

数理物理の新展開 —ランダム行列とSLE

Part II.A: 臨界現象・フラクタル曲線と Schramm-Loewner Evolution (SLE)

中央大学理工学部 香取眞理(かとりまこと)

第54回 物性若手夏の学校 サブゼミ

2009年8月22, 23日 長野県シャレードイン志賀

0. 概要

1. 統計力学模型と連続関数空間上の測度

1.1 平面上の統計力学模型の連続極限

ループ除去ランダムウォーク

(loop-erased RW : LERW)

自己回避ウォーク

(self-avoiding walk : SAW)

臨界浸透模型

(critical percolation model)

臨界 Ising 模型

(critical Ising model)

1.2 共形不変性と領域 Markov 性

共形共変性と共形不変性(conformal cov./inv.)

領域 Markov 性(domain Markov property)

1.3 制限性と局所性

制限性(restriction property)

局所性(locality property)

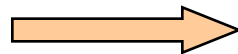
0. 概要

1. 統計力学模型と連続関数空間上の測度

1.1 平面上の統計力学模型の連続極限

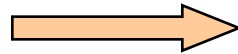
[格子上の離散模型] $\xrightarrow{\text{連続極限}}$ [連続関数(曲線)空間上の測度]

ループ除去ランダムウォーク
(loop-erased RW : LERW)



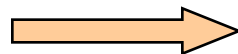
μ^{LERW}

自己回避ウォーク
(self-avoiding walk : SAW)



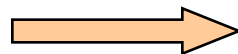
μ^{SAW}

臨界浸透模型
(critical percolation model)



μ^{per}

臨界 Ising 模型
(critical Ising model)



μ^{Ising}

1.2 共形不変性と領域 Markov 性

共形共変性と共形不変性(conformal cov./inv.)

領域 Markov 性(domain Markov property)

} 上の4つに共通

1.3 制限性と局所性

制限性(restriction property)

μ^{LERW} : NG, μ^{SAW} : **OK**

局所性(locality property)

μ^{Ising} : NG, μ^{per} : **OK**

2. Schramm-Loewner Evolution (SLE)

2.1 Riemann の写像定理

2.2 Loewner 方程式

2.3 SLE_{κ}

共形不変性 + 領域 Markov 性

2.4 局所性と制限性

局所性

制限性

3. 対応関係

2. Schramm-Loewner Evolution (SLE)

5

2.1 Riemann の写像定理

2.2 Loewner 方程式

2.3 SLE κ

共形不変性 + 領域 Markov 性 $\iff \mu^\kappa, \kappa \in (0, \infty)$

2.4 局所性と制限性

局所性 $\iff \mu^6$ (SLE $_6$) $\iff \mu^{\text{per}}$

制限性 $\iff \mu^{8/3}$ (SLE $_{8/3}$) $\iff \mu^{\text{SAW}}$

3. 対応関係

2. Schramm-Loewner Evolution (SLE)

2.1 Riemann の写像定理

2.2 Loewner 方程式

2.3 SLE_{κ}

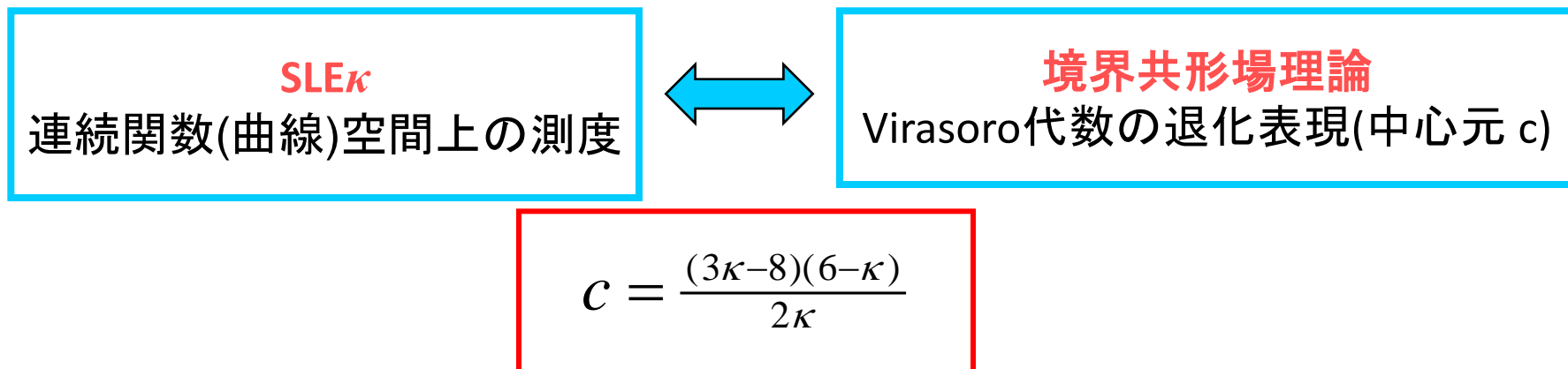
共形不変性 + 領域 Markov 性 $\iff \mu^{\kappa}, \kappa \in (0, \infty)$

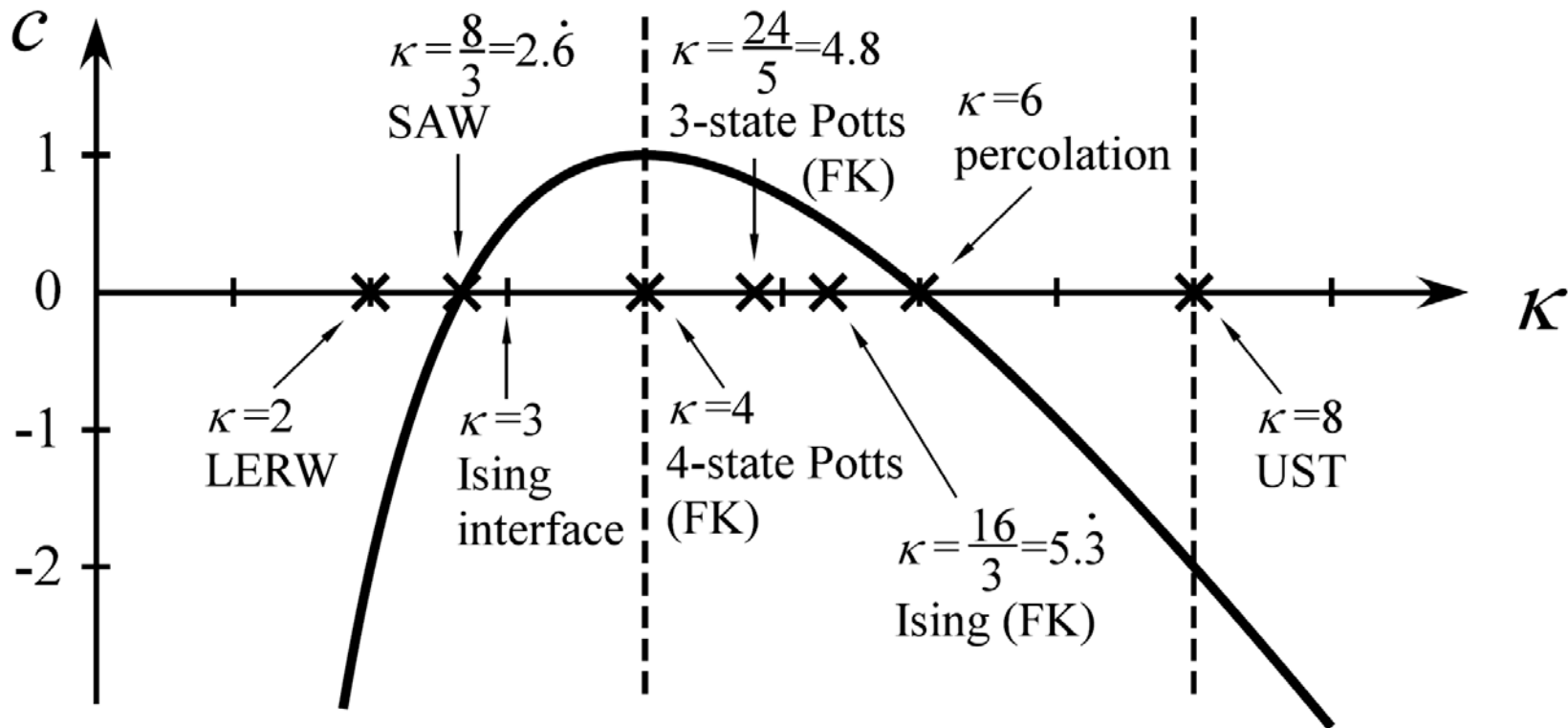
2.4 局所性と制限性

局所性 $\iff \mu^6$ (SLE_6) $\iff \mu^{\text{per}}$

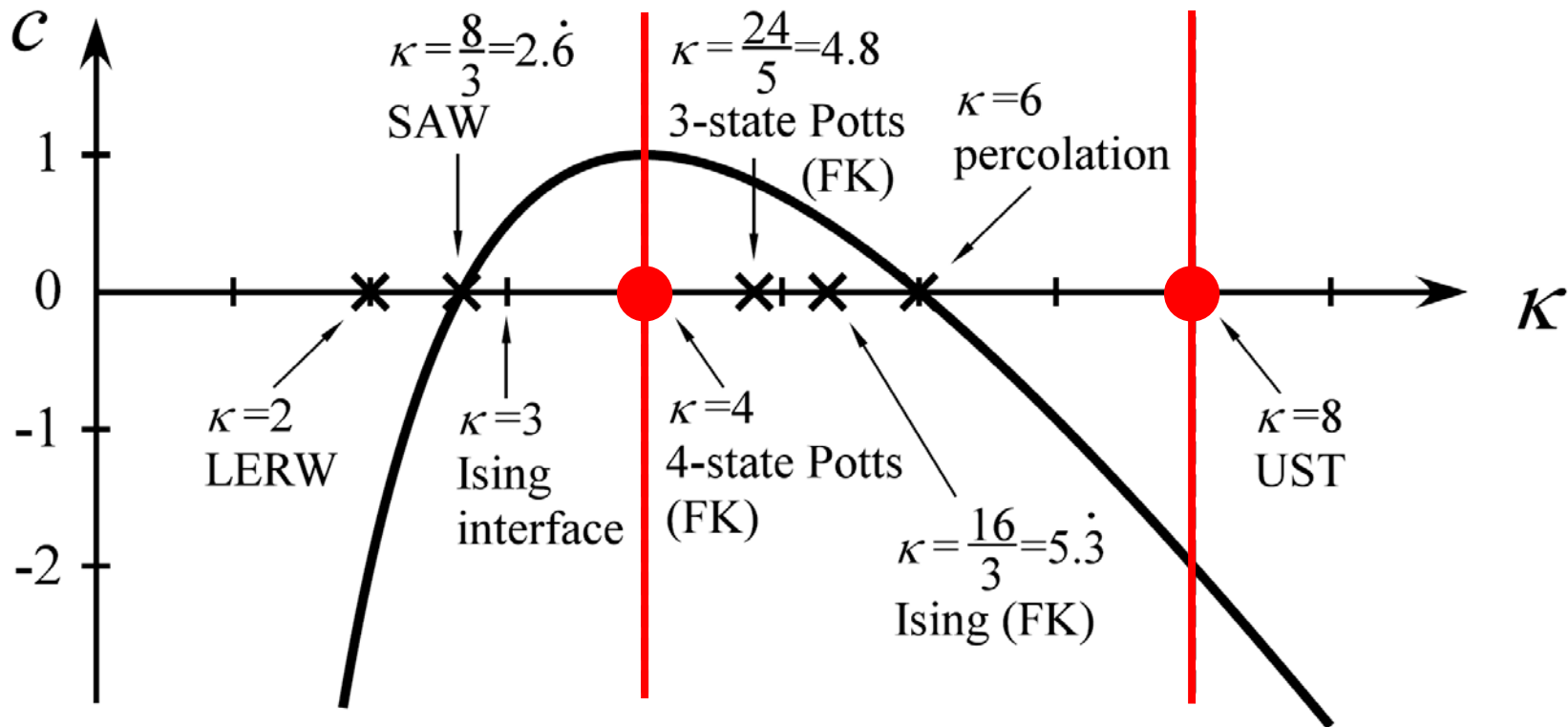
制限性 $\iff \mu^{8/3}$ ($SLE_{8/3}$) $\iff \mu^{\text{SAW}}$

3. 対応関係

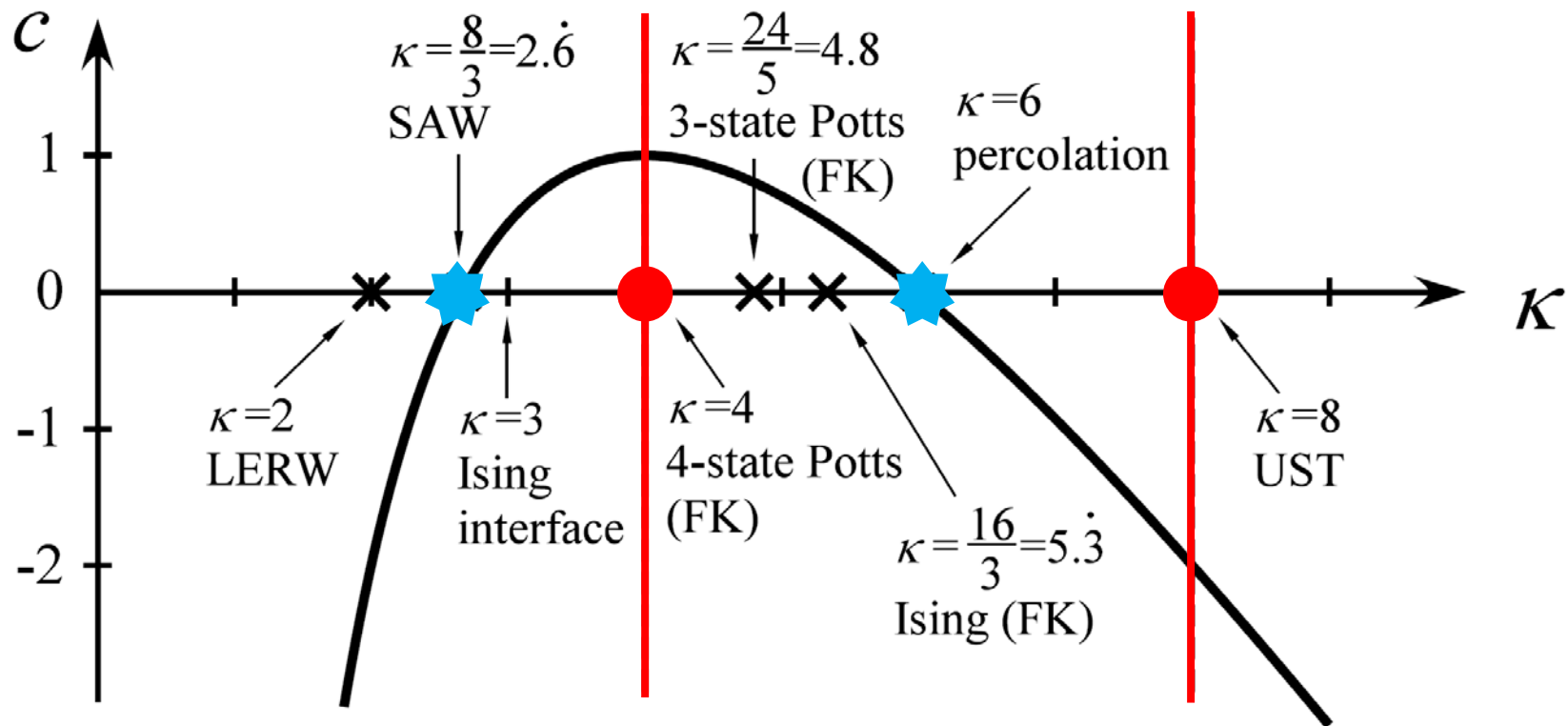




- SLE 曲線の径数 κ と中心電荷 c との対応.
- 平面上のフラクタル曲線の連続極限が特定の κ の値の SLE 曲線で実現される.
- (FK) は Fortuin-Kasteleyn random cluster model としての界面曲線.
- UST は uniform spanning tree.



- SLE 曲線の径数 κ と中心電荷 c との対応.
- 平面上のフラクタル曲線の連続極限が特定の κ の値の SLE 曲線で実現される.
- (FK) は Fortuin-Kasteleyn random cluster model としての界面曲線.
- UST は uniform spanning tree.



