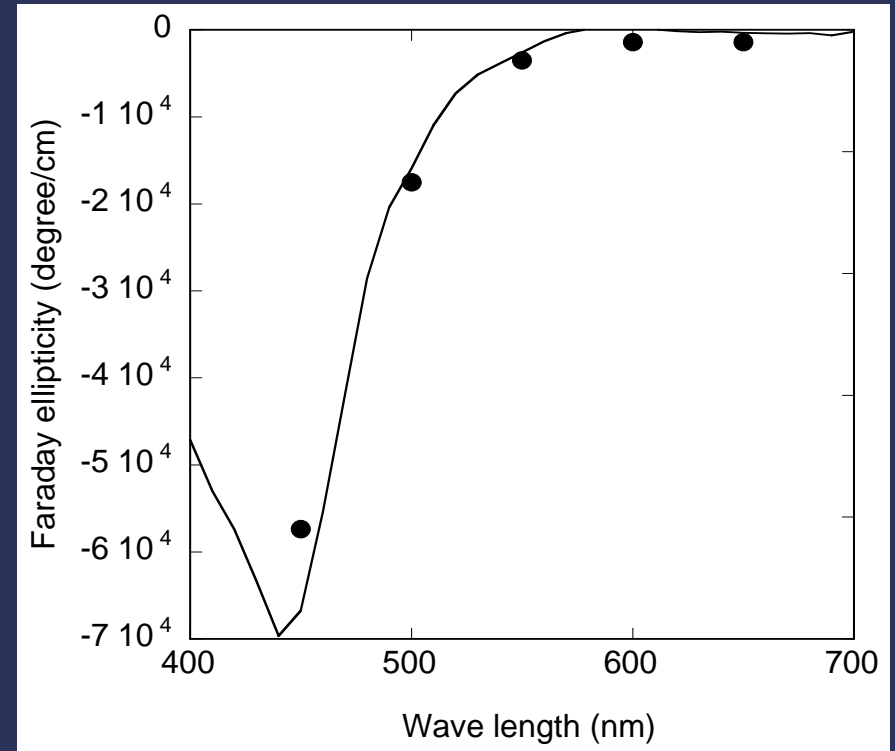
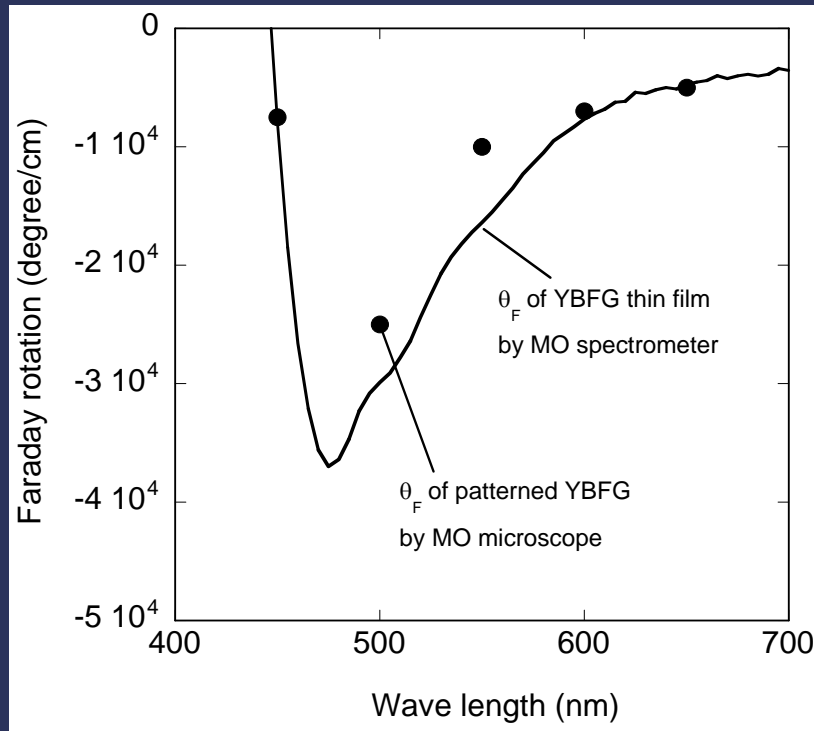


磁化反転

$\lambda=500$  nm

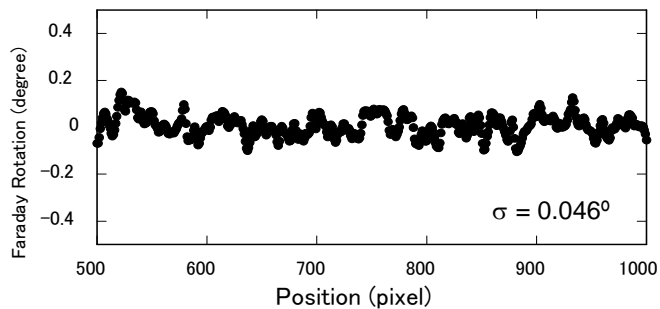
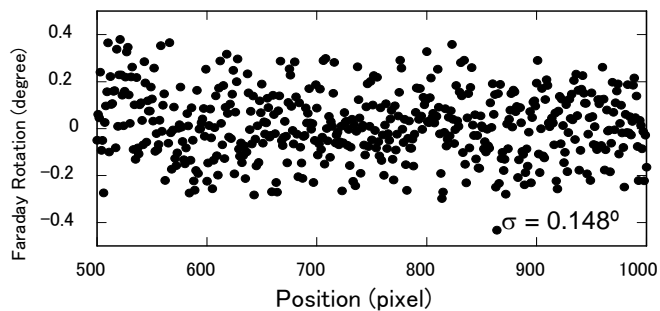
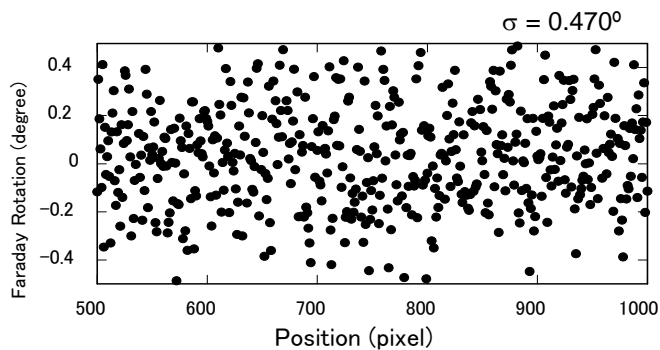
標準試料を使わずに回転角を決定  
回転角は約 0.5 deg. と決定

