

近接作用に基づいた自律分散制御による ad hoc network クラスタリング方式の提案

平成 22 年 1 月 22 日

高野知佐 †

会田雅樹 ‡

† 広島市立大学大学院 情報科学研究科

‡ 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科

Table of Contents

- 研究の目的
- 自律分散制御の仕組み
- 自律分散制御によるクラスタ分割の提案
- 評価
- まとめ

研究の目的

- アドホックネットワーク：ネットワークを複数のクラスタに分割するクラスタリング技術が注目（→ フラッディング情報量を軽減）
- 複数の端末からリーダーとなるクラスタヘッドを適切に選任する必要
 1. 隣接にクラスタヘッドが無い場合：その端末自身がクラスタヘッド
 2. 隣接にクラスタヘッド候補がたくさんいる場合：その中からメトリックに見合った端末がクラスタヘッド

目的： 自律分散的なアドホックネットワークのクラスタリング

- * ネットワーク全体の情報を知っている特別なノードは存在しない
- * 各端末の自律的動作によりクラスタリングが実現

クラスタリングの基準

◎ 様々なクラスタリング手法

- 電池残量が最も多い端末をクラスタヘッドに選任
- 次数（無線リンク）の最も多い端末をクラスタヘッドに選任
- ノード数が等しくなるようなクラスタリング
- 各端末の移動速度を考慮したクラスタリング . . .
- その他いろいろ

このような大域的な最適化が自律的に実現できるか？

自律的な動作で大域的な秩序を生み出す為には？

➔ 近接作用に基づく自律分散制御の適用

近接作用に基づく自律分散制御の枠組み（1）

- 物理的なシステムにおいて異なる位置にある対象間の作用
➡ 「遠隔作用」と「近接作用」

遠隔作用：離れた対象同士が直接作用を及ぼし合うモデル

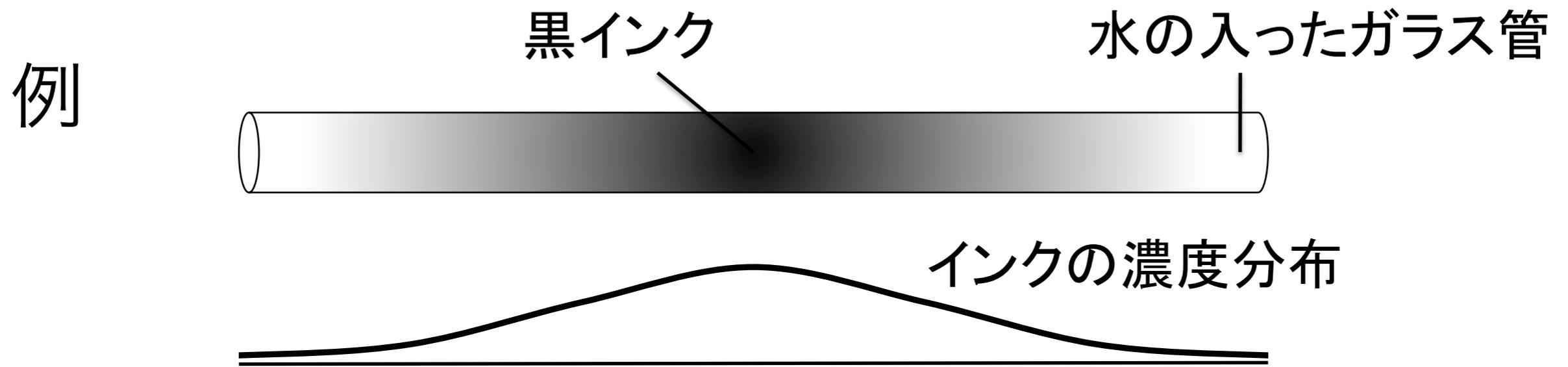
例) ニュートン力学

$$F(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{G m M}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2}$$

- （神様が）力の大きさ F が決定するには...
 - 空間的に離れたサブシステムの状態を同時に知っている
 - 一種の集中管理または集中制御的な枠組み

近接作用に基づく自律分散制御の枠組み (2)

近接作用：作用が直接伝わるのは近隣のみ、近隣同士間の作用の影響が徐々に空間を伝搬→離れた対象に作用が伝達



- 各点の水は左右のインク濃度差に比例したレートで、インクを濃い方から薄い方に移動させる単純な振る舞い
- インクは時間とともにガラス管全体に拡散し、濃度は平滑化

濃度分布の時間発展方程式

→ 偏微分方程式 (拡散方程式)

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2}$$

近接作用に基づく自律分散制御の枠組み (3)

偏微分方程式で記述される近接作用のシステム：

→ 自律分散制御の枠組み

- ◎ ガラス管の各点 (サブシステム) : ガラス管全体(システム全体) に関する情報は持っておらず, 予め決められたルールで近隣点と相互作用 (局所相互作用 = 局所的な自律動作)
- ◎ システム全体の状態 : 偏微分方程式の解で与えられるような大域的に秩序ある振舞い
- ◎ 偏微分方程式により, ミクロ (局所的な自律動作) とマクロ (システム全体の秩序ある状態) をリンク

自律分散制御の処方箋（レシピ）

自律分散システム：サブシステムの局所的な動作によってシステム全体がデッドロック状態になる可能性

我々の提案してきた自律分散制御の作り方

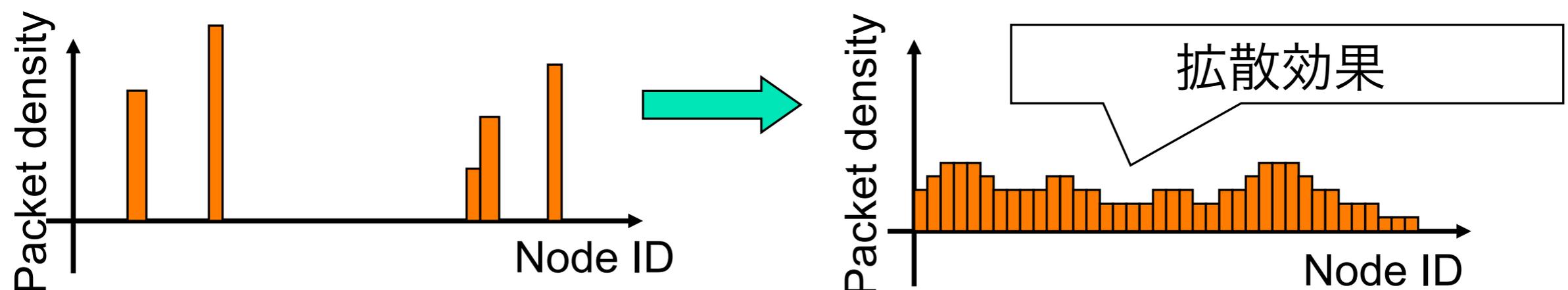
- (1) システムの大域的な状態が持つべき性質を考察
- (2) その性質を備えた解を持つ偏微分方程式を決定
- (3) 偏微分方程式の局所作用を決定
- (4) 局所作用をまねて，サブシステムの動作を決定

→ 全体の状態が自然に望ましい性質に誘導される

過去の適用例：拡散型フロー制御

◎ ミクروسケールの動作ルールを適切に設計し，マクروسケールでの状態を間接的に制御： 拡散型フロー制御方式

➡ ネットワーク全体の情報を収集することなくノードが局所情報に基づいて自律動作

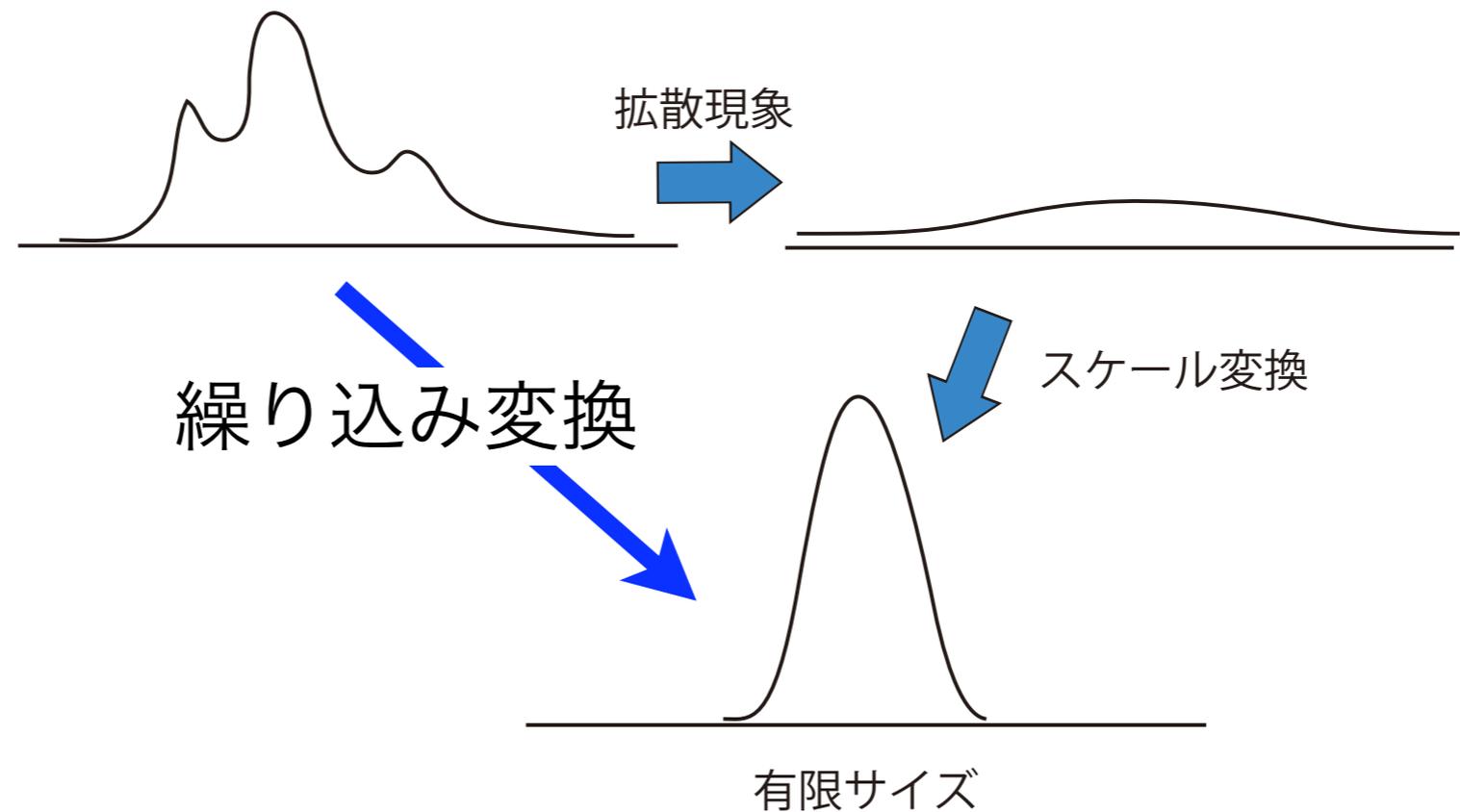


- ◎ ノードの自律動作によりネットワーク内のパケットが1カ所に集中しないようにノードのパケット密度を拡散.
- ◎ 輻輳の発生によるパケットロスを回避し，スループットを保持

くりこみ変換を用いた自律分散制御 (1)

- ▶ 我々の自律分散制御 → 別パターンに適用!
- ▶ 拡散現象を利用した平滑化ではなく, 有限の大きさの構造を作り出す!
- ▶ 拡散方程式に従う密度分布に 拡散 + スケール変換

→ 繰り込み変換



時間が経つと初期分布によらず有限な分散を持つ正規分布

➡ アドホックネットワーク: 有限サイズのクラスタ構造

くりこみ変換を用いた自律分散制御 (2)

我々のレシピを適用

(1) システムの大域的な状態が持つべき性質を考察

時間が経つと初期分布によらず有限な分散を持つ正規分布 (拡散方程式を繰り込み変換)