- SLE 曲線の径数 κ と中心電荷 c との対応.
- 平面上のフラクタル曲線の連続極限が特定の κ の値の SLE 曲線で実現される.
- (FK) は Fortuin-Kasteleyn random cluster model としての界面曲線.
- UST は uniform spanning tree.

2. Schramm-Loewner Evolution (SLE)

10

2.1 Riemann の写像定理

2.2 Loewner 方程式

2.3 SLE κ

共形不変性 + 領域 Markov 性 $\iff \mu^\kappa, \kappa \in (0, \infty)$

2.4 局所性と制限性

局所性 $\iff \mu^6$ (SLE $_6$) $\iff \mu^{\text{per}}$

制限性 $\iff \mu^{8/3}$ (SLE $_{8/3}$) $\iff \mu^{\text{SAW}}$

3. 対応関係

$$c = \frac{(3\kappa - 8)(6 - \kappa)}{2\kappa}$$

SLE κ

連続関数(曲線)空間上の測度



境界共形場理論

Virasoro代数の退化表現(中心元 c)



• 平面上のフラクタル曲線の統計物理 (SLE $_\kappa : 0 < \kappa \leq 4$)

LERW, SAW

• 平面上の平衡統計力学模型

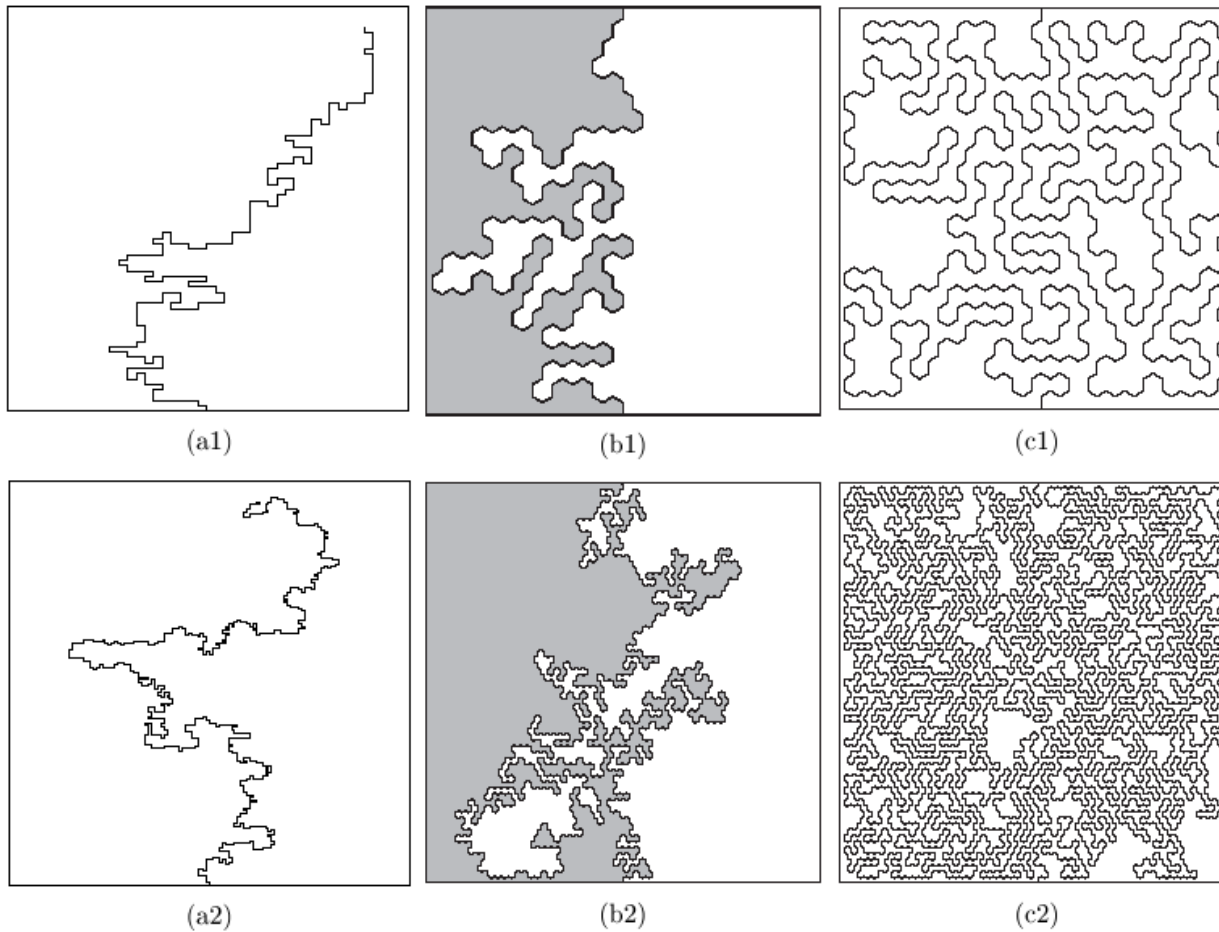
浸透模型(percolation), 磁性体の模型(Ising model)

(SLE $_\kappa : 4 < \kappa < 8$)

• ランダムなペアノ曲線と非平衡統計模型(自己組織化臨界現象)

雪崩模型(Abelian sandpile model), 森林火災模型

(SLE $_\kappa : \kappa = 8$)



計算機シミュレーションで描いた2次元格子上的フラクタル曲線

(a1), (a2) 自己回避ウォーク(SAW)

(b1), (b2) 臨界点におけるサイト・パーコレーション模型の浸透領域の界面

(c1), (c2) Harmonic Anti-Navigator という界面成長模型の時間発展

The 2006 Fields Medals

12



Wendelin Werner



Laboratoire de
Mathématiques
Université Paris-Sud

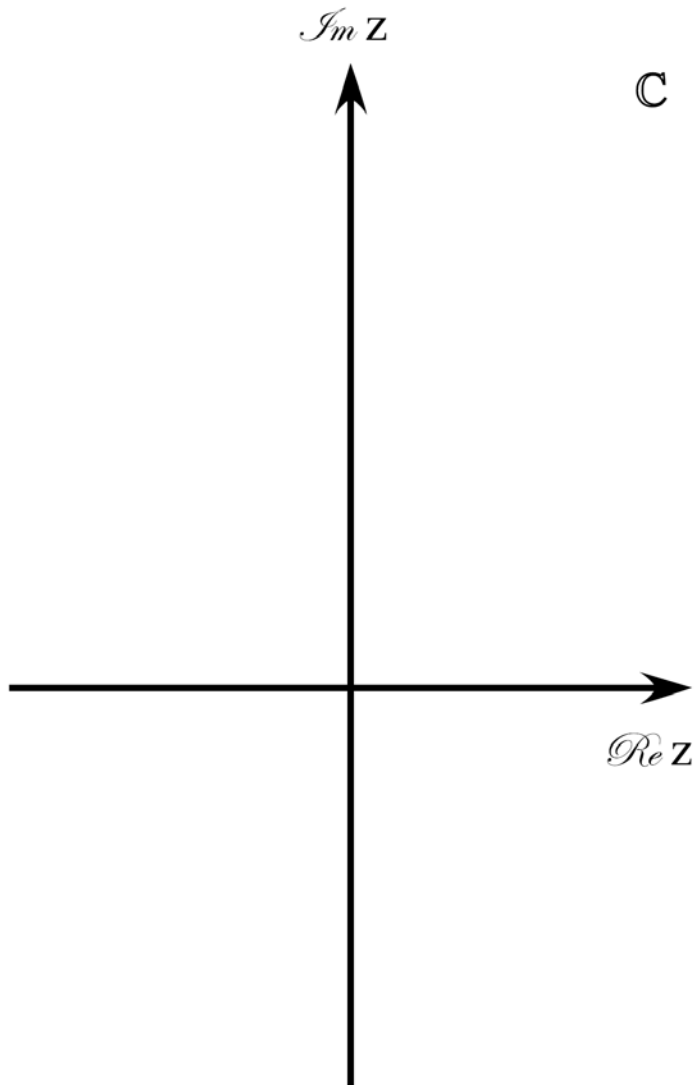


for his contributions to the development of stochastic Loewner evolution, the geometry of two-dimensional Brownian motion, and conformal field theory

- O. Schramm, Scaling limits of loop-erased random walks and uniform spanning trees, *Israel J. Math.* **118** (2000) 221-228.
- G. F. Lawler, *Conformally Invariant Processes in the Plane*, American Math. Soc., 2005.
- R. Friedrich and W. Werner, Conformal restriction, highest-weight representations and SLE, *Commun. Math. Phys.* **243** (2003) 105-122.
- S. Smirnov, Critical percolation in the plane: conformal invariance, Cardy's formula, scaling limits, *C.R.Acad.Sci.Paris, Ser.I Math.* **333** (2001) 239-244.
- S. Smirnov, Conformal invariance in random cluster models, I. Holomorphic fermions in the Ising model, arXiv:0708.0039.
- V. Beffara, The dimension of the SLE curves, *Ann. Probab.* **36** (2008) 1421-1452.
- 香取真理, 「臨界現象・フラクタル研究の新世紀 —SLE の発見—」, *日本物理学会誌*, **62** (no.7) (2007) 527-531.

1. 統計力学模型と連続関数空間上の測度

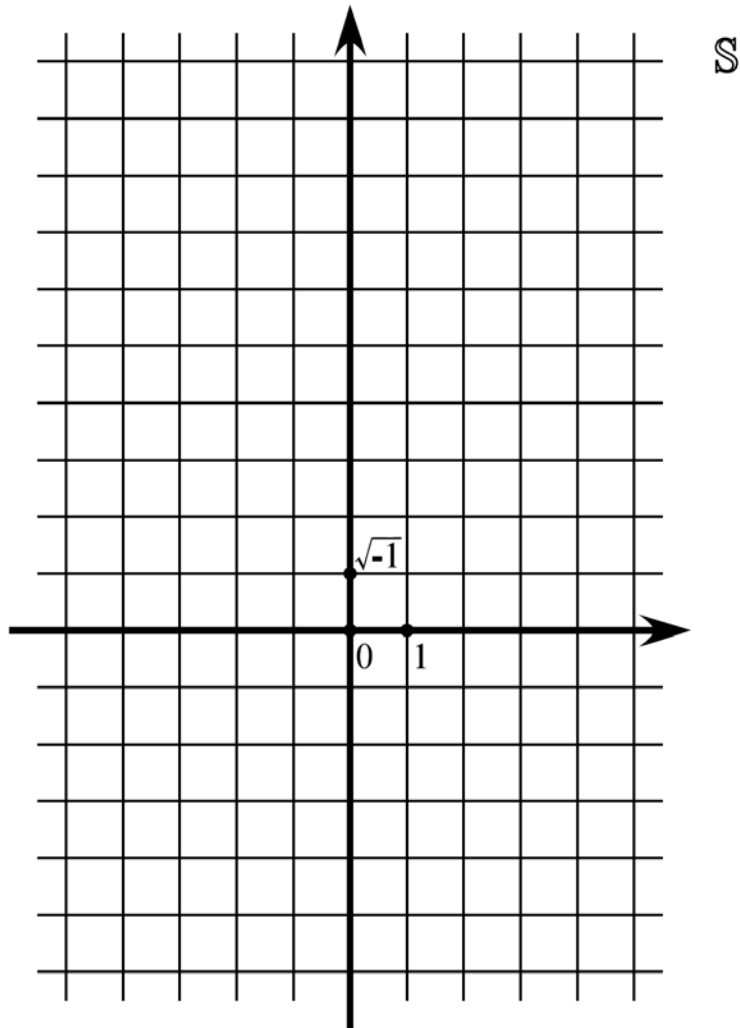
1.1 平面上の統計力学模型の連続極限



複素平面 $\mathbb{C} = \{z = x + \sqrt{-1}y : x, y \in \mathbb{R}\}$

1. 統計力学模型と連続関数空間上の測度

1.1 平面上の統計力学模型の連続極限

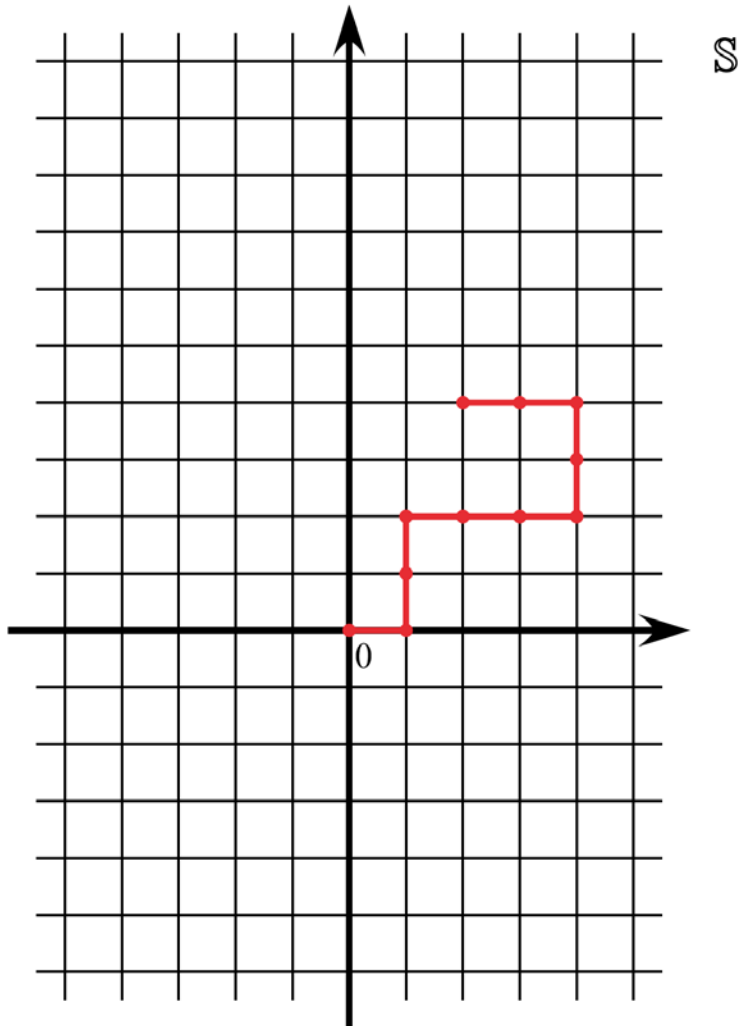


複素平面 $\mathbb{C} = \{z = x + \sqrt{-1}y : x, y \in \mathbb{R}\}$

\mathbb{C} 上の正方格子 $\mathbf{S} = \{z = j + \sqrt{-1}k : j, k \in \mathbb{Z}\}$

1. 統計力学模型と連続関数空間上の測度

1.1 平面上の統計力学模型の連続極限



\mathbf{S}

複素平面 $\mathbb{C} = \{z = x + \sqrt{-1}y : x, y \in \mathbb{R}\}$

\mathbb{C} 上の正方格子 $\mathbf{S} = \{z = j + \sqrt{-1}k : j, k \in \mathbb{Z}\}$

\mathbf{S} 上の最近接ウォークの道 $\omega = (\omega(0), \omega(1), \dots, \omega(n))$

出発点 $\omega(0) = z \in \mathbf{S}$

$\omega(i) \in \mathbf{S}, \quad 1 \leq i \leq n$

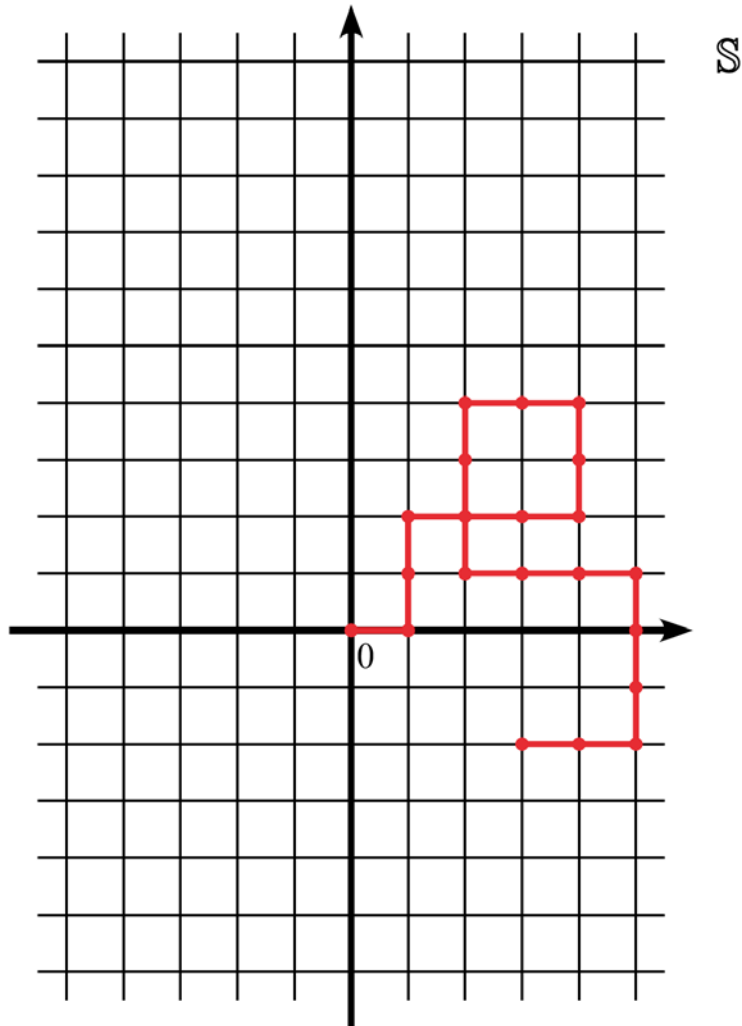
$|\omega(i) - \omega(i-1)| = 1, \quad 1 \leq i \leq n$

$n =$ 道の長さ

左図は出発点を $z = 0$ (原点) とした場合.

