

# 参考資料について

本資料は下記の文献を元に作成されたものです。文章の内容の正確さは保証できないため、正確な知識を求める方は原文を参照してください

- 書籍名: 無線LANとユビキタスネットワーク
- 編集委員: 井上 友二・木下 耕太・木村 英俊・小牧 省三・中嶋 信生
- 編者: 小牧 省三
- 著者: 小牧 省三・間瀬 憲一・松江 英明・守倉 正博
- 出版社: 丸善株式会社

# Ad Hocネットワークのコン セプトとその要素技術

渡邊研究室

a302j040 加藤佳之

# Ad Hocネットワークとはなにか

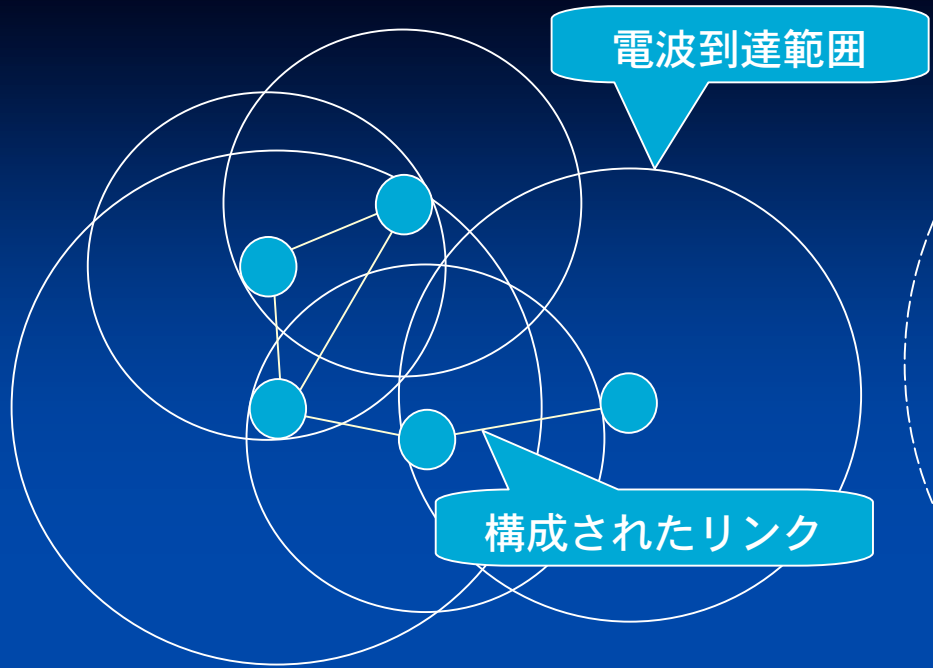
- 現在の通信ネットワーク  
回線交換方式→電話交換網  
パケット交換方式→インターネット
- 従来の通信方式  
交換機および伝送路には通信パスを提供するためのインフラストラクチャが必要  
セルラー端末→基地局  
無線LAN→無線アクセスポイント
- Ad Hocネットワーク
  - ・従来のようなインフラストラクチャに依存せず端末のみが集まることにより構成されるネットワーク
  - ・コンピュータ、無線通信装置の小型化、軽量化をうけて、アドホックネットワークの商用化の可能性が加速
  - ・あらゆる機器やモノに超小型コンピュータチップが埋め込まれ、相互通信を行ったり、インターネットに接続したりするユビキタス社会の基盤となる可能性が高い