(2) その性質を備えた解を持つ偏微分方程式を決定

ある密度関数 $p(x, t)$ が以下の拡散方程式を満たすとする.

$$\frac{\partial}{\partial t} p(x, t) = \kappa \frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, t) \quad \kappa \text{ は拡散係数}$$

拡散方程式の解 $p(x, t)$ を繰り込み変換した分布 $q(x, t)$ は,

$$q(x, t) := \frac{\sqrt{2\kappa\tau}}{\sigma} p\left(\frac{\sqrt{2\kappa\tau}}{\sigma}x, \tau\right) \quad \tau = t \text{ or } e^{2ct}$$

これは以下の偏微分方程式に従う.

$$\frac{\partial}{\partial t} q(x, t) = c \left(1 + x \frac{\partial}{\partial x} + \sigma^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) q(x, t) \quad \tau = e^{2ct} \text{ のとき}$$

くりこみ変換を用いた自律分散制御 (2)

(3) 偏微分方程式の局所作用を決定

これを自律分散制御に結びつけるために、連続の式

$$\frac{\partial}{\partial t} q(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x} J_q(x, t)$$

の $J_q(x, t)$ に対応する流れを特定することが必要

$J_q(x, t)$ の形は以下のようになる。

$$J_q(x, t) = -c x q(x, t) - c \sigma^2 \frac{\partial}{\partial x} q(x, t)$$

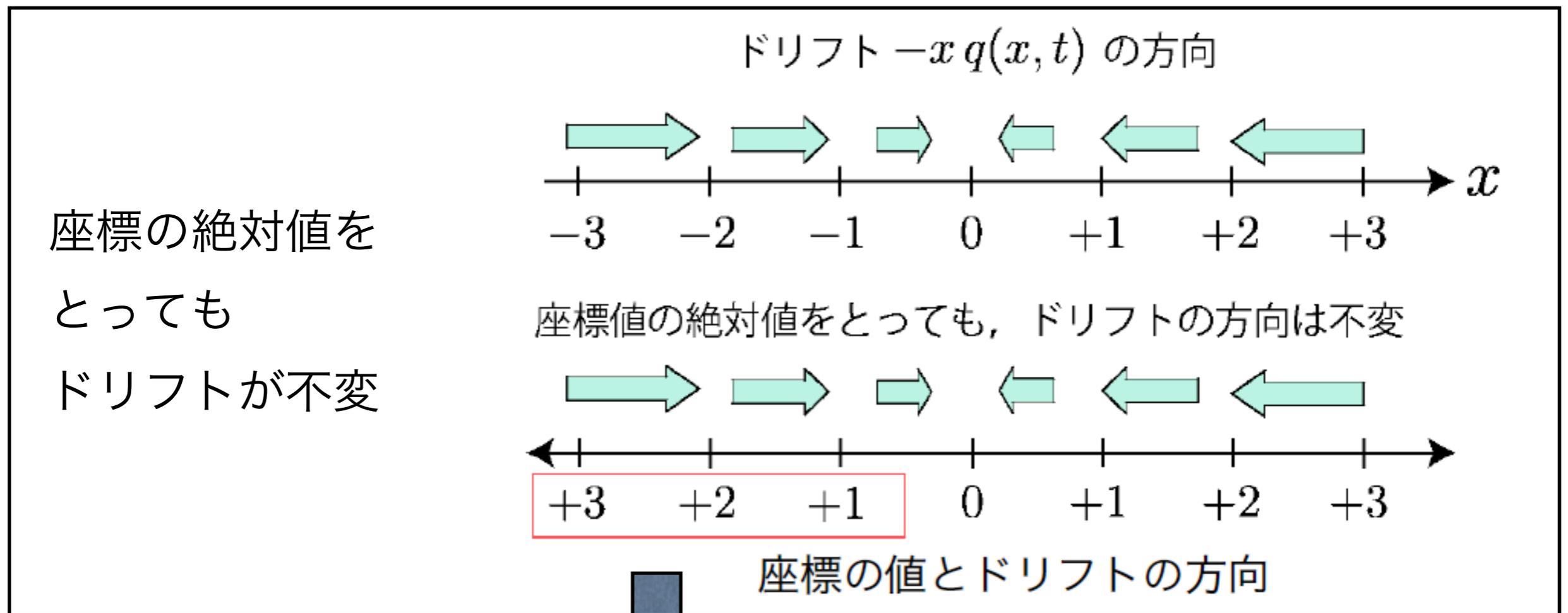
c は分布の変化の速さ, σ^2 は収束する正規分布の分散

右辺第1項: ドリフト項, 右辺第2項: 拡散項

自律分散制御によるクラスタ分割 (1)

局所作用のドリフト項の
形からNWに座標系を入
れることが必要？

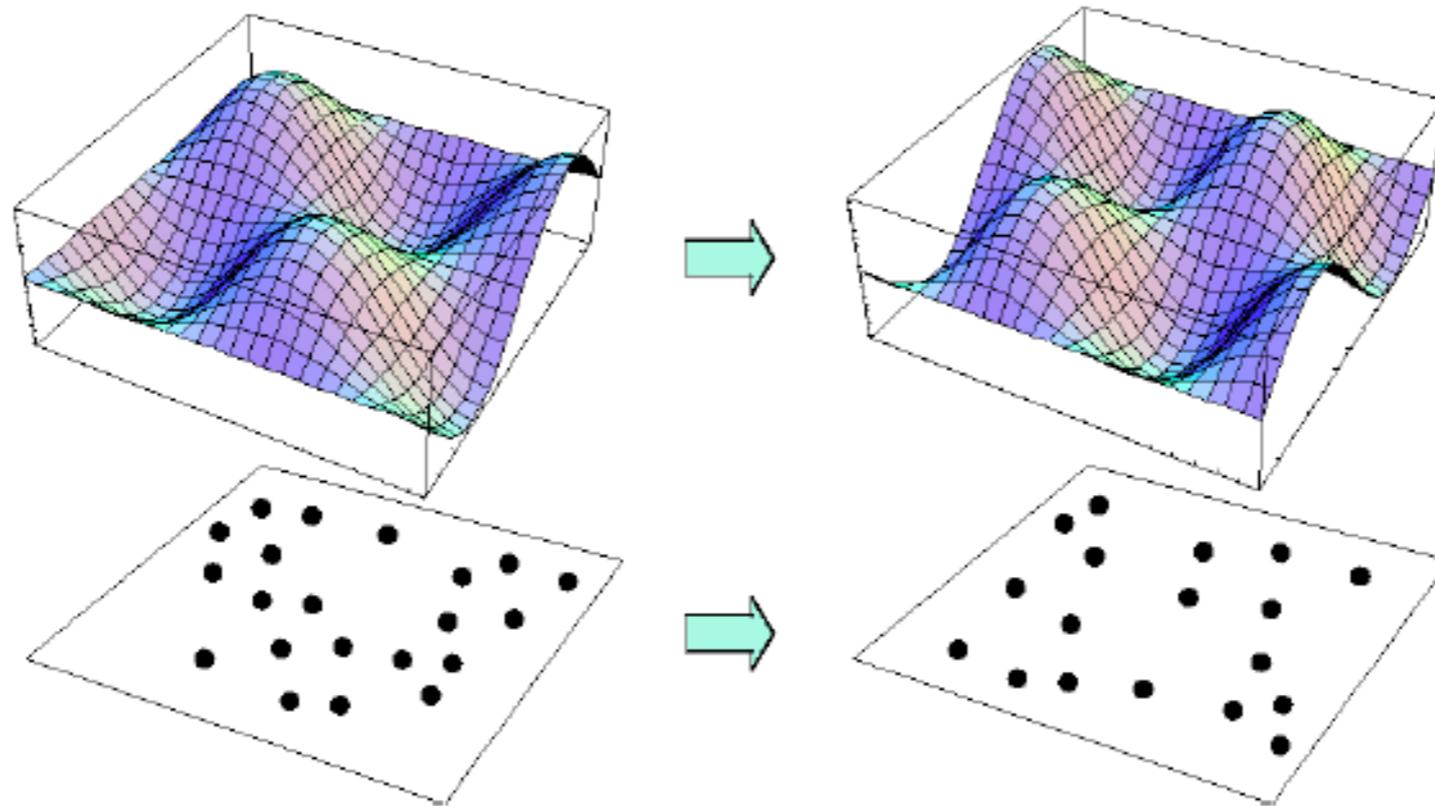
$$J_q(x, t) = -c \boxed{x} q(x, t) - c \sigma^2 \frac{\partial}{\partial x} q(x, t)$$



座標 x の代わりに「**何かの関数**」で置き換え可能

自律分散制御によるクラスタ分割 (2)

ドリフト項の「関数」を適切に設定することができれば、
周囲状況に適応したクラスタ分割が可能になるが..



ドリフト項の「関数」をどのように決定するか？

→ 何らかの大域的な情報が必要？

→ 例えば、ノード数が均等化するような「関数」の与え方等は、局所的な動作だけでは難しい

自律分散制御によるクラスタ分割 (3)

◎ どのような制御を目指すか？

(1) 大域的な情報に基づくドリフト項の「関数」は不要

➡ 人為的なドリフト項の設計をしない

(2) 各ノードはクラスタヘッドのなりやすさの値を持ち、周りの状況に応じて、

❖ 周囲にクラスタヘッド候補がいなければ自分がクラスタヘッドになる

❖ 周囲に候補が多ければ自動的に一つのクラスタにまとまる

人為的なドリフト項を不要とする為の戦略

◎ 局所的な情報でドリフト項を決める為の3戦略

(1) 分布自体を用いることで、ドリフト項の基になるポテンシャルを自律的に生成

➡ 大域情報を用いた人為的なドリフト項の設計をしない

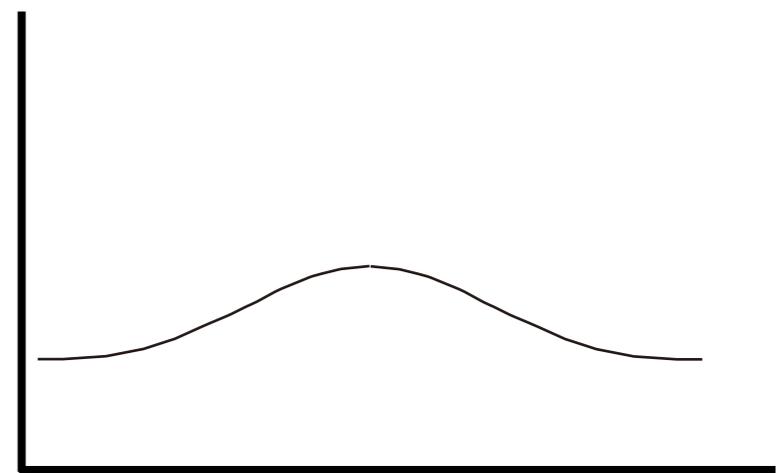
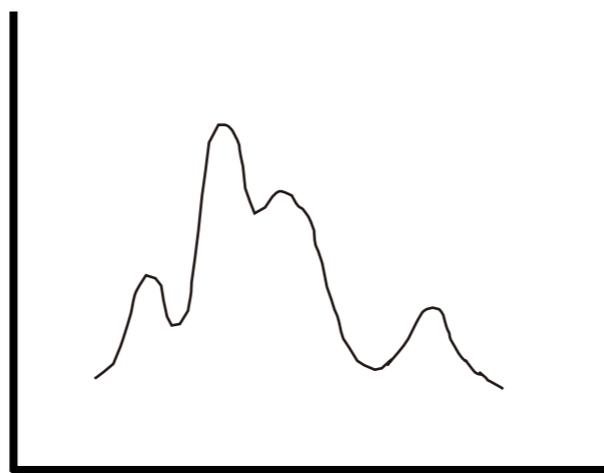
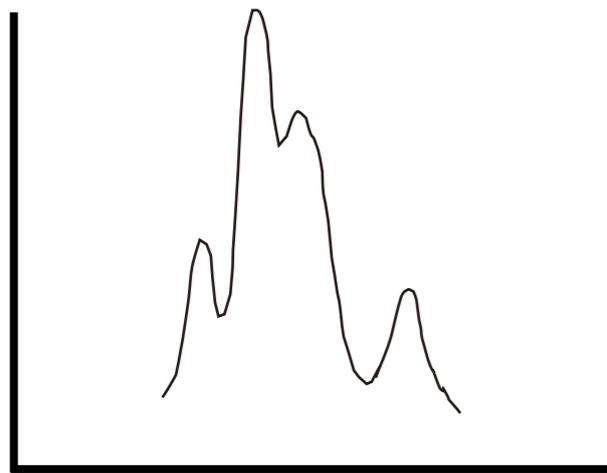
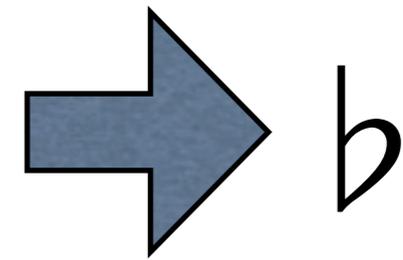
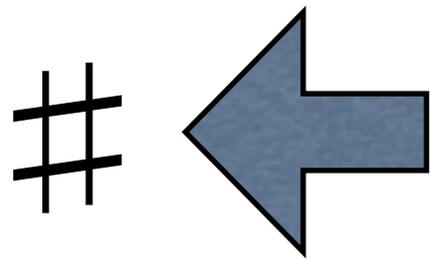
(2) 拡散現象の時間反転した過程（逆拡散）を導入して状況をシャープに

➡ 状態のメリハリをハッキリさせる効果.