1. 統計力学模型と連続関数空間上の測度

1.1 平面上の統計力学模型の連続極限



\mathbb{S}

複素平面 $\mathbb{C} = \{z = x + \sqrt{-1}y : x, y \in \mathbb{R}\}$

\mathbb{C} 上の正方格子 $\mathbf{S} = \{z = j + \sqrt{-1}k : j, k \in \mathbb{Z}\}$

\mathbf{S} 上の最近接ウォークの道 $\omega = (\omega(0), \omega(1), \dots, \omega(n))$

出発点 $\omega(0) = z \in \mathbf{S}$

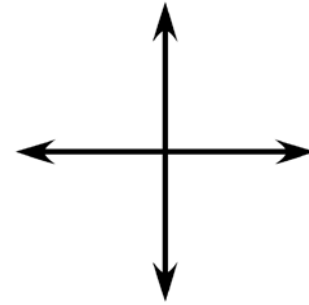
$\omega(i) \in \mathbf{S}, \quad 1 \leq i \leq n$

$|\omega(i) - \omega(i-1)| = 1, \quad 1 \leq i \leq n$

$n =$ 道の長さ

左図は出発点を $z = 0$ (原点) とした場合.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{S} \quad & \left. \begin{array}{l} \text{出発点が } z \in \mathbf{S} \\ \text{長さが } n \end{array} \right\} \text{の道全体の集合} \\
 & \equiv W_n^z \\
 & = \left\{ \omega = (\omega(0), \dots, \omega(n)) : \omega(0) = z, \right. \\
 & \quad \left. \omega(i) \in \mathbf{S}, |\omega(i) - \omega(i-1)| = 1, 1 \leq i \leq n \right\}.
 \end{aligned}$$

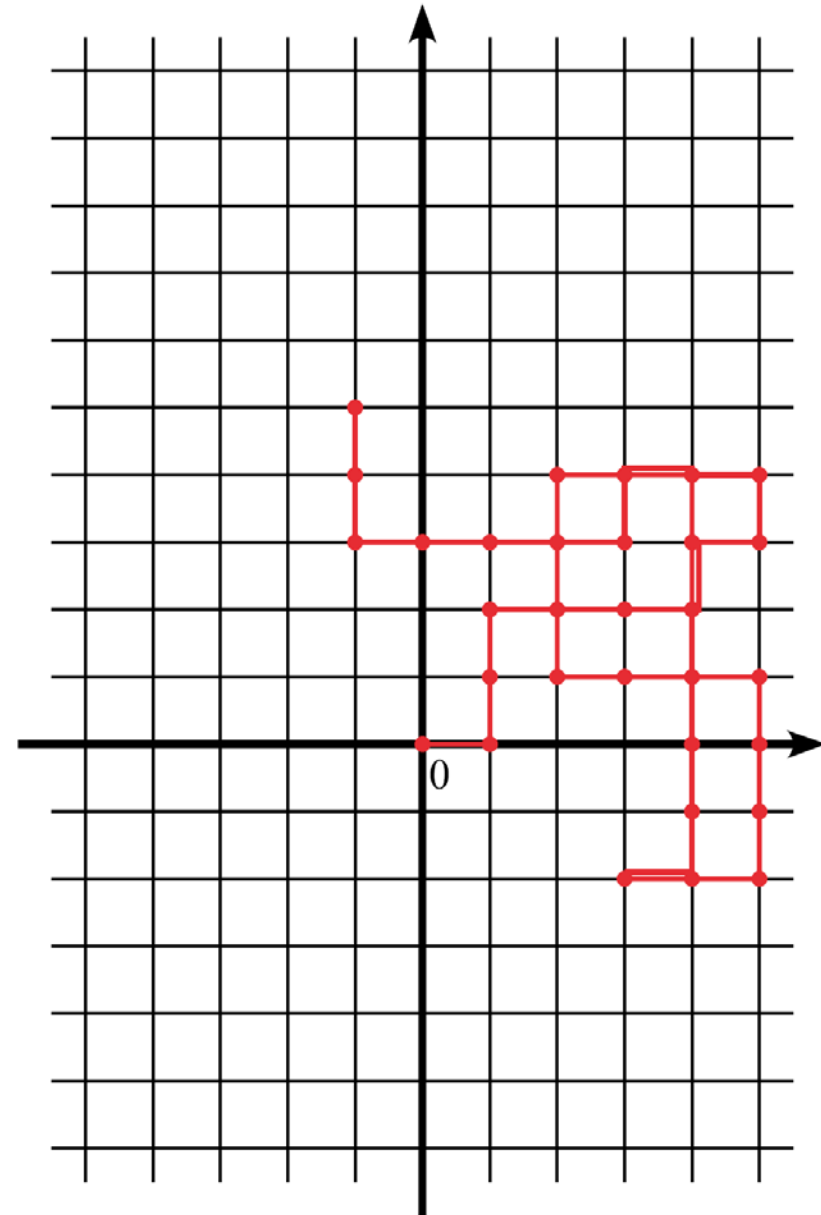


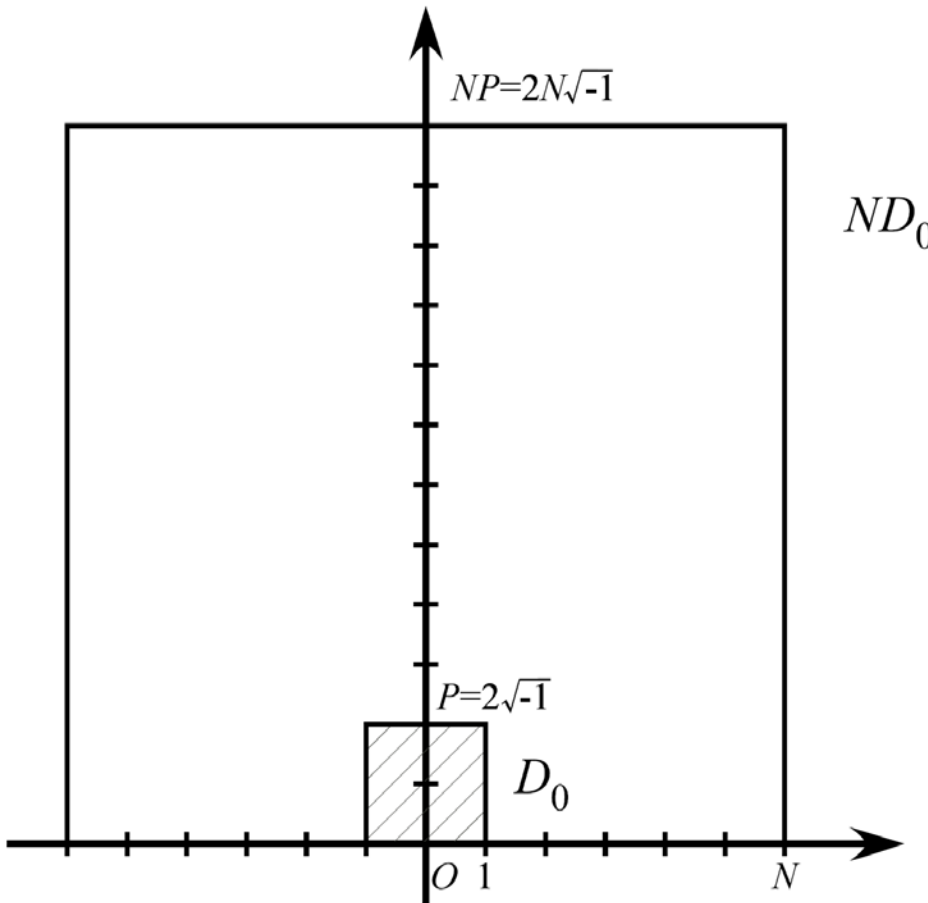
各ステップは上下左右の4通りあるので、 $|W_n^z| = 4^n$.

(出発点 z , 長さ n の) ランダムウォーク (random walk : RW)
 $\equiv W_n^z$ の元の一様分布 (道の統計集団)

定義より、各々の道 $\omega \in W_n^z$ の測度は

$$\frac{1}{|W_n^z|} = \frac{1}{4^n} = 4^{-|\omega|}. \quad \text{ただし, } |\omega| = \text{道 } \omega \text{ の長さ.}$$





- 正方形の開領域

$$D_0 = \{x + \sqrt{-1}y : -1 < x < 1, 0 < y < 2\}$$

$$O = 0 \text{ (原点)} \in \partial D_0$$

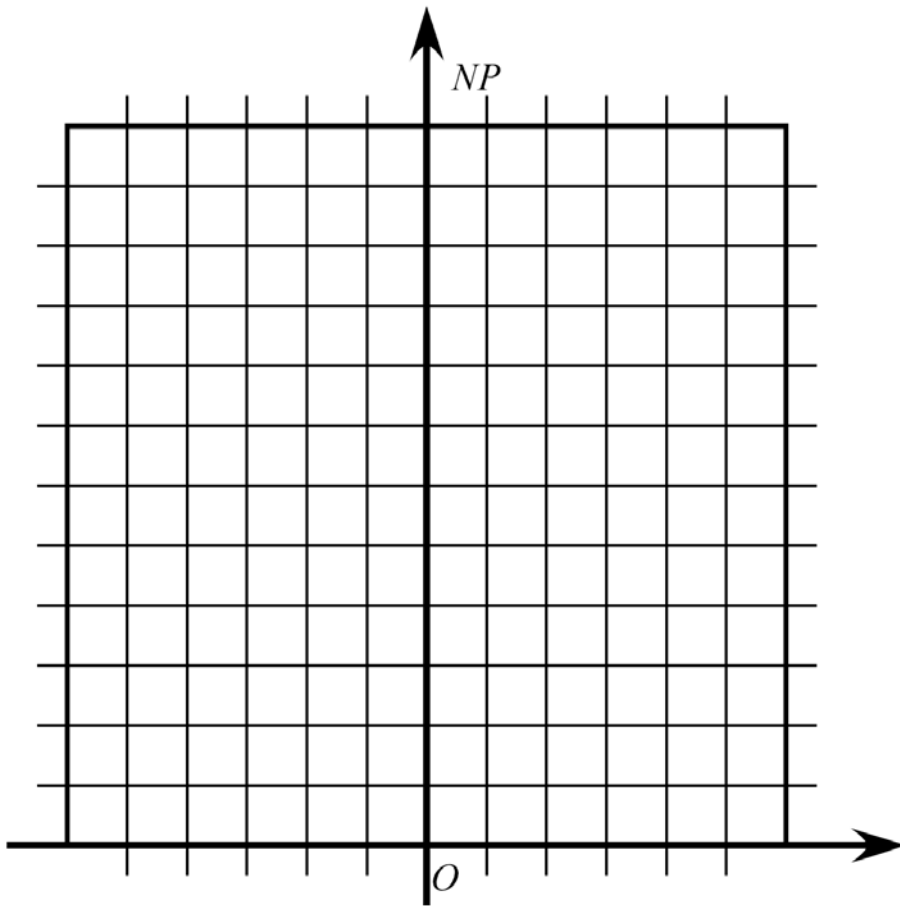
$$P = 2\sqrt{-1} \in \partial D_0$$

- $N \in \mathbb{N} \equiv \{1, 2, \dots\}$

$$N \text{ 倍する : } D_0 \longrightarrow ND_0$$

$$NO = 0$$

$$NP = 2N\sqrt{-1}$$



- 正方形の開領域

$$D_0 = \{x + \sqrt{-1}y : -1 < x < 1, 0 < y < 2\}$$

$$O = 0 \text{ (原点)} \in \partial D_0$$

$$P = 2\sqrt{-1} \in \partial D_0$$

- $N \in \mathbb{N} \equiv \{1, 2, \dots\}$

$$N \text{ 倍する : } D_0 \longrightarrow ND_0$$

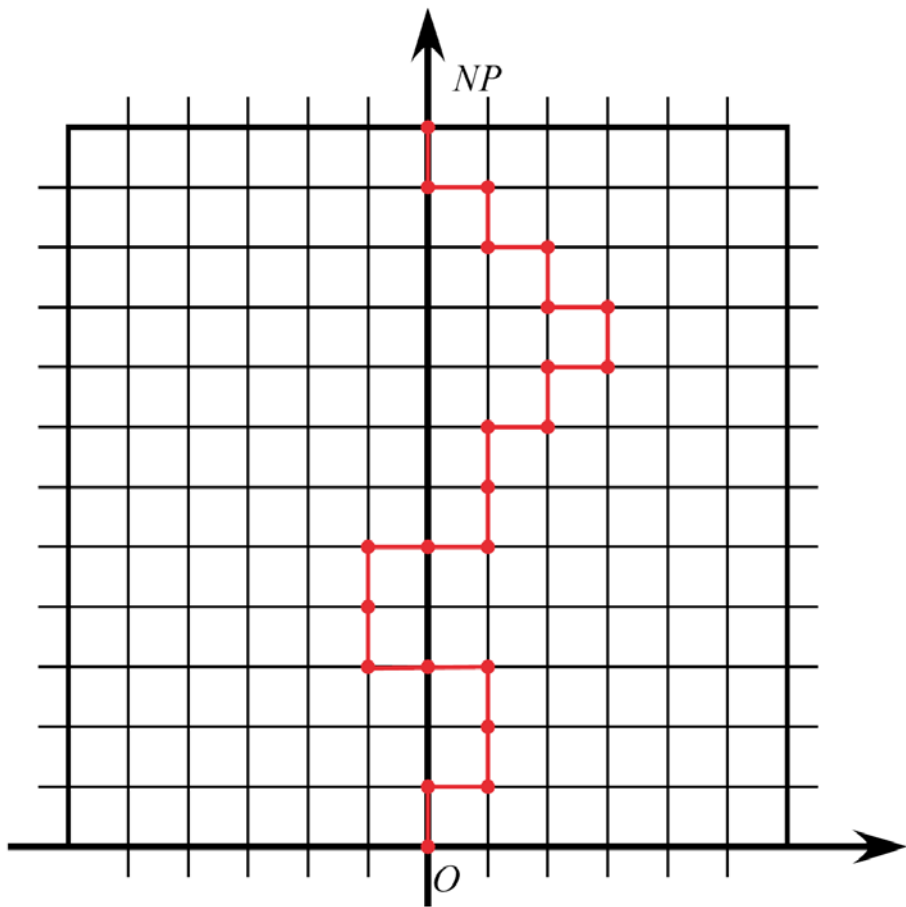
$$NO = 0$$

$$NP = 2N\sqrt{-1}$$

- $\Omega_N(D_0; O, P) \equiv \{\text{RW} : NO \rightsquigarrow NP, \text{道} \subset ND_0\}$

