

自己組織化臨界現象と 可換砂山模型

香取眞理

(中央大学工学部物理学科)

Katori, Makoto (Chuo University)

[スライド part 5/5]

青山学院大学 物理・数理学科 コロキウム

2015年度 第7回

2015年10月22日

青山学院大学 工学部 L棟6階 L603室

目次:

1. 砂山模型と自己組織化臨界現象
2. 可換砂山模型(ASM)の定義と基本的な性質
3. 可換砂山模型(ASM)と離散ポアソン方程式
4. 再帰的配置と全域木(spanning tree)との
1対1対応
5. 砂山(ASP)-全域木(spanning tree)の
局所-大域双対性
6. 可換砂山模型(ASM)研究が教えること

5. 砂山(ASP)-全域木(spanning tree) の局所-大域双対性

- 次のような対応があることを説明した：

ASM の \mathcal{R} の要素である再帰的配置 \iff 全域木

ASM の定常状態 \iff 全域木の一様分布

- しかしながら …

ASM の定常状態での
局所的な物理量の
計算

\iff

大域的な制限を満たす
大域木の
数え上げ

局所的

\iff

大域的

例 1

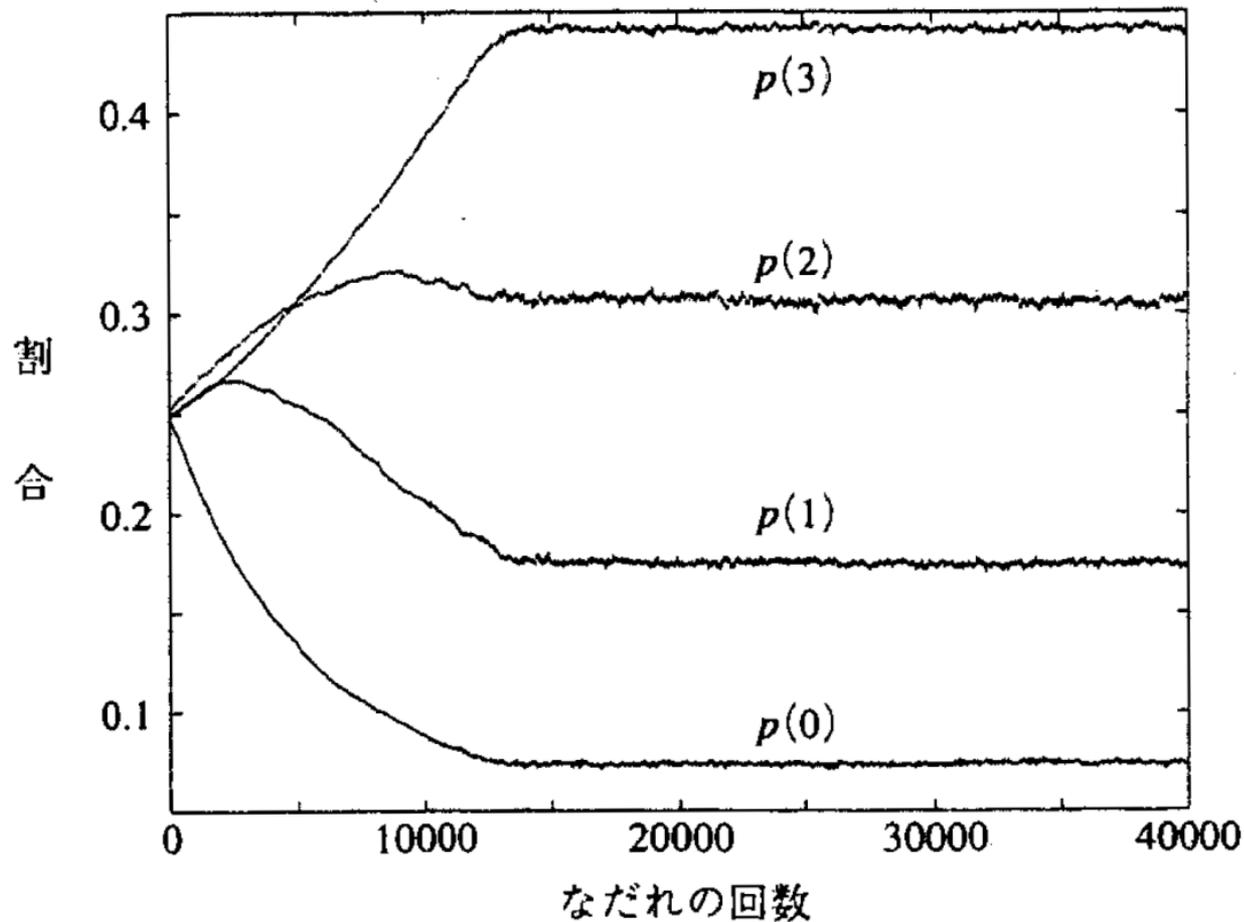
