

# ドレスト光子による自律的粒子 堆積状態への遷移を示す確率モデル

中大理工 高橋 幹, 香取眞理

NICT 成瀬 真

東大工 大津元一

Stochastic model showing a transition to self-controlled  
particle-deposition state induced by optical near-fields  
(K. Takahashi et al., arXiv 1410.3190 [cond-mat.mes-hall] (2014)  
submitted to Appl. Phys. B)

日本物理学会 第70回年次大会 2015年 3月24日

# 目次

- 導入

  - 最新の光学理論 ドレスト光子工学

  - ドレスト光子の性質

  - ドレスト光子の応用例

- モデル解説

  - 先行研究モデル

  - 改良モデル

- 数値シミュレーション結果

  - 非平衡転移現象

  - 秩序変数の光強度依存

  - 蓄積電荷量の光強度依存

  - 臨界値近傍のべき乗則

  - システムサイズごとの相図

- まとめと展望

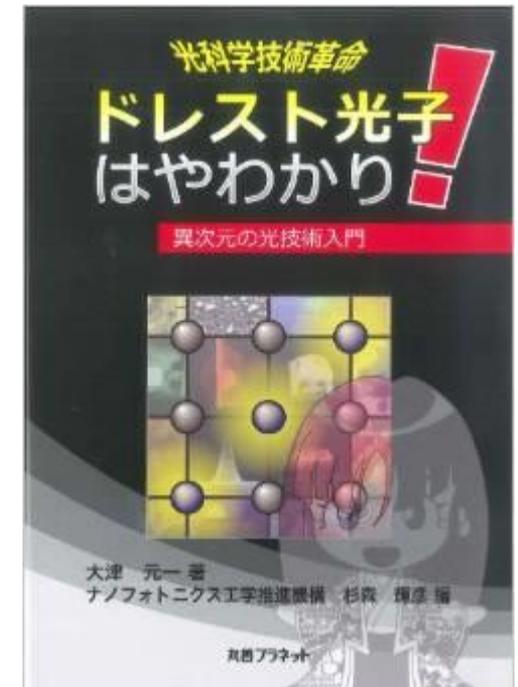
# 最新の光学理論 ドレスト光子工学

東大工の大津元一先生が提唱した、「進歩の限界に達しつつある既存の光技術に取って代わり、多くの分野に使える基盤的な包括技術」(右書籍より引用)

応用範囲:

- ・光リソグラフィ
- ・シリコン発光ダイオード
- ・情報セキュリティ
- ・物質表面平坦化
- ・精密計測

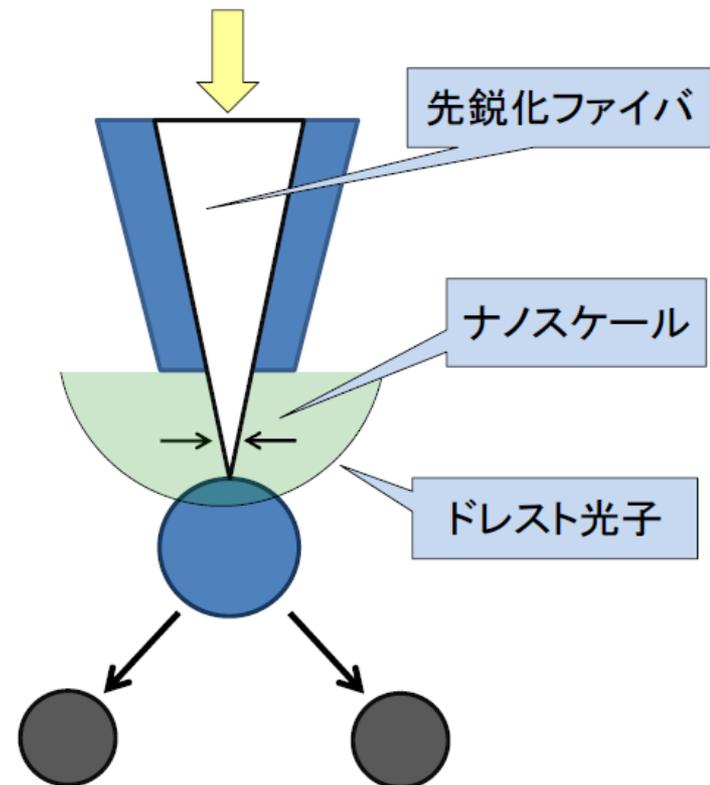
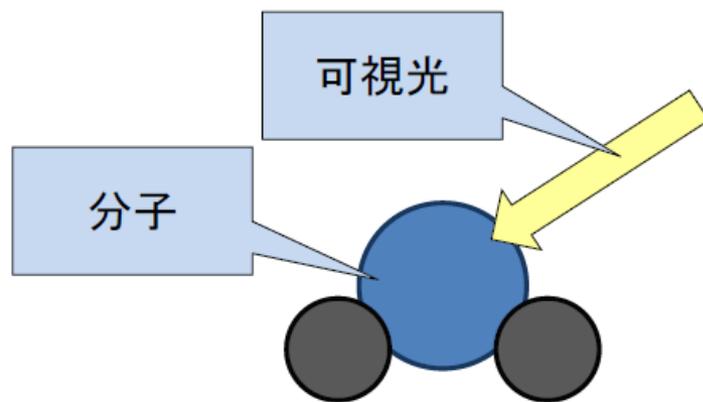
他にも多岐にわたる。



