

無線マルチホップネットワークにおける 動的ルーチング

電気通信大学大学院情報理工学研究科
山本 嶺

自己紹介

➡ 所属

- ➡ 電気通信大学大学院情報理工学研究科情報学専攻

➡ 職歴

- ➡ 2010年4月～2014年3月
 - ➡ 早稲田大学大学院国際情報通信研究科 助手
- ➡ 2014年4月～2019年3月
 - ➡ 電気通信大学大学院情報理工学研究科 助教
- ➡ 2019年4月～
 - ➡ 電気通信大学大学院情報理工学研究科 准教授

➡ 研究歴

- ➡ 主に無線マルチホップネットワークの通信プロトコルの研究に従事

現在の主な研究テーマ

➡ 無線マルチホップネットワークのルーティング

- ➡ Opportunistic Routingを中心に
- ➡ 同時送信フラッディング
- ➡ 車内環境の無線化
- ➡ 局所的な情報配信方式

➡ IoTネットワークにおけるセキュリティ

- ➡ 攻撃検知, 分類
- ➡ 統計解析, 機械学習

➡ ドローンを利用したメッシュネットワーク構築

- ➡ 衝突回避アルゴリズム等

無線マルチホップネットワーク

➡ 定義は色々ありますが・・・

➡ 無線を利用した通信

➡ 相互に中継を行うマルチホップ通信

によって構築されるネットワーク形態

➡ 代表的なものに

➡ MANET (Mobile Ad hoc Network)

➡ VANET (Vehicular Ad hoc Network)

➡ WSN (Wireless Sensor Network)

➡ DTN (Delay/Disruption Tolerant Network)

など

主要課題

➤ ルーティングプロトコル

今回はこれに注目

- トポロジーが常に変化
- ネットワーク全体の状態把握が困難
- 経路選択メトリック
 - 主にホップ数 → 通信性能が各リンクの状態によって変化
- 固定的な通信経路は不向き

➤ 輻輳制御, 信頼性制御

- TCPの性能劣化
 - 損失を輻輳と誤認 → スループット低下

➤ 無線通信

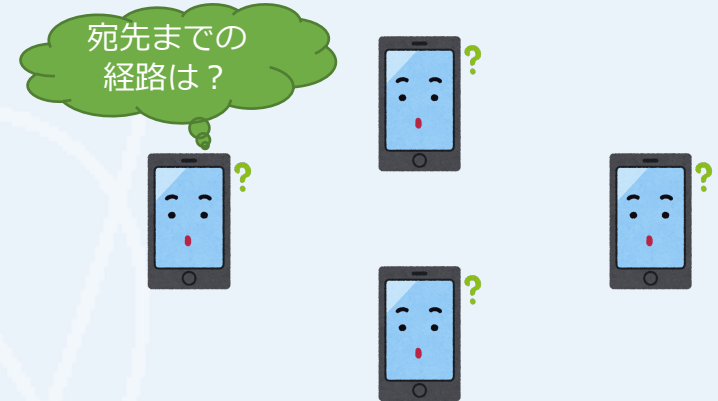
- 有線通信と比較した場合, 不安定な通信

一般的なルーチング

*主にMANET

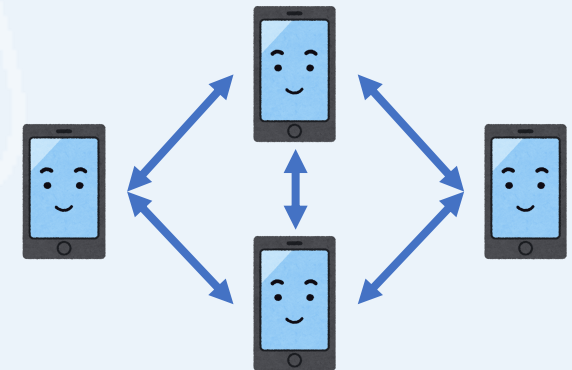
リアクティブ型ルーチング

- ➡ 通信要求に応じて経路作成
- ➡ 送信元主導の経路探索
 - ➡ 経路要求 (RREQ)
 - ➡ 経路応答 (RREP)
- ➡ **通信開始までの遅延増加**