- (定常状態での) 1 格子点上の砂山高さ分布関数

$$\begin{aligned} p_k(\mathbf{x}) &= \text{定常状態で格子点 } \mathbf{x} \text{ 上の砂山の高さが } k \text{ である割合} \\ &= \langle \delta_{h(\mathbf{x})k} \rangle, \quad k = 0, 1, 2, \dots, h_c - 1. \end{aligned}$$

- 2 次元 BTW 模型 ($h_c = 4$) を考える.
格子サイズ $L \rightarrow \infty$ をとると, p_k は \mathbf{x} に依存しなくなる.
- p_0 は大域木の局所的な数え上げで求められる :

$$p_0 = \frac{2(\pi - 2)}{\pi^3} \simeq 0.07363.$$

Majumdar, S. N., Dhar, D.: J. Phys. A: Math. Gen. **24**, L357-L362 (1991).



2次元正方格子上的 BTW 模型の各格子点上の安定な値は 0, 1, 2, 3 である.

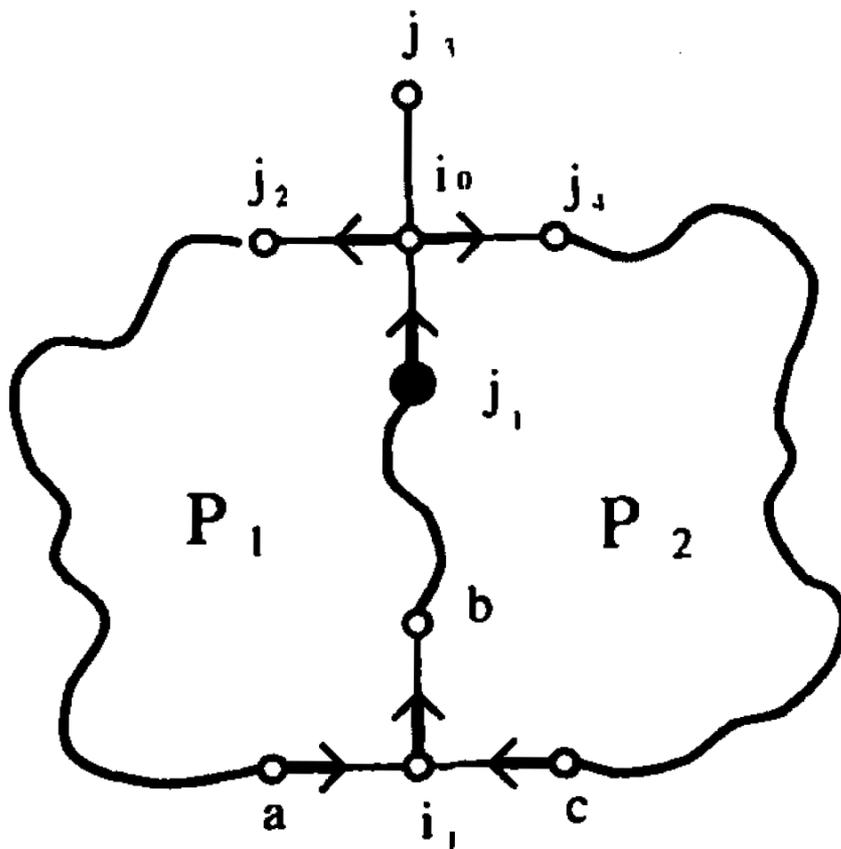
(4 になると不安定化して倒壊する.)