# ドレス光子の性質

ナノスケールの物体に光照射を行うことで相互作用により物体周囲に広がる、電子の衣を纏った光子

→ フォノンと結合し照射光よりも  
高いエネルギーを持つ



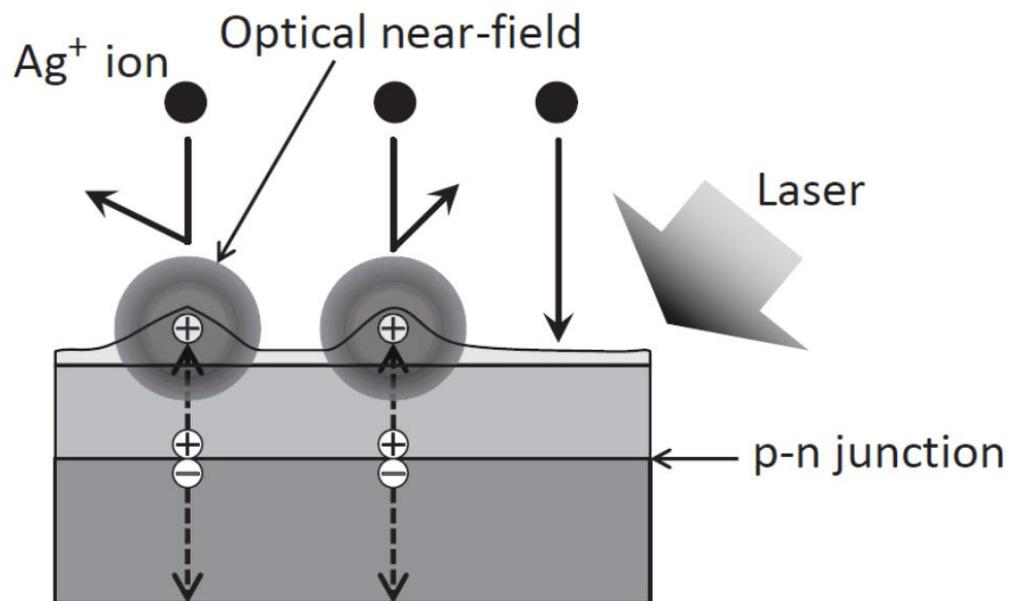
# ドレスト光子の応用例

ドレスト光子の利用は光起電デバイスの高効率化が可能

デバイス加工の手順

1. 長波長光を照射
2. スパッタリングにより粒子堆積
3. 突起部にドレスト光子が発生
4. pn接合部に電子・正孔が発生
5. 突起部に正孔が蓄積
6. 粒子堆積が自律的に制御
7. 特徴的な表面形状が生成