- 分配関数 (=条件付き RW の測度の総和)

$$Z_N(D_0; O, P) = \sum_{\omega \in \Omega_N(D_0; O, P)} 4^{-|\omega|}$$



- 正方形の開領域

$$D_0 = \{x + \sqrt{-1}y : -1 < x < 1, 0 < y < 2\}$$

$$O = 0 \text{ (原点)} \in \partial D_0$$

$$P = 2\sqrt{-1} \in \partial D_0$$

- $N \in \mathbb{N} \equiv \{1, 2, \dots\}$

$$N \text{ 倍する : } D_0 \longrightarrow ND_0$$

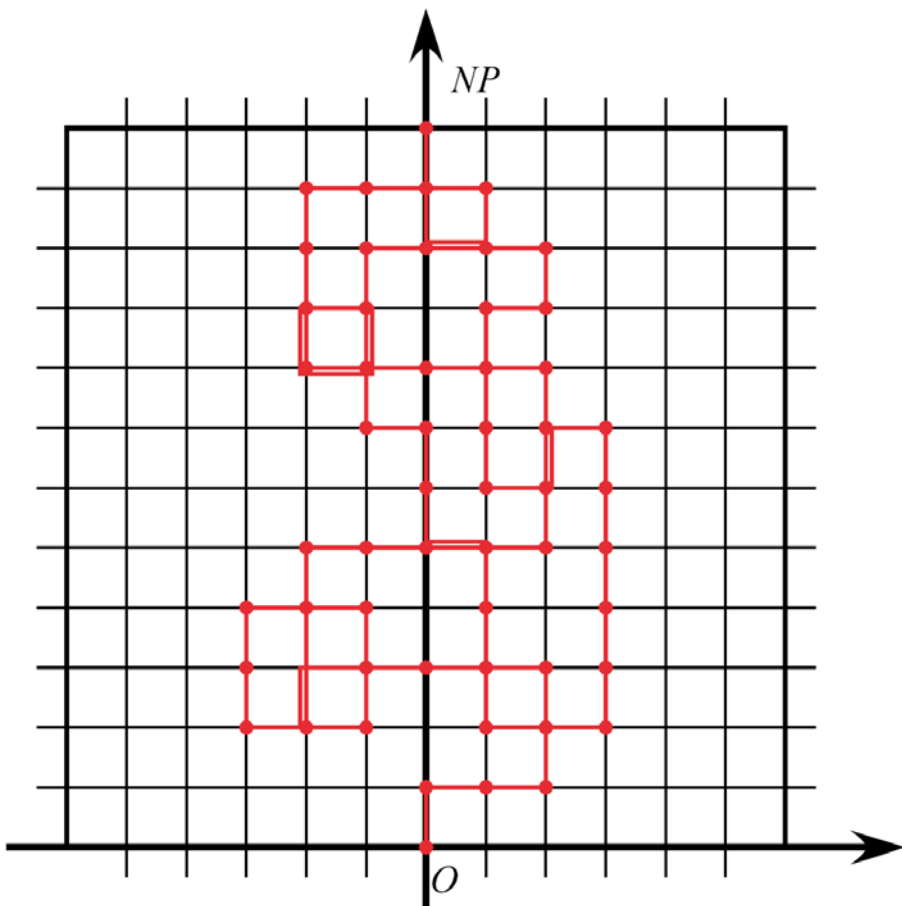
$$NO = 0$$

$$NP = 2N\sqrt{-1}$$

- $\Omega_N(D_0; O, P) \equiv \{\text{RW} : NO \rightsquigarrow NP, \text{道} \subset ND_0\}$

- 分配関数 (=条件付き RW の測度の総和)

$$Z_N(D_0; O, P) = \sum_{\omega \in \Omega_N(D_0; O, P)} 4^{-|\omega|}$$



- 正方形の開領域

$$D_0 = \{x + \sqrt{-1}y : -1 < x < 1, 0 < y < 2\}$$

$$O = 0 \text{ (原点)} \in \partial D_0$$

$$P = 2\sqrt{-1} \in \partial D_0$$

- $N \in \mathbb{N} \equiv \{1, 2, \dots\}$

$$N \text{ 倍する : } D_0 \longrightarrow ND_0$$

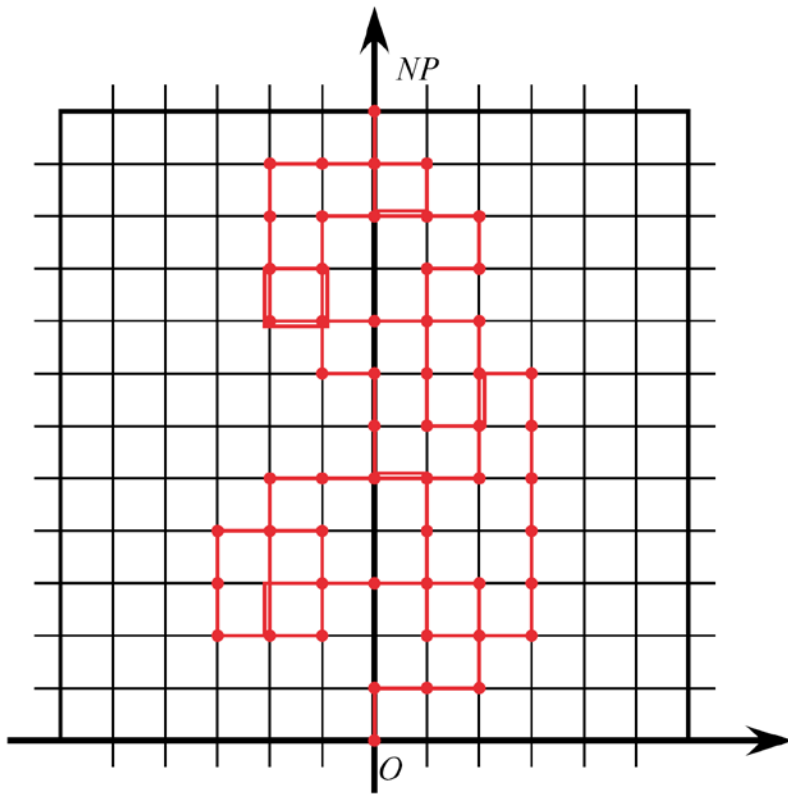
$$NO = 0$$

$$NP = 2N\sqrt{-1}$$

- $\Omega_N(D_0; O, P) \equiv \{\text{RW} : NO \rightsquigarrow NP, \text{道} \subset ND_0\}$

- 分配関数 (=条件付き RW の測度の総和)

$$Z_N(D_0; O, P) = \sum_{\omega \in \Omega_N(D_0; O, P)} 4^{-|\omega|}$$



ただし

$$f(N) \sim g(N), \quad N \rightarrow \infty$$

\Updownarrow

$$\frac{f(N)}{g(N)} \rightarrow 1, \quad N \rightarrow \infty$$

$$N \rightarrow \infty$$

$$Z_N(D_0; O, P) \sim C(D_0; O, P)N^{-2}$$

ここで

$$G_{D_0}(z, w) = \pi \int_0^\infty p_{D_0}(t, w, z) dt$$

= the Green's function for the complex BM
stopped at ∂D_0

= the Green's function for the Laplacian
with Dirichlet boundary condition on D_0

for $z, w \in D_0$,

$$H_{D_0}(z, w) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{1}{2\pi\varepsilon} G_{D_0}(z, w + \varepsilon \mathbf{n})$$

= Poisson kernel, for $z \in D_0, w \in \partial D_0$,

$$\widehat{H}_{D_0}(z, w) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{1}{\varepsilon} H_{D_0}(z + \varepsilon \mathbf{n}_z, w)$$

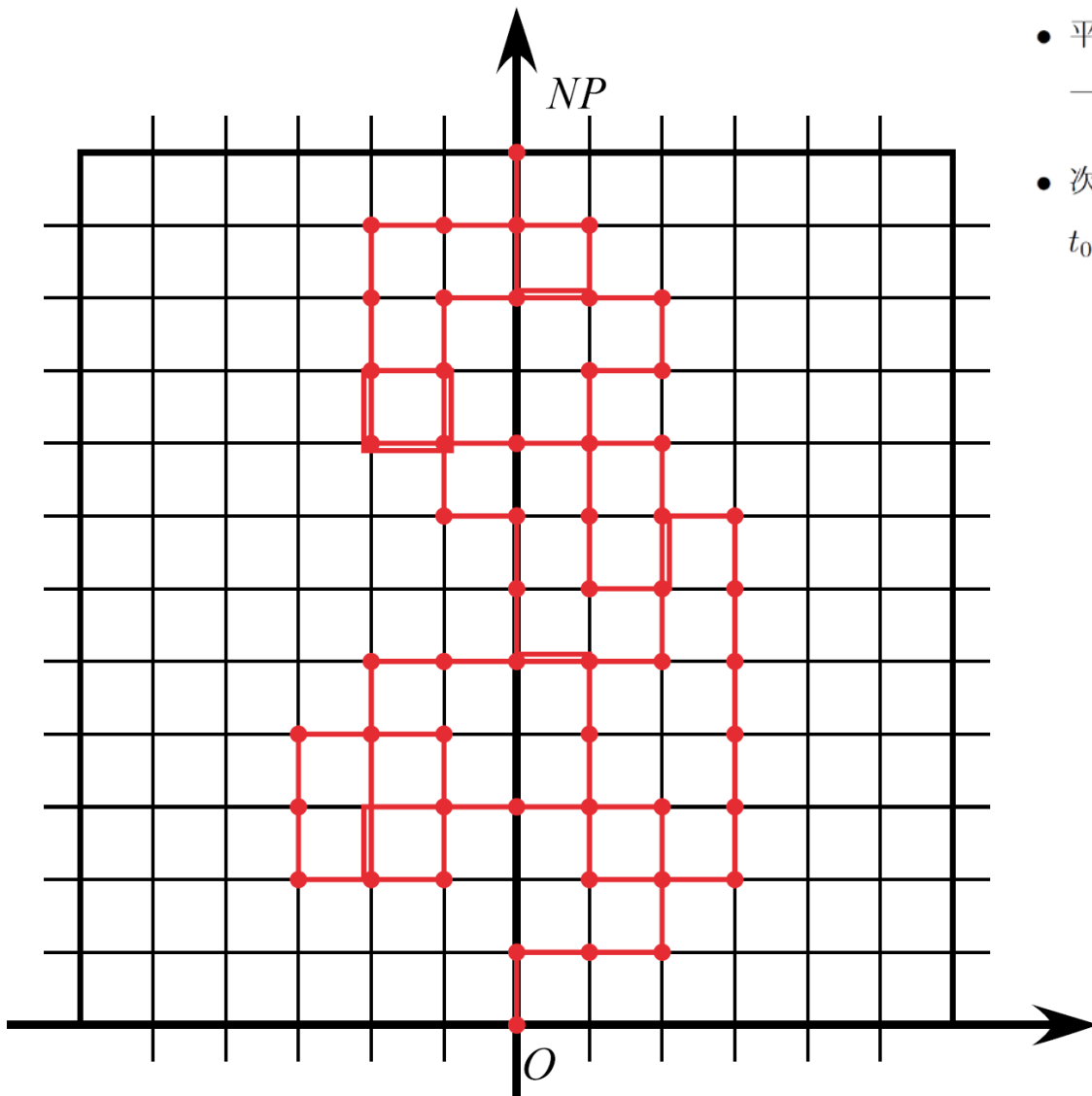
$$= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{1}{2\pi\varepsilon^2} G_{D_0}(z + \varepsilon \mathbf{n}_z, w + \varepsilon \mathbf{n}_w)$$

= boundary Poisson kernel, for $z, w \in \partial D_0$,

としたとき,

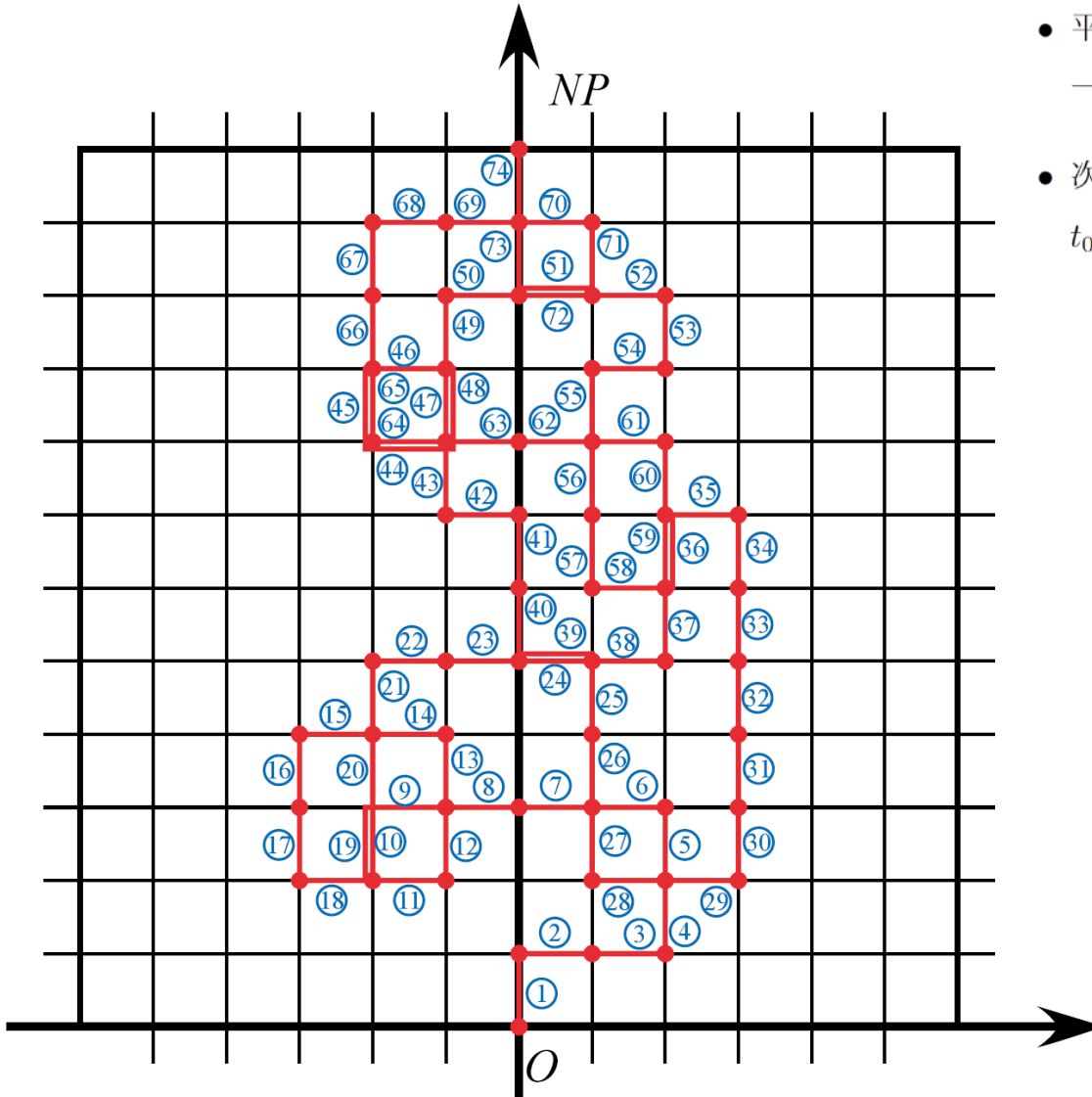
$$C(D_0; O, P) = \widehat{H}_{D_0}(O, P).$$

平面上のRW \Rightarrow 連続極限 \Rightarrow 複素ブラウン運動(complex BM)



- 平面上の RW の集合 $\Omega_N(D_0; O, P)$ の元 ω は一般にはループを持つ (自己交差する).
- 次の操作によってループを消去する: $\omega \rightarrow \hat{\omega}$
 $t_0 = 0, \hat{\omega}(0) = \hat{\omega}(t_0) = 0$ として, $m \geq 1$ に対して