# ファラデー回転 $\theta_F$ とファラデー楕円率 $\eta_F$ の波長依存性の定量的評価





# データの精度



$\sigma$  : 標準偏差

1 shot

$0.920^\circ$

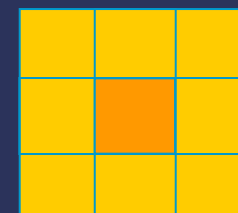
10回積算

$0.148^\circ$

10回積算

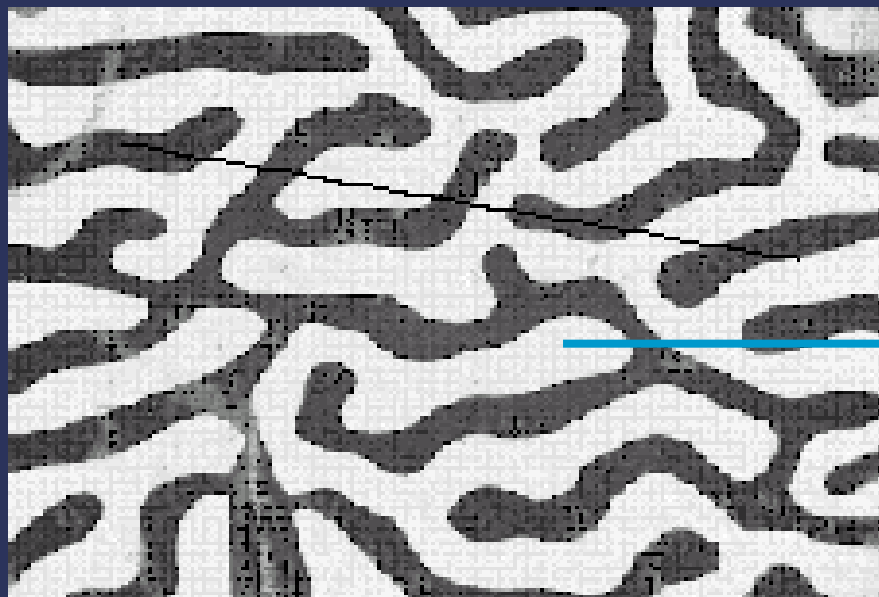
+ 平滑化

$0.048^\circ$

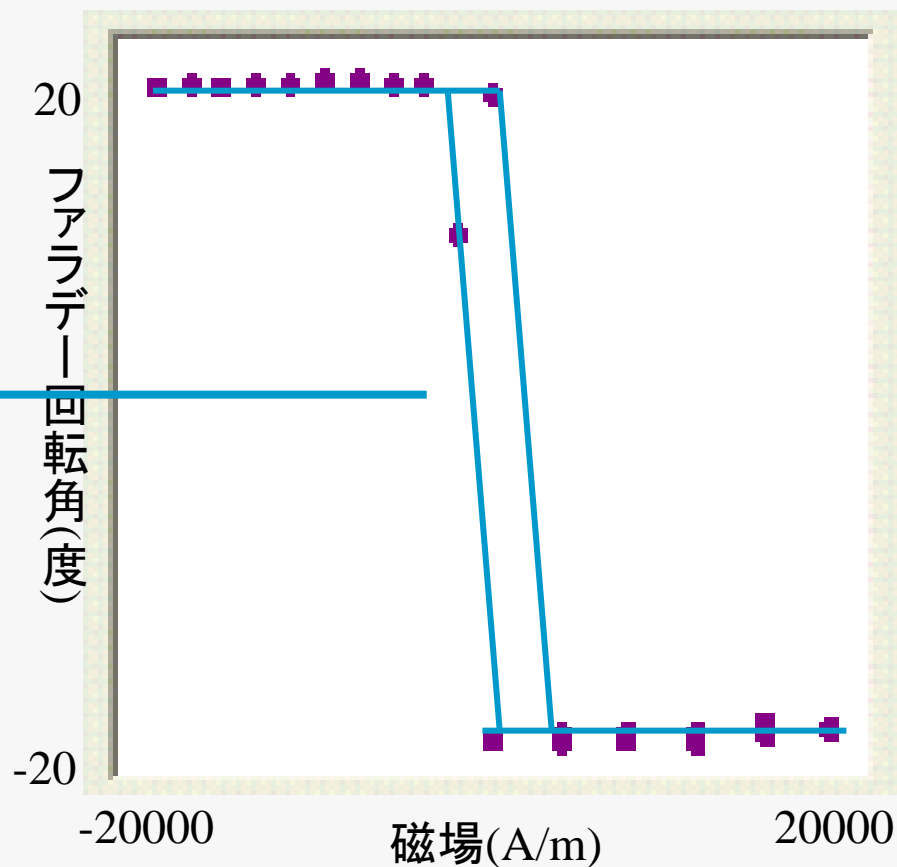


# ヒステリシスの測定

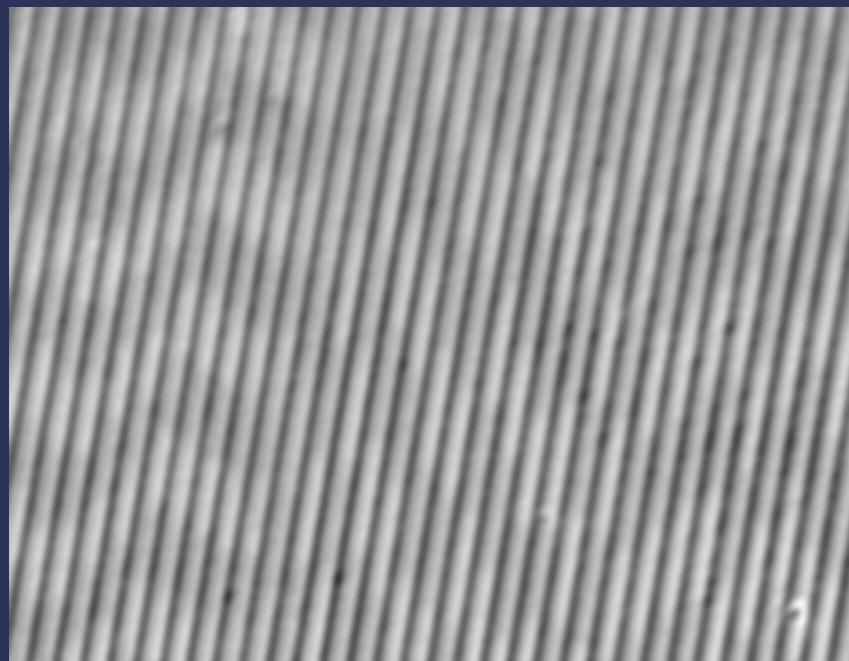
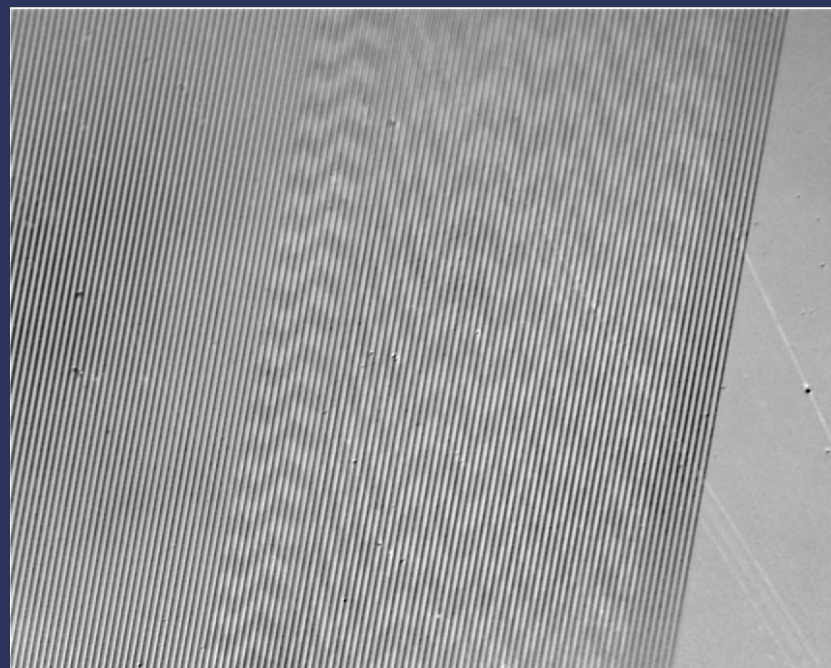
磁界を正負に変化させて、各磁界における磁気光学画像を測定しておけば、あとで、カーソルを持ってもらうだけで、その位置のヒステリシスを評価できる。



