

# マルチパス制御を題材とした熱力学の観点からの自己組織型ネットワーク制御の解釈

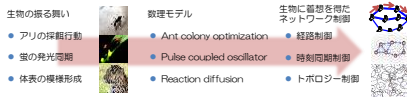
大阪大学 大学院情報科学研究科<sup>1</sup>  
 大阪大学 大学院経済学研究科<sup>2</sup>  
 岩井卓也<sup>1</sup>, 小南大智<sup>2</sup>, 村田正幸<sup>1</sup>, 四方哲也<sup>1</sup>

## 発表の流れ

- 研究の背景
  - 頑健に優れた通信ネットワークの実現
  - 自己組織型ネットワーク制御への期待
  - 秩序化, 乱雑化エネルギーの量の設計
- 研究の内容
  - 熱力学の知見に基づいた設計方針を検討
  - 熱力学の観点から自己組織型制御を解釈
- 数値例の紹介
- 発表のまとめ
- 今後の予定

## 背景：頑健な通信ネットワークの実現

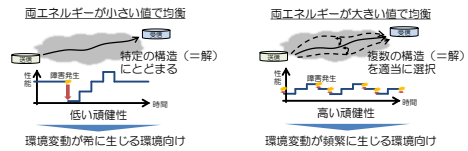
- 今まで以上に頑健性に優れた通信ネットワークが必要
  - ノードやリンクなどの故障への耐性
  - トラフィックなどの変動への耐性
- 生物に学ぶ自己組織型ネットワーク (SON) 制御に期待
  - ノード間相互作用により構造 (例: 経路表) を創発
  - 多くの研究成果により有効性を確認済み<sup>[1]</sup>



[1] C. Zheng and D. Sicker, "A survey on biologically inspired algorithms for computer networking," IEEE Communications Surveys Tutorials, pp. 1-32, Jan. 2013.

## 背景：SON 制御のエネルギーと頑健性

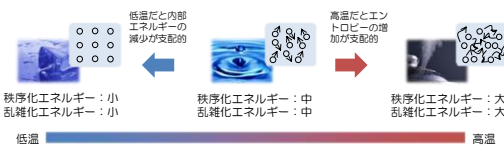
- 秩序化, 乱雑化エネルギーが SON 制御の振る舞いに影響
  - 秩序化エネルギー: 構造の変わり易さ
  - 乱雑化エネルギー: 構造のランダムさ
 } 安定時の SON 制御の両エネルギーは均衡
- 安定時の両エネルギーの量は SON 制御の頑健性に影響



SON 制御の環境や要求に基づいて, 両エネルギー量を設計するべきしかし, 両エネルギーの区別や設計の仕方については未検討

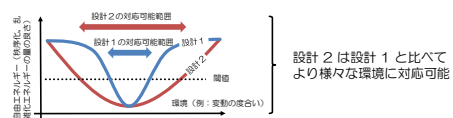
## 方針：熱力学の考え方に着想を得る

- エネルギーの区別の仕方: 熱力学の観点から解釈を与える
  - 乱雑化エネルギー  $\propto$  温度 ( $T$ )  $\times$  エントロピー ( $S$ )
  - 秩序化エネルギー  $\propto$  内部エネルギー ( $E$ ) ※詳細は後述
- エネルギーの量の設計の仕方: 物質の熱力学的な安定化に基づく
  - 等温過程の時, 温度に応じて自由エネルギーが自発的に減少
  - 自由エネルギーの変化を説明する式  $\Delta A = \Delta E - T\Delta S$



## 目的：熱力学の観点から SON 制御を解釈

- 様々な環境 (例: 変動の度合い) に対して安定時の SON 制御の自由 EG が小さくなる様に設計することが頑健性の向上に繋がる

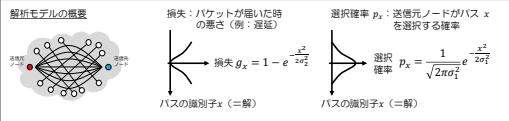


- ただ, 熱力学状態量 (自由 EG 等) と SON 制御の対応は不明

研究の目的 熱力学の観点から SON 制御を解釈して熱力学の状態量を定式化する

題材とする SON 制御：マルチパス制御

- マルチパス制御の概要
  - 送信元、送信先ノードとの間に事前に複数のパスを構築
  - 送信元ノードはパケットを送る毎にパスを確率的に選択
- 分析モデルの仮定
  - 送信元、送信先ノード間には無限本のパスを構築
  - 損失の低いパスを高確率で選ぶように自己組織化
  - パスの損失、選択確率はガウス関数で与える