# Ad Hocネットワークの概要

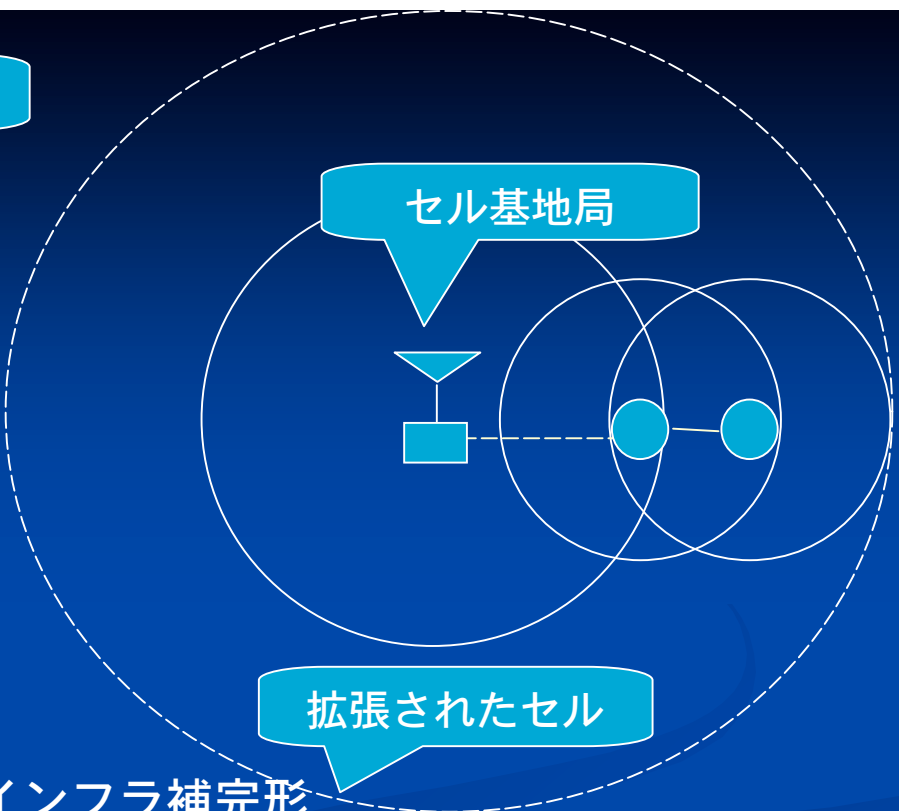
- 原始的なAd Hocネットワーク  
端末同士が1対1で接続する通信
- 一般的なAd Hocネットワーク  
数十ないし数百の端末から構成  
各端末をノードとよぶ  
ノードは一般的に移動体となっている  
無線リンクによりネットワークが成立している  
すべてのノードが対等な関係をもち、自律分散的なネットワークを構築
- ノードが持つ機能  
ノード間の通信を中継する機能(ルータ機能)  
中継ノードを介する通信をマルチホップ通信という(Ad Hocネットワークの必須機能)
- ノードが移動体で構成される場合には  
Mobile Ad Hoc Network(MANET)  
と呼称されることが多い

# Ad Hocネットワークの利用形態

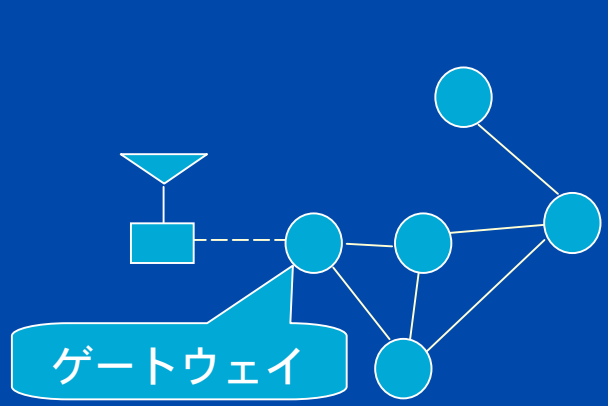
- a: スタンドアロン形  
Ad Hocネットワークが単独で存在する方式  
イベント会場、会場、災害現場、戦場等インフラストラクチャが存在しないか、破壊された状態での利用形態
- b: インフラ補完形  
セル方式の移動通信網や、無線LANなどのインフラストラクチャにおいて移動端末が無線リンクを確立し同時に、端末がインフラストラクチャとなることでセルの範囲を拡張し、インフラを補完する
- c: インフラ共存形  
Ad Hocネットワークがインフラストラクチャと一時的、あるいは永続的に接続して利用される形態、Ad Hoc内のいくつかのノードが、インフラストラクチャにアクセスするGWになっている。これによりAd Hocネットワーク全体がインターネットに接続することが可能になる。
- d: インフラ内在形  
Ad Hocネットワークのノードがいくつかの固定ノードとして設置される形態  
給電可能な固定ノードがインフラストラクチャの役割を果たす
- e: インフラ形成形  
柔軟なインフラストラクチャを実現するためその基盤にAd Hocネットワークを使用する  
各ノードはマルチホップ通信を行う  
ノードの配下に接続されるLAN端末が存在(非MANETノード)  
非MANET端末から見るとAd Hocネットワークはトランスペアレント(透明)な存在