東邦大品川教授提供の  
Y1-xBixFe5O12薄膜の  
磁気光学像



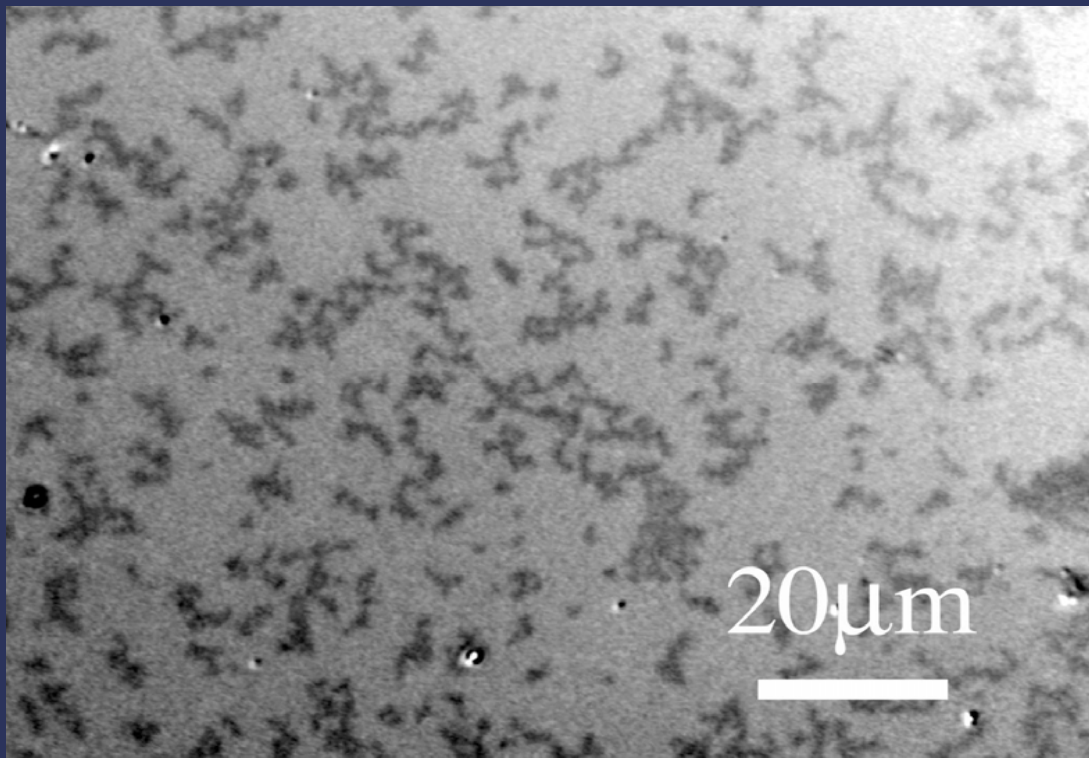
# Pt/Co MO ディスクの記録マーク



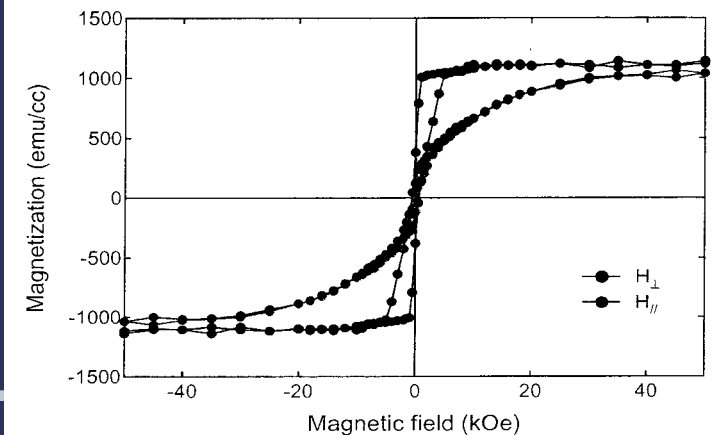
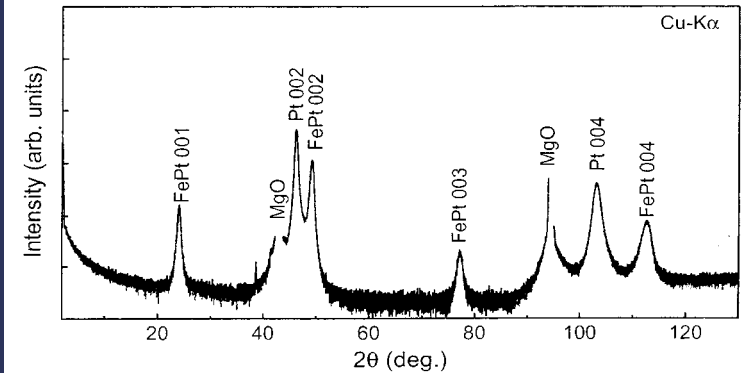
MO記録された1  $\mu\text{m}$ のグルーブが明瞭に見られており分解能は1  $\mu\text{m}$ 以下と推定される

# 低温成膜FePt薄膜のKerr回転画像

$\text{Fe}_{38}\text{Pt}_{62}$ (20nm)/Pt(40nm)/Fe(1nm)/MgO(001)

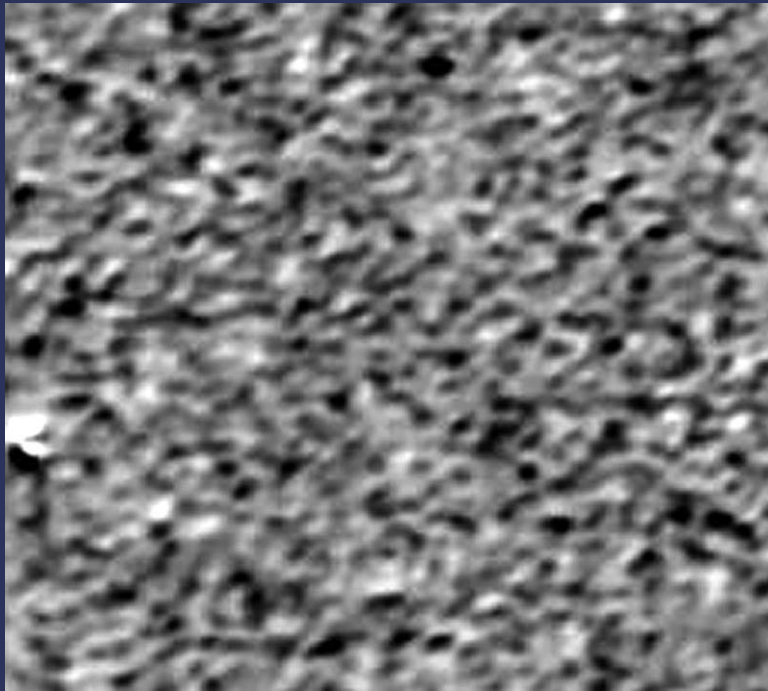


Kerr回転画像(残留磁化状態)