(3) 拡散（または逆拡散）の効果と釣り合うような逆方向の作用としてドリフトを導入

➡ 分布自身の情報と周囲状況のみから安定する状況を生成.

逆拡散の意味



➡ 時間の進行方向

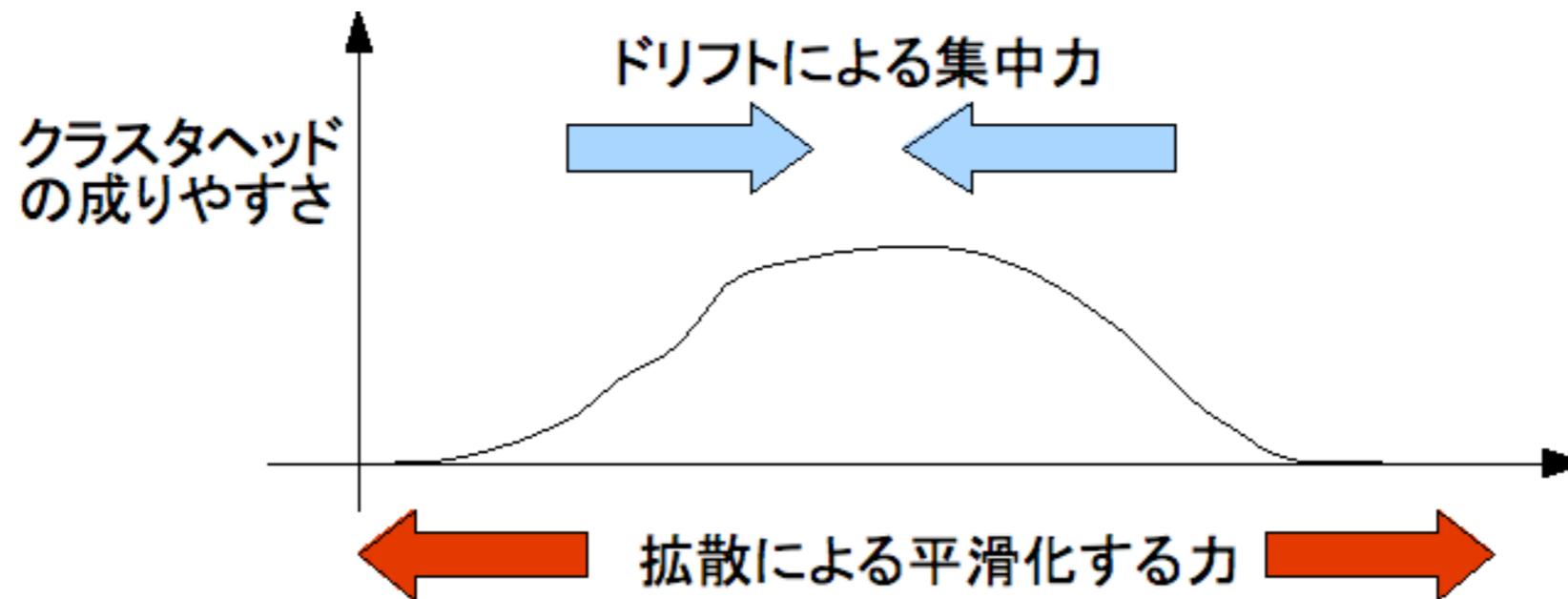
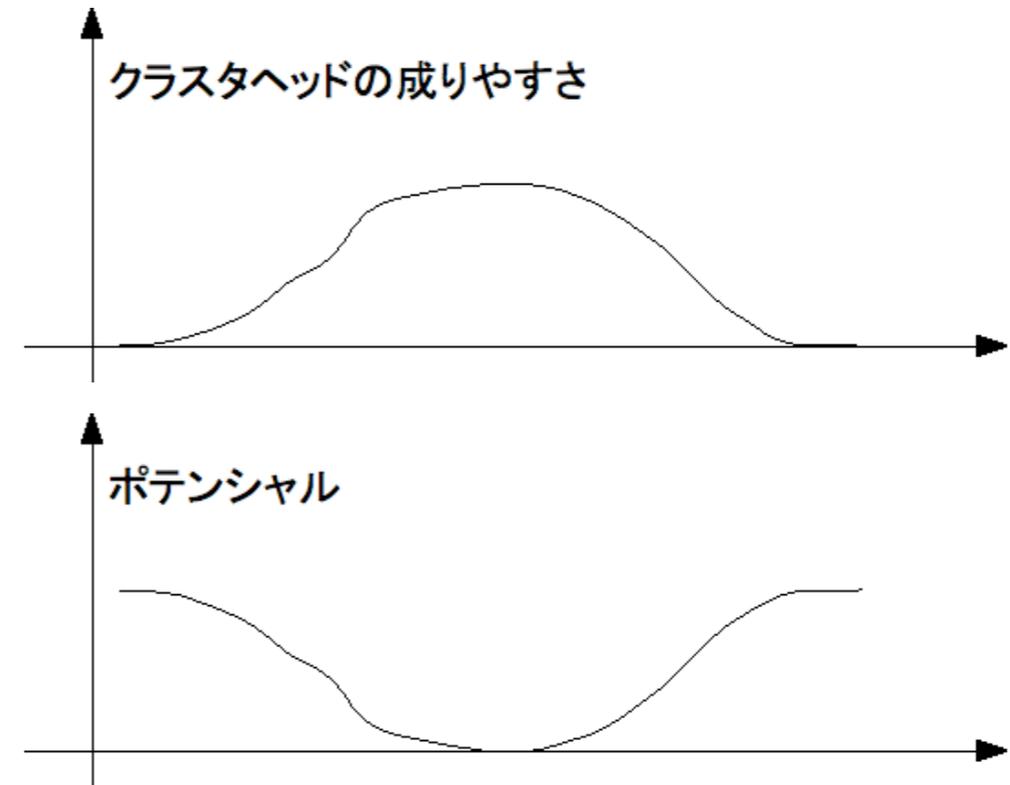
逆拡散 : 拡散係数が負となる過程を考えれば良い.

逆拡散は, 自然界では起こらないエントロピーが減少する現象であるが工学的システムでは実現可.

