

ネットワークの堅牢性と効率性を保証する
グラフ理論的条件に関する研究
—スマート農業における局所観測網モデルへの応用—

木村 健司

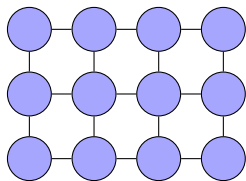
石巻専修大学 理工学部 情報電子工学科

一般財団法人 石田實記念財団 研究奨励賞発表会
2025年11月7日

観測方式の考え方：全体観測と局所観測

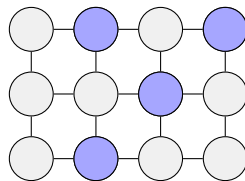
全体観測（全センサ稼働）

- すべてのセンサを常時稼働させる方式。
- 高精度な観測が可能だが、電力消費や通信負荷が大きい。
- スマート農業などでは、この方式は長期運用に不向きとされる (Jawad et al. 2017)。



局所観測（必要最小限の稼働）

- 一部の代表的なセンサだけを稼働させ、近くの観測を補完。
- センサを交代で動かすことで、電力を節約しながら観測を維持。
- スマート農業では、省電力かつ持続的な観測を実現する設計として注目されている (Jawad et al. 2017)。



■ 稼働センサ
■ 非稼働センサ

- 全体観測は高精度だが高コスト。
- 局所観測は、一部のセンサを協調的に動かすことで、**省電力と安定した観測の両立**を目指す考え方である。

研究の目的とアプローチ

研究の目的

- センサネットワークにおける局所的安定構造を数理的に定義・解析する。
- 特にスマート農業のような環境観測において、限られた電力・通信資源で安定的な観測を維持するための理論的基盤を構築する。

研究のアプローチ

- センサ間の通信関係を**グラフ構造**としてモデル化。
- 各ノード（センサ）の性能や電力量を重みとして扱い、局所的な観測維持条件を導く。
- 得られた条件を満たす構造を、**安定的かつ省電力な観測網設計**へ応用。

農業分野での具体的課題

- 農地全体を常時観測するのは高コスト。
- 一部のセンサが停止しても観測を維持できるようにしたい。
- 土壌水分や温度などを長期的に観測しながら、**電力・通信負荷を抑える仕組み**が求められている。

この研究では、スマート農業における省電力かつ安定した観測網の理論的基盤を構築することを目的とする。

局所観測網のモデル化

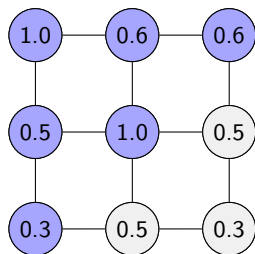
考え方

- センサネットワークでは、一部のセンサだけを稼働させても観測が維持できる場合がある。
- 稼働センサ（青）は、その近傍にある停止センサ（灰）の役割を一部補完し、局所的な観測網を安定させる。
- 稼働センサに隣接するセンサ群に対して、稼働センサ群の総電力量が非稼働センサ群の総電力量を上回ると、その領域の観測は安定に維持される。

中央のセンサ（残電力量 1.0）の例

$$(1.0 + 0.6 + 0.5) \geq (0.5 + 0.5)$$

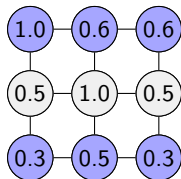
この関係が成り立つ場合、中央センサの近傍領域の観測が安定している。局所的な支援関係を考慮することで、観測網の省電力化と安定維持の両立が可能となる。



■ 稼働センサ (6/9)
■ 非稼働センサ
数値：各センサの現在の稼働可能電力量（残電力量）の最大値を 1.0 とした相対比率で表す。
例：0.6 は、最大値から見て 60% の残電力量を示す。

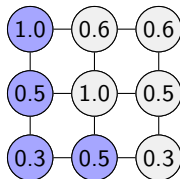
局所観測網の安定・不安定の例

安定な局所観測網の例 (1)



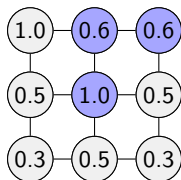
例. 中央下のセンサ $(0.5 + 0.3 + 0.3) \geq (1.0)$ → 安定

不安定な局所観測網の例 (1)



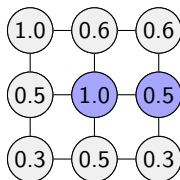
例. 中央下のセンサ $(0.5 + 0.3) < (1.0 + 0.3)$ → 不安定

安定な局所観測網の例 (2)



例. 中央のセンサ $(1.0 + 0.6) \geq (0.5 + 0.5 + 0.5)$ → 安定

不安定な局所観測網の例 (2)



例. 中央のセンサ $(1.0 + 0.5) < (0.6 + 0.5 + 0.5)$ → 不安定

- 稼働センサ (青)
- 非稼働センサ (灰)