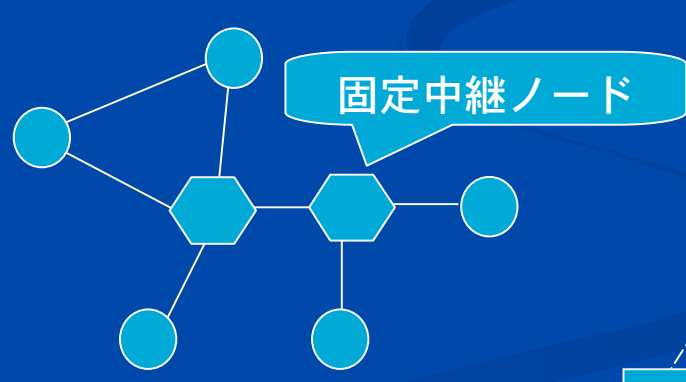
スタンドアロン形



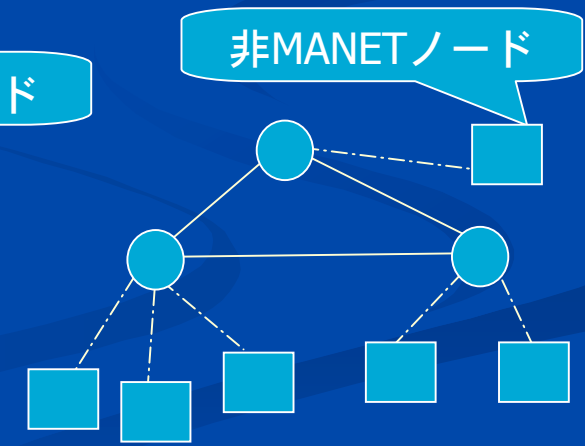
インフラ補完形



インフラ共存形



インフラ内在形



インフラ形成形

# Ad Hocネットワークの技術的考察

## ■ OSI参照プロトコル

- ・アプリケーション層(プレゼンテーション層、セッション層)
- ・トランスポート層
- ・ネットワーク層
- ・データリンク層
- ・物理層

の各層での技術的ポイントを考察

# 物理層

- ノードは移動体であることから、各ノードの移動速度は予測できず、ノード間の電波状況は急激に変化する  
→ 変化する電波状況に適応できることが必要
- ノードは電池駆動である場合が多く、連続利用時間を延長させるためにエネルギー消費を低下させる必要がある  
スリープをしてしまうと電池寿命は延びるが、通信は不可能になる  
→ 上位層との連携が不可欠

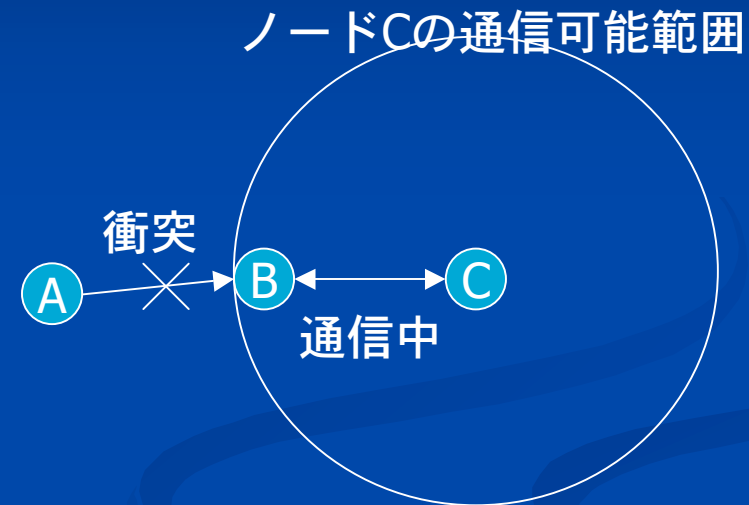


# データリンク層

- IEEE802.11形の無線LANはCSMA/CAを使用

- 隠れ端末問題  
ノードCがノードB送信中にノードAがCの搬送波を検出できない場合、AがBに送信するときに衝突が起こる

- さらされ端末問題  
干渉領域外にノード(D)が存在するときそのノードと通信中のノード(C)の搬送波を検出するためパケット通信ができない現象  
CSMA/CAによる不必要な通信の抑制によって生じる  
マルチホップ通信特有の問題



# ネットワーク層

- 複数のノードを中継するマルチホップ通信では始点から終点までの経路をどのように決定するかが重要となる
- 経路制御はループを防止することが重要な課題
- さまざまなルーティングプロトコルが提案

以下に示す形態にカテゴライズされる

- ・ プロアクティブ形(テーブル駆動形)
- ・ リアクティブ形(オンデマンド形)
- ・ フラット形
- ・ 階層形

# トランスポート層

- Ad Hocネットワークの特性
  - ・無線インターフェースは送受信を行うことができない
  - ・ノード移動によるリンク切断
- Ad Hocネットワークの特性によるTCP環境下での動作の問題
  - ・マルチホップ通信でのスループットが急激に増減する不安定性
  - ・TCPコネクション間での公平性が維持できない
- 経路障害と経路再構築を明示的にTCPに伝える仕組みを組み込むことでスループットの低下を改善できると考えられる