人為的なドリフト項の設計が要らない制御例（1）

ある分布（クラスタヘッドの成りやすさ分布）

ポテンシャル：その分布を反転したような分布

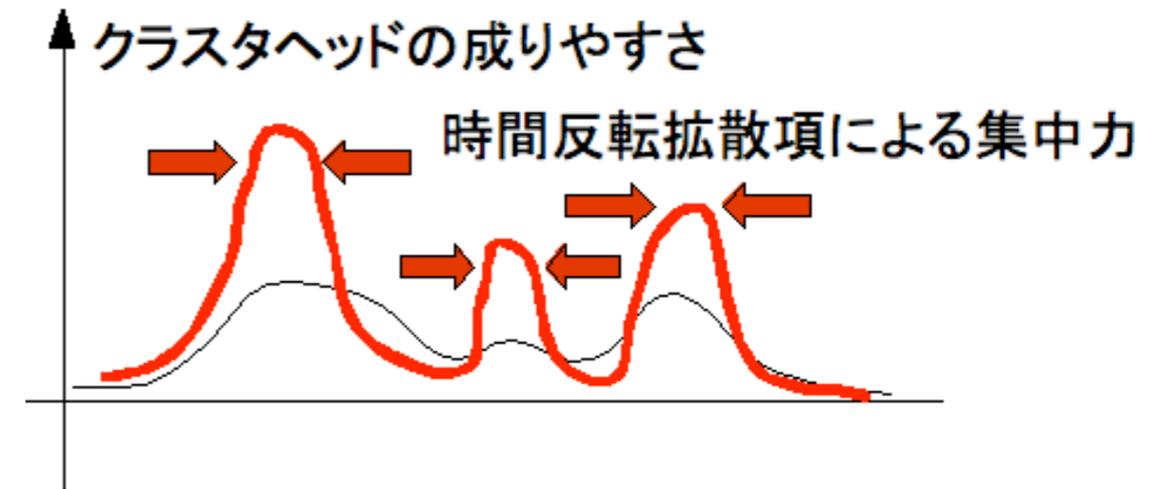


一旦分布のピークが崩れると、元に戻る力が働かない
→ 有限なサイズの分布を維持できない。

人為的なドリフト項の設計が要らない制御例（2）

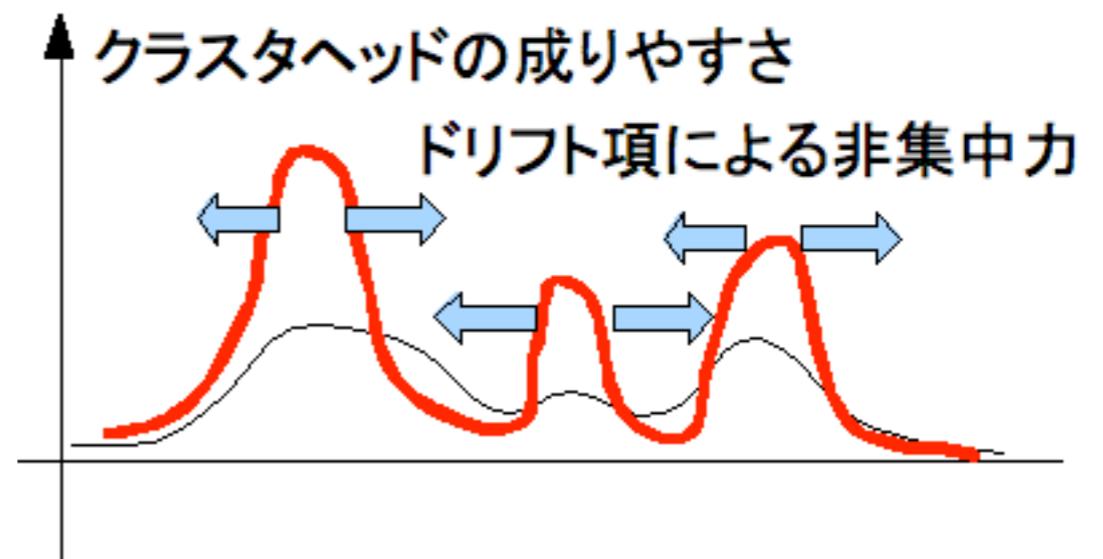
ある分布を「逆拡散」で変化させる。

⇒ 分布のピークにより集まるように動き、ピークが際立つ



ポテンシャル：その分布の形（反転させない）

⇒ ドリフト的には分布のピークから低い方に動きやすい。



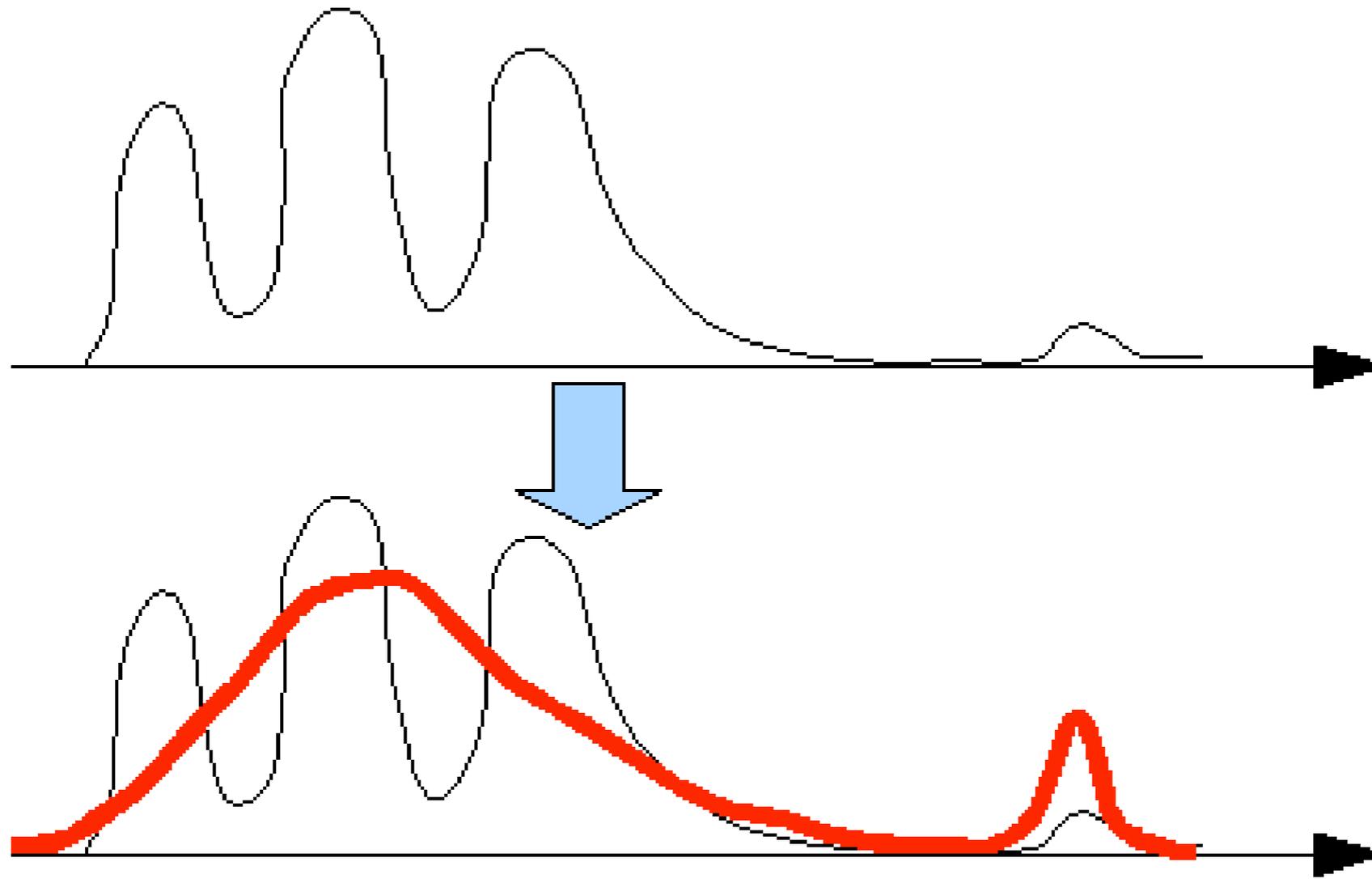
制御例（1）と比較して、拡散項とドリフト項が逆の役割

➡ 分布のピークは際立つが、不安定

自律分散クラスタリング方式

- ◎ 前述の2方式の良いところを組み合わせ
 - 拡散による安定した挙動
 - 逆拡散によるピークの強調
- ◎ 次時刻のポテンシャルの決定：次の時刻のポテンシャルを逆拡散により生成
 - ➡ ピークが強調
 - ➡ クラスタヘッドの候補ノードの強調
- ◎ 次時刻のクラスタの成りやすさ分布の決定：次の時刻の分布を順方向の拡散とポテンシャルによるドリフトにより生成
 - ➡ ポテンシャルにより強調されたピークが拡散により滑らかな挙動

自律分散クラスタリング方式の特徴



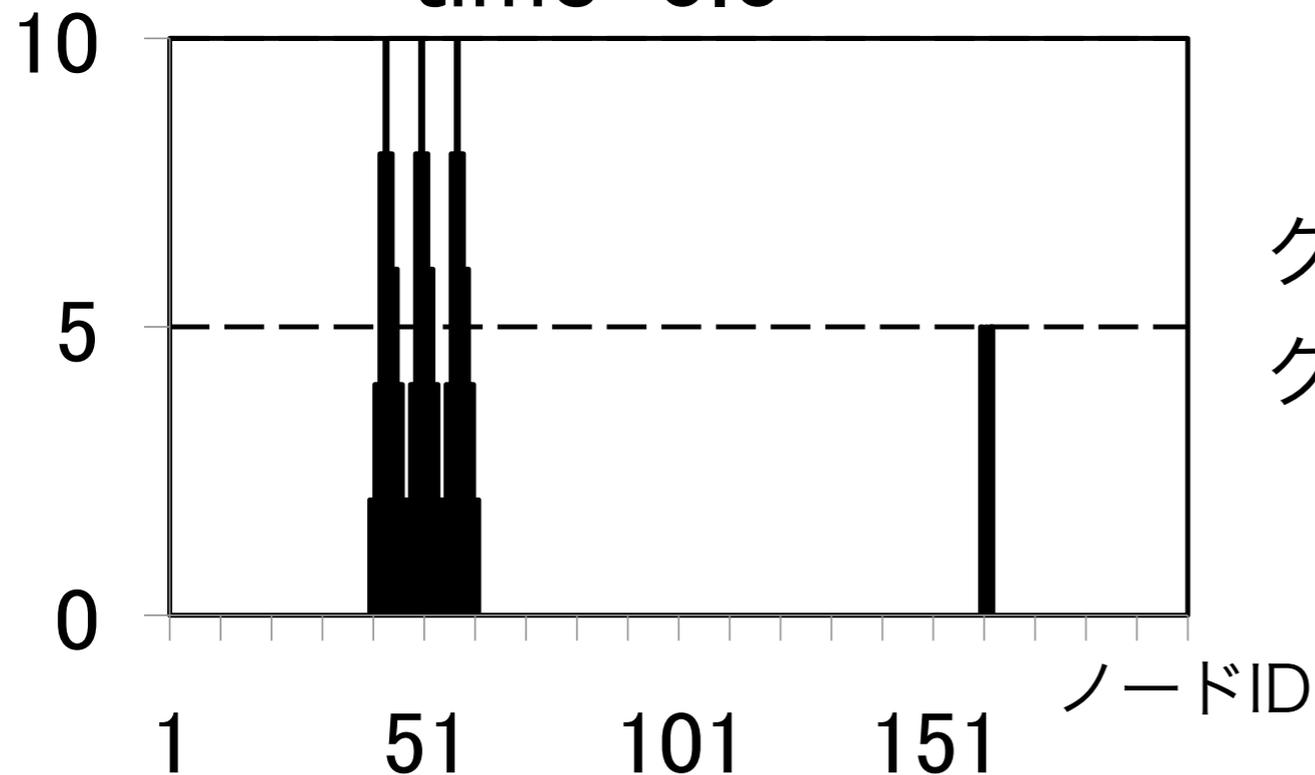
周囲の状況に応じた統合と独立化

周囲状況に合わせた秩序形成の評価 (1)

- 1次元ネットワークモデル (横軸ノード数200)
- ノードは, 何らかの条件で決まるクラスタヘッドのなりやすさの数値をもつ
- クラスタヘッドの成りやすさ分布の初期状態

CHの成りやすさ

time=0.0



クラスタヘッド候補の高い3つの山
クラスタヘッド候補の小さい1つの山

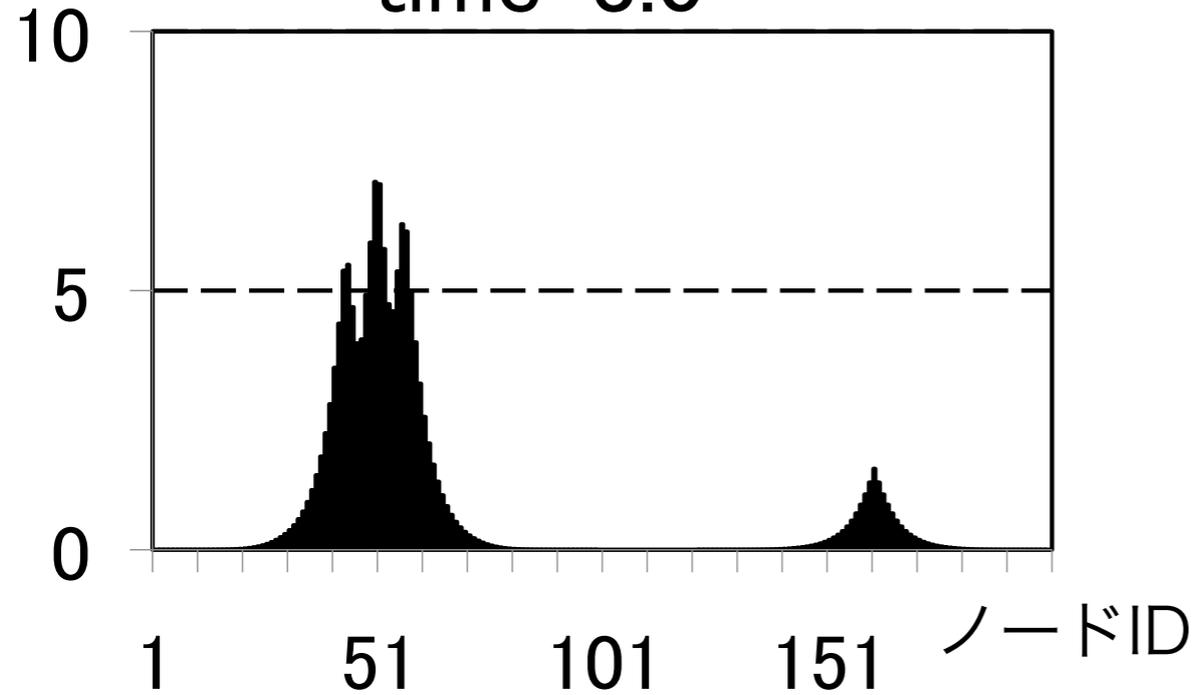
提案方式により, 周囲の状況に応じたクラスタヘッド候補の統合,
独立化が起きるか?