プロアクティブ型ルーチング

- ➡ 常に最新の経路表を保持
- ➡ 通信を行っていないときも常に経路を維持
- ➡ **コントロールパケット等によるネットワーク負荷増加**



古典的ルーチングの問題点

➤ 確立経路の継続的利用

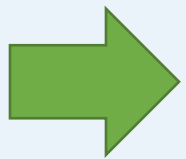
- 切断されるまで経路を継続利用
- 通信環境の変化への対応が困難

➤ リンク切断に伴う経路再構築

- 経路探索, 再計算等の負荷
- 局所的な修復によるエンド間の性能劣化

➤ 経路選択メトリック

- ホップ数では通信品質を評価不可能
- 他のメトリック（通信成功率等）は常に変化
 - 経路構築時の情報が通信開始時には古い情報

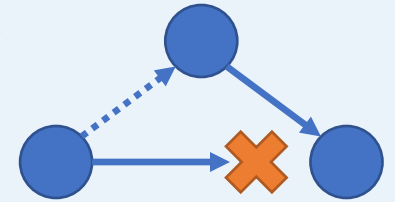


通信環境に応じた動的な経路制御が必要

動的ルーティング

➤ Route Modification with Overhearing

- 無線通信の同報性を利用
- リンク切断時に近傍端末を利用して再送



➤ Multipath Routing

- 複数経路をエンド間で構築
- 通信状況に応じて経路切替, バックアップとして利用

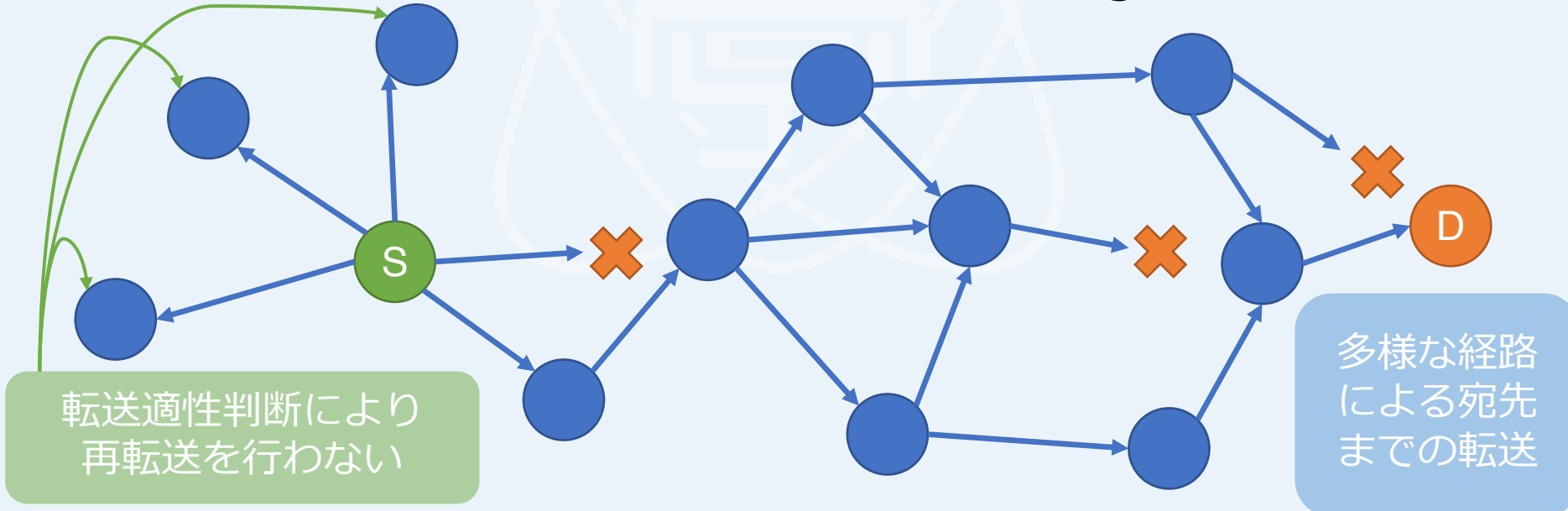
➤ Opportunistic Routing (OR)

- Opportunistic (日和見的) に経路選択
- ブロードキャストを利用し, 近傍へ一斉送信
- 受信端末が転送適性度を自律的に判断
 - 宛先への転送適性度が高い場合のみ再ブロードキャスト
- 結果的に複数経路での転送

Opportunistic Routingの概要

経路を構築しないレーシング

- 固定的なエンド間の経路は使用しない
- 受信端末が自律的に転送判断
 - 経路がどうなるかはその都度異なる
- 転送判断のメトリックは多様（ホップ数, ETX等）
- すべての受信端末が転送するとFloodingと同様



ORの利点と欠点

➡ 利点

- ➡ 経路構築が不要ですぐに転送開始
- ➡ マルチパス通信による信頼性向上
- ➡ 受信端末駆動の転送による経路維持コストの低減
- ➡ トポロジー変化への耐性

➡ 欠点

- ➡ ブロードキャスト通信に起因する問題
 - ➡ CSMA/CAが機能しない
 - ➡ 転送レート固定
- ➡ 経路型ルーチングと比較して総転送量が増加
- ➡ 転送判断に必要なメトリックの収集が必須
- ➡ 経路探索を併用する場合，誘導経路設定が必要