$p(k)$ は値が k の格子点数の全対数に対する割合 ($k = 0, 1, 2, 3$).

なだれを繰り返すうちに, 定常分布に近づいていく.

- しかし, $p_k, k = 1, 2, 3$ には, 大局的な制限を課した大域木の数え上げをする必要がある :
Prietzhev の Θ グラフ.

Prietzhev, V. B.: J. Stat. Phys. 74, 955-979 (1994)



This figure is a copy of Fig.7 in Prietzhev (1994) (J .Stat. Phys. 74, 955-979).

$$\begin{aligned}
p_1 &= \frac{1}{2} - \frac{3}{2\pi} - \frac{2}{\pi^2} + \frac{12}{\pi^3} + \frac{I_1}{4}, \\
p_2 &= \frac{1}{4} + \frac{3}{4\pi} + \frac{1}{\pi^2} - \frac{12}{\pi^3} - \frac{I_1}{2} - \frac{3I_2}{32}, \\
p_3 &= \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{\pi^3} + \frac{I_1}{4} + \frac{3I_2}{32}.
\end{aligned}$$

ここで、 $I_\nu, \nu = 1, 2$ は次で与えられる定積分,

$$I_\nu = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_0^{2\pi} d\alpha_1 \int_0^{2\pi} d\alpha_2 \int_0^{2\pi} d\beta_1 \int_0^{2\pi} d\beta_2 \frac{i \sin \beta_1 \det(M_\nu)}{D(\alpha_1, \beta_1) D(\alpha_2, \beta_2) D(\alpha_1 + \alpha_2, \beta_1 + \beta_2)},$$

ただし,

$$D(\alpha, \beta) = 2 - \cos \alpha - \cos \beta,$$

であり, また, M_1, M_2 は次の行列である:

$$\begin{aligned}
M_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & e^{i\alpha_2} & 1 \\ 3 & e^{i(\beta_1+\beta_2)} & e^{i(\alpha_2-\beta_2)} & e^{-i\beta_1} \\ 4/\pi - 1 & e^{i(\alpha_1+\alpha_2)} & 1 & e^{-i\alpha_1} \\ 4/\pi - 1 & e^{-i(\alpha_1+\alpha_2)} & e^{2i\alpha_2} & e^{i\alpha_1} \end{pmatrix}, \\
M_2 &= \begin{pmatrix} e^{i\beta_2} & e^{-i(\alpha_1+\alpha_2)-i(\beta_1+\beta_2)} & e^{i\beta_1} \\ e^{-i\alpha_2} & 1 & e^{-i\alpha_1} \\ e^{i\alpha_2} & e^{-2i(\alpha_1+\alpha_2)} & e^{i\alpha_1} \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

例 2

- (定常状態での) 2 点の砂山高さ相関関数

予稿にはすこし詳しく書いたもので、本講演では述べないことにする。

計算は恐ろしく面倒

2 次元 BTW モデルの結果は、対数共形場理論 ($c = -2$) の予想と一致

その後、前述の Priezzhev の砂山高さ分布の多重積分は、以下の値を与えることが示された (完全な証明にはなっていないようだが) :

Jeng, M., Piroux, G., Ruelle, P.: J. Stat. Mech. P10015 (2006).