周囲状況に合わせた秩序形成の評価 (2)

- ポテンシャル決定時の拡散係数が $\sigma=0.05$ の場合

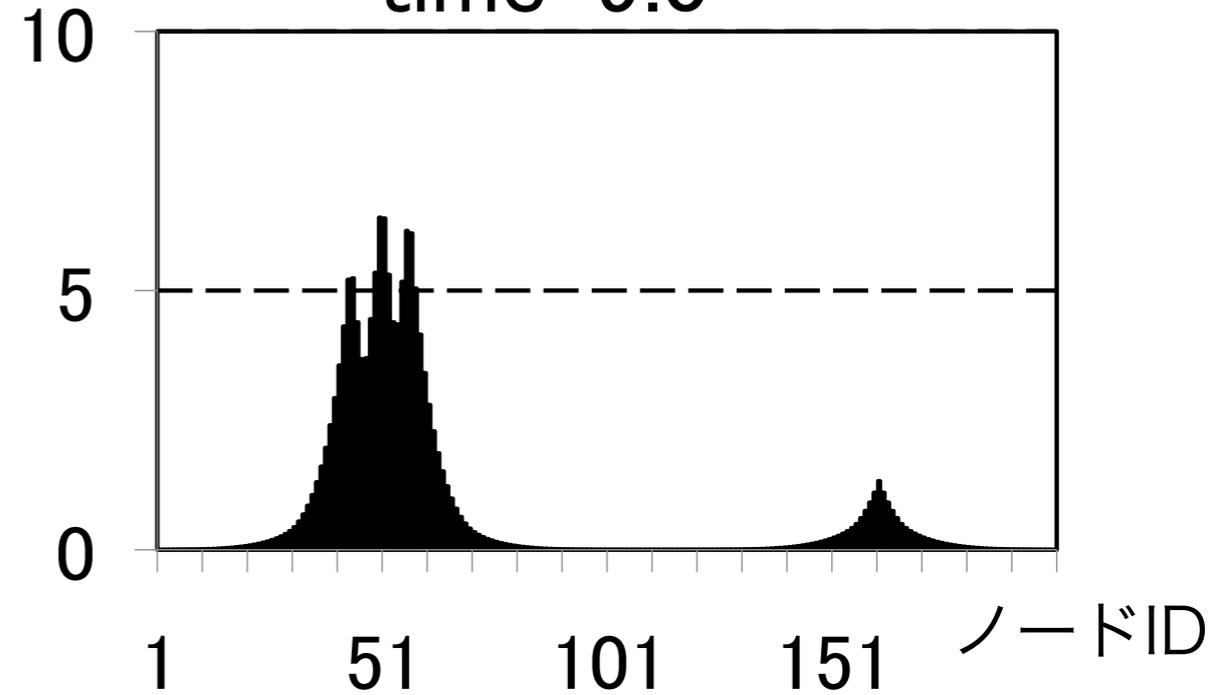
CHの成りやすさ

time=3.0



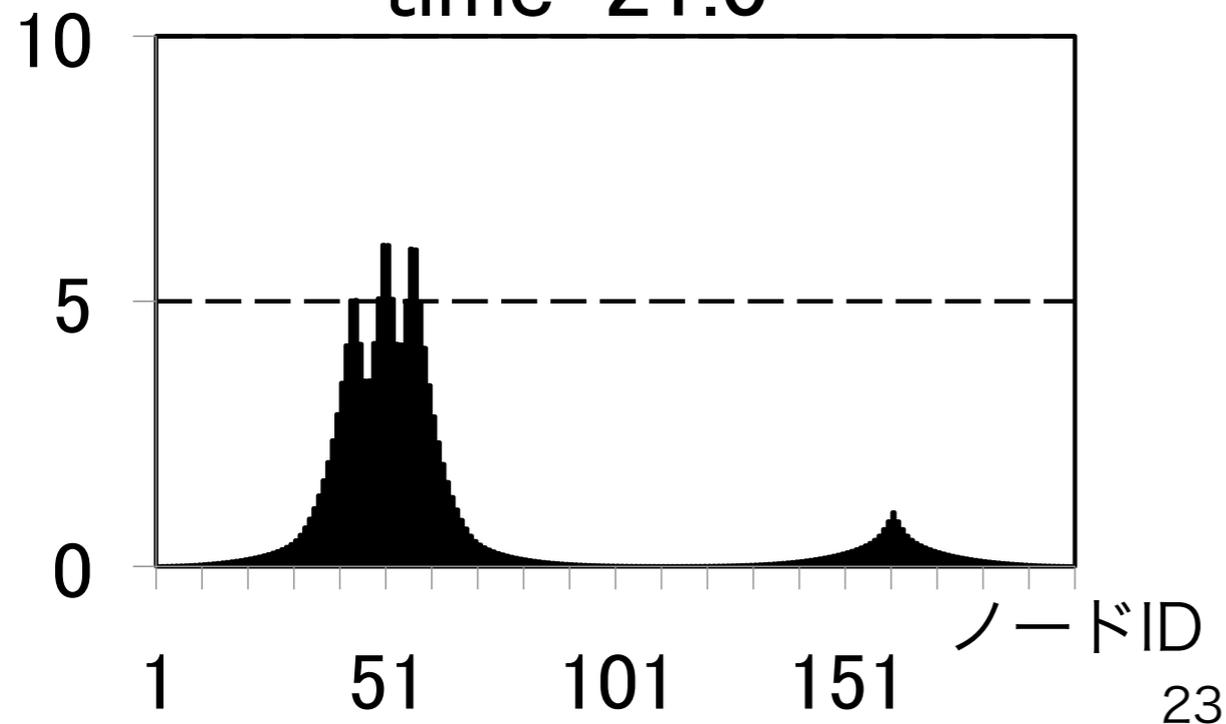
CHの成りやすさ

time=9.0



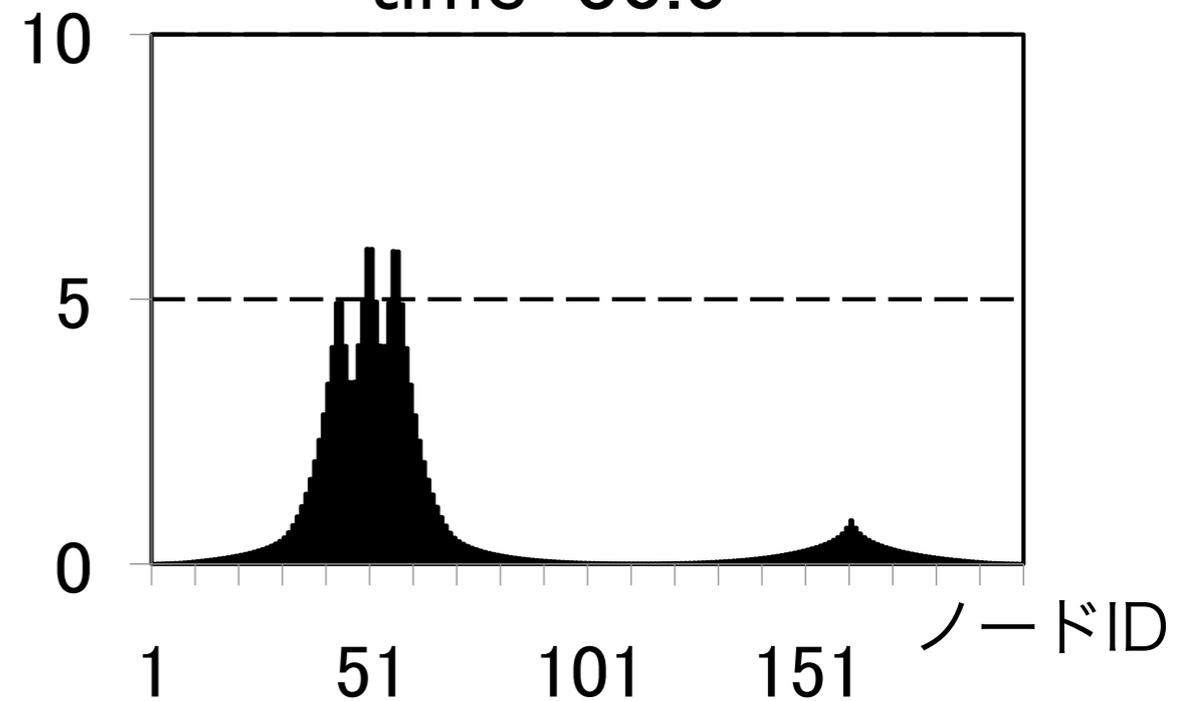
CHの成りやすさ

time=21.0



CHの成りやすさ

time=30.0



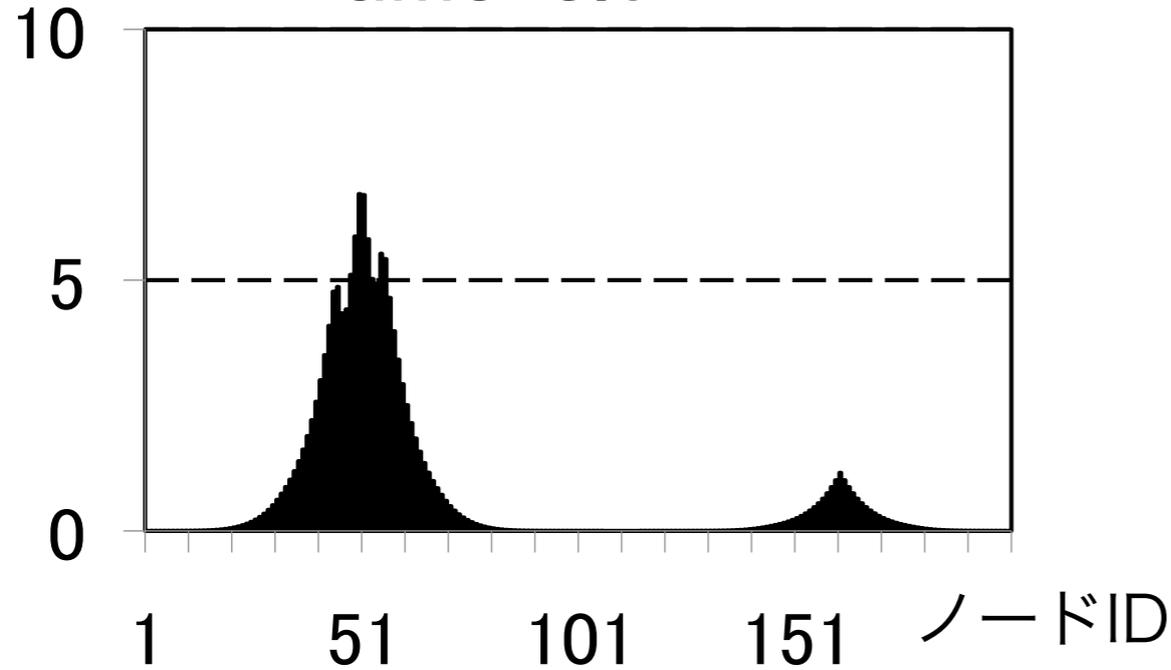
23

周囲状況に合わせた秩序形成の評価 (3)