ORを利用した動的ルーチング例

➡ ExOR

- ➡ ETXを基に転送優先度を設定

➡ HRAN

- ➡ 宛先までの距離を基に転送優先度を設定

➡ LCAR

- ➡ 取り得る経路を集合として管理し，転送優先度を設定

➡ SOAR, OxDSR

- ➡ ETX, EAXを基に転送優先度を設定

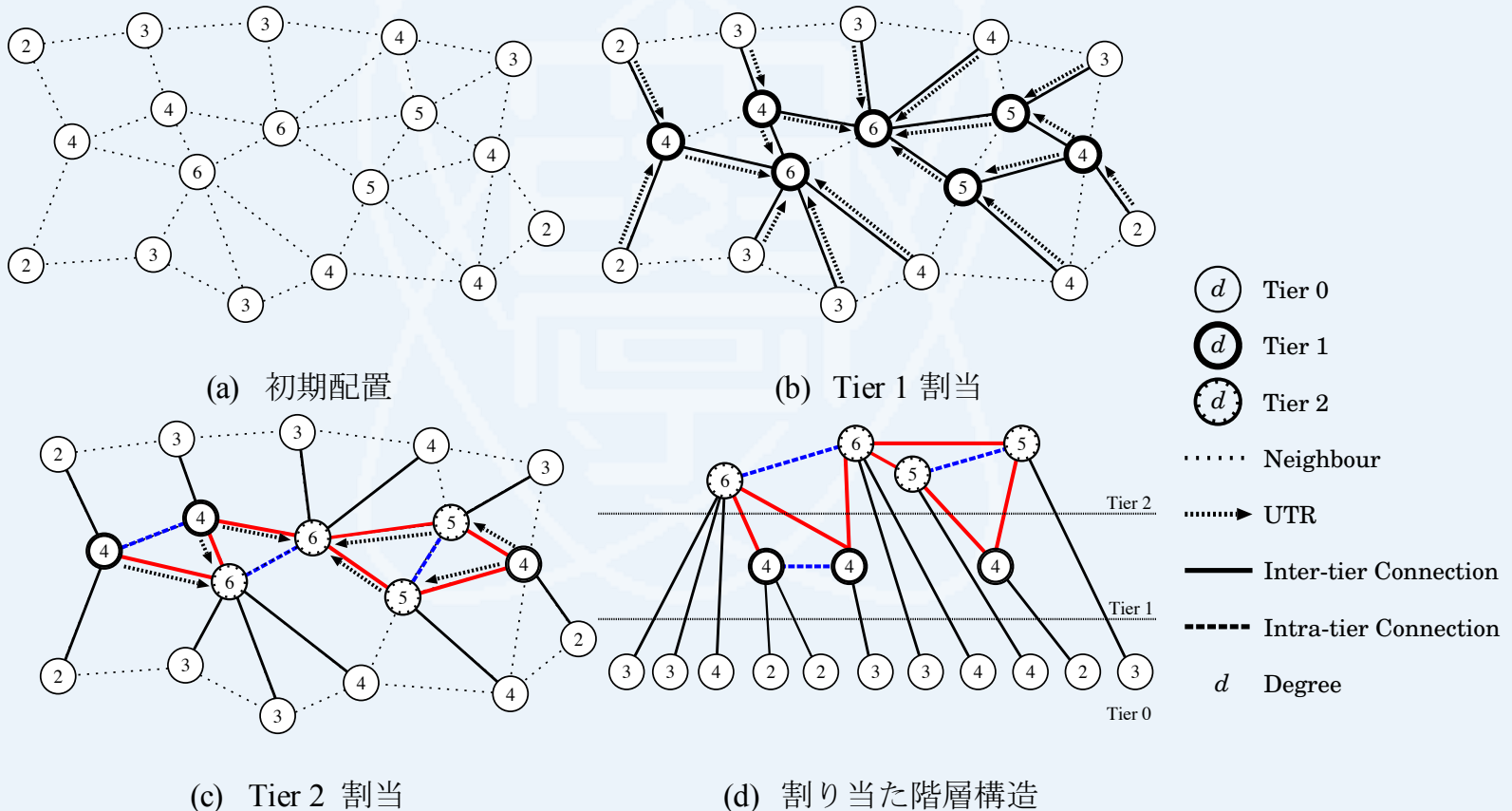
➡ CHOR, VORTEX

- ➡ ホップ数とノード次数を基に転送を誘導

VORTEX : 階層割当

➡ 次数の高い端末がより上位となるよう階層割当

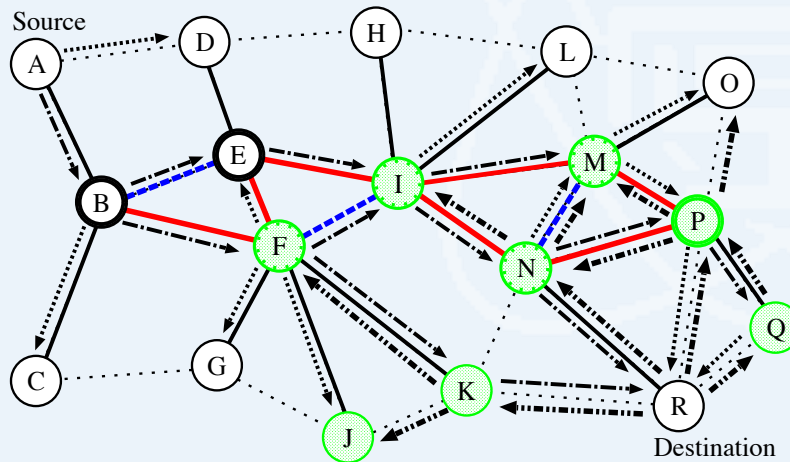
➡ Helloメッセージ交換による近傍端末把握



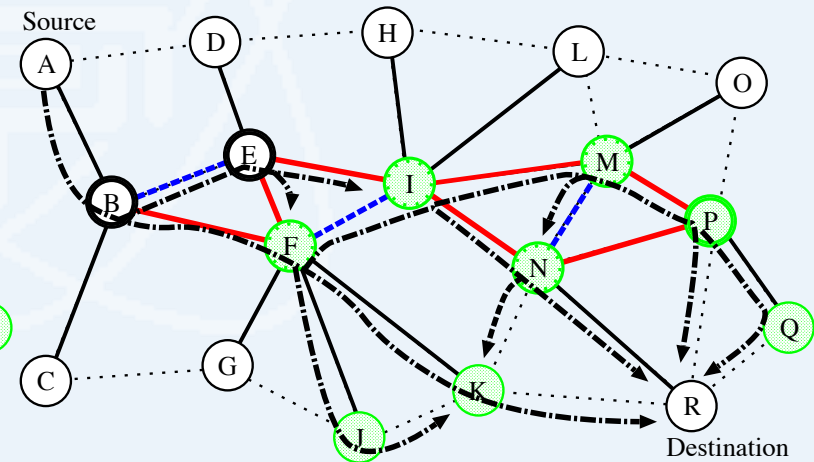