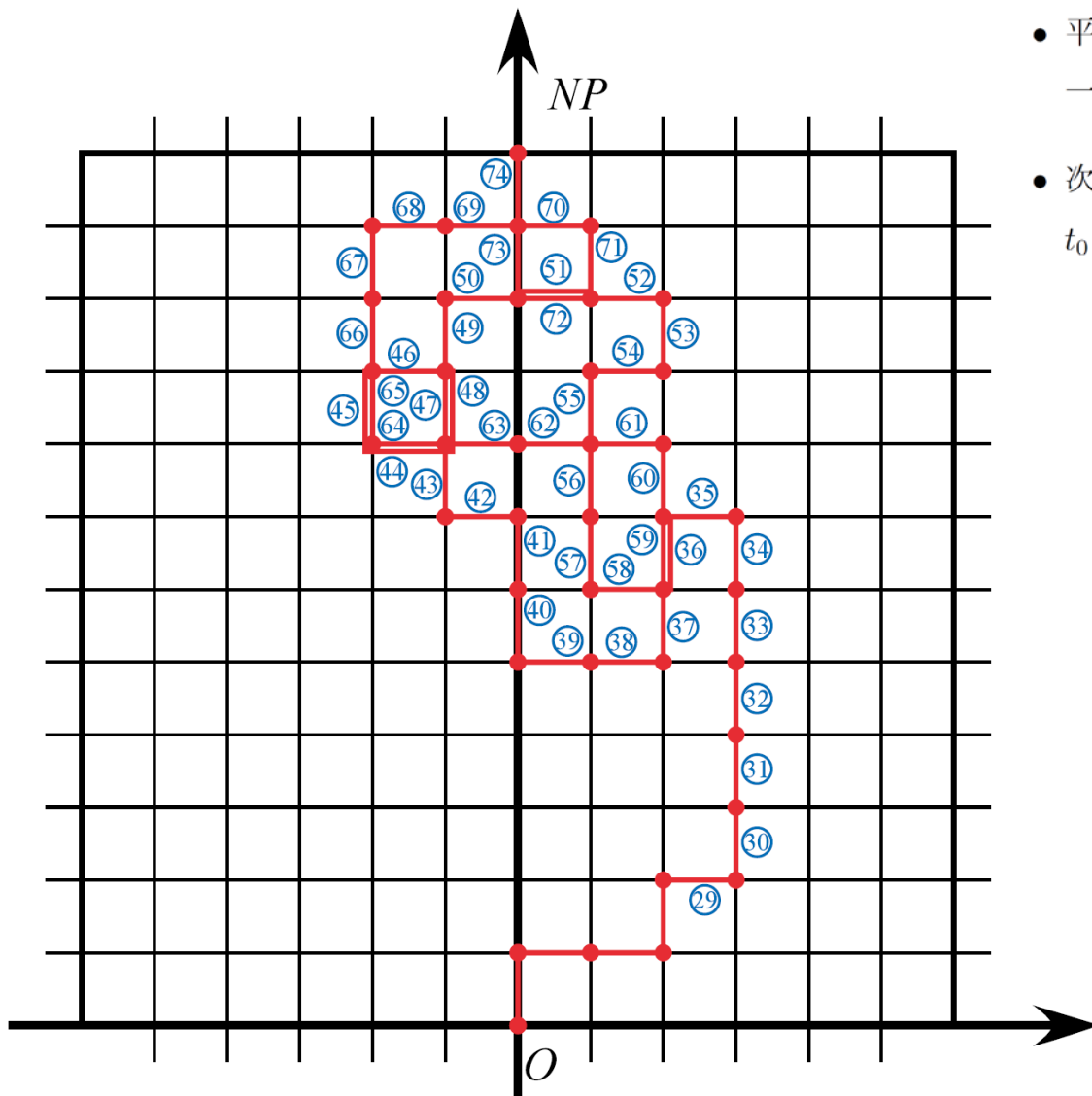
$$t_m = \max \{ \ell > t_{m-1} : \hat{\omega}(\ell) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1) \},$$
$$\hat{\omega}(m) = \hat{\omega}(t_m) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1).$$



- 平面上の RW の集合 $\Omega_N(D_0; O, P)$ の元 ω は一般にはループを持つ (自己交差する).
- 次の操作によってループを消去する: $\omega \rightarrow \hat{\omega}$
 $t_0 = 0, \hat{\omega}(0) = \hat{\omega}(t_0) = 0$ として, $m \geq 1$ に対して

$$t_m = \max \left\{ \ell > t_{m-1} : \hat{\omega}(\ell) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1) \right\},$$

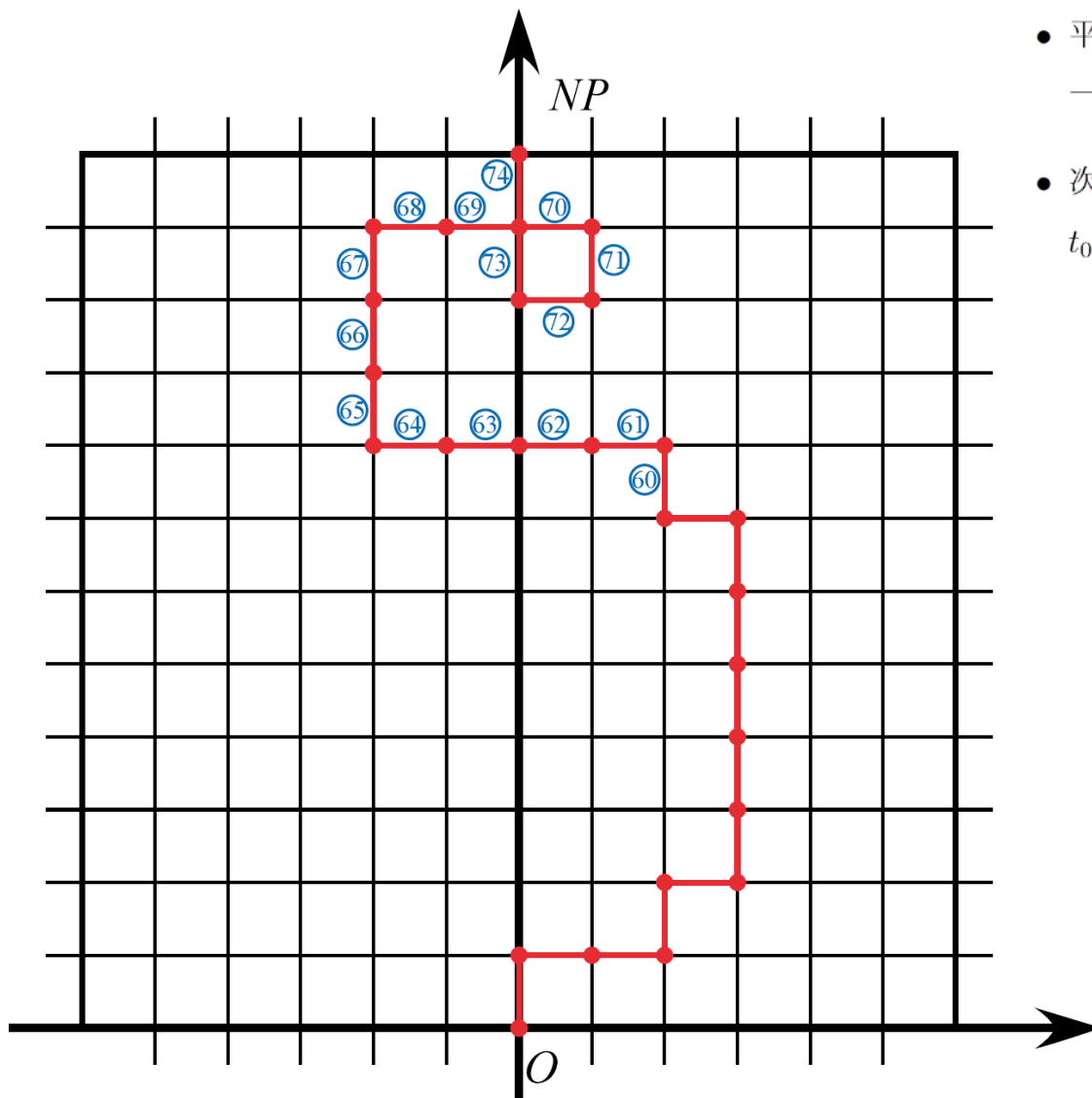
$$\hat{\omega}(m) = \hat{\omega}(t_m) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1).$$



- 平面上の RW の集合 $\Omega_N(D_0; O, P)$ の元 ω は一般にはループを持つ (自己交差する).
- 次の操作によってループを消去する: $\omega \rightarrow \hat{\omega}$
 $t_0 = 0, \hat{\omega}(0) = \hat{\omega}(t_0) = 0$ として, $m \geq 1$ に対して

$$t_m = \max \left\{ \ell > t_{m-1} : \hat{\omega}(\ell) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1) \right\},$$

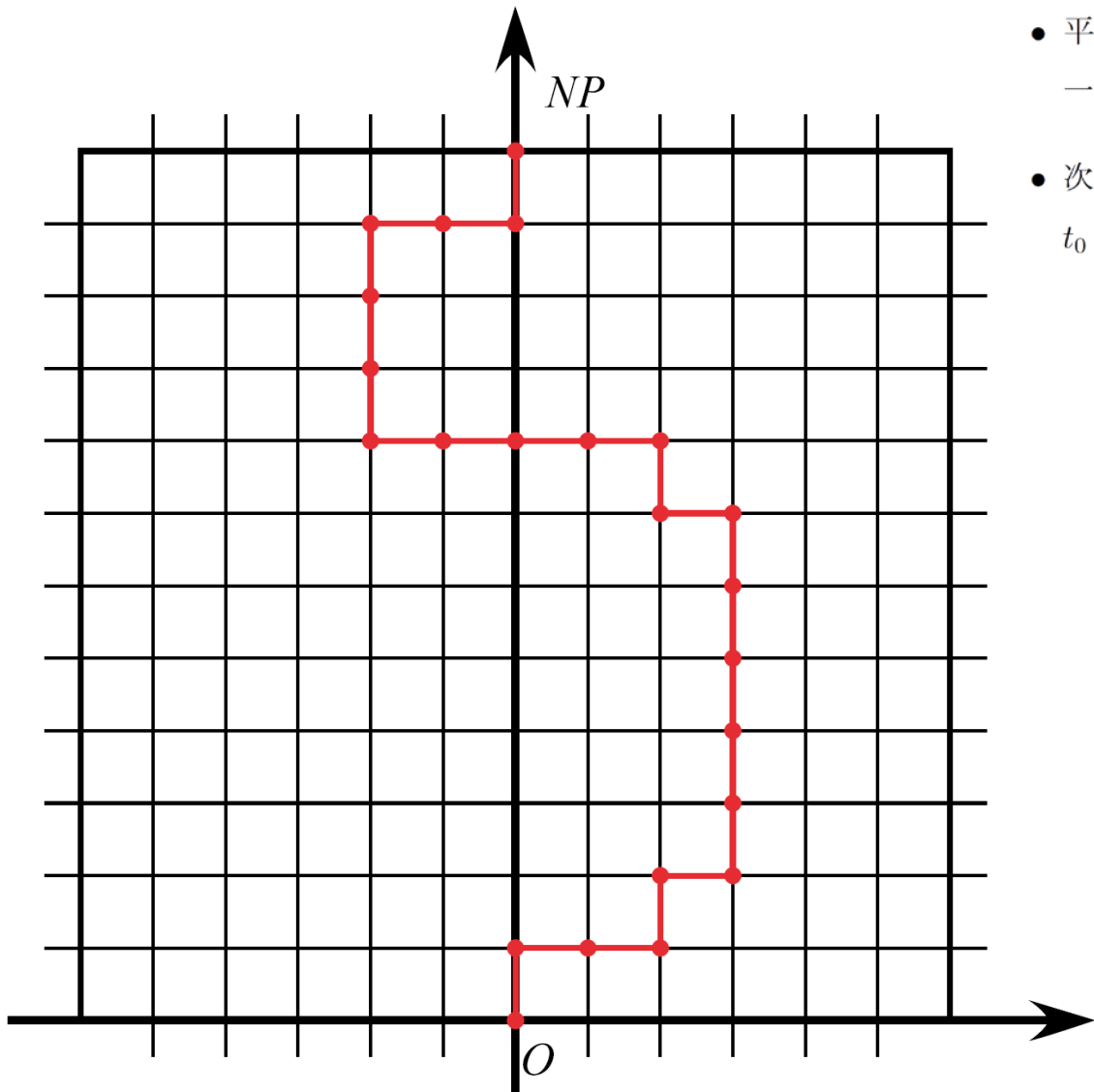
$$\hat{\omega}(m) = \hat{\omega}(t_m) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1).$$



- 平面上の RW の集合 $\Omega_N(D_0; O, P)$ の元 ω は一般にはループを持つ (自己交差する).
- 次の操作によってループを消去する: $\omega \rightarrow \hat{\omega}$
 $t_0 = 0, \hat{\omega}(0) = \hat{\omega}(t_0) = 0$ として, $m \geq 1$ に対して

$$t_m = \max \left\{ \ell > t_{m-1} : \hat{\omega}(\ell) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1) \right\},$$

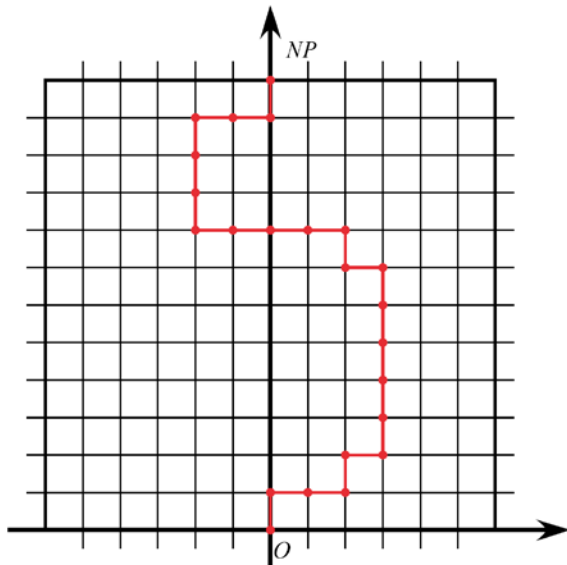
$$\hat{\omega}(m) = \hat{\omega}(t_m) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1).$$



- 平面上の RW の集合 $\Omega_N(D_0; O, P)$ の元 ω は一般にはループを持つ (自己交差する).
- 次の操作によってループを消去する: $\omega \rightarrow \hat{\omega}$
 $t_0 = 0, \hat{\omega}(0) = \hat{\omega}(t_0) = 0$ として, $m \geq 1$ に対して

$$t_m = \max \left\{ \ell > t_{m-1} : \hat{\omega}(\ell) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1) \right\},$$
$$\hat{\omega}(m) = \hat{\omega}(t_m) = \hat{\omega}(t_{m-1} + 1).$$

ループ除去ランダムウォーク(LERW)の連続極限



$\exists \nu > 0,$

$$\omega^{1/N} \left(\frac{i}{N^{1/\nu}} \right) = \frac{1}{N} \omega(i), \quad 0 \leq i \leq |\omega|$$

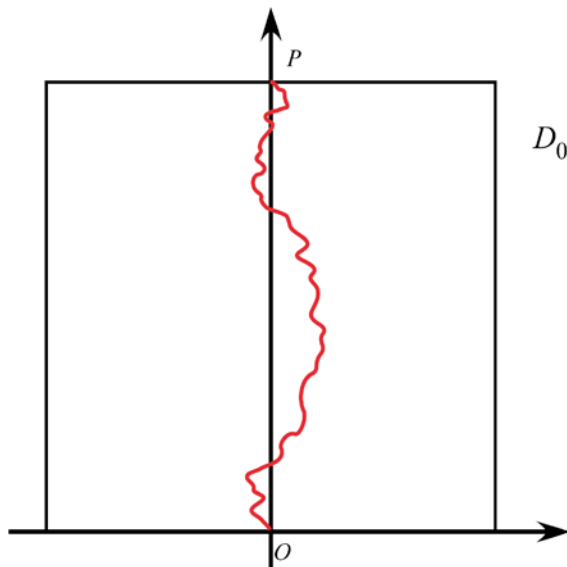
= 原点 O を出発, $\frac{|\omega|}{N^{1/\nu}}$ ステップ後に $P = 2\sqrt{-1}$ に到達,

D_0 内の (空間刻み $1/N$ の) ループ無しの道

$\Downarrow \quad N \rightarrow \infty$

$\gamma : (0, t_\gamma) \rightarrow D_0$ 連続,

$$\lim_{t \downarrow 0} \gamma(t) = O, \quad \lim_{t \uparrow t_\gamma} \gamma(t) = P, \quad t_\gamma \in (0, \infty).$$



D_0 ただし, $t_\gamma = \lim_{N \rightarrow \infty} |\omega|/N^{1/\nu}$: P への到達時刻 (確率変数)

$\gamma : (0, t_\gamma) \rightarrow D_0$ 連続,

$$\lim_{t \downarrow 0} \gamma(t) = O, \quad \lim_{t \uparrow t_\gamma} \gamma(t) = P, \quad t_\gamma \in (0, \infty)$$

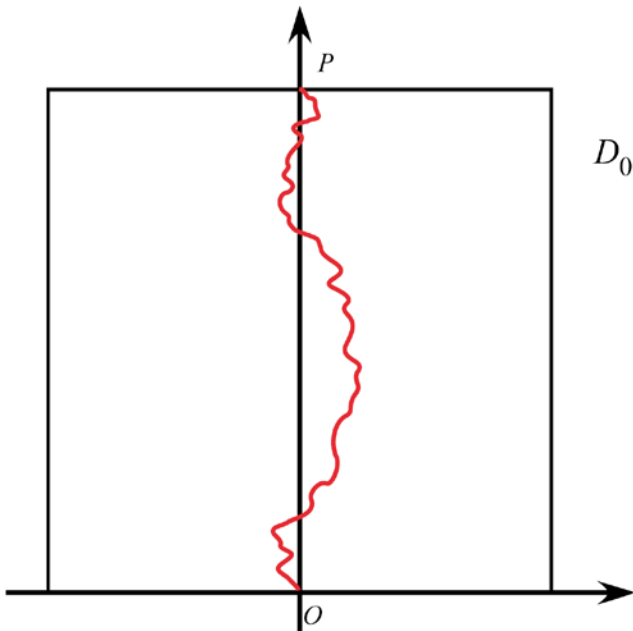
- 曲線 γ のフラクタル次元 $d_{\text{LERW}} = \frac{1}{\nu}$
- γ は単純曲線: $\gamma(t_1) \neq \gamma(t_2), 0 \leq \forall t_1 < t_2 \leq t_\gamma$.