$$p_0 = \frac{2}{\pi^2} - \frac{4}{\pi^3} = 0.07363\dots,$$

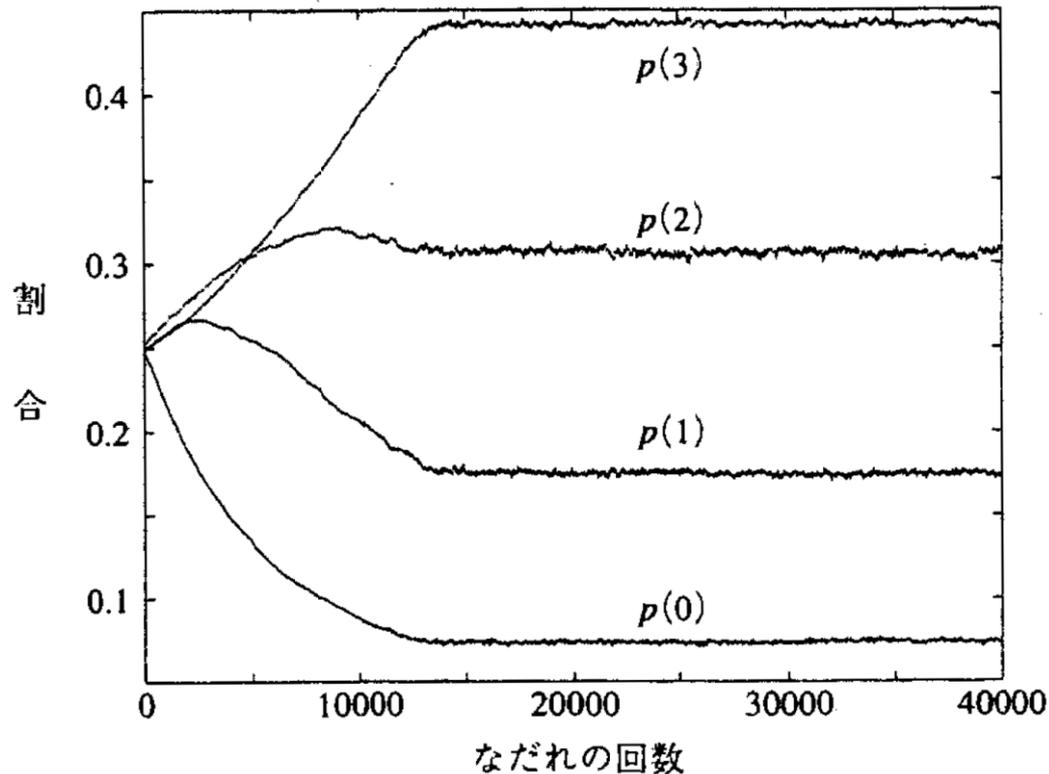
$$p_1 = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\pi} - \frac{3}{\pi^2} + \frac{12}{\pi^3} = 0.17389\dots,$$

$$p_2 = \frac{3}{8} + \frac{1}{\pi} - \frac{12}{\pi^3} = 0.30629\dots,$$

$$p_3 = 1 - (p_0 + p_1 + p_2) = \frac{3}{8} - \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{\pi^3} = 0.44617\dots.$$

これらの値より、平均の高さは次で与えられる :

$$\langle h \rangle = 0 \times p_0 + 1 \times p_1 + 2 \times p_2 + 3 \times p_3 = \frac{17}{8} = 2.125.$$



$$p_0 = \frac{2}{\pi^2} - \frac{4}{\pi^3} = 0.07363\dots,$$

$$p_1 = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\pi} - \frac{3}{\pi^2} + \frac{12}{\pi^3} = 0.17389\dots,$$

$$p_2 = \frac{3}{8} + \frac{1}{\pi} - \frac{12}{\pi^3} = 0.30629\dots,$$

$$p_3 = 1 - (p_0 + p_1 + p_2) = \frac{3}{8} - \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{\pi^3} = 0.44617\dots.$$