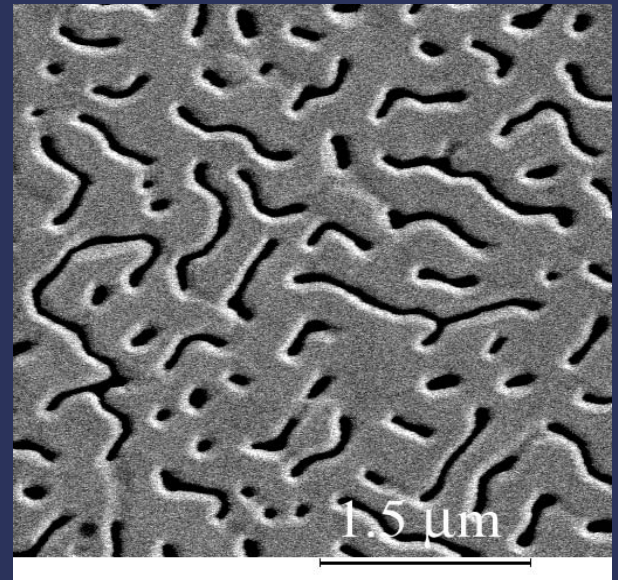


# FePt薄膜のKerr回転画像

$L1_0$  Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(100nm)/MgO(001)



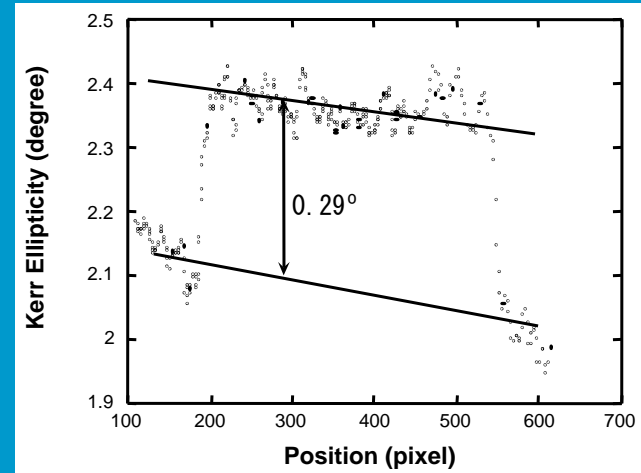
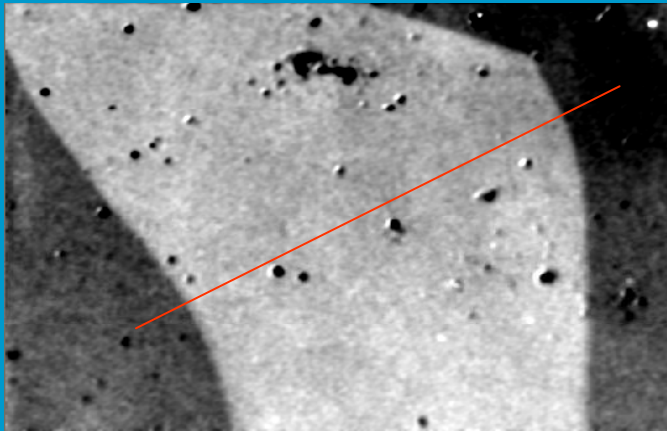
Kerr回転画像



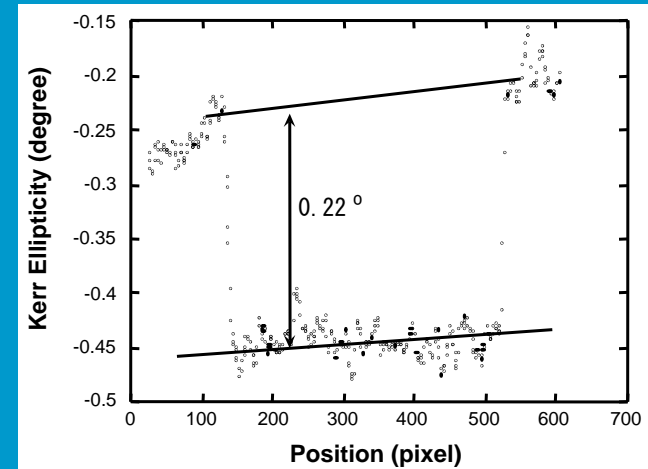
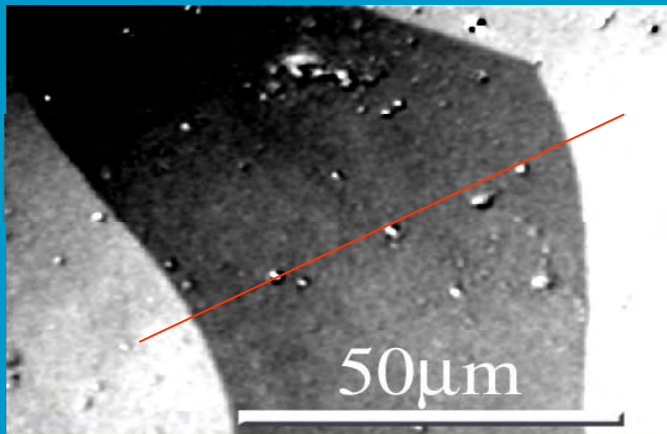
SEM像

# Bi:YIG薄膜のカー一回転画像

## Kerr rotation



## Kerr ellipticity

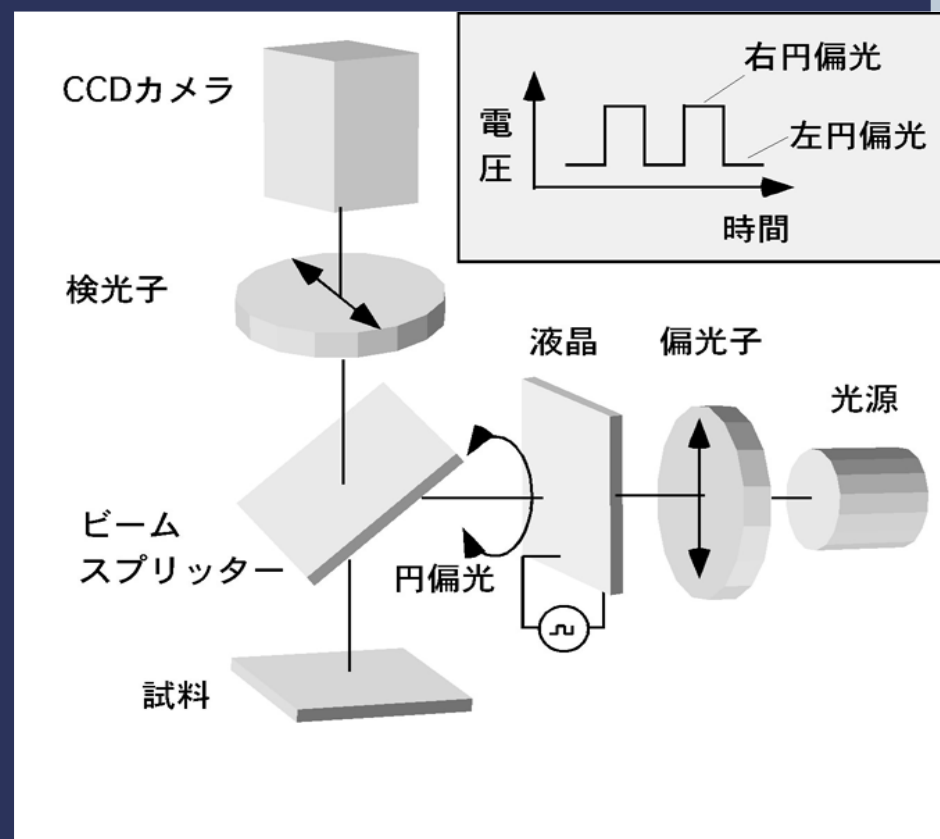
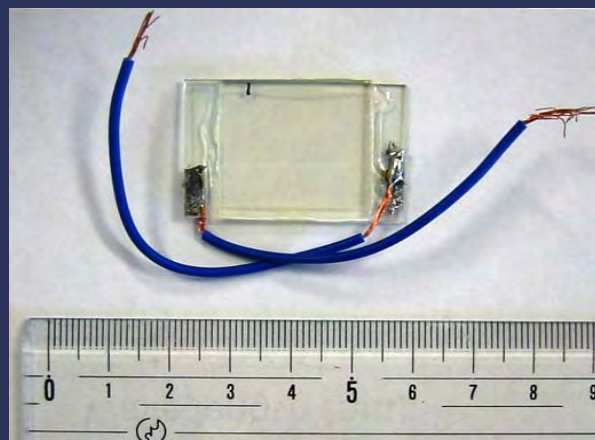