VORTEX：階層に基づく転送

宛先推定・宛先確定状態

- 設定した階層情報を誘導情報として利用
- 上位階層に位置する端末は下位の端末情報を把握
- 基本的に上位階層に転送
- 初期段階では宛先位置を推定



(a) 宛先推定状態

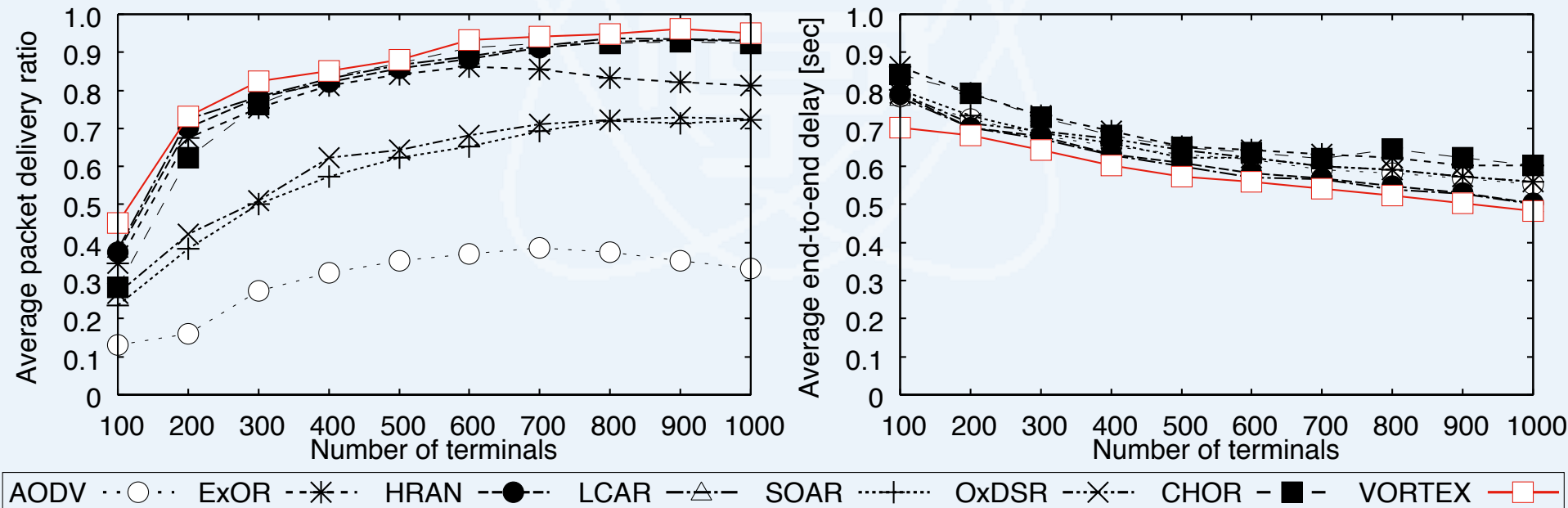


(b) 宛先確定状態

VORTEX : 性能評価 (1/2)

通信成功率と伝送遅延

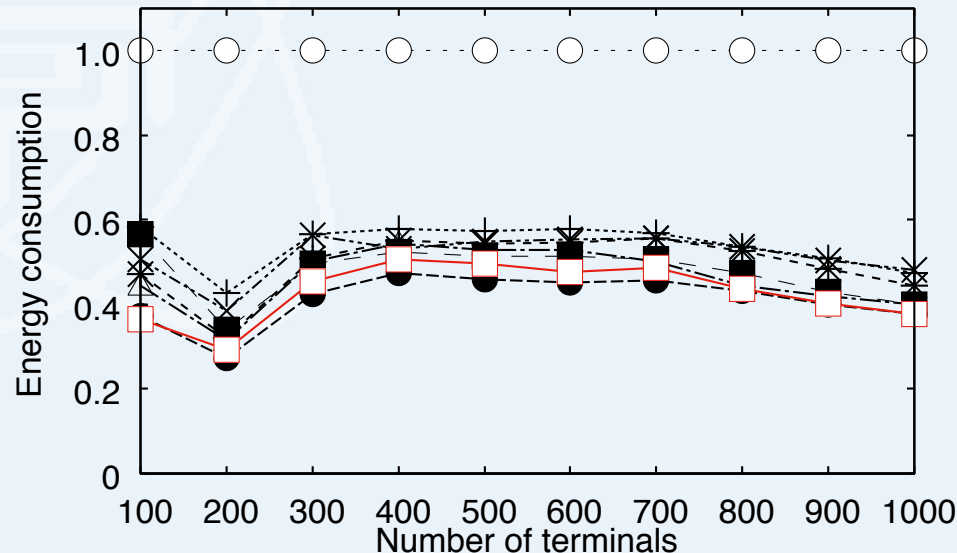
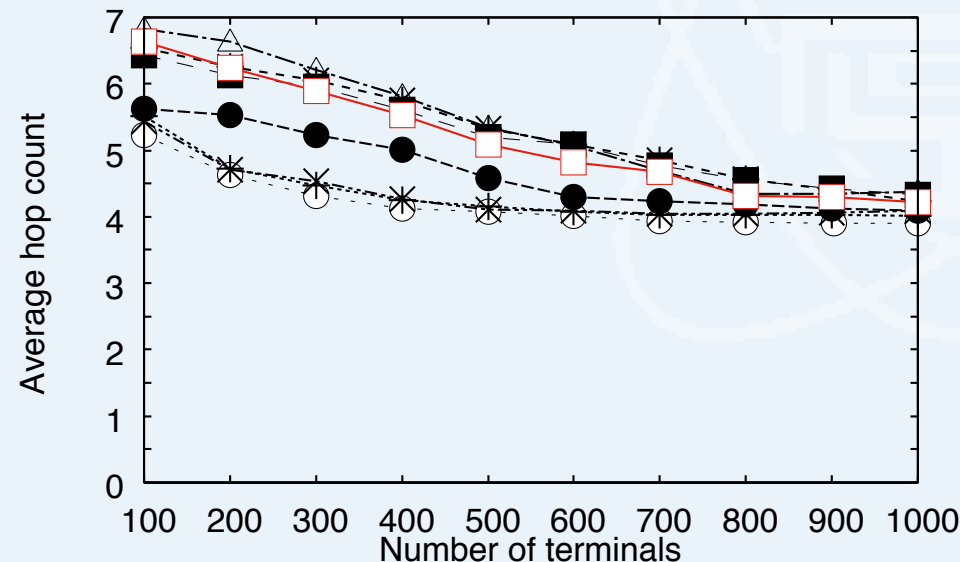
- 通信成功率の向上：経路多様性
- 遅延の低減：経路探索による誘導情報設定が不要
- 複数経路を利用するORでは同様に性能向上



VORTEX : 性能評価 (2/2)