- ポテンシャル決定時の拡散係数が $\sigma=0.07$ の場合

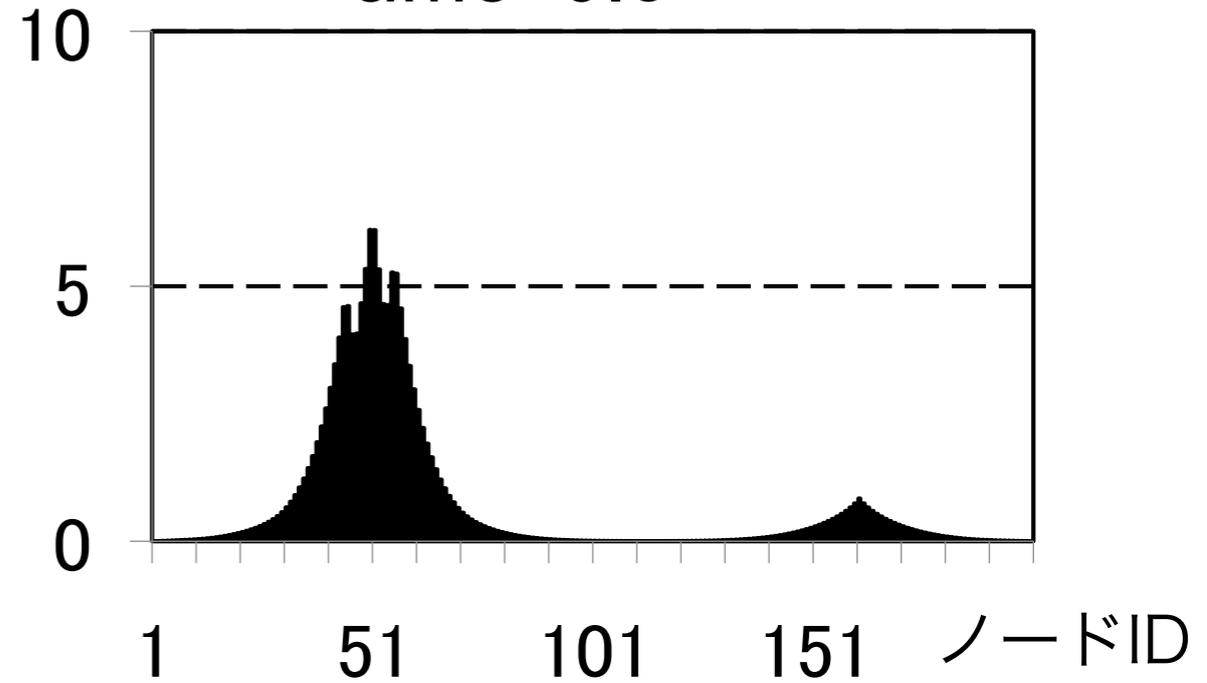
CHの成りやすさ

time=3.0



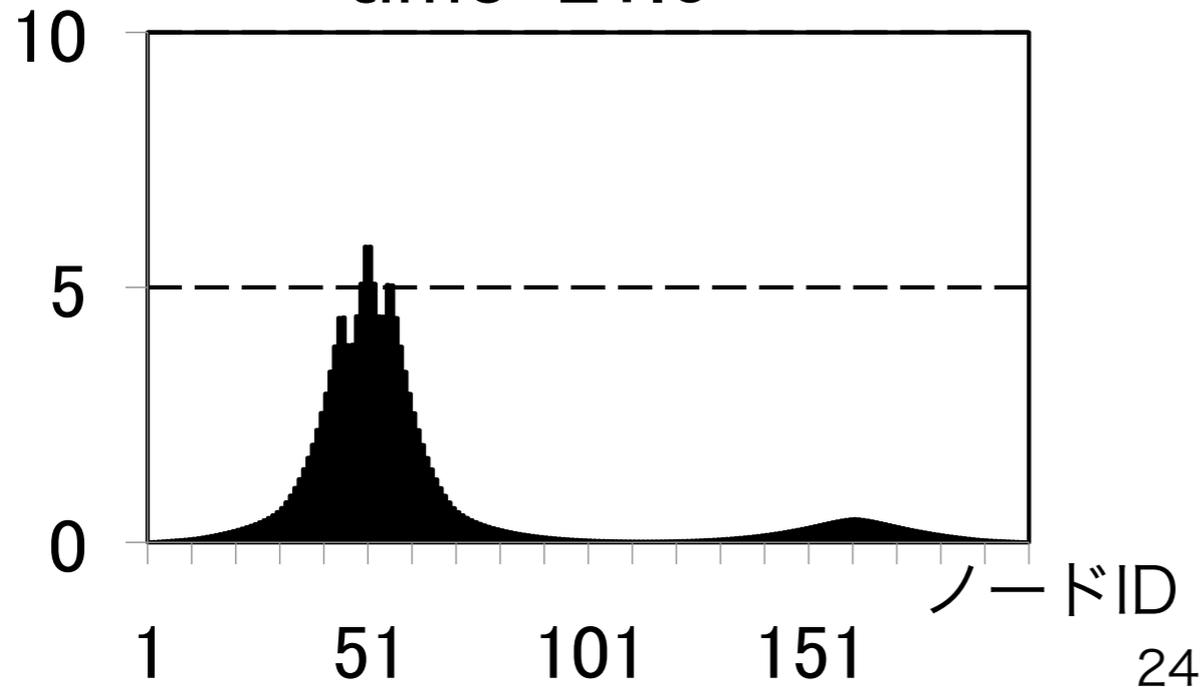
CHの成りやすさ

time=9.0



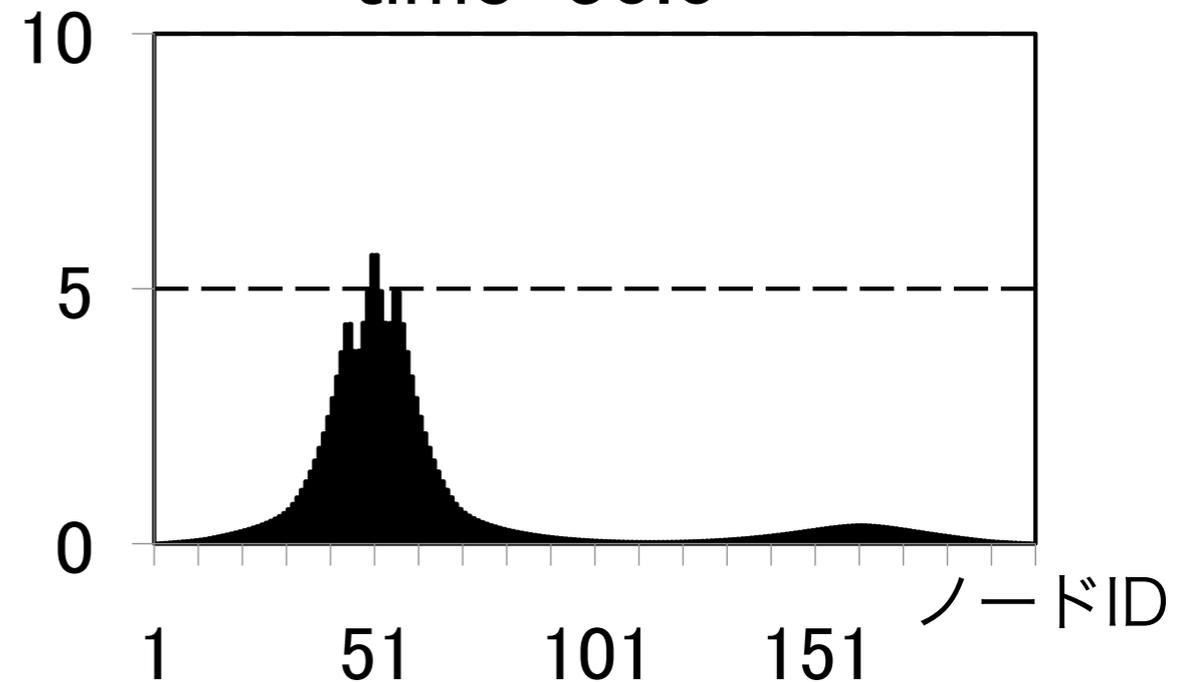
CHの成りやすさ

time=21.0



CHの成りやすさ

time=30.0



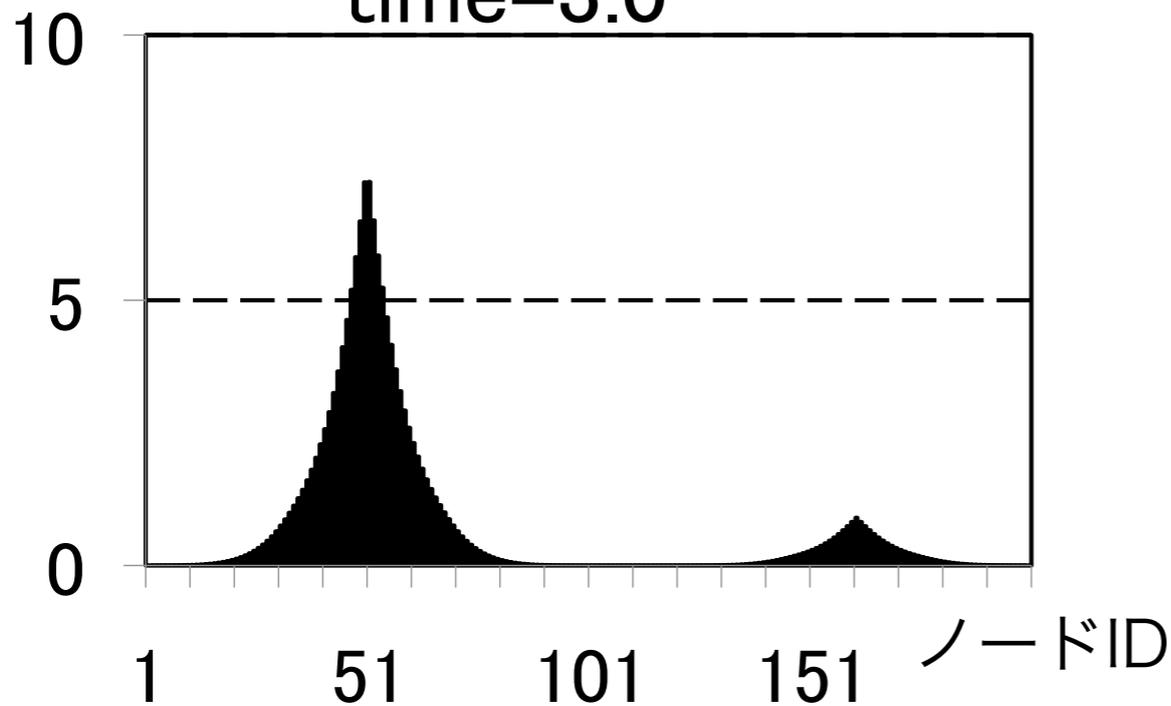
24

周囲状況に合わせた秩序形成の評価 (4)