# 動画像を得るために

- 回転1/4波長板では、1つの画像をとるために数秒が必要ですが、磁界を変化させて画像を見るには、速い応答が必要です。
- できれば、ビデオレート(1秒間に30フレーム)で測定したい。
- そこで、回転検光子の代わりに液晶板を使い電圧によって光学遅延を制御することとしました。

# 液晶波長板による偏光スイッチ

- $\lambda/4$ 板を回転する代わりに液晶に加える電圧を制御



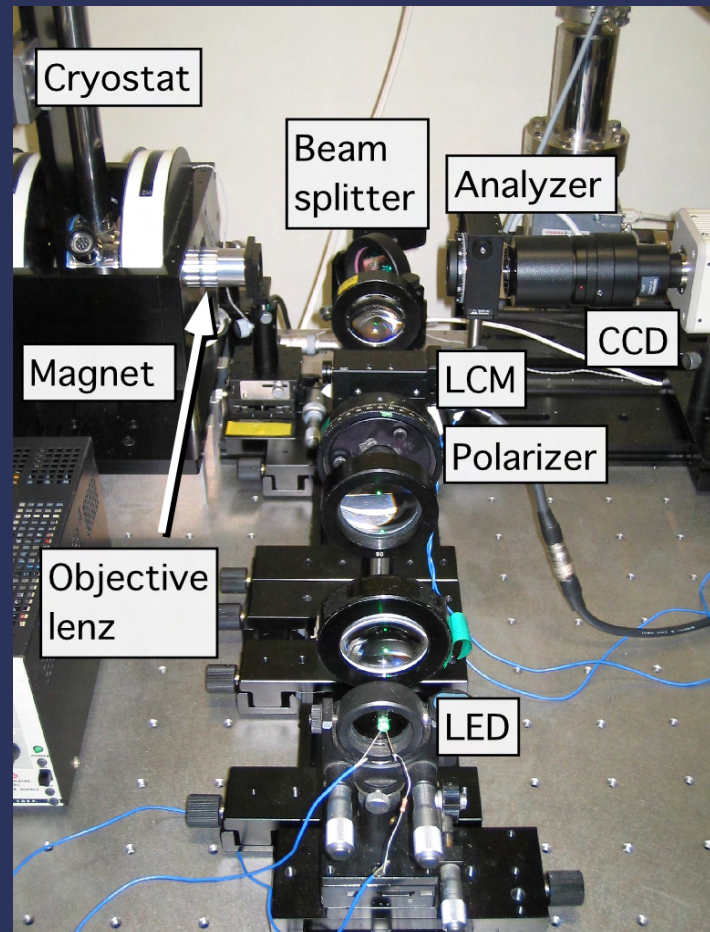
液晶変調器を用いた磁気光学顕微鏡



# MO microscope

Cryostat  
3.5 - 500 K

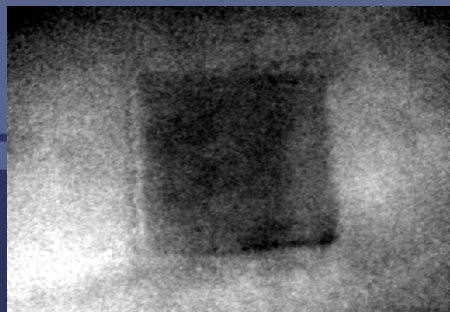
LED  
Green 525nm  
Blue 470nm



CCD  
150 fps

Sample  $\text{Y}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$