数値：各センサの現在の稼働可能電力量 (残電力量) の相対値 (最大 1.0)

安定な局所観測網（グラフモデル）と理論的結果

定義 1

センサネットワークを無向グラフ $G = (V, E)$ で表す。ここで、ノードはセンサを表し、各センサの残電力量や信頼度を重み関数 $w : V \rightarrow \mathbb{R}^+$ で表す。空でないノード集合 $S \subseteq V$ が次を満たすとき、 S を **安定な局所観測網** という：

$$\sum_{u \in N(v) \cap S} w(u) + w(v) \geq \sum_{u \in N(v) \setminus S} w(u) \quad (\forall v \in S)$$

定理 1 (Kimura et al. 2010)

任意の重み付きネットワーク (G, w) に対して、次を満たす安定な局所観測網 S が存在する：

$$|S| \leq \left\lceil \frac{|V|}{2} \right\rceil$$

意味・解釈

- 各センサの電力量や信頼性が異なっても、安定に観測を維持するために必要な稼働センサの上限数は、全センサ数の半数（切り上げ）で十分である。

スマート農業における安定な局所観測網

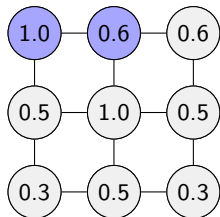
スマート農業とは

- 農地に温湿度・土壌水分センサを配置し、データに基づいて環境を自動観測・制御する仕組み。
- すべてのセンサを常時稼働させると、電力消費と通信負荷が増大する。

安定な局所観測網の考え方

- センサとその通信経路からなるネットワークを考える。
- 稼働センサ（青）は、近傍の停止センサ（灰）の観測範囲を一部補完し、局所的な観測を維持する。
- 近傍内で次の関係が成り立つとき、その観測網は**安定**である：

稼働センサ群の総電力量 \geq 非稼働センサ群の総電力量
局所的な支援構造により、省電力かつ安定した観測が可能となる。



■ 稼働センサ（青）

■ 非稼働センサ（灰）

各稼働センサの近傍では、稼働側の残電力量の合計が非稼働側以上であるため、観測が安定に維持される。数値は各センサの残電力量を最大値 1.0 とした相対比率。

関連研究と今後の課題

関連研究

- 指定ノード（特定のセンサ）を含む／含まない安定な局所観測網の構造を解析。
- この問題は最適化問題として定式化されており、特定ノードを含む安定な局所観測網の構造を理論的に求める手法を提示した（Kawaura et al. 2014）。
- 特に、ノード数の少ないグラフでは、条件を満たす安定な局所観測網を具体的に算出することが可能である。
- これにより、観測拠点や中継ノードなど重要センサを確実に観測対象へ含めるための設計指針を得た。

今後の課題

- 現在の理論は、ノード構成や通信経路が固定された静的ネットワークを前提としている。
- 今後は、ノードの故障・移動・通信変動を考慮した動的ネットワークへの拡張を行い、時間変化を含む安定条件を理論化する。
- センサ再配置や電力補充などの再構成過程をモデル化し、安定な局所観測網の長期安定運用指針を導くことを目指す。

まとめと今後の展望

情報通信の将来像

- 本研究が目指す情報通信の将来像は、中央集約的な制御から脱却し、各ノードが自律的に判断・協調する分散型・自己維持型ネットワーク社会の実現である。




本研究の位置づけ

- 安定な局所観測網の数理モデル化によって、センサネットワークにおける安定・省電力運用条件を明確化。
- 理論的枠組みを、スマート農業・IoT 観測・災害監視などの分散通信システム設計に応用。

今後の展望

- 理論段階：安定な局所観測網を拡張し、時間変化を含む動的ネットワークにおける安定な局所観測網の条件を数理的に解明する。
- シミュレーション段階：動的接続を持つセンサネットワーク環境を模擬し、提案理論の有効性を実験的に検証する。
- 実証段階：宮城県内の農地をモデルとする小規模フィールド実験を行い、省電力・高信頼な観測網設計の指針を実証する。
- 応用・社会実装段階：地域のスマート農業・防災・環境監視システムに理論成果を適用し、宮城・東北の情報通信産業の進歩発展に貢献する。

参考文献 I

-  Jawad, H. M. et al. (2017). “Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review”. In: *Sensors* 17.8, p. 1781. DOI: 10.3390/s17081781.
-  Kawaura, Takahiro, Kenji Kimura, and Naoto Niki (2014). “Defensive alliances with prescribed and proscribed vertices”. In: *Congressus Numerantium* 220, pp. 219–226.
-  Kimura, Kenji, Masayuki Koyama, and Akira Saito (2010). “Small Alliances in a Weighted Graph”. In: *Discrete Applied Mathematics* 158.18, pp. 2071–2074. DOI: 10.1016/j.dam.2010.09.001.