→加工後のデバイスは  
照射光の波長を変換できる

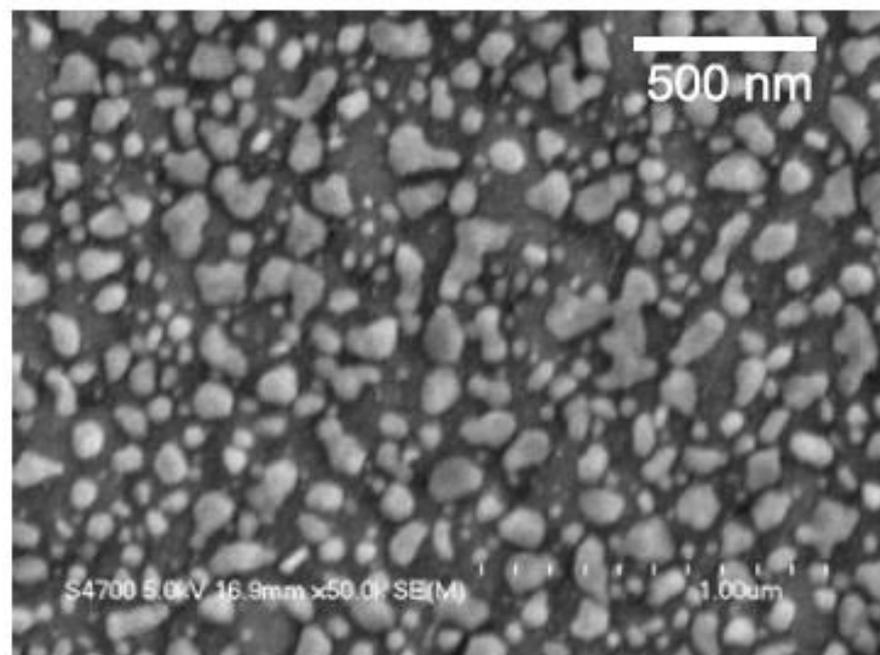
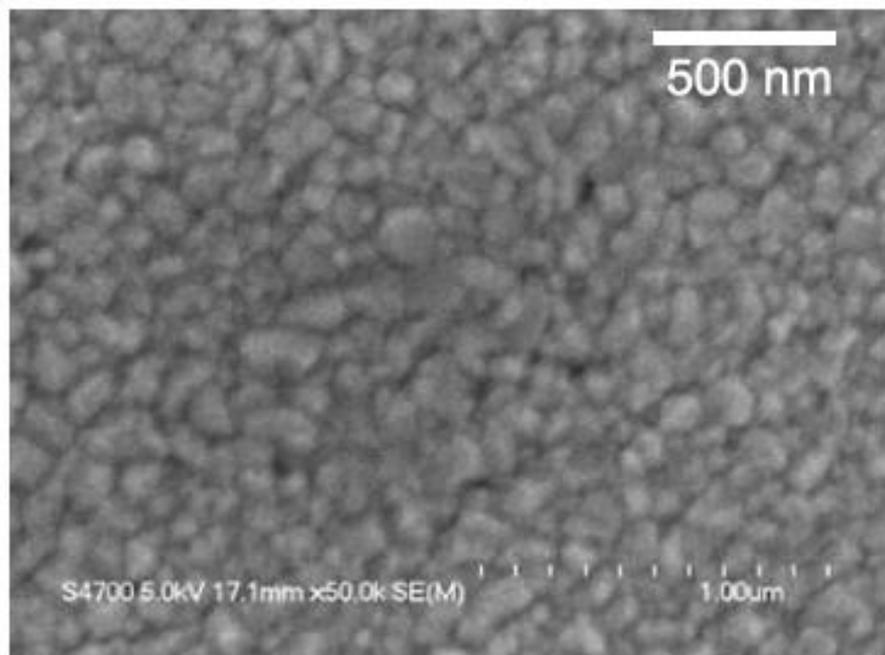


# ドレスト光子の応用例

基板表面(拡大図)