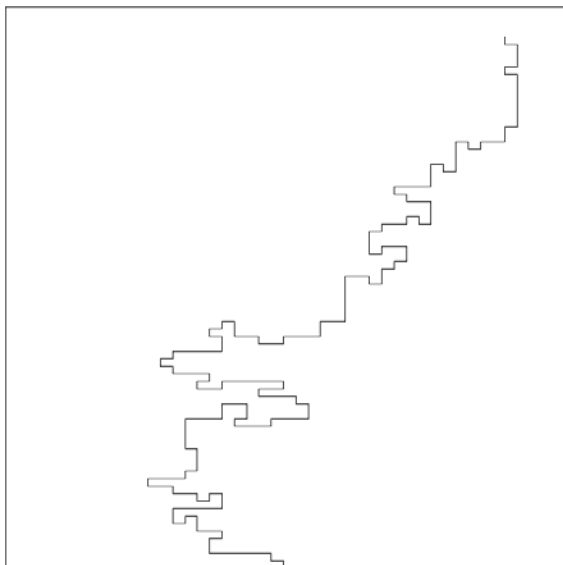
$\mathcal{K}_{\text{LERW}}(D_0; O, P) \equiv$ LERW の連続極限 (指数 ν のスケーリング極限) として得られる連続関数 γ 全体.

$\bar{\mu}_{D_0; O, P}^{\text{LERW}}(\cdot) \equiv$ 関数空間 $\mathcal{K}_{\text{LERW}}(D_0; O, P)$ に対する測度

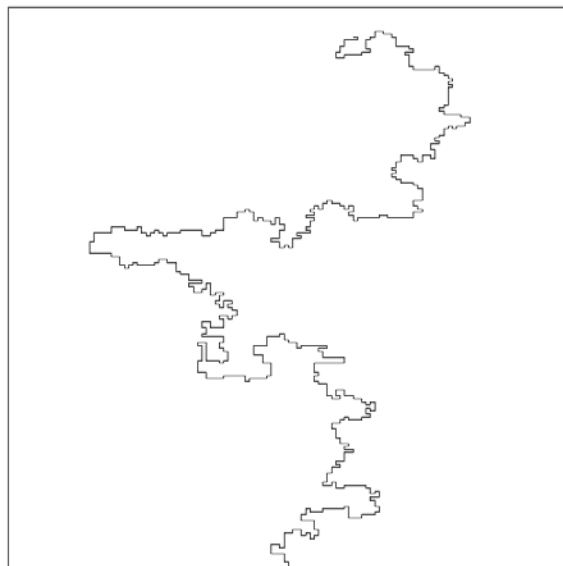
- 総和は (ループ除去前の RW の極限と同じく) $C(D_0; O, P)$ なので,

$$\begin{aligned} \mu_{(D_0; O, P)}^{\text{LERW}}(\cdot) &= \frac{\bar{\mu}_{(D_0; O, P)}^{\text{LERW}}(\cdot)}{C(D_0; O, P)} \\ &= \mathcal{K}_{\text{LERW}}(D_0; O, P) \text{ に台をもつ確率測度} \end{aligned}$$





(a1)



(a2)

- $W_n^z = \{RW : \text{出発点} = z, \text{長さ} = n\}$
の部分集合 (ループ無しの RW)

$$W_{n,0}^z \equiv \{\omega \in W_n^z, : \omega(i) \neq \omega(j), 0 \leq \forall i < j \leq n\}.$$

- $\exists \beta > 0$ s.t.

$$|W_{n,0}^z| \simeq e^{\beta n}, \quad n \rightarrow \infty.$$

ただし, $f(n) \simeq g(n), n \rightarrow \infty$

$$\iff \log f(n) \sim \log g(n), n \rightarrow \infty$$

自己回避ウォーク (self-avoiding walk: SAW)

≡ 自己交差しない (ループ無し) ウォーク ω に対して
それぞれ $e^{-\beta|\omega|}$ の測度を与えた統計集団.

左図(a1)は $n=200$ ステップ, (a2) は $n=800$ ステップ

SAW の分配関数

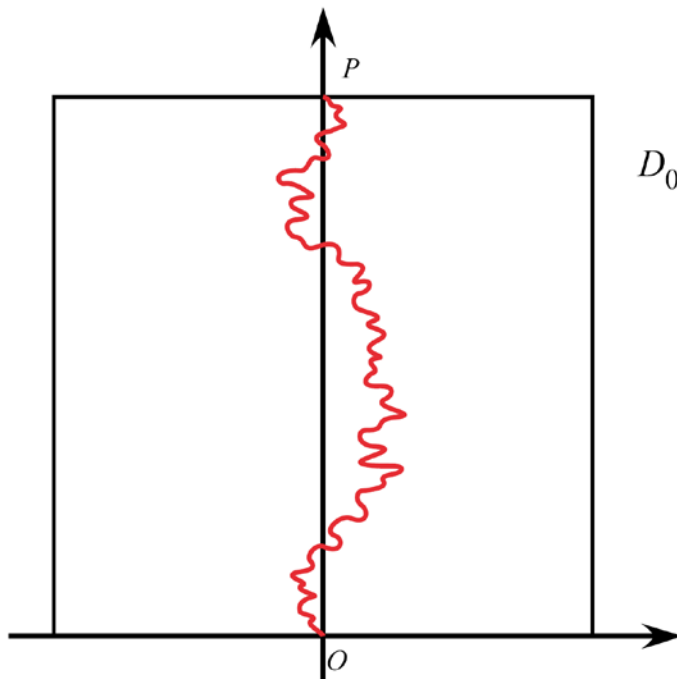
$$Z_N^{\text{SAW}}(D_0; O, P) = \sum_{\omega \in \Omega_N^0(D_0; O, P)} e^{-\beta|\omega|}$$

- $\exists b_{\text{SAW}} > 0$, s.t.

$$Z_N^{\text{SAW}}(D_0; O, P) \sim C^{\text{SAW}}(D_0; O, P) N^{-2b_{\text{SAW}}}, \quad N \rightarrow \infty.$$

- $\exists \nu = 1/d_{\text{SAW}}$, s.t.

$$\omega^{1/N} \left(\frac{i}{N^{1/\nu}} \right) = \frac{1}{N} \omega(i) \implies \gamma(t), \quad N \rightarrow \infty.$$



SAW の連続極限に対する測度

$$\bar{\mu}_{(D_0; O, P)}^{\text{SAW}}(\cdot) = C^{\text{SAW}}(D_0; O, P) \mu_{(D_0; O, P)}^{\text{SAW}}(\cdot)$$

比較

- RW と LERW では

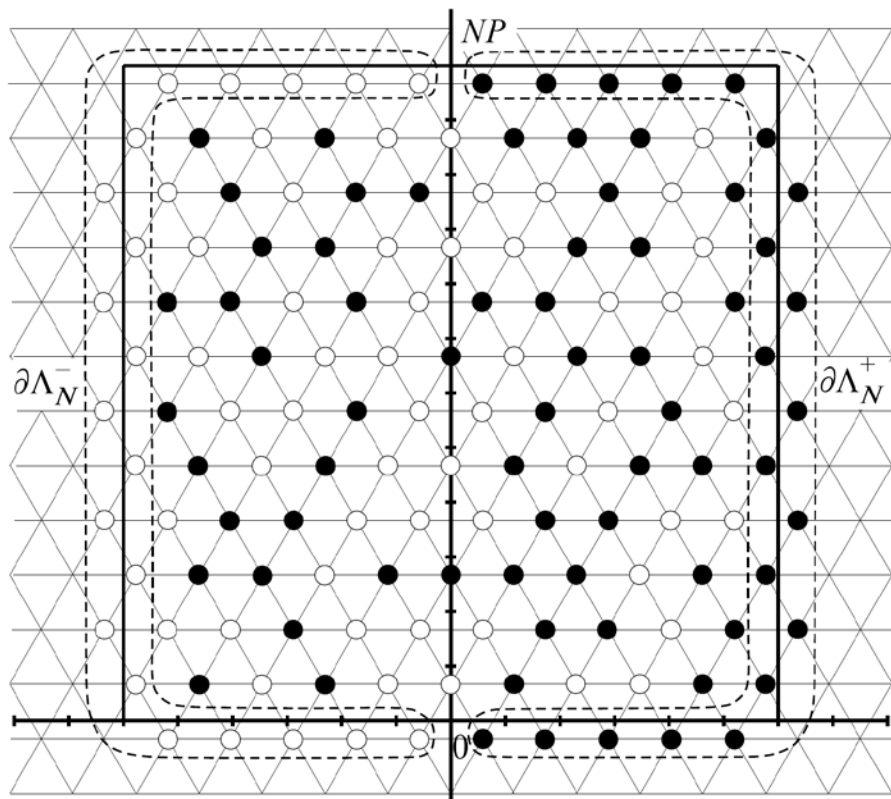
$$Z_N(D_0; O, P) \sim C(D_0; O, P) N^{-2}, \quad N \rightarrow \infty.$$

つまり, $b_{\text{RW}} = b_{\text{LERW}} = 1$.

- $d_{\text{LERW}} \neq d_{\text{SAW}}$

臨界浸透模型

(critical percolation model)



- ここでは \mathbb{C} 上に三角格子を置く :

$$\tau = \exp(2\pi\sqrt{-1}/3) \text{ として}$$

36

$$\mathbf{T} = \{z_0 + (i + j\tau)\sqrt{3}a : i, j \in \mathbb{Z}\}.$$

ただし, $a = \frac{2}{3}$ として $z_0 = a\sqrt{-1}$ とする.

- 確率変数 $\eta(z) \in \{0, 1\}$, $z \in \mathbf{T}$

Bernoulli 測度 ν_p で分布 :

$$\nu_p(\eta(z) = 1) = p, \quad \nu_p(\eta(z) = 0) = 1 - p.$$

- 三角格子 $\mathbf{T} \iff$ 繊維表面

$$\eta(z) = 1 \iff \text{濡れた部位}$$

$$\eta(z) = 0 \iff \text{乾いた部位}$$

浸透現象の模型

- 浸透相転移 (percolation transition)

$p \leq \frac{1}{2}$: ある 1 点を含む連結浸透領域は
確率 1 で有界

$p > \frac{1}{2}$: $\text{Prob}(\text{非有界}) > 0$

$p = p_c = \frac{1}{2}$: 臨界値

以下 $p = p_c = \frac{1}{2}$ とする.

- $N \in \mathbb{N}, \mathbf{T} \cap ND_0 = \Lambda_N$
(左図は $N = 6$ の場合)
- Dobrushin 境界条件

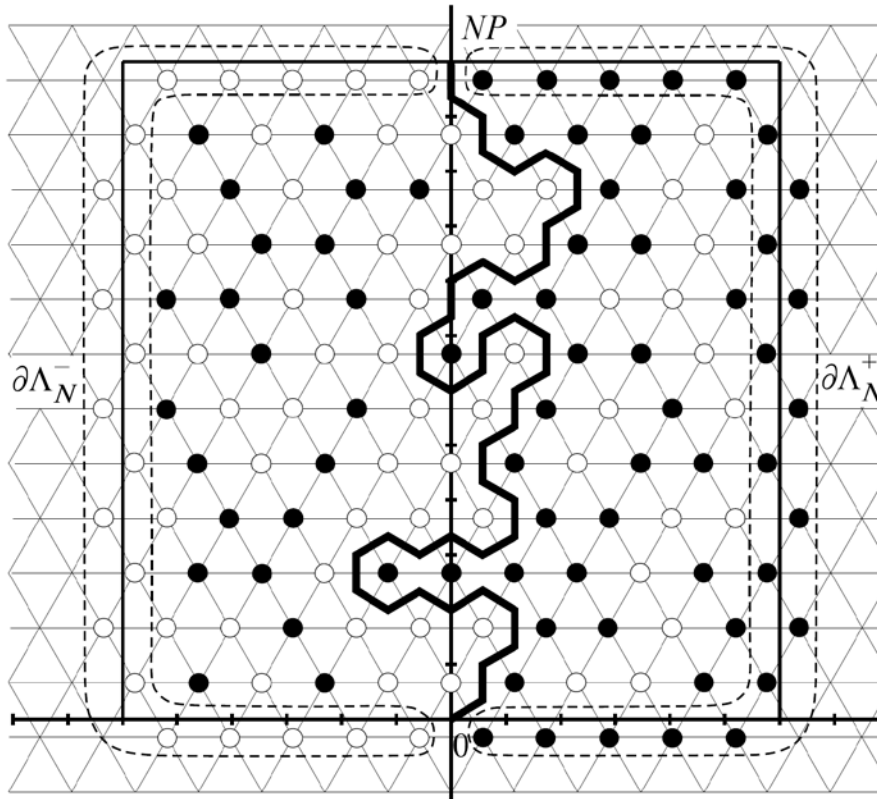
$$\eta(z) = 1, \quad \forall z \in \partial\Lambda_N^+$$

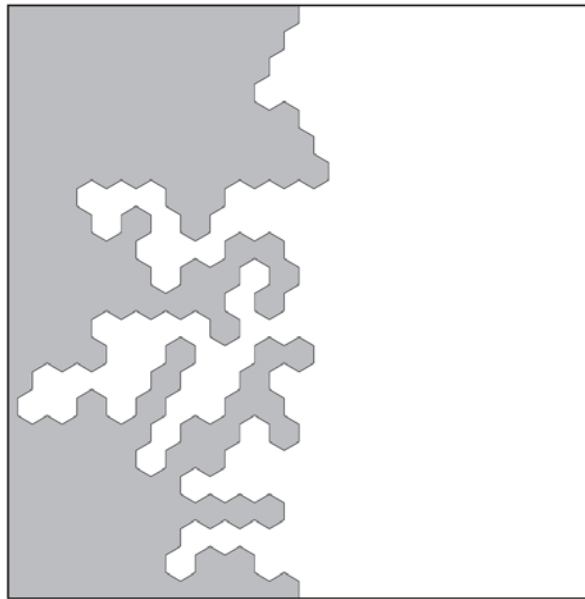
$$\eta(z) = 0, \quad \forall z \in \partial\Lambda_N^-$$

- これ以外の領域 Λ_N 内部の配置：
 $\nu_{1/2}$ に従ってランダムに分布
- 浸透探索過程

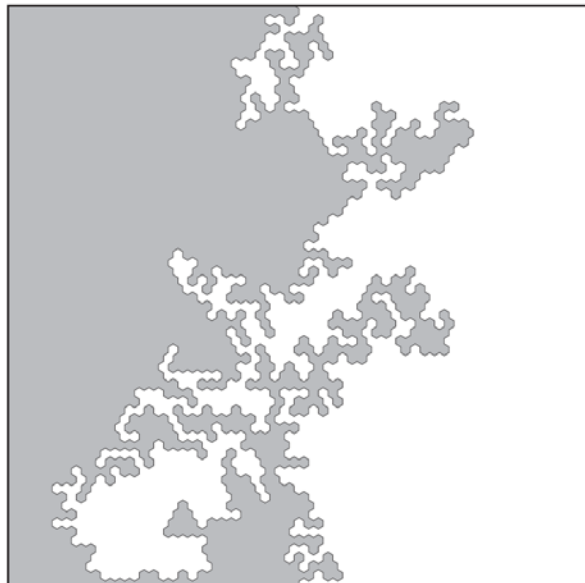
(percolation exploration process)

ω : 道の進行方向すぐ左側は 0 (白丸)
道の進行方向すぐ右側は 1 (黒丸)





(b1)



(b2)

浸透探索過程 ω

$N \rightarrow \infty \quad \downarrow \quad$ スケーリング極限 (指数 $\nu = 1/d_{\text{per}}$)

γ : 連続曲線

これは単純曲線ではない.