➤ ホップ数と消費電力

- 平均ホップ数は若干増加
 - 最短ホップが最適経路とは限らない
- 信頼性向上によって再送の減少
 - エンド間ETX性能の向上



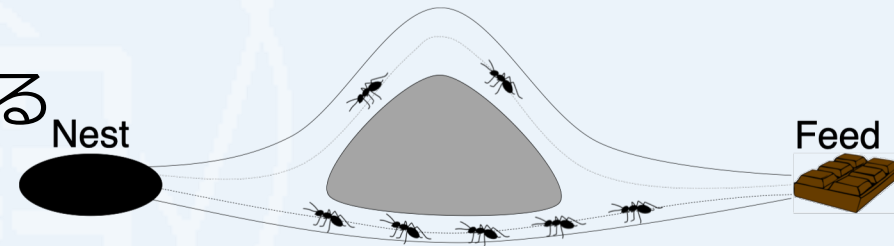
AODV ···○·· ExOR --*-- HRAN --●-- LCAR --△-- SOAR ···+··· OxDSR --*-- CHOR -■- VORTEX -□-

その他の動的ルーチング

➤ ACO（蟻コロニー最適化）を利用したルーチング

➤ 蟻の採餌公道を模擬したヒューリスティックなアルゴリズム

➤ 蟻が移動するときに分泌する
フェロモンを基準とした
経路探索



➤ 多くの蟻が通過する場所には多くのフェロモンが滞留

➤ 更に多くの蟻が集まる → 最短経路の発見

➤ 個々の行動によって最適化を達成

➤ 動的な環境に対応するため過渡状態の動作を応用

➤ 対象はセンサネットワーク

➤ 残留電力量に応じた適応的な経路変更

AEROの概要

➤ 三種類のエージェント（ANT）を利用

➤ **F-ANT**：宛先方向へ進むANT

- 経路情報の収集
- 従来のルーチングと同様

➤ **B-ANT**：送信元へ戻るANT

- 経路候補の通知を兼ねる
- 複数のB-ANTを返送

➤ **D-ANT**：送るデータを運ぶANT

- 実際のデータを送信
- 経路，端末の残留電力量を評価