# アプリケーション層

- P2P形サービス

- センターコンピュータに依存しない
- 特定の役割を持つノードが不要

- スループットの急変や一時的な経路切断への対処

- 切断を意識させないサービス
- MANET分割に備えてデータの複製を複数ノードで持たせる

# 経路制御プロトコルの詳細

- Ad Hocネットワークの経路制御プロトコル
- 一般のノード間には対称リンクや非対称リンクが存在する
- 特定のノードへパケットを配送する方式をユニキャストという
- マルチキャストグループに属する複数のノードへパケットを配送する方式をマルチキャストという
- 1ホップの隣接ノードへパケットを配送する方式をローカルブロードキャストといい、すべてのノードへパケット配送をするのを全ノードブロードキャスト(フラッディング)という
- 経路制御プロトコルによってサポートされるリンク形態、パケット配送方式が異なる

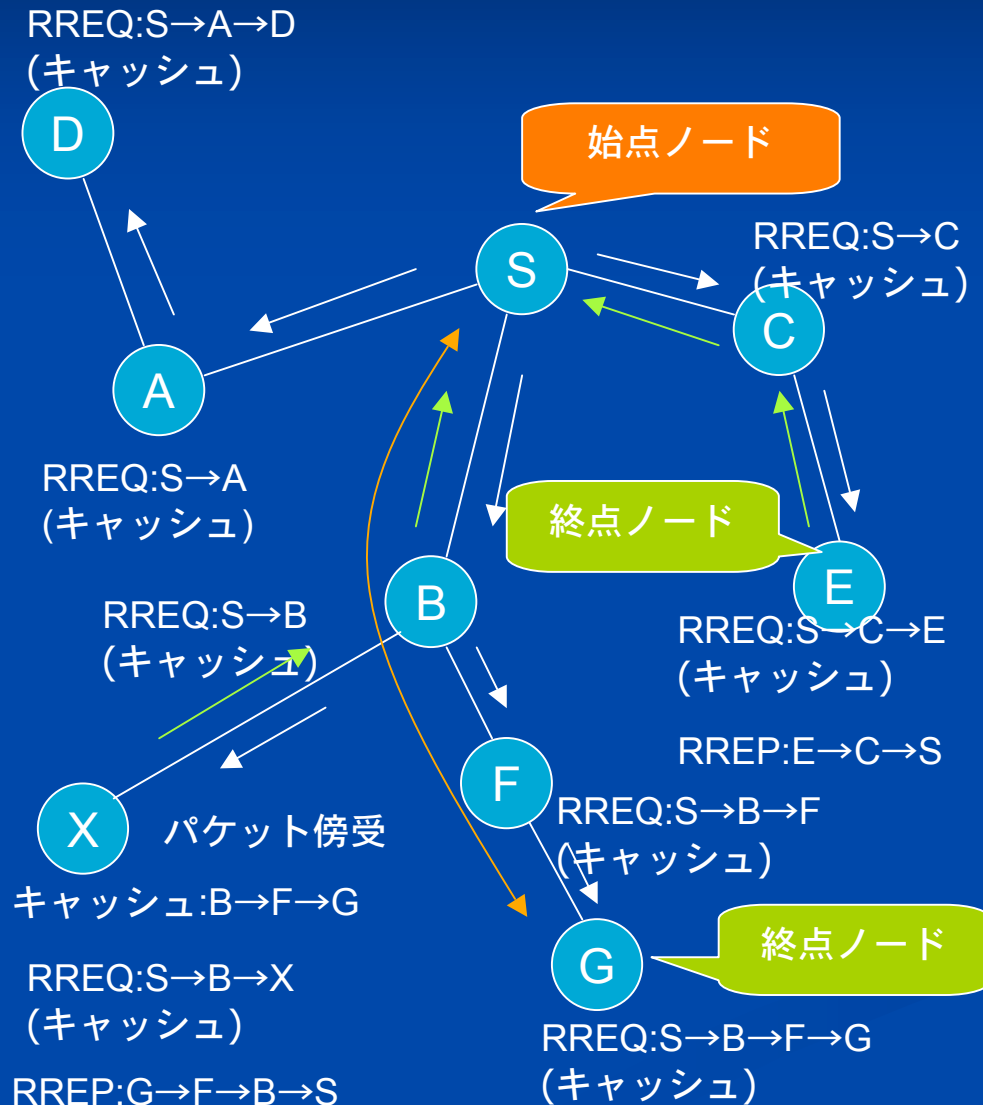
分類	方式例
プロアクティブ形	OLSR TBRPF DSDV MMRP
ハイブリッド形	ZRP
リアクティブ形	DSR AODV TORA ABR