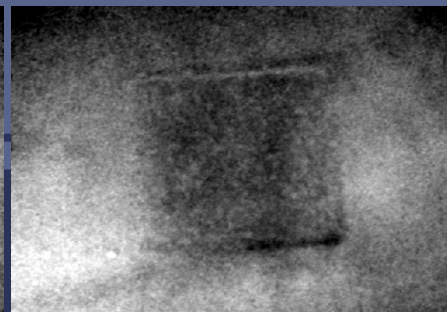
パターンサイズ 50 $\mu\text{m}$ 角



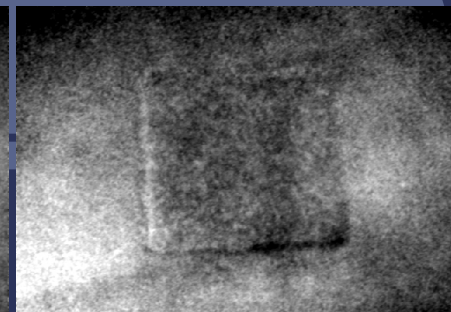
0s



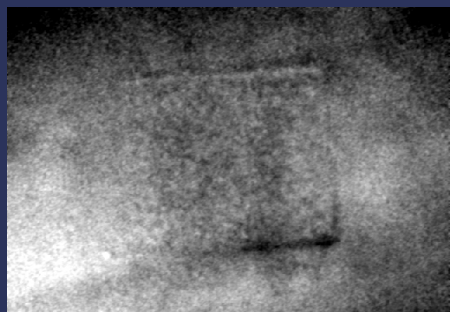
1s



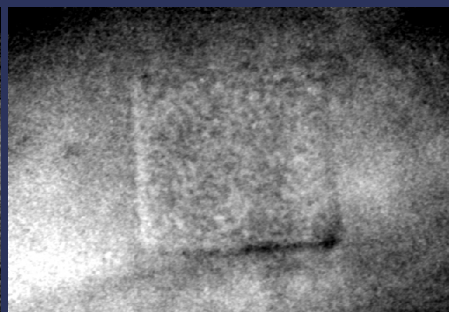
2s



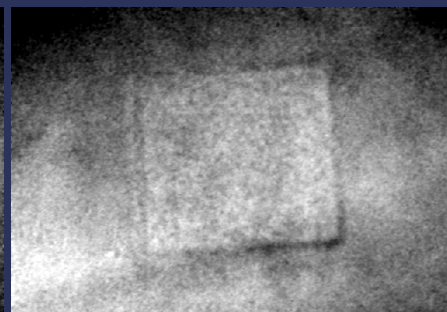
3s



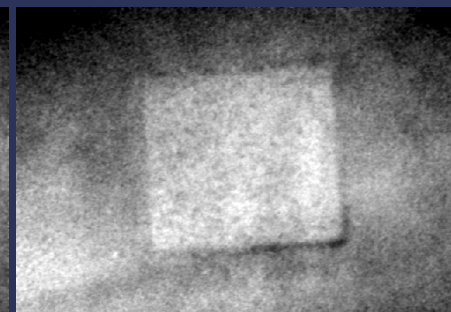
4s



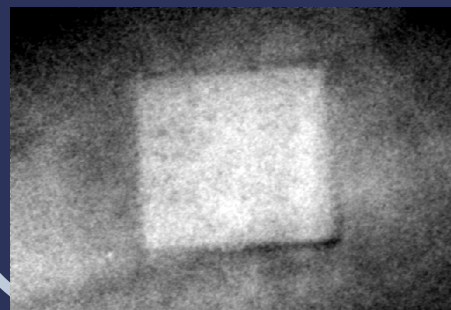
5s



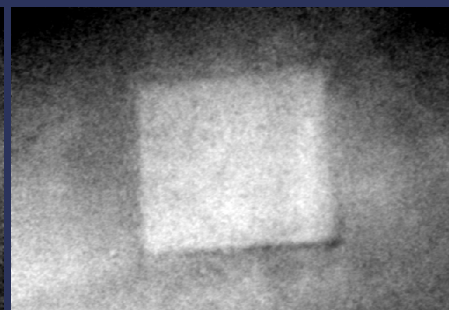
6s



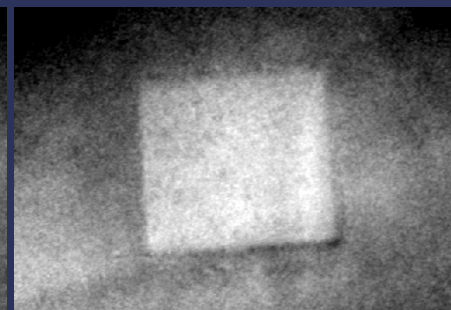
7s