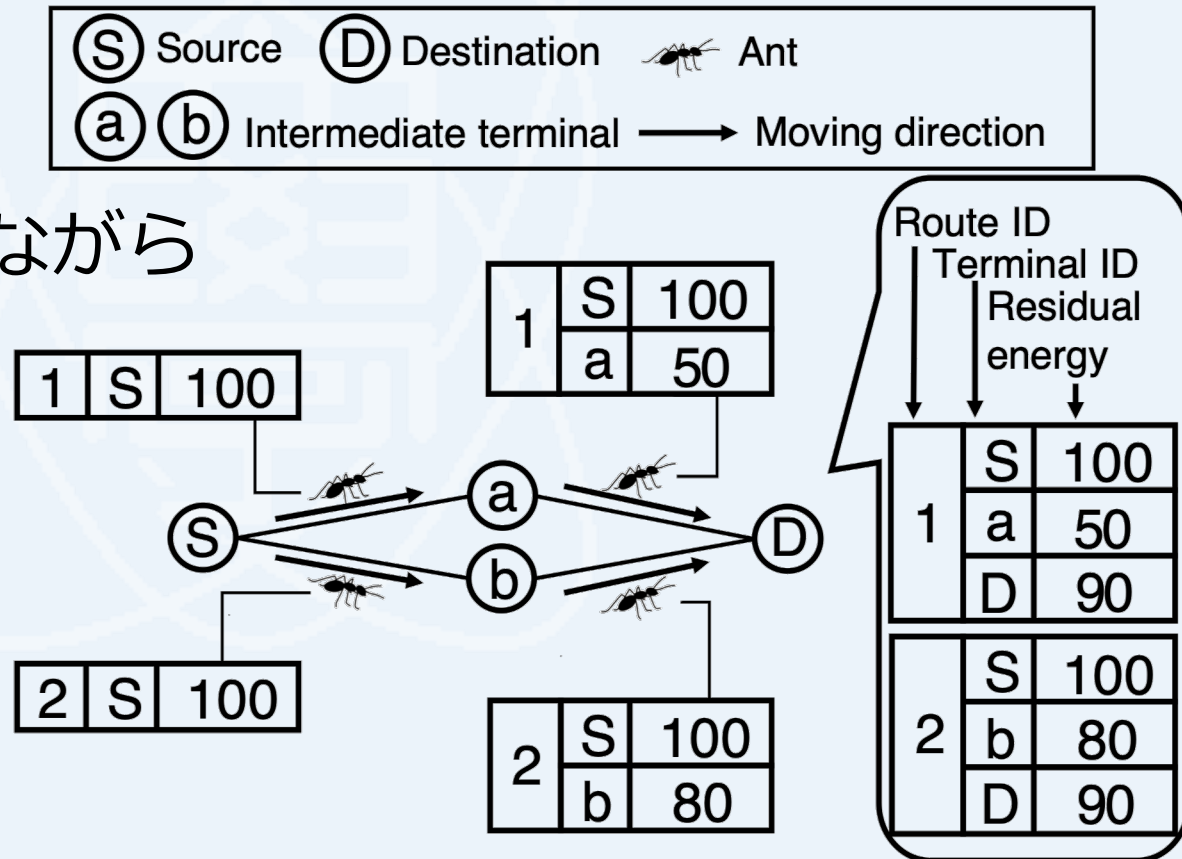
➤ 優先転送経路を利用し，確率的に他の端末も利用

AERO : F-ANT

➡宛先へ向かって進行

➡経路途中にある
中継端末の**残留
電力量**を記録しながら
宛先へ進行

➡宛先は複数の
F-ANTを受信し
経路を評価

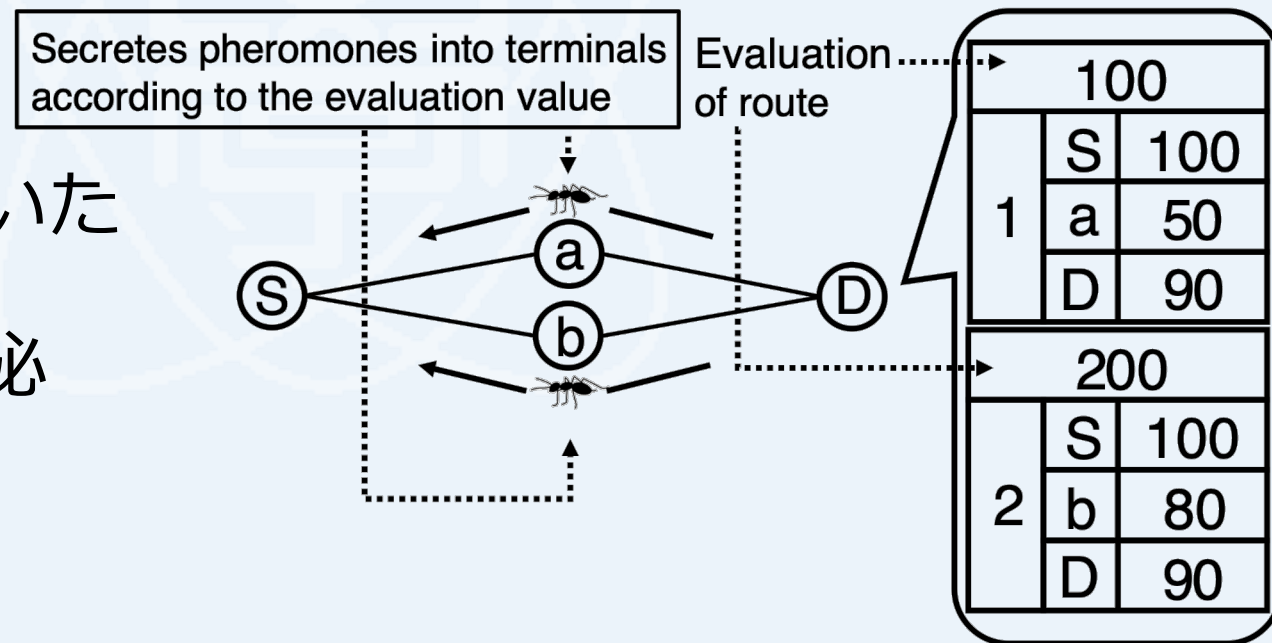


AERO : B-ANT

➡ 宛先はF-ANTによって得られた情報を評価

➡ 各経路の評価値をB-ANTに内包し、送信元へ返送

➡ 返送途中で評価値に基づいたフェロモンを
中継端末へ分泌

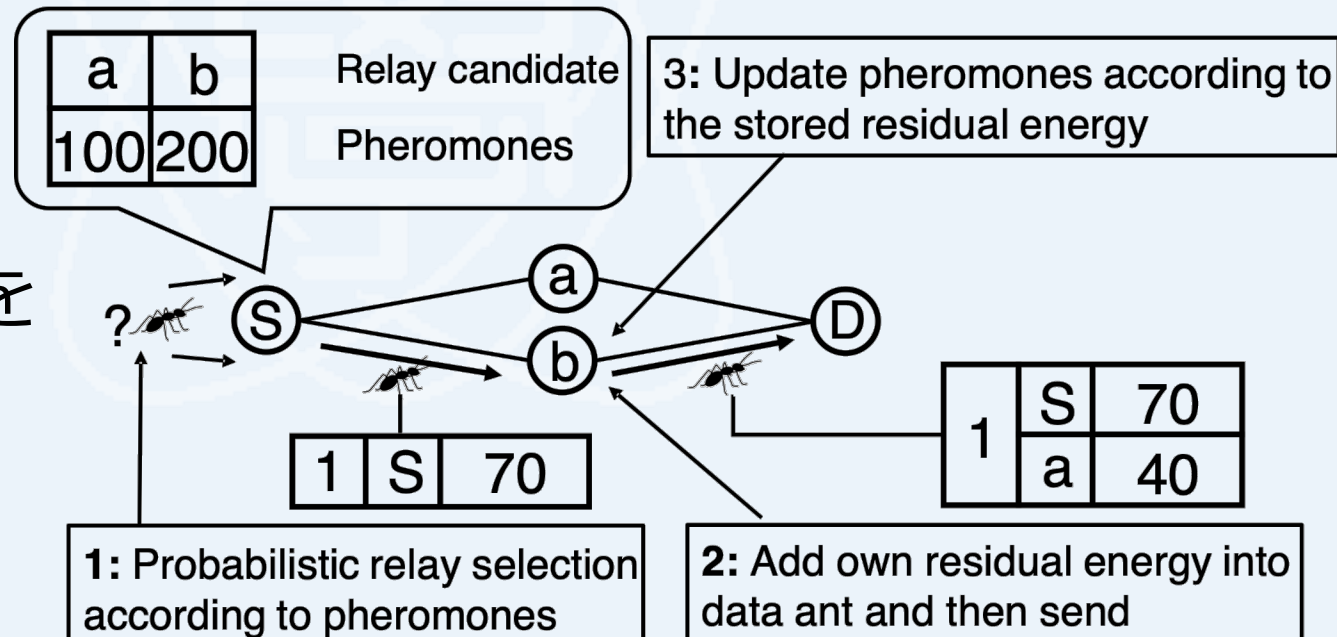


AERO : D-ANT

➡ フェロモン量に応じたホップごとの転送端末選択

➡ 転送時に残留電力に応じたフェロモンを分泌

➡ より残留電力量の多い端末がフェロモンを更に獲得



AERO : 評価値計算の詳細

➡ 評価値とフェロモンの更新

➡ 宛先端末による評価

$$H_{A,i} = (1 - \beta) \frac{E_{sd,i}}{E_{sd,\max}} + \beta \left(\frac{\sum_{j \in n_{sd}, e_{ij} \leq E_{sd}} (e_{ij} - E_{sd})}{|e_{i,\text{low}}| E_{sd}} + 1 \right)$$