主要な経路制御プロトコル

# DSR

- Dynamic Source Routing
- リアクティブ形の経路制御プロトコル  
経路表が通信時に作成される
- ユニキャスト/マルチキャストをサポート
- 始点ノードから終点ノードまでの経路を  
指定する始点経路制御方式を使用
- 対称リンクの使用が望ましい
- 経路発見と経路保全の機能を持つ

# DSR(経路発見)



## 基本動作:通常の経路探索

- 1.隣接ノードに経路要求メッセージRREQを含んだDSRパケットを送信
- 2.受信したノードは、ノード自身が終点でないとき、中継した経路履歴をキャッシュし、さらに隣接ノードへブロードキャストする
- 3.ノード自身が終点である場合、経路応答メッセージRREPをRREQによってキャッシュされた経路情報を逆転させた始点経路を生成し通信を行う

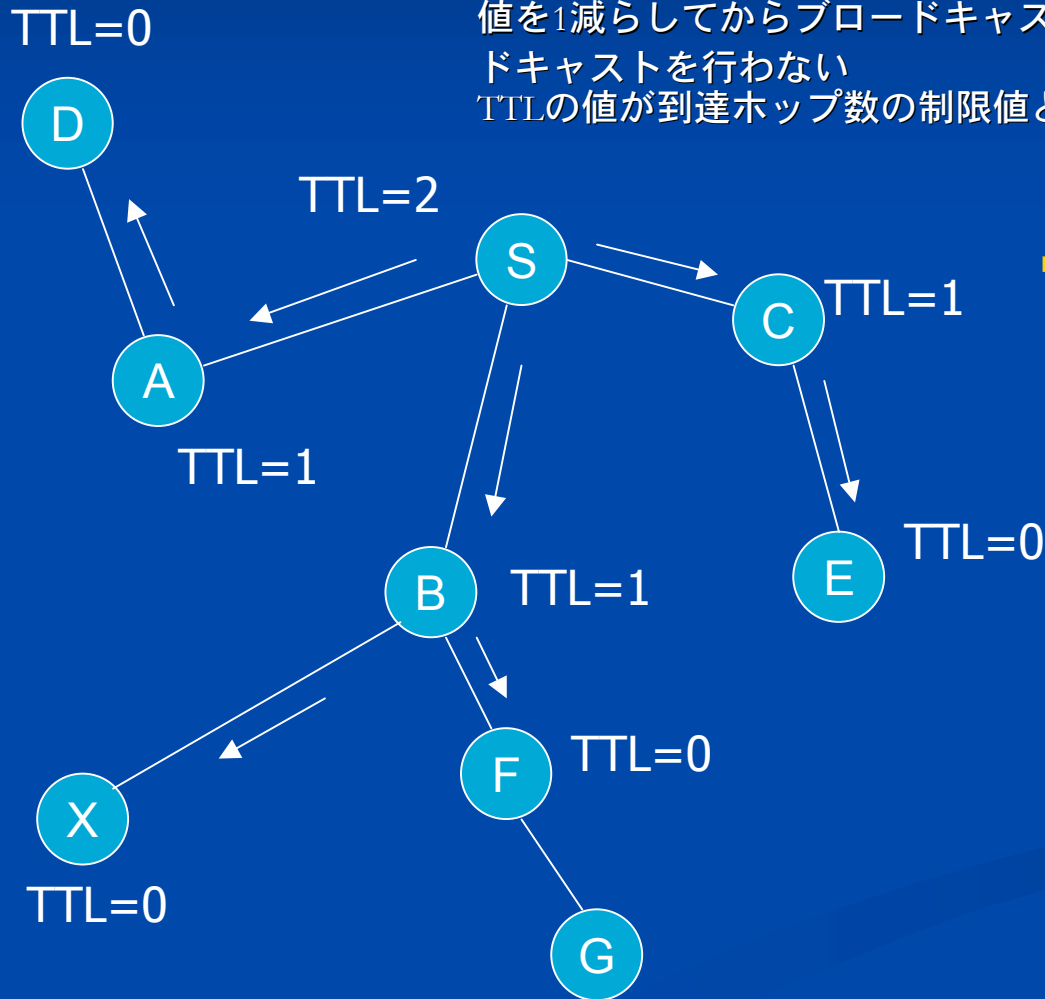
## 付加動作:キャッシュ利用の経路探索

- a.ノード間(例ではS-G間)で通信中のとき中継ノード(例ではB)に隣接するノード(例ではX)がパケットを傍受し、キャッシュに追加できる  
→付随的な経路発見
- b.RREQメッセージ受信時にキャッシュした経路情報に終点ノード(本例ではG)への始点経路情報がある場合、この始点経路とRREQの経路を合成したものをRREPとして通知し、無駄なRREQメッセージの送信をなくす  
→キャッシュを用いた経路応答