熱力学的状態量の定義：自由エネルギー

- 自然界の物質の自由エネルギー
  - 熱等で取り出せる余剰なエネルギー
  - 物質の熱力学的な安定度合いと関係
  - 安定しているほど小さい値
- マルチパス制御の自由エネルギー
  - 秩序化、乱雑化エネルギーの差
  - エネルギーの環境適合度合いと関係
  - 環境に適合しているほど小さい値

物質の（ヘルムホルツの）自由エネルギー

$$A = E - TS$$

A: 自由 EG S: エントロピー  
E: 内部 EG T: 温度

マルチパス制御の自由エネルギー

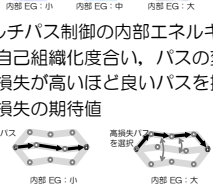
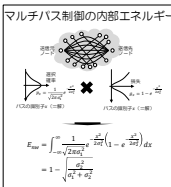
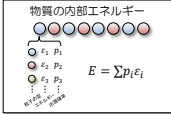
$$A_{NW} = E_{NW} - T_{NW} S_{NW}$$

$A_{NW}$ : 自由 EG  $S_{NW}$ : エントロピー  
 $E_{NW}$ : 内部 EG  $T_{NW}$ : 温度

以降では残りの熱力学的状態量を順に解釈、定式化

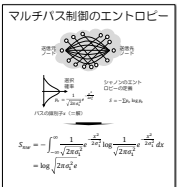
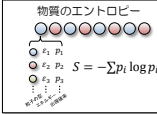
熱力学的状態量の定義：内部エネルギー

- 自然界の物質の内部エネルギー
  - 運動、結合エネルギーの和
  - 内部構造の変わりやすさ
  - 粒子のエネルギーの平均
- マルチパス制御の内部エネルギー
  - 自己組織化度合い、パスの変わり易さ
  - 損失が高いほど良いパスを探索
  - 損失の期待値



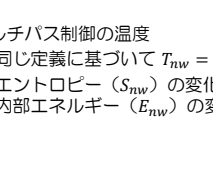
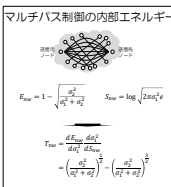
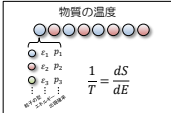
熱力学的状態量の定義：エントロピー

- 自然界の物質のエントロピー
  - 粒子のエネルギー分布の乱雑さ
- マルチパス制御のエントロピー
  - 送信元ノードがパスを選ぶ際のランダムさ



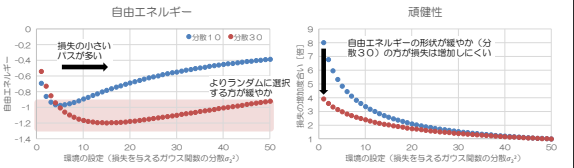
熱力学的状態量の定義：温度

- 自然界の物質の温度
  - 統計力学の温度の定義  $T = dE/dS$
  - エントロピー (S) の変化に対する、内部エネルギー (E) の変化度合い
- マルチパス制御の温度
  - 同じ定義に基づいて  $T_{NW} = dE_{NW}/dS_{NW}$
  - エントロピー ( $S_{NW}$ ) の変化に対する、内部エネルギー ( $E_{NW}$ ) の変化度合い



数値例：自由 EG の形状と頑健性の関係

- 制御の設定：パスの選択確率のガウス関数の分散  $\sigma_1^2$  を 10, 30
  - 分散  $\sigma_1^2$  が大きいほどよりランダムにパスを選択
- 環境の設定：パスの損失のガウス関数の分散  $\sigma_2^2$  を 1~50
  - 分散  $\sigma_2^2$  が大きいほど低損失のパスが多く存在



自由エネルギーの形状を緩やかに設計すると「広範囲の環境の設定に対応可能にする」つまり「頑健にする」ことにつながる

## まとめと今後の課題

- まとめ
  - SON 制御の秩序化および乱雑化エネルギーの量の設計
  - 自由エネルギーに基づいて両エネルギーの量を決定
  - 数値例によって頑健性の向上が可能である事を確認
- 今後の課題
  - 環境の変動を考慮した解析モデルに拡張
  - 既存手法の各種変数との対応関係を整理
  - シミュレーションで頑健性の向上を確認

ご清聴ありがとうございました。