Average residual energy of all routes

$$E_{sd} = \frac{\sum_{i \in r_{sd}} E_{sd,i}}{|r_{sd}|}$$

$$E_{sd,i} = \frac{\sum_{j \in n_{sd,i}} e_{ij}}{|n_{sd,i}|}$$

Calculate variability

➡ 各端末による評価

$$H_{B,j} = \frac{e_j - E_{sj}}{E_{sj}}$$

If positive, the terminal has more energy

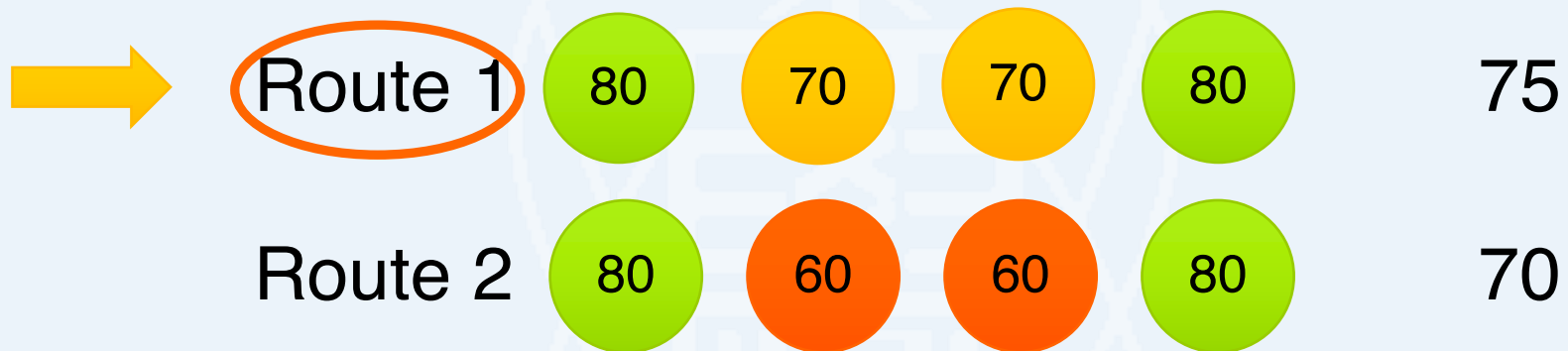
Average residual energy on route i

AERO : 経路選択例

宛先の評価による経路選択例

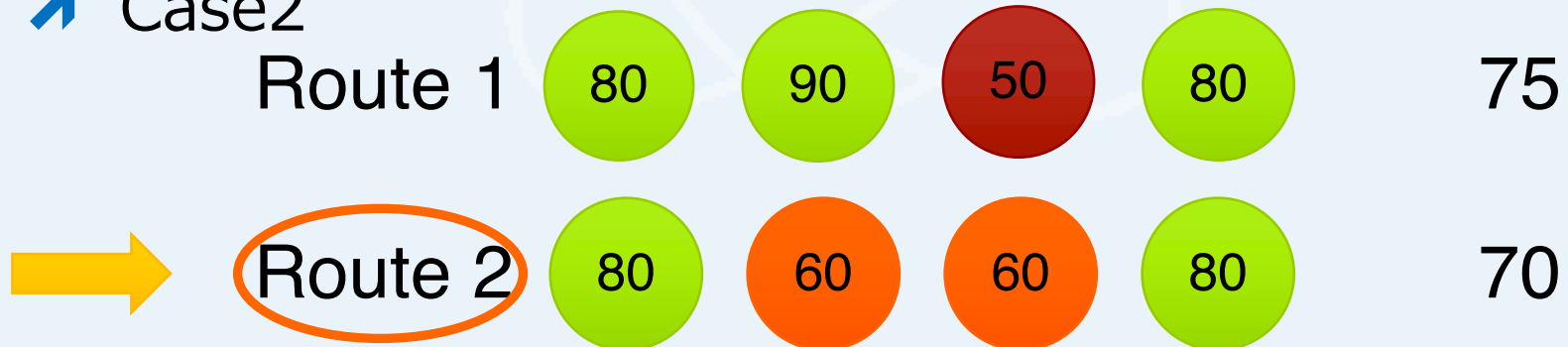
Case1

Ave. Residual Energy



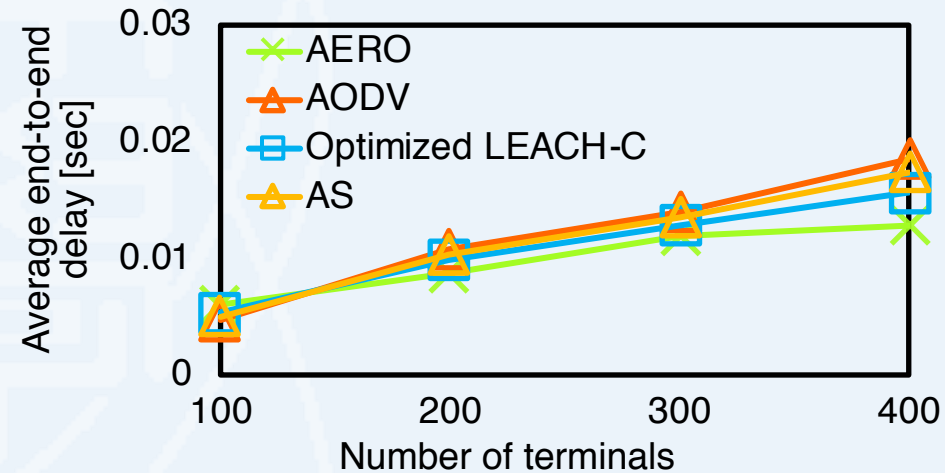