# DSR(経路発見の続き)

- c. 拡大リング探索

RREQはTTLを用いて転送範囲を制限する、RREQを受信したノードはTTLの値を1減らしてからブロードキャストする。TTL=0で受信したノードはブロードキャストを行わない  
TTLの値が到達ホップ数の制限値となっている



- d. 一斉応答の防止

RREQがほぼ同時に受信した複数のノードの経路キャッシュに基づいて一斉にRREPが応答する場合は考えられる  
一斉応答が起こると始点ノードの処理負荷が増大する  
これを避けるために次式で定めるランダム遅延時間の後に送信することにする

$$d = H(h-1+r)$$

d: 遅延時間

H: 1ホップの往復遅延

h: 各ノードの合成ホップ数

r: 乱数(0 or 1)



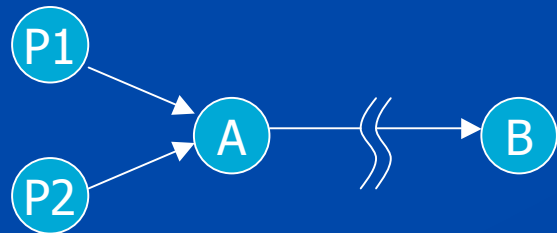
# DSR(経路保全)

- 経路上の各ノードは次ホップへのパケット送信が正常に行われたことを確認する責任を持つ
- 確認応答が一定時間確認されない場合、次ホップへのリンクが切断したと判断し、リンクを経路キャッシュから破棄して、このリンクを含む始点経路を利用してパケットを送信したすべての始点ノードへ経路エラー(RERR)メッセージを送信する
- RERRメッセージを受信したノードは経路キャッシュからそのリンクを含む始点経路を削除する
- パケットサルベージ  
パケット転送時に次ホップへのリンク切断を検出した途中ノードがそのパケットを破棄せず、別の経路で配送を試みる機能
- 始点経路の自動短縮  
ノードが他のノードのパケット転送を傍受してる場合、キャッシュされた経路がより経由ノード数の少ない短縮された経路を利用できる場合、RREQメッセージを受信していなくても始点ノードにRREPメッセージを送信できる。このRREPメッセージをgratuitous RREP(無償経路応答)という

# AODV

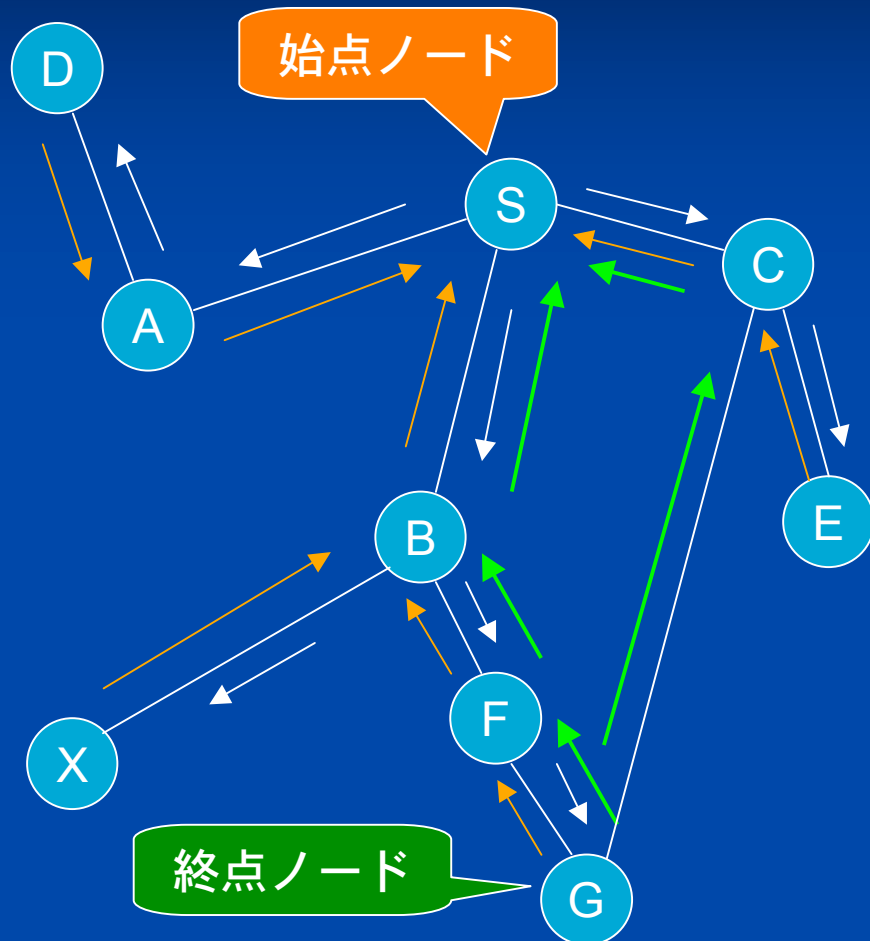
- Ad hoc On-demand Distance Vector routing
- リアクティブ形の経路制御プロトコル
- ユニキャスト、マルチキャスト、ブロードキャストをサポート
- 各中継ノードがルータとして終点アドレスに基づき次ホップを決定する、ホップごと制御方式
- 対称リンクの使用を前提
- ノードはシーケンス番号を持つ  
シーケンス番号が大きいほど最新の経路であることを保証している
- ノードにはプリコーサ\*リスト (precursor) を保持できる