光照射なし

光照射あり



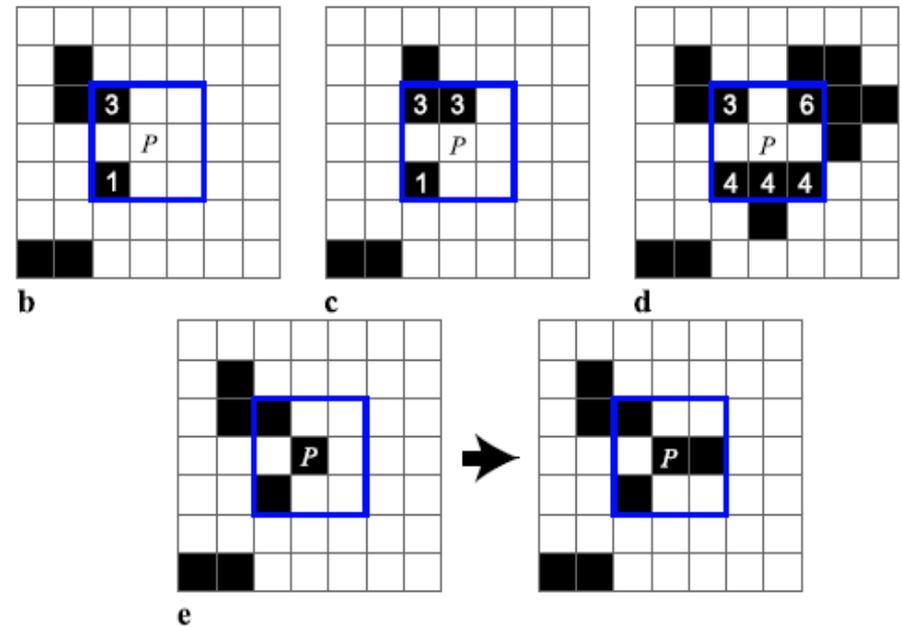
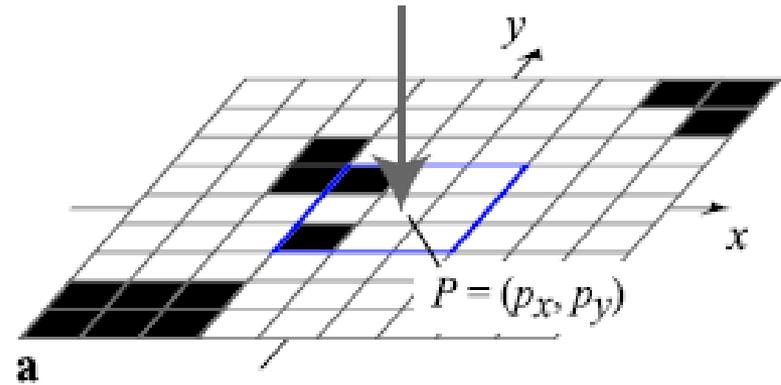
引用 : S. Yukutake et al, Appl Phys B (2010) 99 415.

**特徴的形状を持つAg薄膜が  
自律的に形成されるメカニズムを解明する**

# 先行研究モデル

1.  $L \times L$ の格子を設定する
2. 粒子を落とす位置をランダムに決める
3. 周囲8つのセルからの反発を計算する
4. 反発力が閾値  $E_{th}$ より小さければそのセルに堆積させる
5. 反発力が大きければ隣接する4つのセルのいずれかにランダムに移動させ、手順3に戻る
6. 手順2~5のサイクルを  $T$  回行う

システムサイズ  $L$ 、閾値  $E_{th}$ 、総サイクル数  $T$  を適宜変えてシミュレーションを行う



引用 : M.Naruse , et al , Appl. Phys. B **105** (2011) 185.

# 改良モデル

- 時刻  $t$ 、 $L \times L$  上の点  $r$  における確率変数として堆積粒子数  $n_t(r)$  だけでなく電荷量  $q_t(r)$  を設定
- 粒子に働く反発をクーロン反発とした