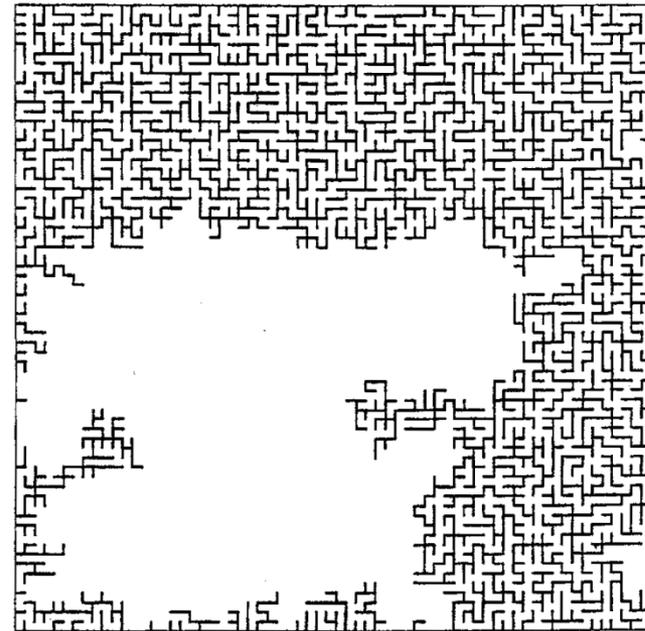
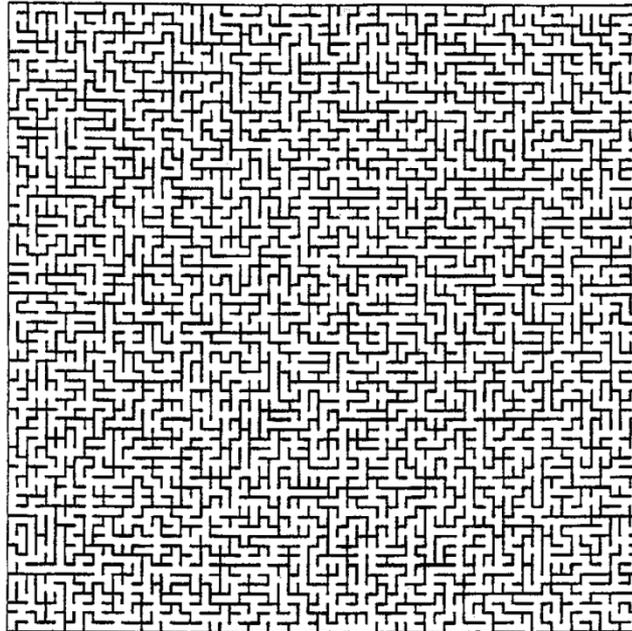
- この対応を用いて、ダイナミクス（プロセス）を次のものに置き換えて解析している：
 - ⇒ 全域木の静的な数え上げ問題（Priezzhev）
 - ⇒ $c = -2$ 共形場理論（対数共形場理論）（P. Ruelle など）
 - ⇒ Temperley 対応により dimer 数え上げ問題に翻訳
 - ⇒ さらに、Lieb 対応で量子スピン系に変換して転送行列を用いる
(Brankov, Poghosyan など)

6. 可換砂山模型 (ASP) 研究が 教えること

再帰的配置 $h \in \mathcal{R}$ の特徴

- 高すぎない ... 高すぎると不安定化 $h \rightarrow \eta \notin \mathcal{R}$
 - 低すぎない ... 安定ではあるが過渡的配置になってしまう.
過渡的配置は「さらなる堆積を待っている状態」
 - $h \in \mathcal{R}$ は、安定配置だが局所的な摂動で不安定化し、
なだれを引き起こす「一触即発の状態」.
あるいは、「要注意配置」と呼べるかもしれない.
- この「要注意配置」を、摂動を加えて実際になだれを起こすことなく、
(未然に) 見分けることができるか？

- この「要注意配置」を，摂動を加えて実際になだれを起こすことなく，（未然に）見分けることができるか？



These figures were given by S. S. Manna.

- 「砂山-全域木対応」は、『対応する tree 構造（ある種のネットワーク構造）が全域を覆っているか』で判定できることを意味している。

可換砂山模型

再帰的配置の統計力学

全域木表示（幾何学的構造）

現実のなだれ現象

「要注意配置」のアンサンブル？

ストレスのネットワーク構造？