- Bernoulli 測度なので

測度の総和 (分配関数) $Z_N^{\text{per}}(D_0; O, P) \equiv 1$

よって $N^{-2b_{\text{per}}} = 1 \iff b_{\text{per}} = 0$

- 浸透探索過程の連続極限 γ

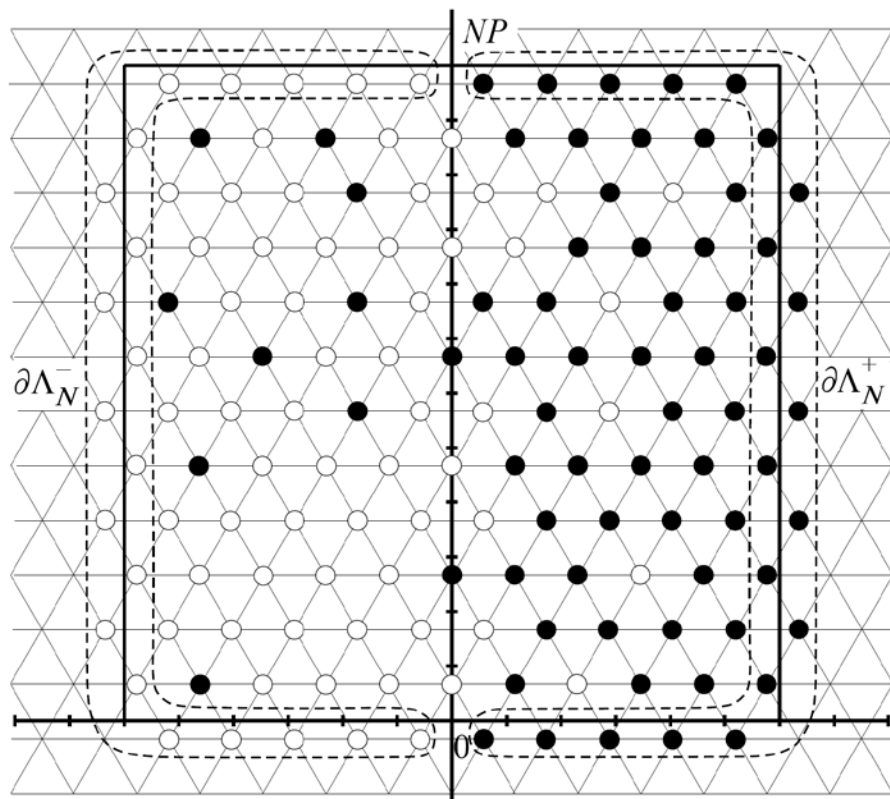
に対する確率測度を

$\mu_{(D_0; O, P)}^{\text{per}}(\cdot)$ と記す.

左図 (b1) は 35×35 三角格子上,

(b2) は 100×100 三角格子上

臨界 Ising 模型 (critical Ising model)



- $\bar{\Lambda}_N = \Lambda_N \cup \partial\Lambda_N^+ \cup \partial\Lambda_N^-$

- 確率変数 (スピン)

$$\sigma(z) \in \{-1, 1\}, \quad z \in \bar{\Lambda}_N$$

- Dobrushin 境界条件

$$\sigma(z) = 1, \quad \forall z \in \partial\Lambda_N^+$$

$$\sigma(z) = -1, \quad \forall z \in \partial\Lambda_N^-$$

- 領域内部 Λ_N^o のスピンは

径数 $\beta > 0$ の Gibbs 測度でランダムに配置 :

$$\pi_{N,\beta}(\sigma) = \frac{e^{-\beta E(\sigma)}}{Z_{N,\beta}}$$

ただし,

$$E(\sigma) = -\frac{1}{2} \sum_{z,z' \in \bar{\Lambda}_N: |z-z'|=\sqrt{3}a} \sigma(z)\sigma(z')$$

$$Z_{N,\beta} = \sum_{\sigma \in \{-1,1\}^{\Lambda_N^o}} e^{-\beta E(\sigma)}$$

- 磁気相転移 (magnetic phase transition)

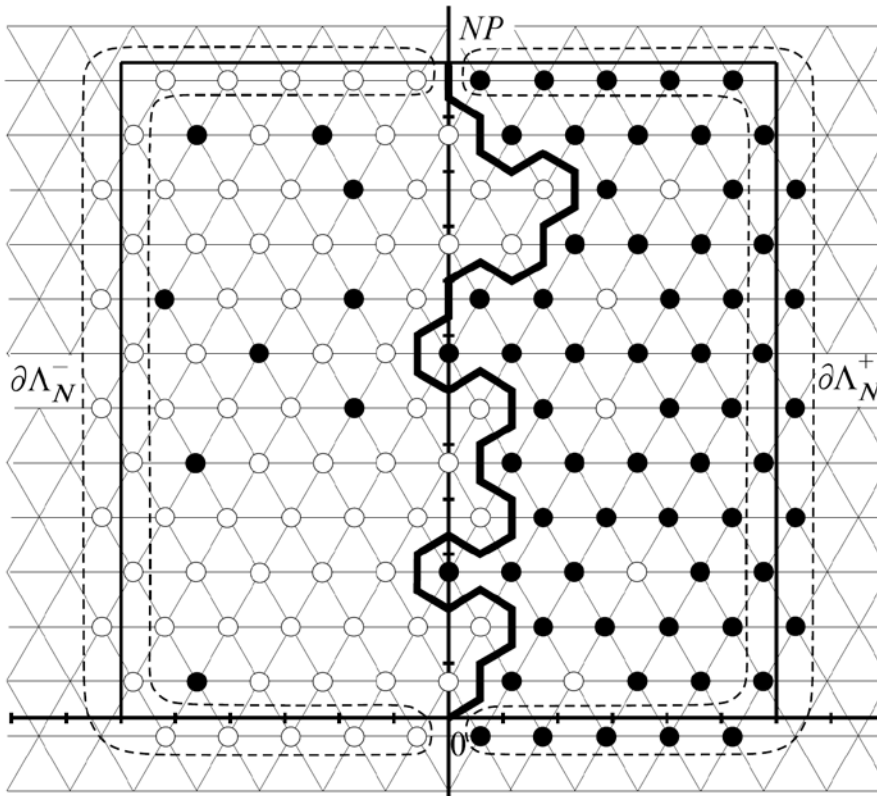
$$\beta = J/kT < \beta_c \quad (T > T_c) : \text{常磁性相}$$

$$\beta = J/kT > \beta_c \quad (T < T_c) : \text{強磁性相}$$

$$\beta = J/kT = \beta_c \quad (T = T_c) : \text{臨界点 (Curie 温度)}$$

$$e^{-2\beta_c} = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad \beta_c = \frac{1}{4} \log 3 = 0.27465 \dots$$

Ising 界面(Ising Interface)



以下 $\beta = \beta_c$ ($T = T_c$) とする.

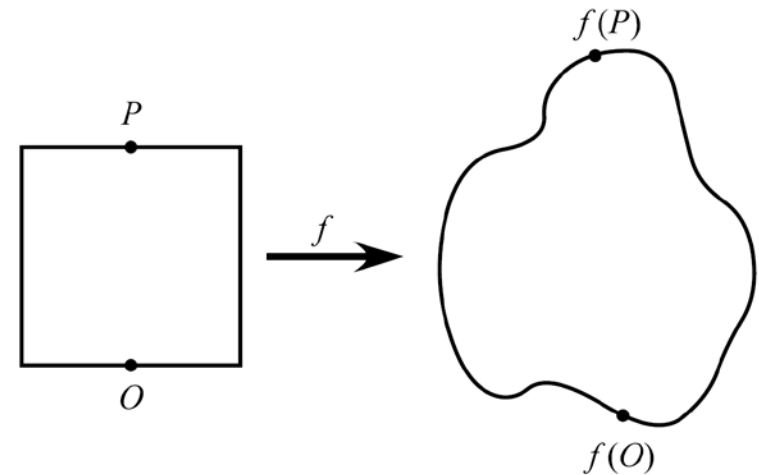
- ω : Ising 界面 (Ising interface)
 $N \rightarrow \infty$ \Downarrow スケーリング極限
 (指数 $\nu = 1/d_{\text{Ising}}$)
- γ : 連続曲線
 これは単純曲線.
- Ising 界面の連続極限 γ
 に対する測度を
 $\bar{\mu}_{(D_0; O, P)}^{\text{Ising}}(\cdot)$ と記す.

1.2 共形不変性と領域 Markov 性

$f : D_0 \subset \mathbb{C}$ 上で正則, $f'(z) \neq 0, \forall z \in D_0$ のとき

$f : D_0 \rightarrow f(D_0) : \text{共形変換 (等角写像)}$

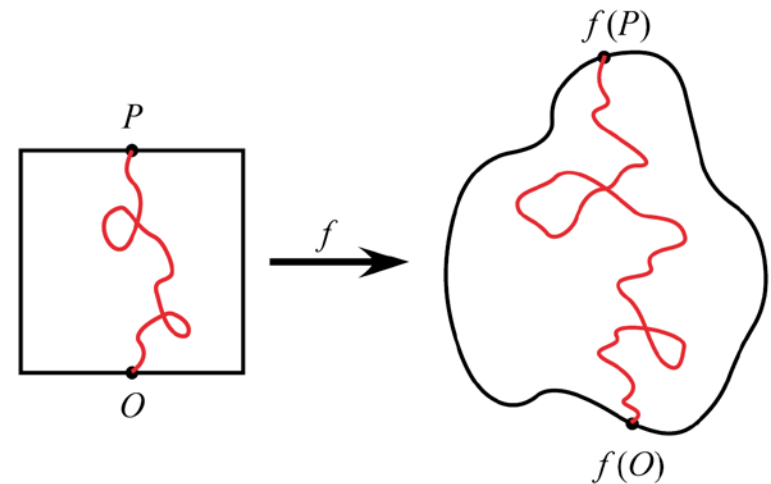
ただし, $\partial D_0 \rightarrow f(\partial D_0), O \rightarrow f(O), P \rightarrow f(P)$ とする.



1.1 節で述べた平面格子上の統計力学模型の連続極限に伴って得られる連続関数 γ に対する測度

$$\bar{\mu}_{(D_0; O, P)}(\cdot) = C(D_0; O, P) \mu_{(D_0; O, P)}(\cdot)$$

の共形変換 f による変換性を考える.



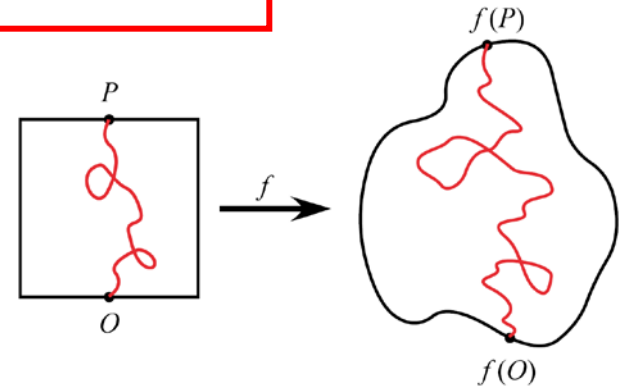
次の2つの変換性を持つことが期待される。

① 共形共変性と共形不変性

任意の共形変換に対して,

$$f \circ \bar{\mu}_{(D_0; O, P)}(\cdot) = |f'(O)|^b |f'(P)|^b \bar{\mu}_{(f(D_0); f(O), f(P))}(\cdot)$$

指数 b = 1.1 節の格子上の模型の分配関数の
 領域サイズ $N \rightarrow \infty$ に伴う漸近挙動で決まる値
 = (上の式の形から) **境界スケーリング指数**
 (boundary scaling exponent) と呼ばれる



上式は測度の総和 (分配関数) の**共形共変性**と
 確率測度の**共形不変性**を意味する：

$$C(D_0; O, P) = |f'(O)|^b |f'(P)|^b C(f(D_0); f(O), f(P)),$$

$$\mu_{(D_0; O, P)}(\cdot) = \mu_{(f(D_0); f(O), f(P))}(\cdot).$$

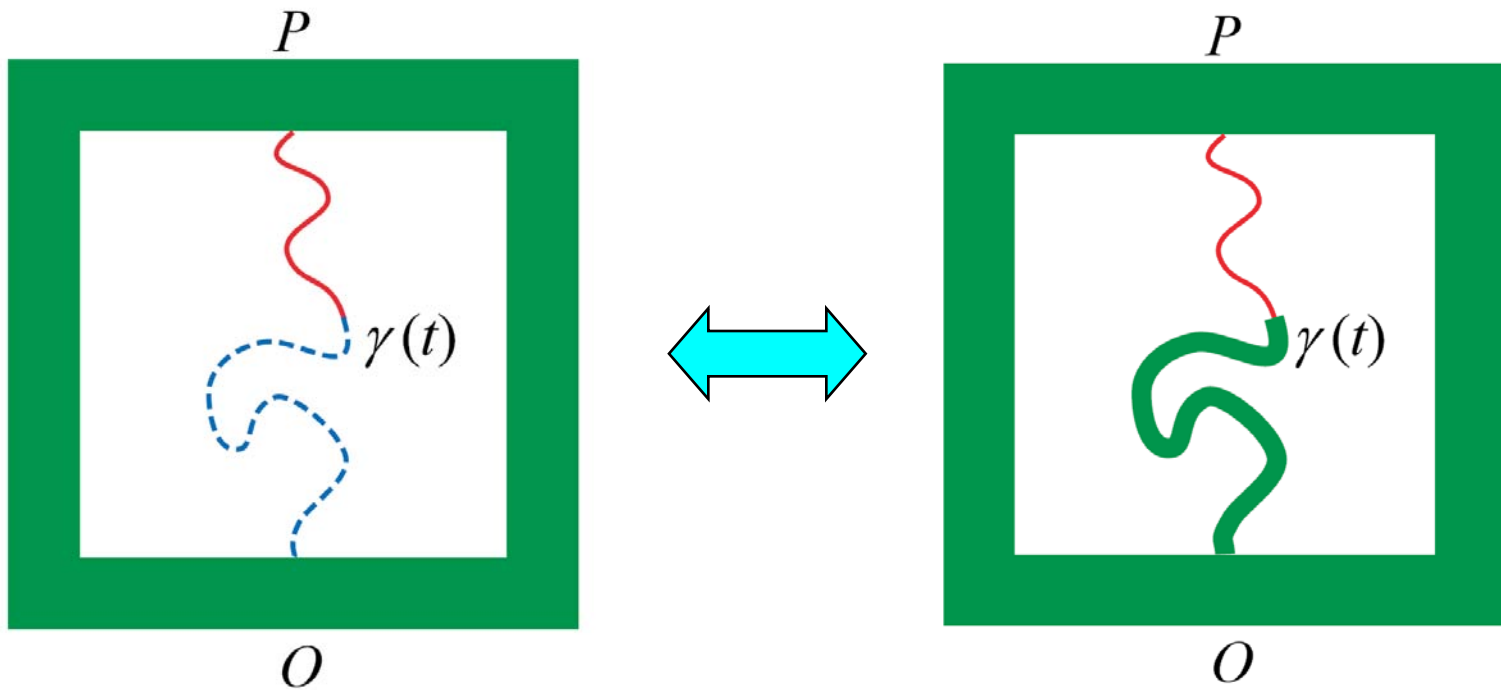
② 領域 Markov 性

$\mu_{(D_0; O, P)}$ の下で, 曲線 γ の初期の一部分 $\gamma(0, t], t \in (0, t_\gamma)$ を観測する.

この条件の下での曲線の残りの部分の分布は,
 D_0 から $\gamma(0, t]$ を除いた開領域で,
 $\gamma(t)$ を出発点として $\gamma(t_\gamma) = P$ を終点とする曲線
 の分布に等しい:

$$\mu_{(D_0; O, P)}(\cdot \mid \gamma(0, t]) = \mu_{(D_0 \setminus \gamma(0, t]; \gamma(t), P)}(\cdot).$$

この性質を領域 Markov 性と言う.