- ポテンシャル決定時の拡散係数が $\sigma=0.09$ の場合

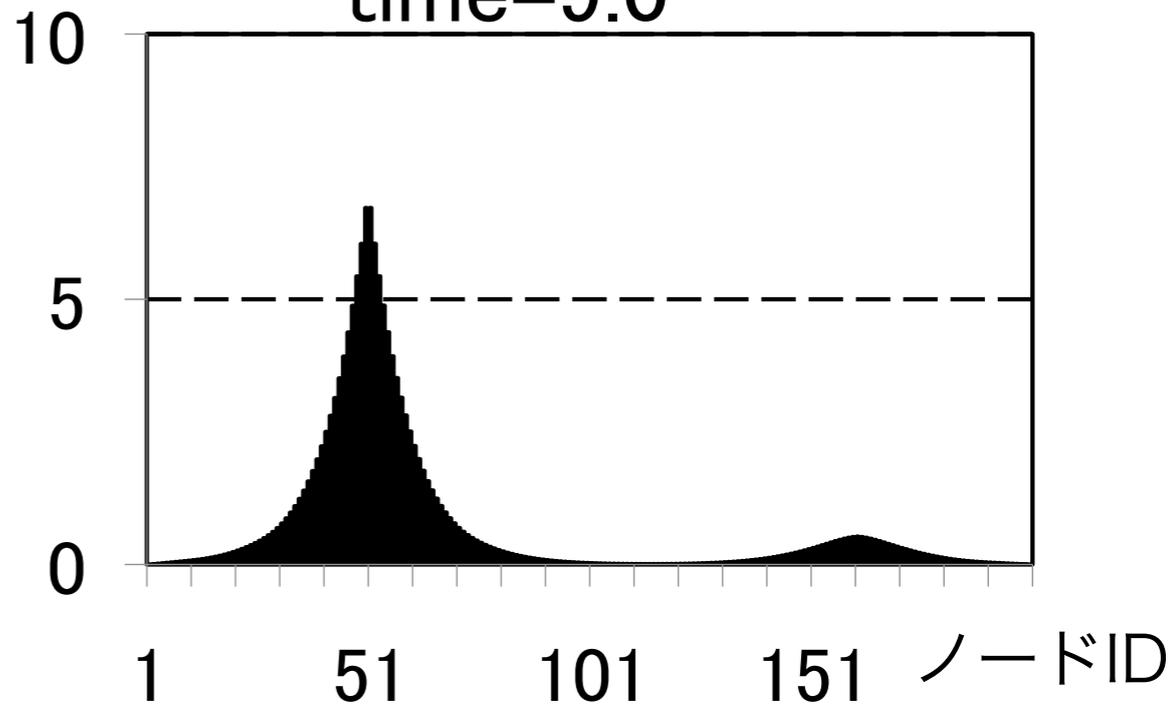
CHの成りやすさ

time=3.0



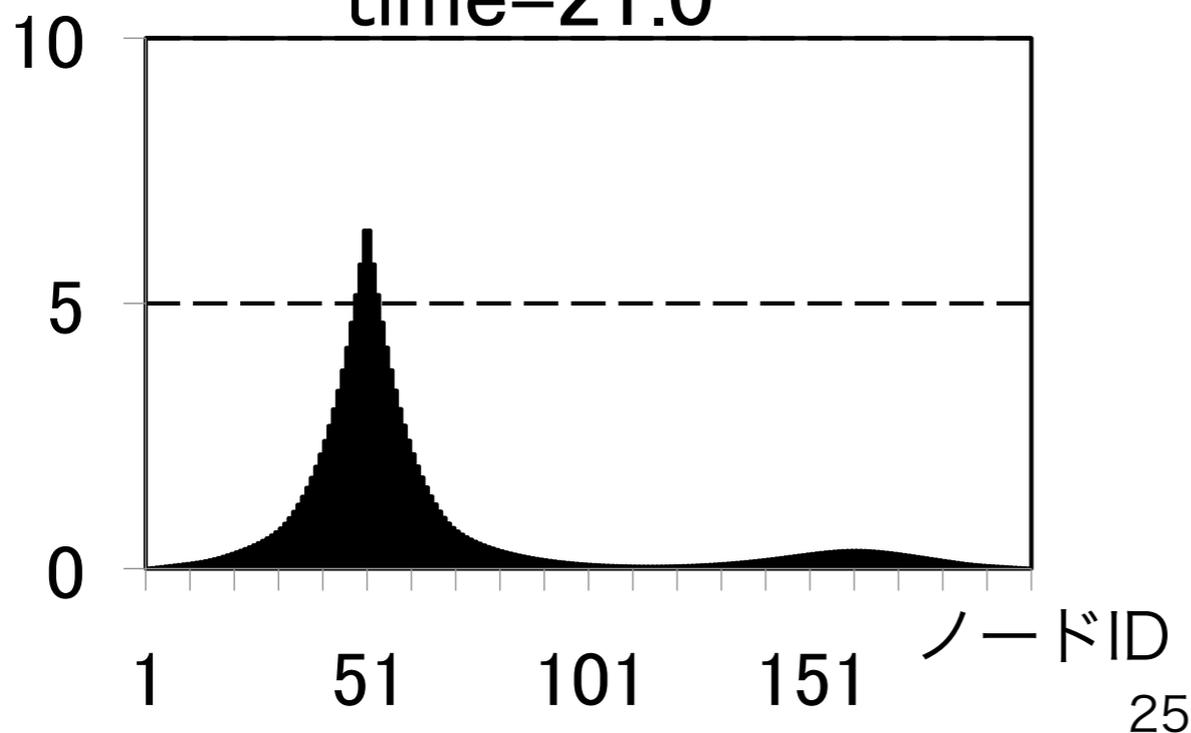
CHの成りやすさ

time=9.0



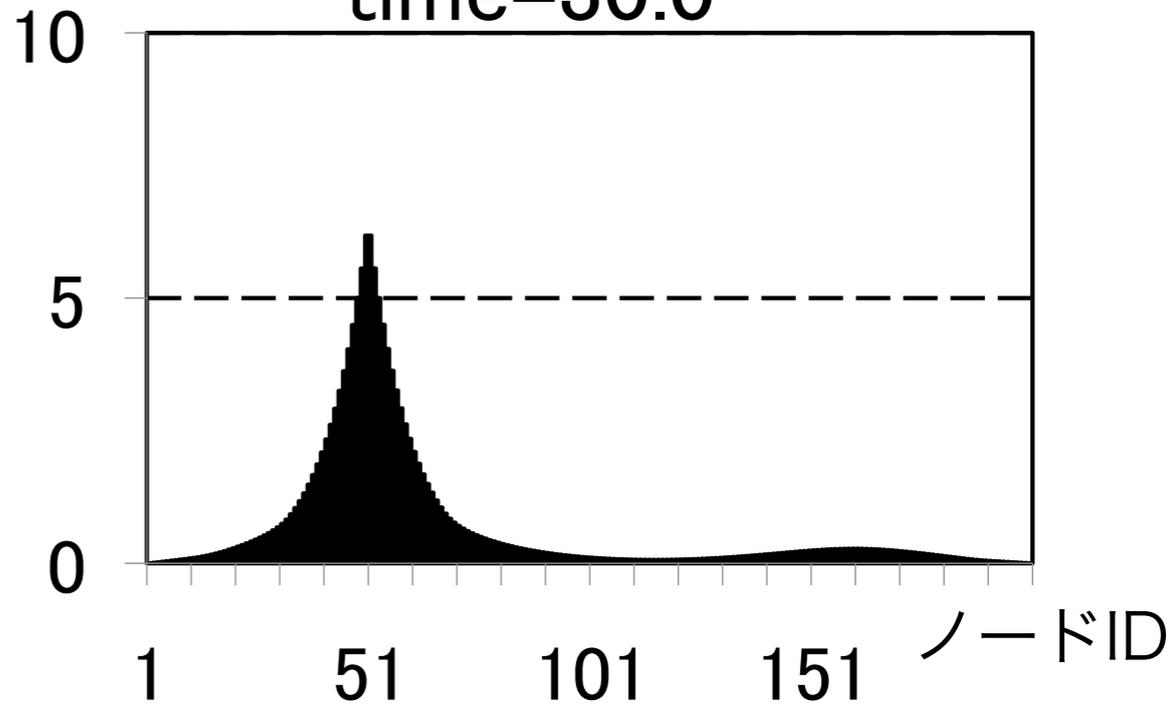
CHの成りやすさ

time=21.0



CHの成りやすさ

time=30.0



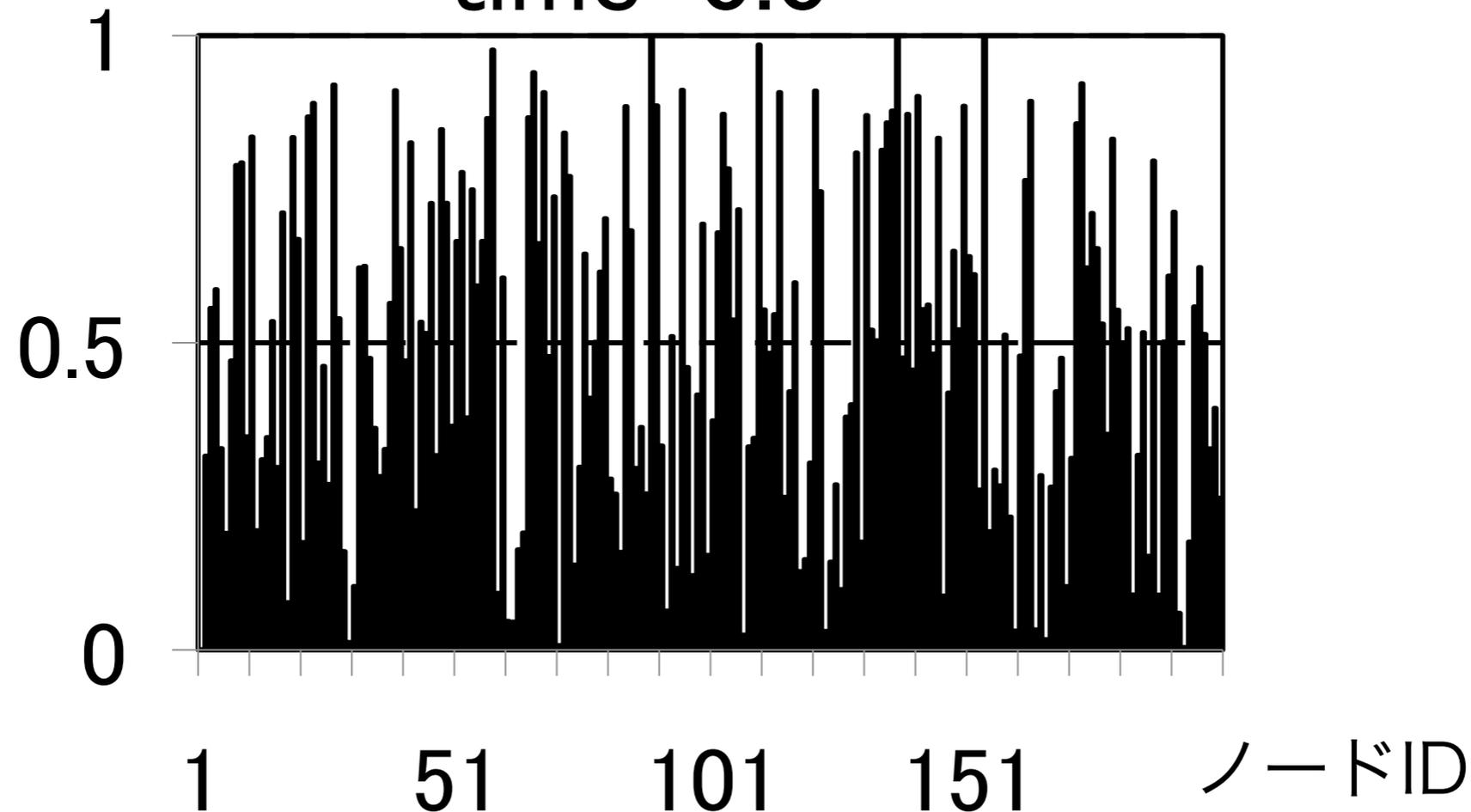
25

構造の無い状態からの秩序形成 (1)