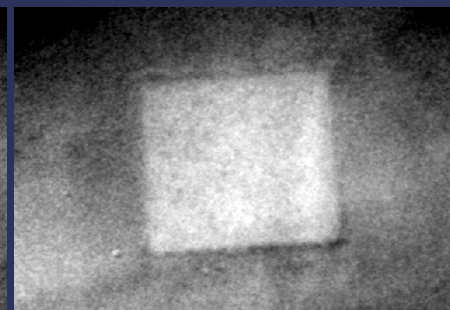
8s



9s

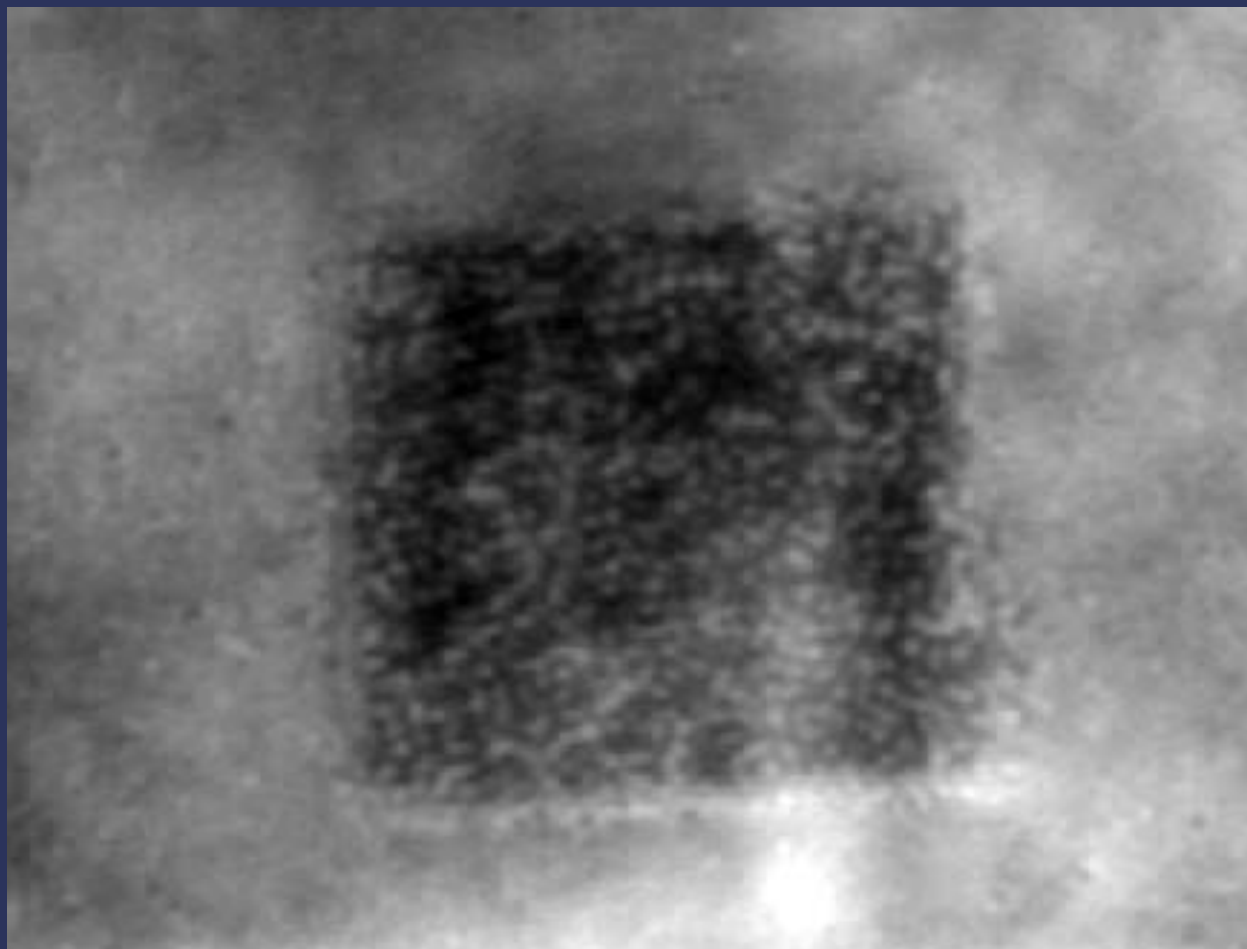


10s



11s

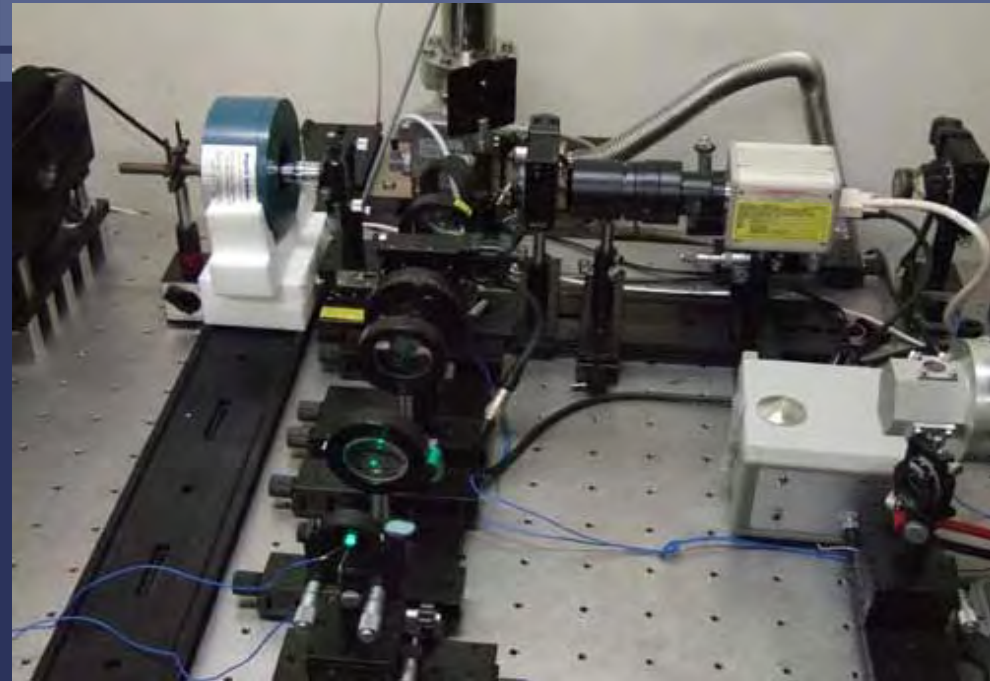
# Kerr rotation image ( Obj. lens $\times 50$ )



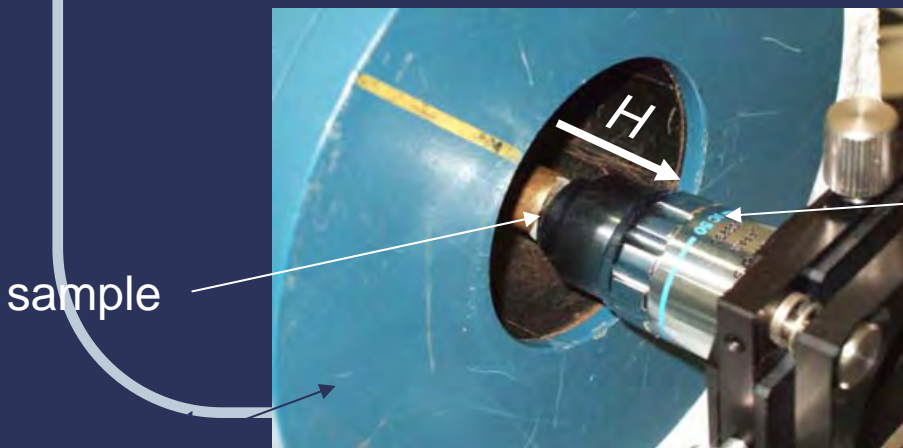
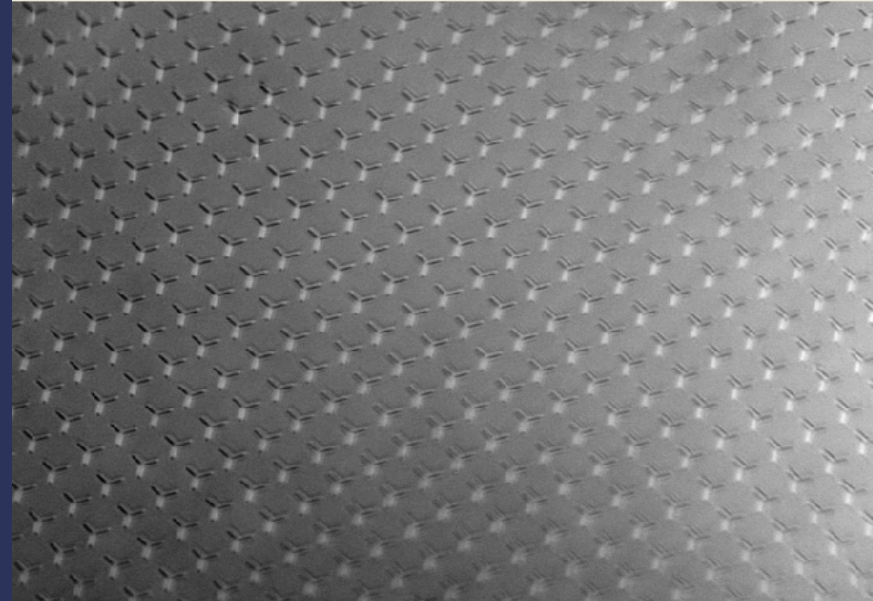
積算 1000回

試料 50mm角の磁性ガーネット

# MO microscope measurement

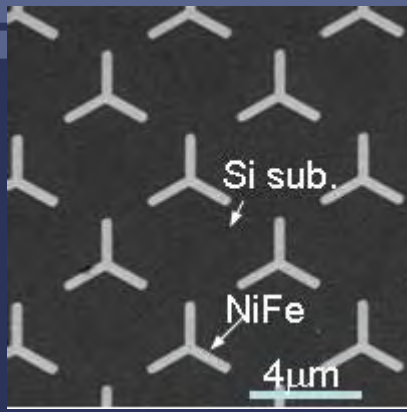


MO image

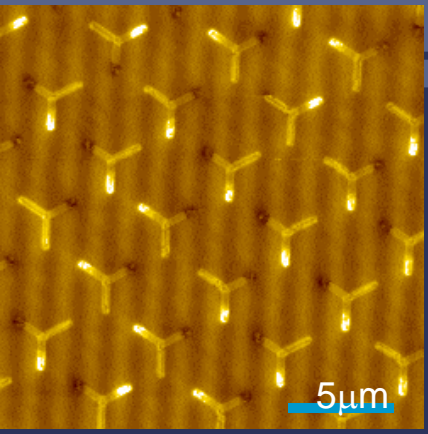


objective lens  
( $\times 50$ ,  $NA=0.85$ )