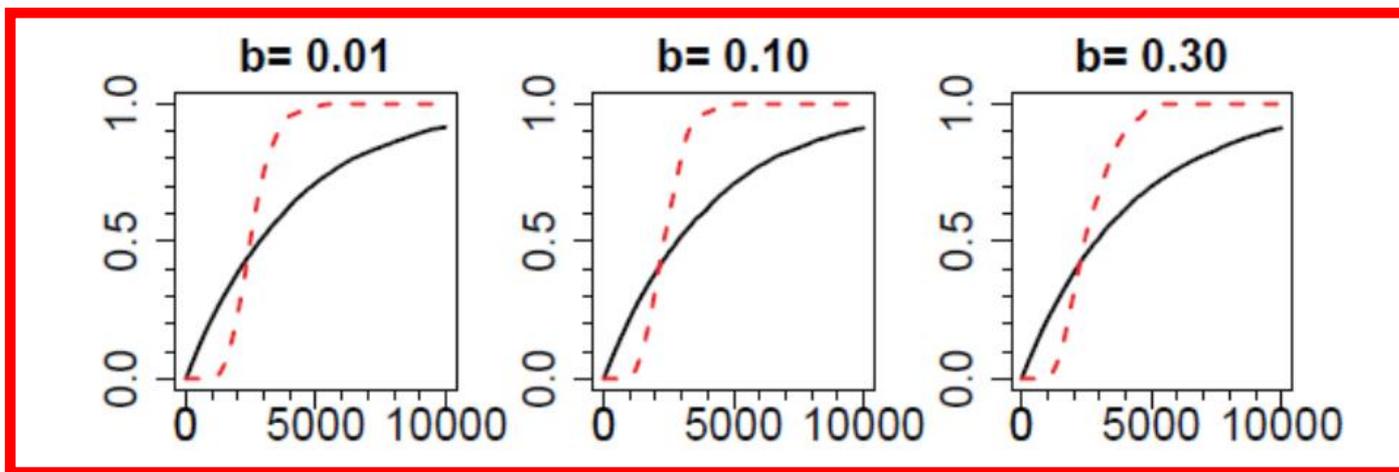
$$V(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{r} \in \Lambda_L} a \frac{q_t(\mathbf{r})}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}|}$$

- 光強度パラメータ  $b$  を導入
- クラスタサイズ  $s$  に依存するドレスト光子の発生効率関数をガウス型として導入

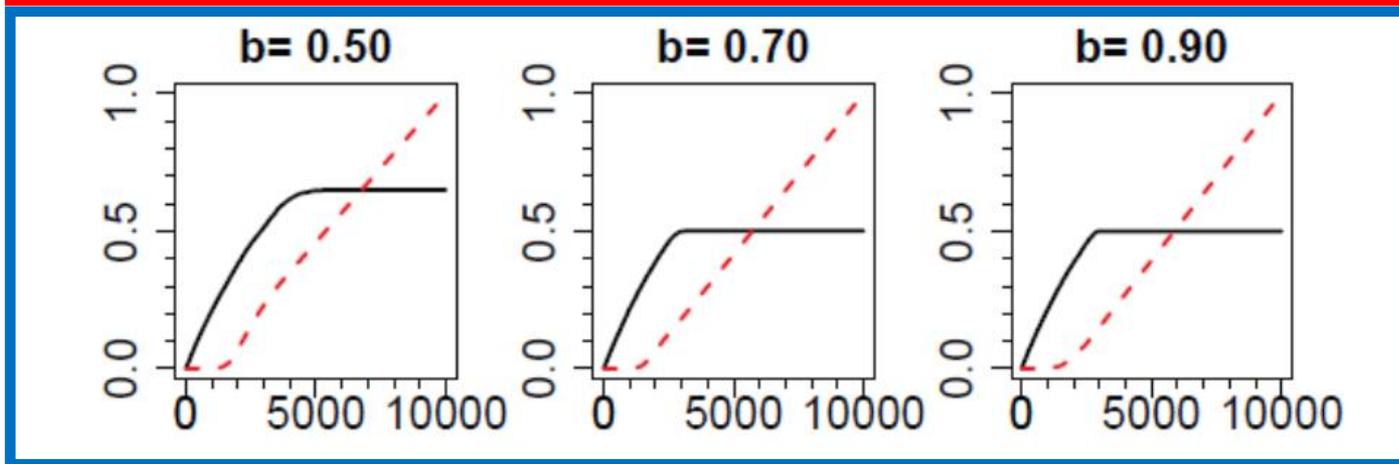
$$f(s) = \exp\left[-\frac{(s - s_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

# 非平衡相転移現象

状態B  
(ランダムな堆積)



状態A  
(自律的な堆積)