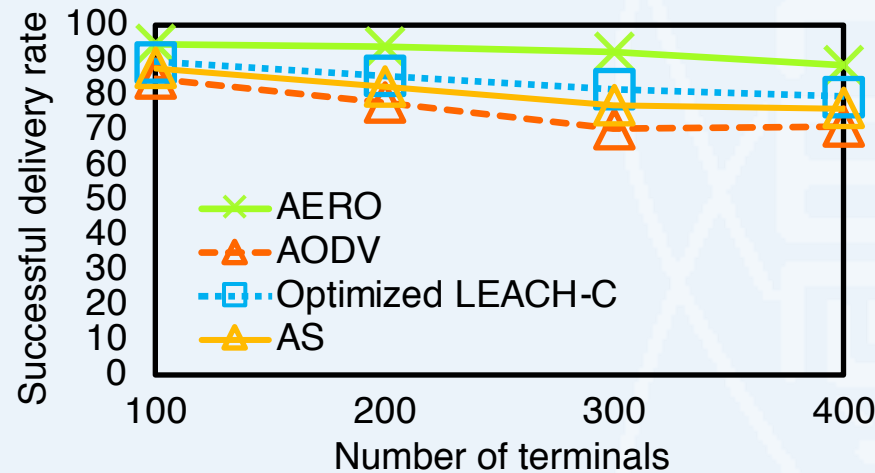
Large variability

Case2



AERO : 性能評価 (1/2)

通信成功率と遅延



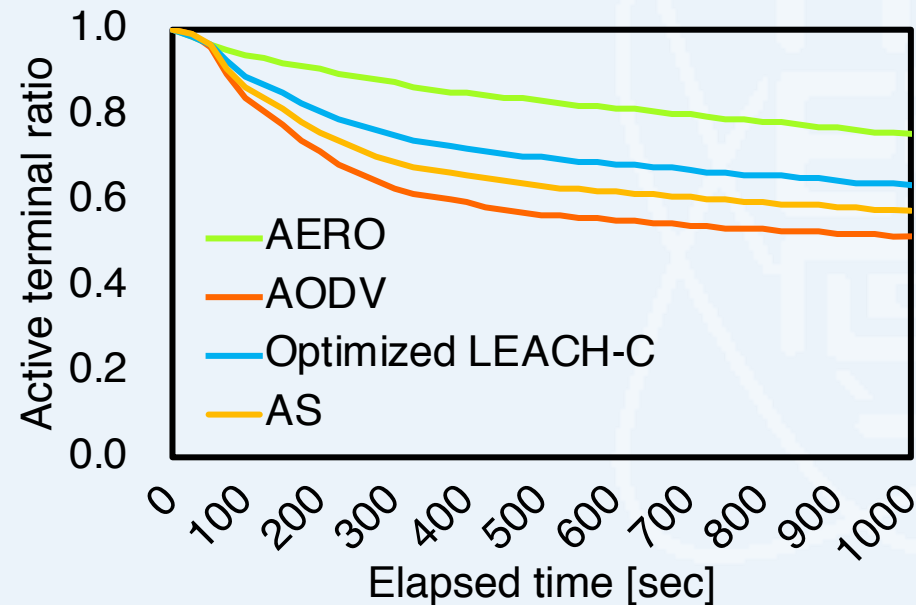
経路多様性による高い成功率

同様に遅延もある程度低減

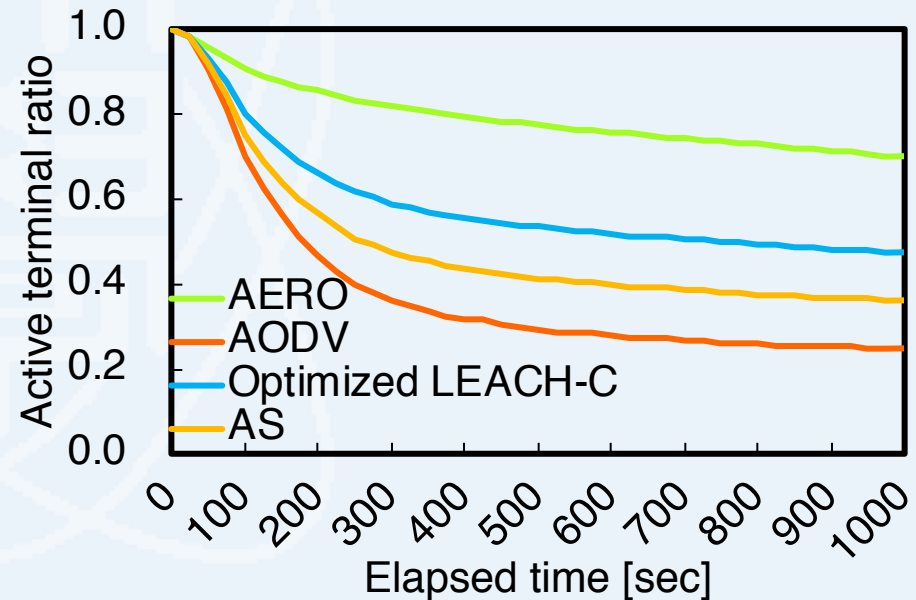
AERO : 性能評価 (2/2)

➡ 端末生存率

400端末



100端末



➡ 通信負荷分散によるネットワークの長寿命化

まとめ

- 無線マルチホップネットワークにおける動的ルーチングの一例を紹介
 - VORTEX : アドホックネットワーク向け
 - AERO : センサネットワーク向け
- 従来の経路型ルーチングより確率的に経路選択するルーチングがダイナミックな環境に向く
 - 転送方向を制御するために誘導経路設定
 - 目的に応じた経路選択メトリック選択
- より効率的な制御には他レイヤとの連携を推奨