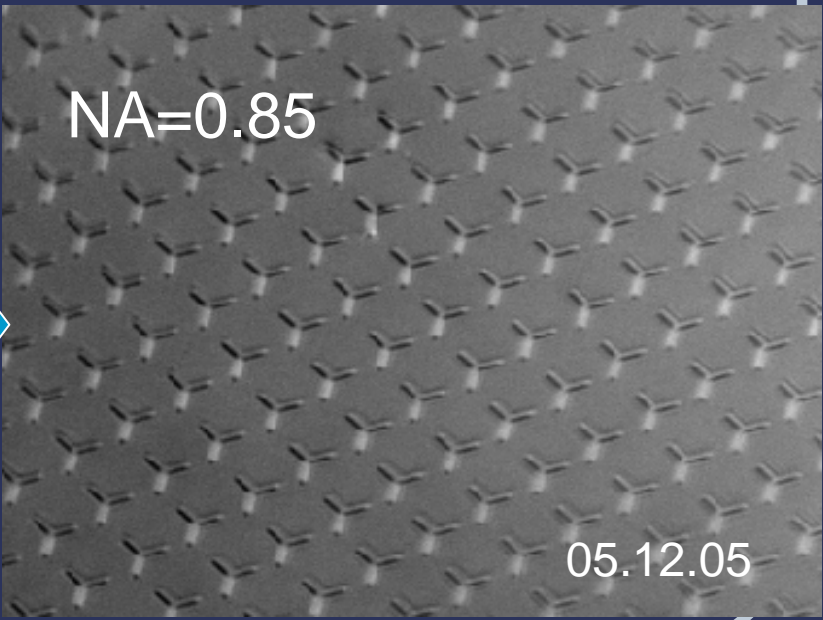
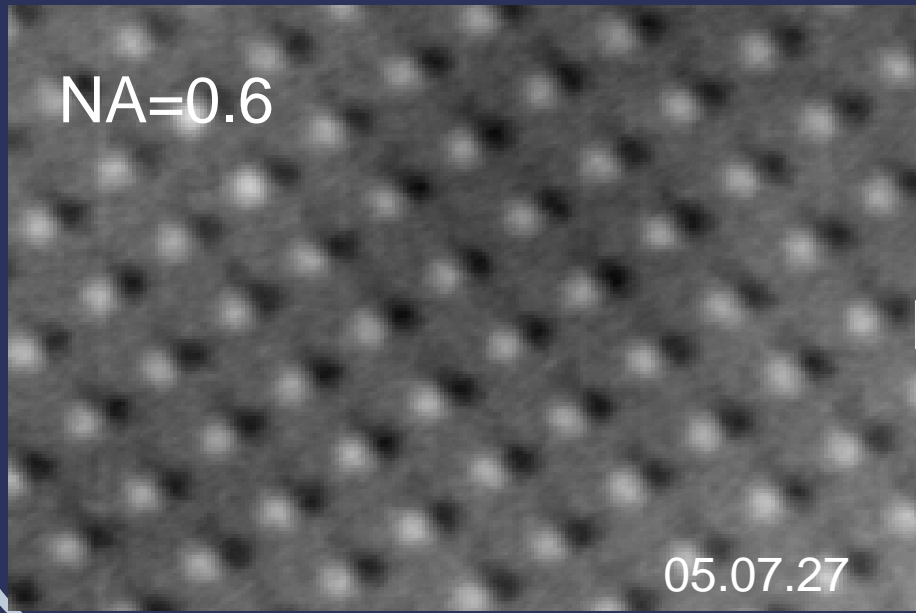
# レンズのNAをあげることによる解像度の向上



SEM像



MFM像



# 超伝導体への磁束の侵入を見る

- 最近、石橋らは、ガーネット膜上に、ニオブNbの超伝導薄膜をつくり、Nbに侵入した磁束を観測する実験をしています。

# MO images of Nb anti-dots

10 $\mu\text{m}$  アンチドットパターン全体のMO像  
対物レンズ10倍。150Oe磁場中冷却後の画像と  
磁場除去後の画像の差分画像。

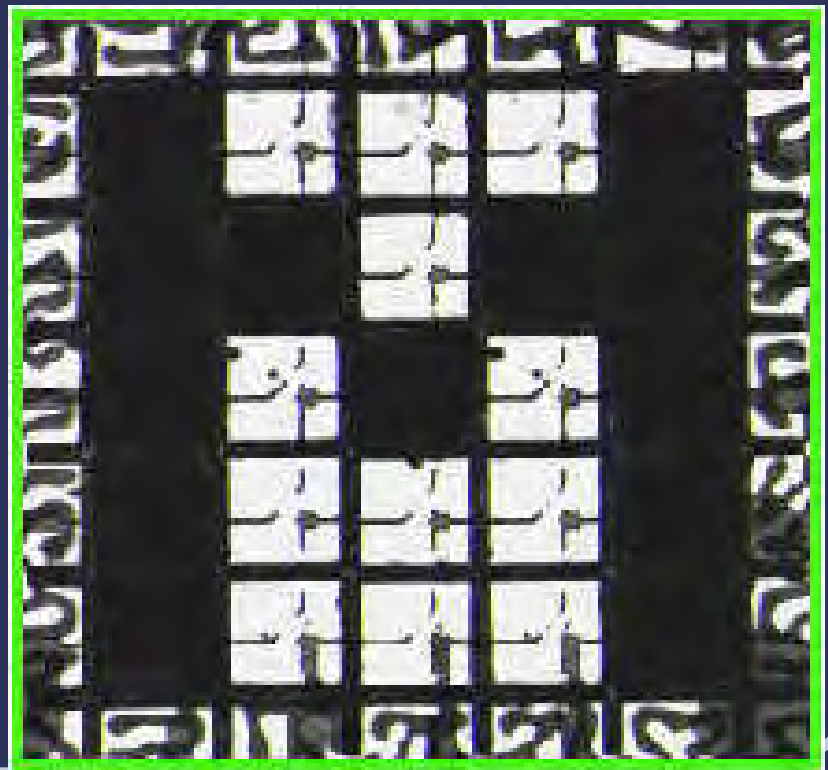
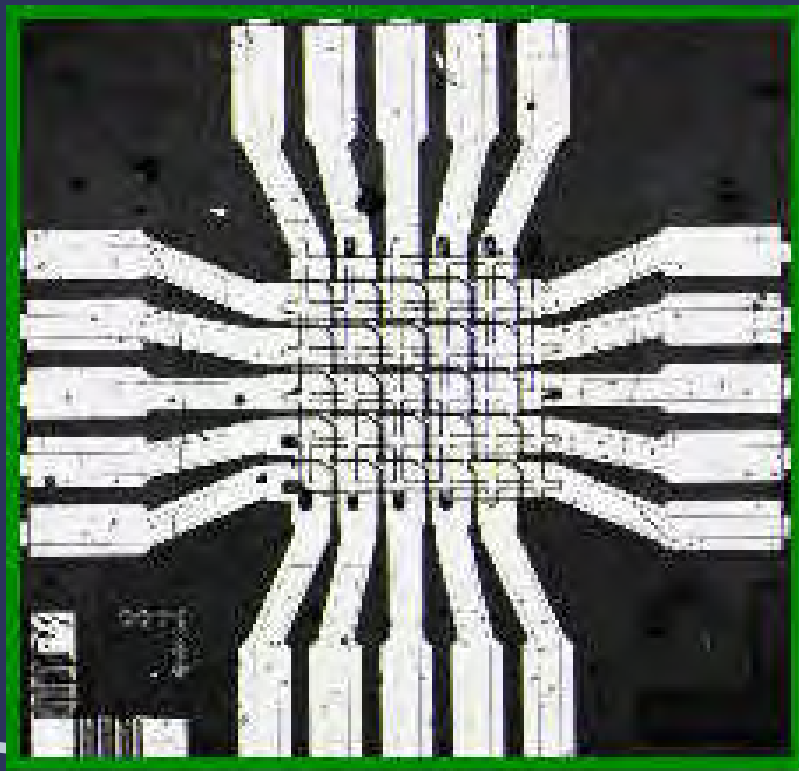
# 空間磁気光学変調器(MOSLM)

- 光画像処理に用いられるSLM (spatial light modulator)として通常液晶が用いられるが、応答速度が速いSLMが求められていました。
- 磁気光学効果を用いると高速応答が期待できます。
- 豊橋技科大の井上らは、MOSLMを開発しました。磁界の印加のためにWord線とBit線に電流を流し、合成磁界で磁化を反転するのです。



# MOSLMの例

- 豊橋技科大井上研のHPより



# 今週のまとめ

- 磁区の観察に磁気光学効果を使うことのメリットを述べました。
- クロスニコル法を用いた磁気光学顕微鏡の問題点を指摘しました。
- 円偏光変調法を磁気光学顕微鏡に適用する佐藤研の試みを紹介しました。
- 開発した顕微鏡を使った観測例を示しました。

# 第13回の課題

- さまざまな磁区観察法を箇条書きにし、あなたが興味を持ったこと、質問などを書いてください。
- 磁気光学効果を使って磁区観察することのメリットを述べてください。