注: 曲線の径数付けについて

$\gamma : (0, t_\gamma) \rightarrow D_0$ 連続,

$$\lim_{t \downarrow 0} \gamma(t) = O, \quad \lim_{t \uparrow t_\gamma} \gamma(t) = P, \quad t_\gamma \in (0, \infty)$$

曲線 γ は変数 $t \in [0, t_\gamma]$ (時間と見なす) の連続関数.

共形変換によって, 時間はどのように変換 (時間変更) されるべきか.

- ウォーク ω のスケールリング性

$$\omega^{1/N} \left(\frac{i}{N^{1/\nu}} \right) = \frac{1}{N} \omega(i), \quad 0 \leq i \leq |\omega|$$

↓

像曲線 $f \circ \gamma$ 上の

区間 $f(\gamma[t_1, t_2]), 0 < t_1 < t_2 < t_\gamma$, の移動時間

$$= \int_{t_1}^{t_2} |f'(\gamma(s))|^d ds,$$

(d は曲線 γ のフラクタル次元.)

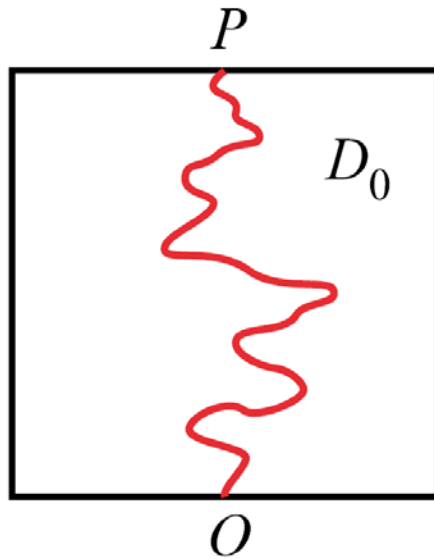
- 曲線の径数付けの違い (時間変更の違い) を無視して考えることもある.

$$\gamma(t) = \gamma(\theta(t)) :$$

$$\forall \text{ 増加同相写像 } : \theta : [0, t_\gamma] \rightarrow [0, t_\gamma]$$

1.3 制限性と局所性

制限性 (restriction property)

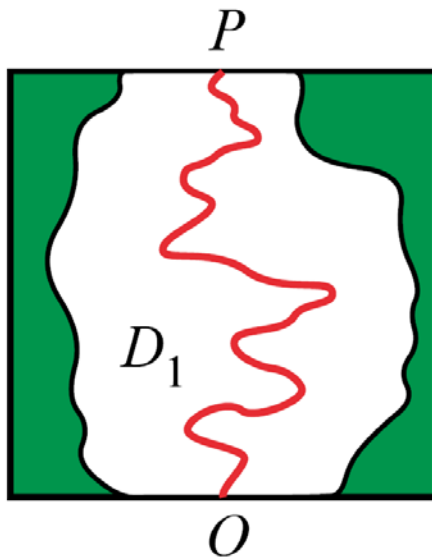


D_1 : 単連結領域, $D_1 \subset D_0$. ただし, $O, P \in \partial D_1$.

- 部分領域 D_1 で LERW を考える.

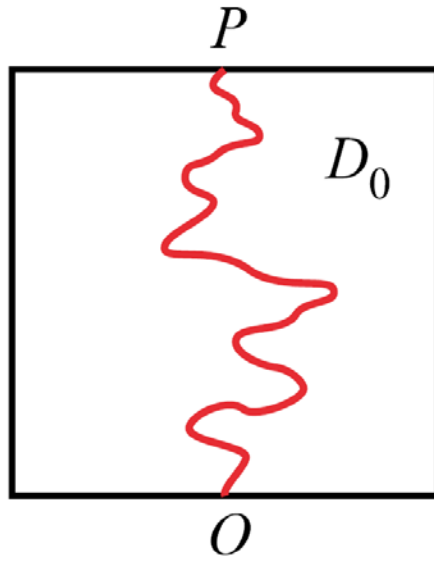
↓

$$\frac{d\bar{\mu}_{(D_1; O, P)}^{\text{LERW}}}{d\bar{\mu}_{(D_0; O, P)}^{\text{LERW}}} < 1, \quad D_1 \subset D_0, \quad D_1 \neq D_0$$



1.3 制限性と局所性

制限性 (restriction property)

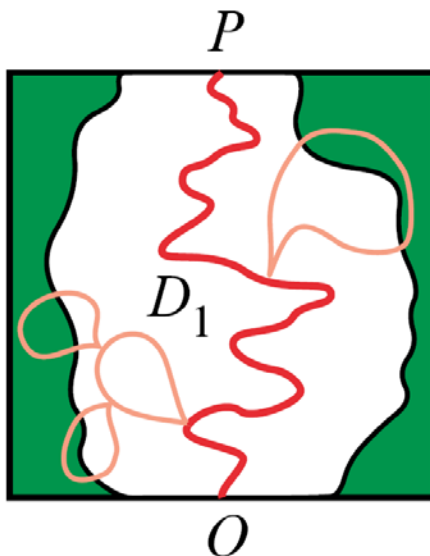


D_1 : 単連結領域, $D_1 \subset D_0$. ただし, $O, P \in \partial D_1$.

- 部分領域 D_1 で LERW を考える.

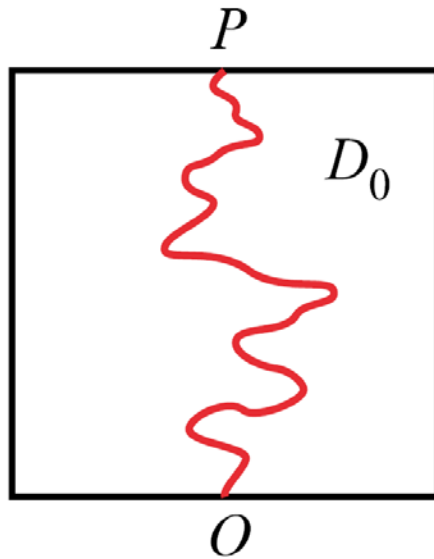
↓

$$\frac{d\bar{\mu}_{(D_1; O, P)}^{\text{LERW}}}{d\bar{\mu}_{(D_0; O, P)}^{\text{LERW}}} < 1, \quad D_1 \subset D_0, \quad D_1 \neq D_0$$



1.3 制限性と局所性

③ 制限性 (restriction property)

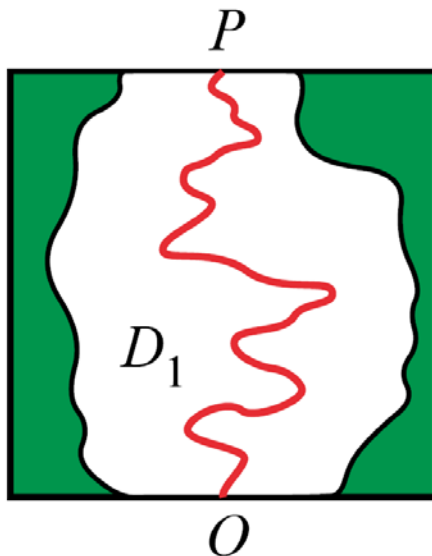


D_1 : 単連結領域, $D_1 \subset D_0$. ただし, $O, P \in \partial D_1$.

- 部分領域 D_1 で LERW を考える.

↓

$$\frac{d\bar{\mu}_{(D_1;O,P)}^{\text{LERW}}}{d\bar{\mu}_{(D_0;O,P)}^{\text{LERW}}} < 1, \quad D_1 \subset D_0, \quad D_1 \neq D_0$$

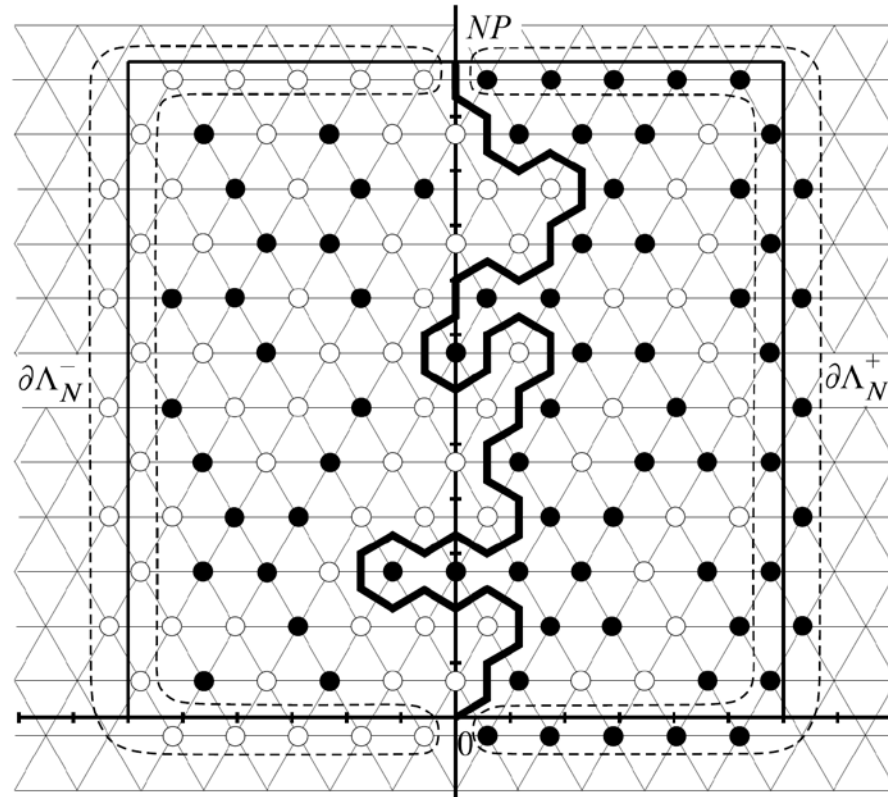


- しかし, SAW の連続極限の測度においては

$$\frac{d\bar{\mu}_{(D_1;O,P)}^{\text{SAW}}}{d\bar{\mu}_{(D_0;O,P)}^{\text{SAW}}} = \mathbf{1}\{\gamma(0, t_\gamma) \subset D_1\}, \quad D_1 \subset D_0$$

が成立する. これを制限性という.

④ 局所性(locality property)



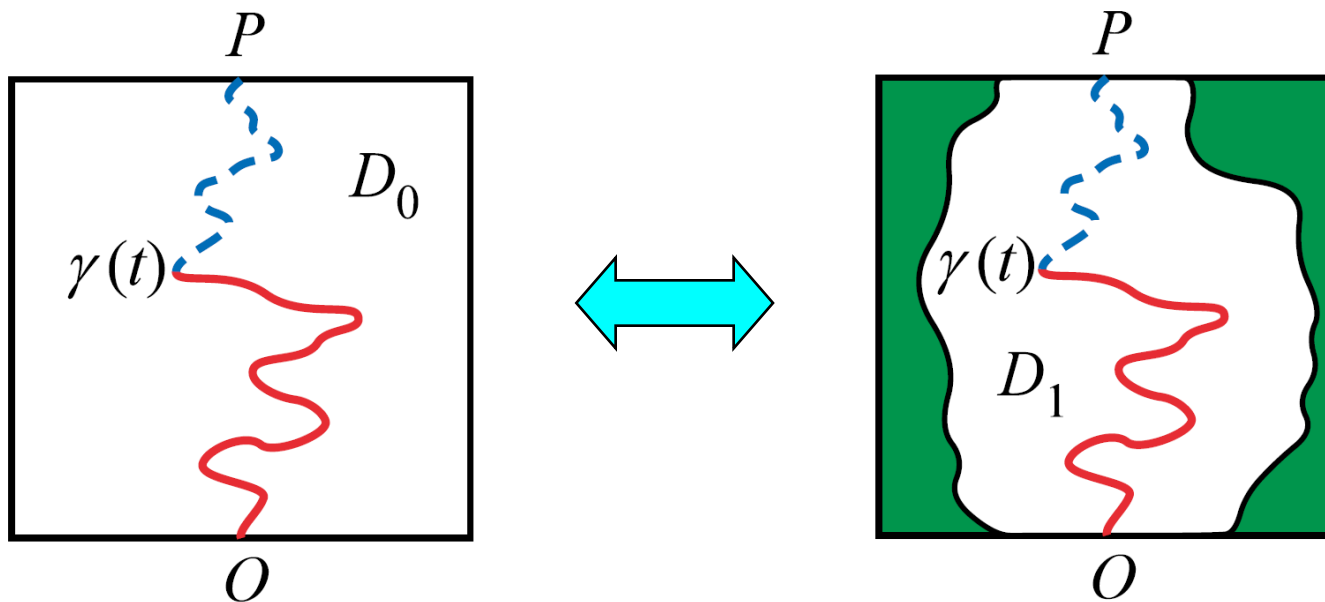
浸透探索過程 ω

Bernoulli 測度 $\nu_p \implies$ 局所性

④ 局所性(locality property)

D_1 : 単連結領域, $D_1 \subset D_0$, $O, P \in \partial D_1$.

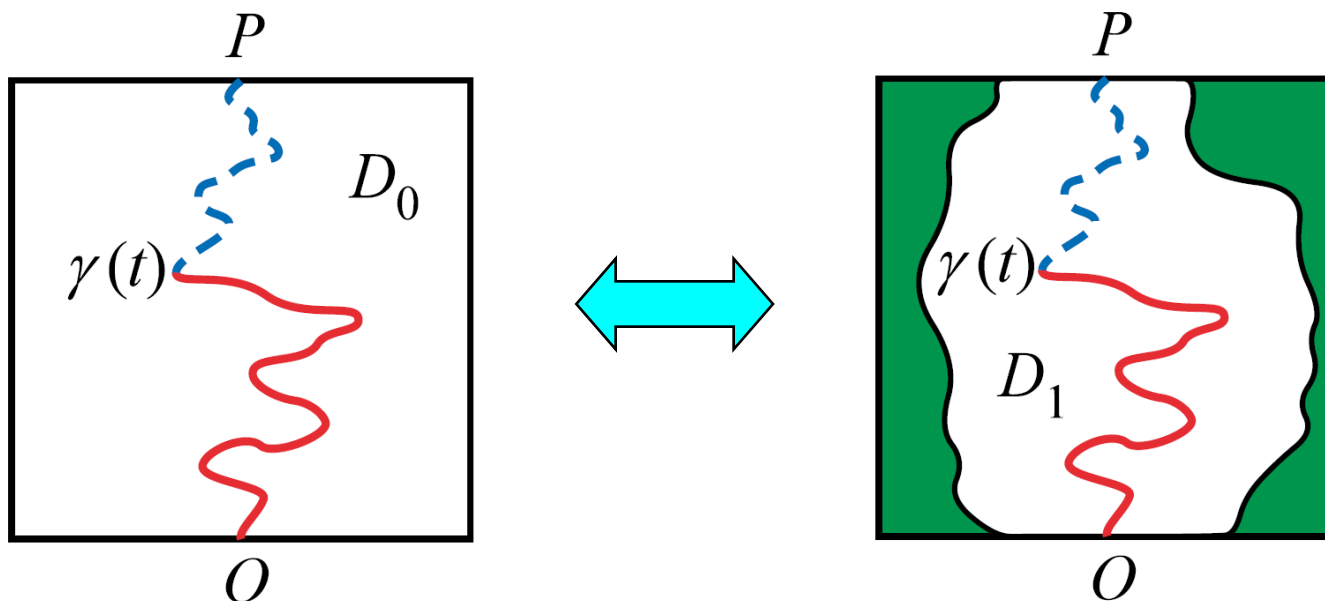
$$\mu_{(D_1; O, P)}^{\text{per}}(\gamma(0, t]) = \mu_{(D_0; O, P)}^{\text{per}}(\gamma(0, t]) \mathbf{1}\{\gamma(0, t] \subset D_1\}, \quad \forall t \in (0, t_\gamma).$$



④ 局所性(locality property)

D_1 : 単連結領域, $D_1 \subset D_0$, $O, P \in \partial D_1$.

$$\mu_{(D_1; O, P)}^{\text{per}}(\gamma(0, t]) = \mu_{(D_0; O, P)}^{\text{per}}(\gamma(0, t]) \mathbf{1}\{\gamma(0, t] \subset D_1\}, \quad \forall t \in (0, t_\gamma).$$



- Ising 界面の連続極限の測度 μ^{Ising} には局所性は期待できない.
- 制限性は曲線全体 $\gamma(0, t_\gamma)$ の性質であるが, 局所性は任意の初期部分 $\gamma(0, t], t \in (0, t_\gamma)$ に対して成り立つべき性質であり, より強い**独立性**である.