- クラスタヘッドの成りやすさ分布の初期状態を変更
- 各ノードのクラスタヘッドの成りやすさは0~1範囲の一様乱数

CHの成りやすさ

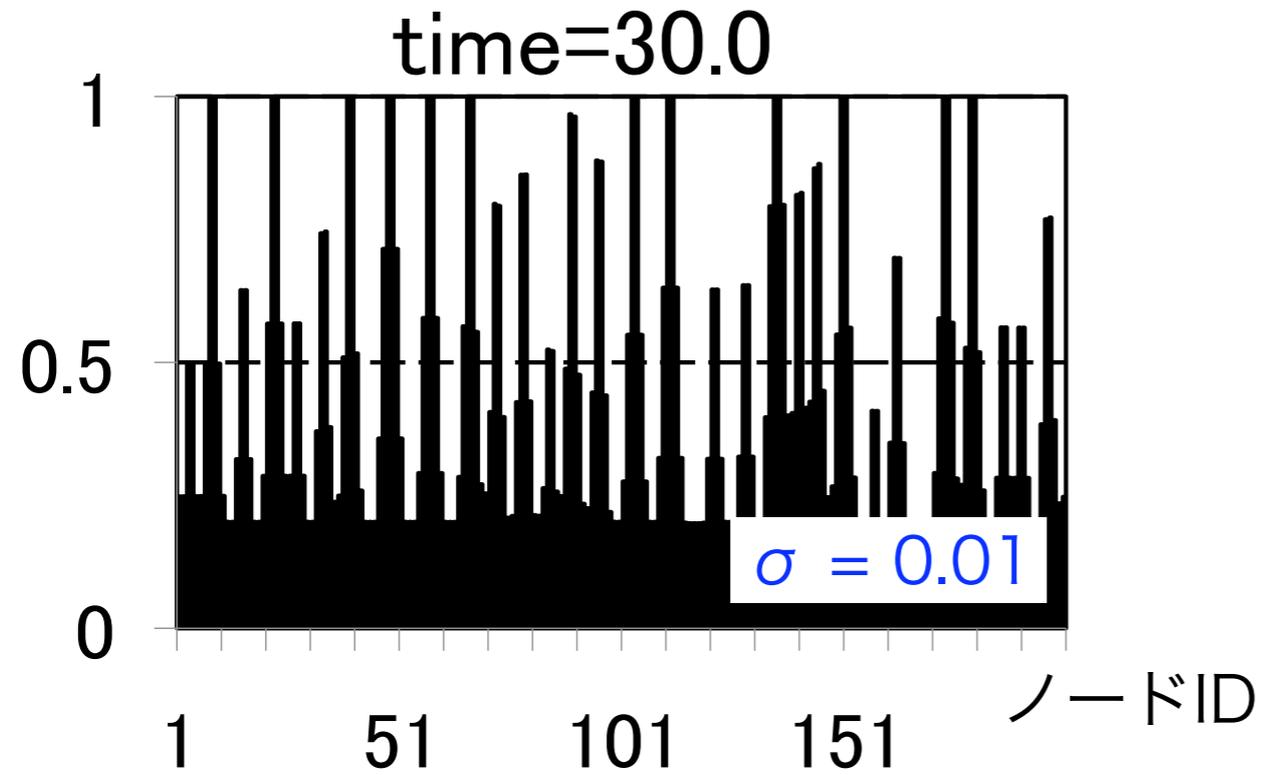
time=0.0



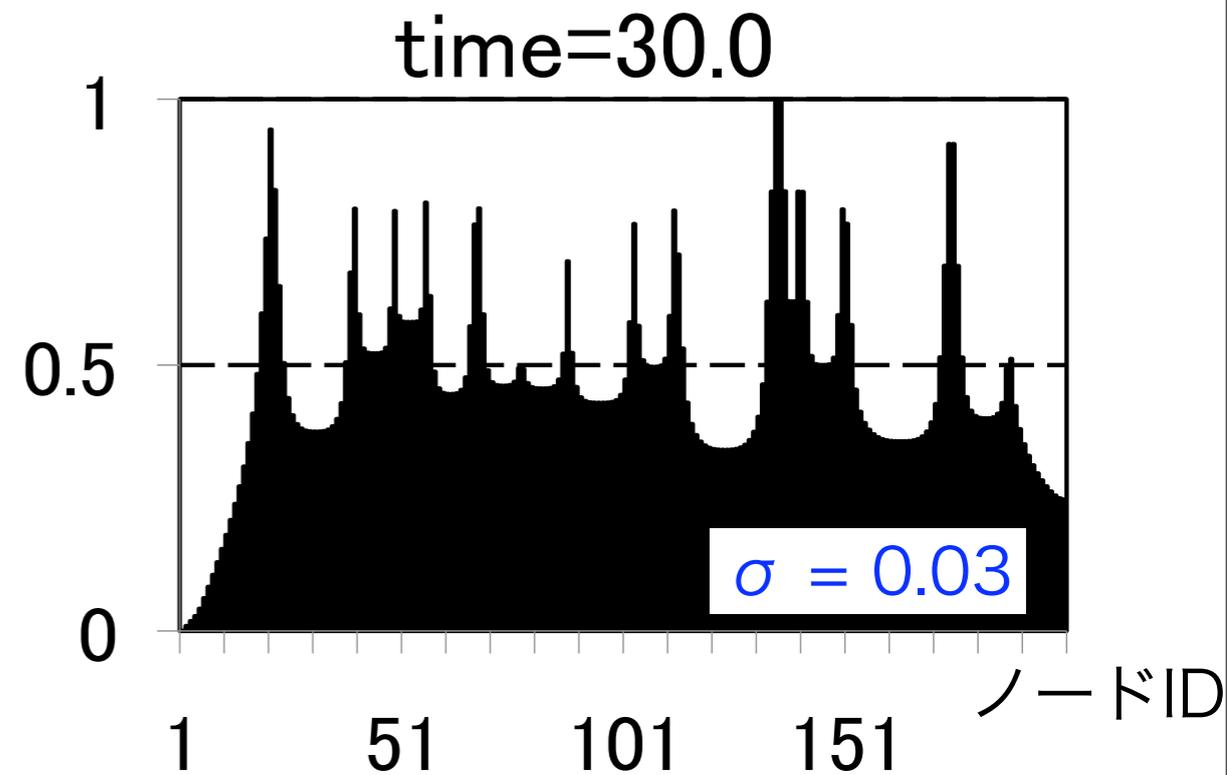
ポテンシャル決定時の拡散係数 σ の値の違いによって分布はどのように変化するか？

構造の無い状態からの秩序形成 (2)

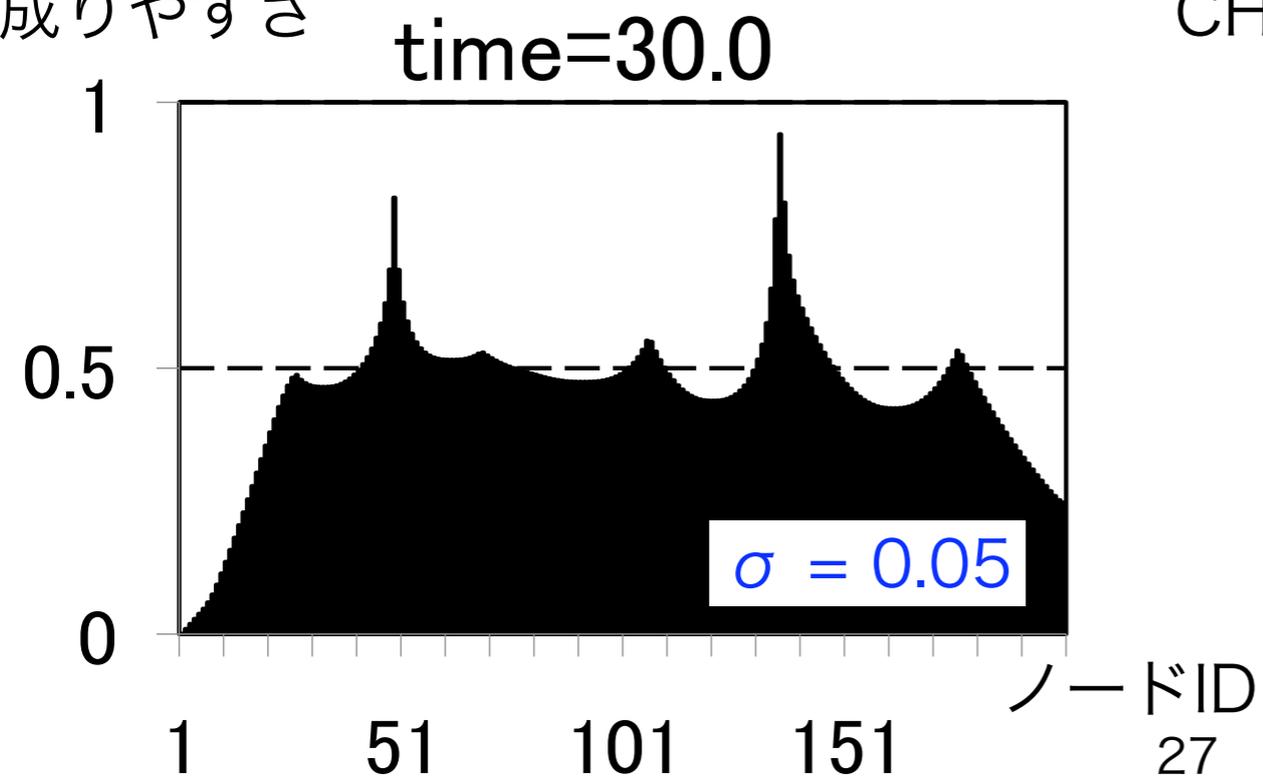
CHの成りやすさ



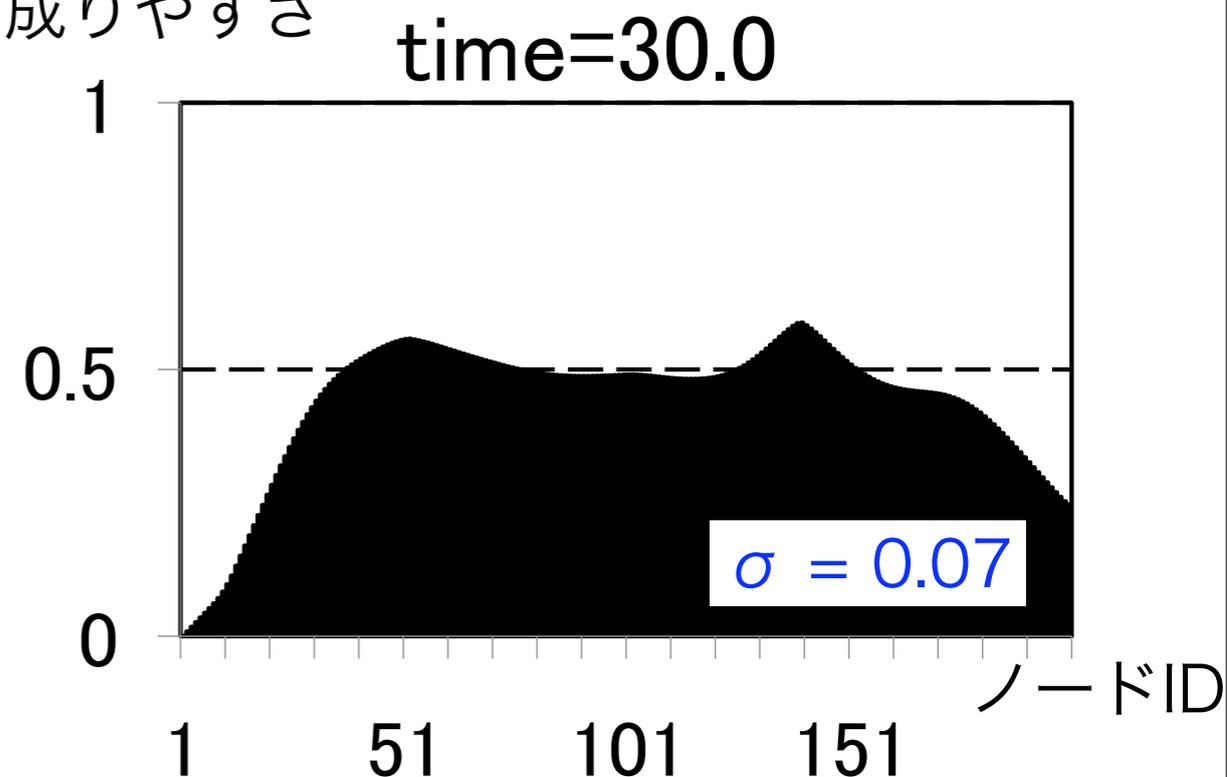
CHの成りやすさ



CHの成りやすさ



CHの成りやすさ



まとめ

- アドホックネットワークにおける自律分散クラスタリング方式を提案
 - ネットワーク全体の情報を知っている特別なノードは存在せず、各端末の自律的動作によりクラスタリングが実現
 - 隣接にクラスタヘッドの候補が無い場合：その端末自身がクラスタヘッド
 - 隣接にクラスタヘッド候補がたくさんいる場合：その中からメトリックに見合った端末がクラスタヘッド
- ネットワークのわずかな状態の変化を増幅しつつ、最終的には、拡散係数で決定する緩やかなの構造を実現できる。

謝辞

本研究の一部は、科研費若手(B)(21700086)および総務省戦略的情報通信研究開発制度(SCOPE)地域ICT振興型研究開発型研究開発の助成を受け、実施したものです。

参考文献

- [1] Masaki Aida and Chisa Takano, “Principle of autonomous decentralized flow control and layered structure of network control with respect to time scales,” Supplement of the The Sixth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS2003), pp. 3-4, Pisa, Italy, April, 2003.
- [2] 高野, 会田, “物理の近接作用に学ぶ：拡散現象を指導原理とした自律分散型フロー制御技術,” 電子情報通信学会誌, 91(10), pp. 875–880, Oct. 2008.
- [3] 高野知佐, “拡散現象を指導原理とする自律分散フロー制御機構の研究,” 首都大学東京大学院システムデザイン研究科, 2008, 126p, 博士学位論文.
- [4] 会田 雅樹, 高野 知佐, 村田 正幸, 今瀬 真, “くりこみ変換を利用した新しい自律分散制御の考察,” 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-12-2, 2009.