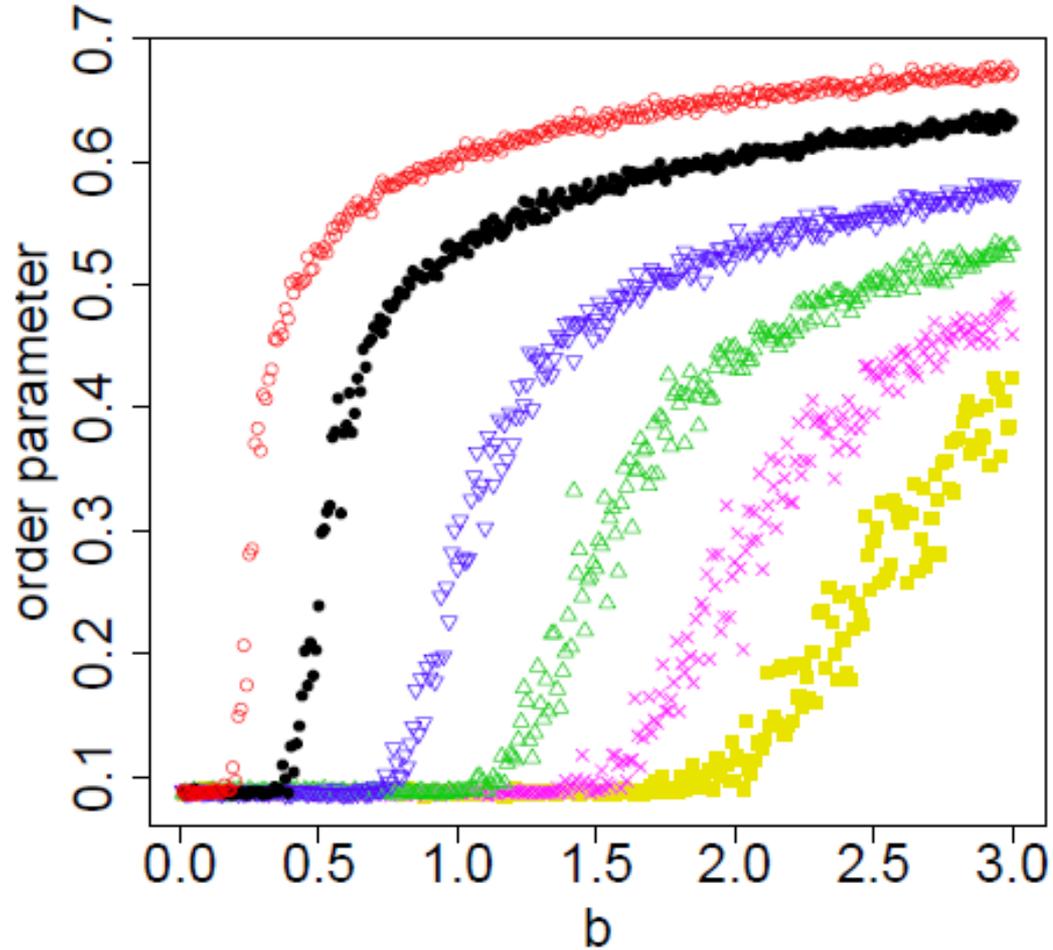


引用 : K. Takahashi et al., arXiv 1410.3190  
[cond-mat.mes-hall] (2014)