\*プリコーサ:自身を終点への次ホップとする隣接上流ノード



P1およびP2はBを終点ノードとするAのプリコーサ

# AODV(経路発見)



## 基本動作

1. 始点ノード(例ではS)からRREQのブロードキャストを行う

2. 受信したノードが終点ではなければ、Sの逆経路を記憶しさらにローカルブロードキャストを行う.このときホップカウント(RREQの始点ノードで初期値0のホップ数を記憶する値)を1加算する

※IPパケットの始点アドレスはRREQ発行元からそのノード自身のIPアドレスに変化する

3. RREQを受け取ったノードが終点ノードであるか、終点ノードへの経路を保持している場合、RREPメッセージを生成し、発信元ノードSへの逆経路を用いてユニキャストする

4. 後続のRREPがよりよい経路(終点シーケンス番号が大きい、ホップ数が少ない)場合、経路を更新することができる

### a. 拡大リング探索

RREQはTTLを決められた値に設定し、一定時間内にRREPが得られないときは、TTLを一定値増加させて再送する.最終的には全体を探索できるようにTTLを設定する.

TTLの設定には無効になった経路を保持して、その経路情報から決定する

→:RREQのブロードキャスト方向

→:記憶された始点ノードSの逆経路

→:終点から始点のRREPメッセージの動き

# AODV(経路発見の続き)

## b.RREQの転送

- ・ RREQを受信したノードは直前ホップへの経路を生成・更新する。
  - ・ 始点IPアドレスとRREQ-ID(始点ノードがRREQを送信するたびに1ずつ加算していく値)を元に同一RREQの重複受信と判断すると破棄する
  - ・ 自身の経路表への逆経路のエントリの追加/更新
- 逆経路の終点シーケンス番号は既存値とRREQの始点シーケンス番号の大きいほうの値を設定する

## c.RREPの生成

- ・ RREQを受け取ったノードがRREPを生成できるためにはそのノード自身が終点ノードであること、またはそのノードが順経路をもち終点シーケンス番号がRREQの終点シーケンス番号以上であることが必要
- RREPの生成はRREQの終点IPアドレスと始点IPアドレスをRREPの対応するフィールドにコピーする
- ★終点ノードがRREPを返す場合
- RREPを生成する直前に「(RREQ内の終点シーケンス番号)+1」と「終点ノードのシーケンス番号」の大きいほうをシーケンス番号とする、これをRREPの終点シーケンス番号フィールドに入れる
- ★終点ノード以外の途中ノードがRREPを返す場合
- RREQが通過した直前ホップのIPアドレスを終点ノードのプリコーサリストに入れる  
同様に終点ノードへ向かう次ホップのノードを始点ノードのプリコーサリストに入れる

## d.RREPの転送

- ・ RREPを受信したらRREPのホップカウントフィールドを1加算する
- ・ 受信ノードが順経路エントリを持たなければ経路エントリに加える
- ・ よりよい条件の有効なRREPであれば経路エントリを更新する
- ・ RREPの転送先の隣接ノードを終点ノードへの順経路のプリコーサリストに加える