- 黒実線: 粒子堆積密度  $R_T$
- 赤破線: 総蓄積電荷量  $Q_T$

$$E_{th} = 10, b = 0.01 \sim 0.90$$

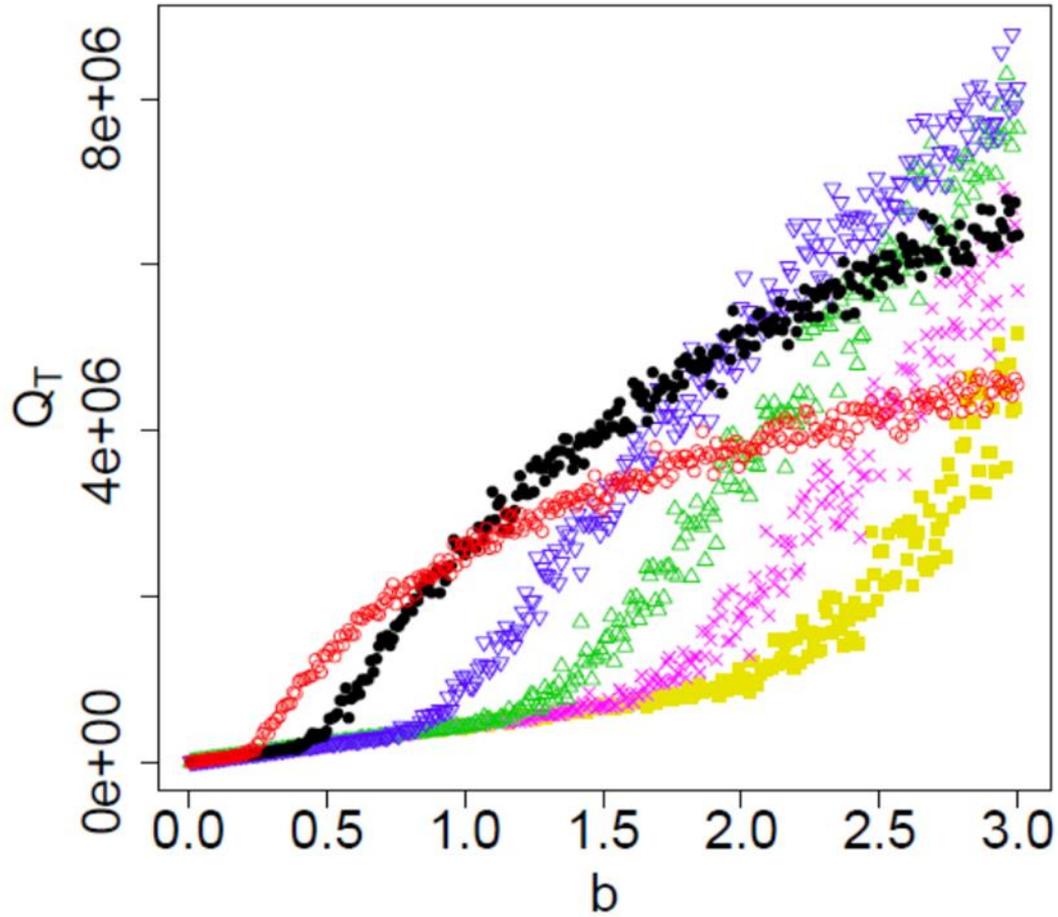
# 秩序変数の光強度依存



$E_{th} = \bigcirc 5, \bullet 10, \nabla 20, \triangle 30, \times 40, \blacksquare 50$

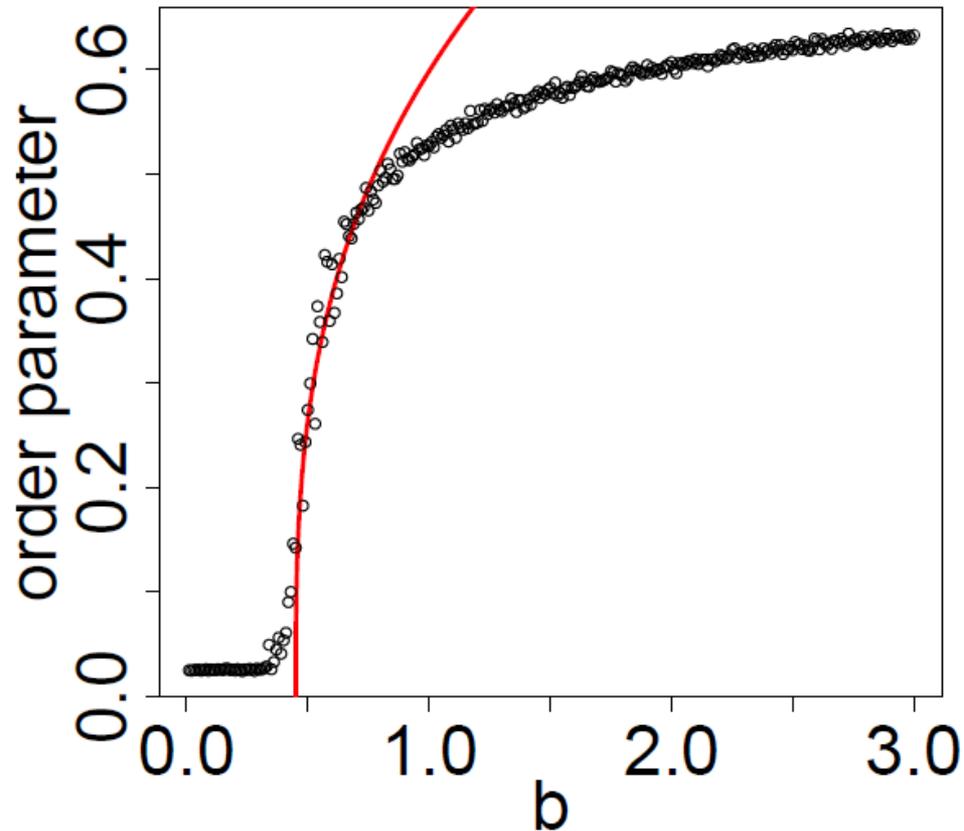
秩序変数:  $\rho_0 = 1 - R_T$

# 蓄積電荷量の光強度依存



$E_{th} = \text{○} 5, \text{●} 10, \text{▽} 20, \text{△} 30, \text{×} 40, \text{■} 50$

# 臨界値近傍のべき乗則



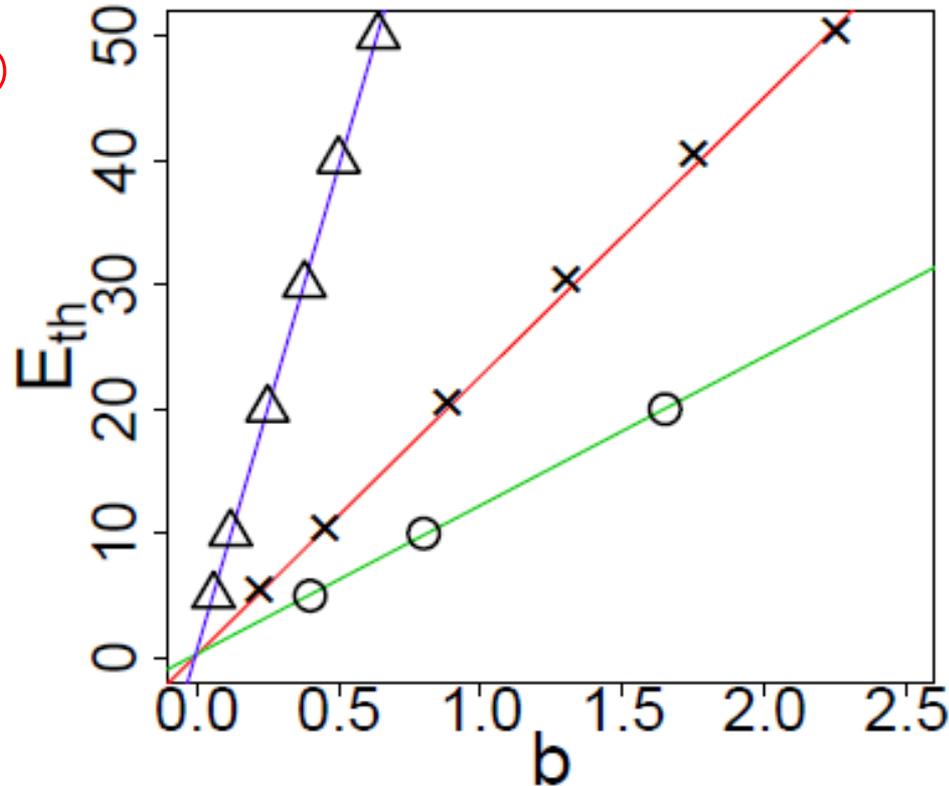
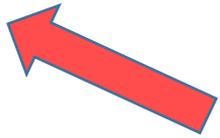
べき乗則より臨界値  $b_c$  を見積もることができる

$$\rho_0 \sim (b - b_c)^\beta, \quad 0 < b - b_c \ll 1$$

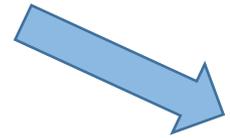
→  $E_{th} = 10$  のとき、 $b_c = 0.44$ ,  $\beta = 0.34$

# システムサイズごとの相図

状態B  
(ランダムな堆積)



状態A  
(自律的な堆積)



$$L = \circ 50, \times 64, \triangle 100$$

$b_c = c(L) E_{th}$  という普遍的な比例関係が存在する

# まとめと展望

- ドレスト光子工学と呼ばれる最新の光学理論は光デバイスや加工、情報通信技術などの様々な分野への応用が可能である
- その中でも特に、光起電力デバイス加工の現象について確率モデルの有効性が先行研究で述べられている
- 先行モデルを改良し、表面状態がランダムなものから自律的な堆積に転移する結果を得た。また、 $(b_c, E_{th})$ -相関から  $b_c = c(L) E_{th}$  という比例関係を示した
- 光起電力デバイスと共に、シリコンのLED化についても研究を進める予定である。