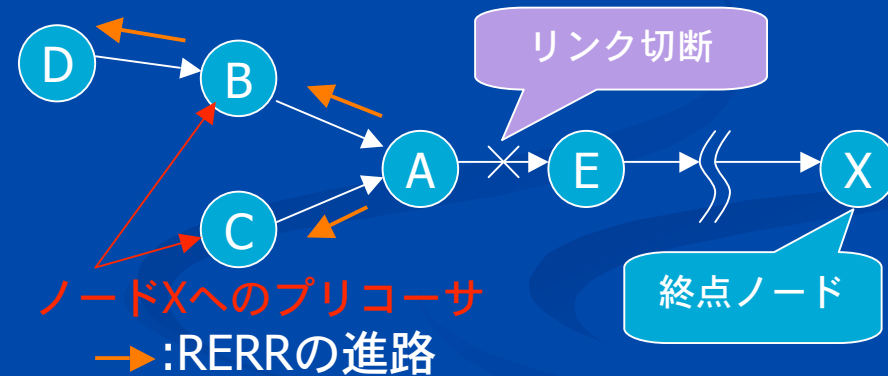
## e.無償RREP

- ・ 始点ノードがGフラグを立てたRREQを送信したときRREPを返す中間ノードは終点に対して、始点ノードへの経路を通知するメッセージを送る。これは終点ノードまでRREQを受信してから中間ノードで始点方向にRREPを送信するのと同じ意味を持つ。これにより終点ノードからのRREQなしで発行されるRREPが生成される

# AODV(経路保全)

- リンク切断の検出
  - (i) ノードは有効経路に含まれる隣接ノードとのリンク状態を確認するために**HELLOメッセージを定期的にブロードキャスト**する。メッセージフォーマットはRREPでIPヘッダのTTLを1とする。一定時間HELLOメッセージあるいは他のパケットが受信されない場合隣接ノードとのリンクが切断されたと判断する
  - (ii) 受動確認方式を採用する。受動確認方式とは元ノードからパケットを転送したノードがさらに隣接ノードにパケットを送信した場合、**元のノード**がそれを**傍受**することにより間接的に元ノードと送信先のノードとの転送に成功したと確認する方法である
  - (iii) 受動確認が得られないときや、次ホップが終点ノードの場合には、次ホップからのパケット受信、次ホップへのRREQ送信、次ホップへのICMPエコー要求などで次リンクを確認する。これによりリンク検出ができなければリンク切断と判定する。

- RERRメッセージの生成  
リンク切断を検出したノードは、そのリンクを使用していた既存経路エントリを**無効化**する、同時に**経路エラーメッセージ**を生成し、無効化された経路の終点ノードのIPアドレスをリストを入れ、これらのノードのプリコーサへ送信する。(ユニキャストまたはTTL=1のブロードキャスト使用)  
受信したパケットの終点ノードへの有効な経路が存在しないときもRERRを生成する



- ローカル経路修復  
リンク切断を検出した中間ノードは終点ノードまでのホップ数が一定値以下の場合には上流の経路を保持したまま終点経路への代替経路発見を試みる事が可能  
終点シーケンス番号を1つ増加してRREQをブロードキャストしRREPを待つ  
**一定時間内にRREPが得られなければRERRを生成、始点ノードへ通知**  
RREPが得られれば、新たな経路と以前の経路の終点ノードへのホップ数を比較。前者が後者より多ければ**Nフラグを立てたRERR**を始点ノードへ通知。  
その後経路表のエントリを更新してRREPを上流ノードへ転送。RREPが始点ノードに到達すれば経路修復が完了する。

# OLSR

- プロアクティブ形の経路制御プロトコル
- フラッディングの効率化のためにマルチポイントリレー(MPR)を導入
- 大規模、高密度のMANET形成に適している
- 各ノードは対称リンクを持つ隣接ノードからMPRを選択するので、非対称リンクは含まないことが前提
- 隣接ノード発見とトポロジ発見の機能を持つ

# OLSR

- 隣接ノード発見  
ノード間のHELLOメッセージの交換によりリンク状態検出、MPR選択、MPR通知を行う
- OLSRパケットを検出したノードは受信メッセージに基づいて自身の情報ベースの更新と受信したメッセージの再転送を行う  
受信メッセージのTTLが0以下ならば  
→メッセージを廃棄  
既受信メッセージと発信元のアドレスおよびメッセージシーケンス番号が同一ならば  
→処理をスキップ  
他インターフェースからの受信であっても再転送済みならば再転送は不要  
メッセージを送信したノードが対称隣接ノードかつMPRセレクトタであり、TTLが1より大である場合、そのメッセージをインターフェースからブロードキャストすることで再転送を行う
- トポロジ発見  
TC( Topology Control )メッセージによってMANET全体に広告し、各ノードが経路表を作成する手段を提供する

※対称隣接ノード:2ホップノードの中で少なくとも1つの対称リンクを持つもの

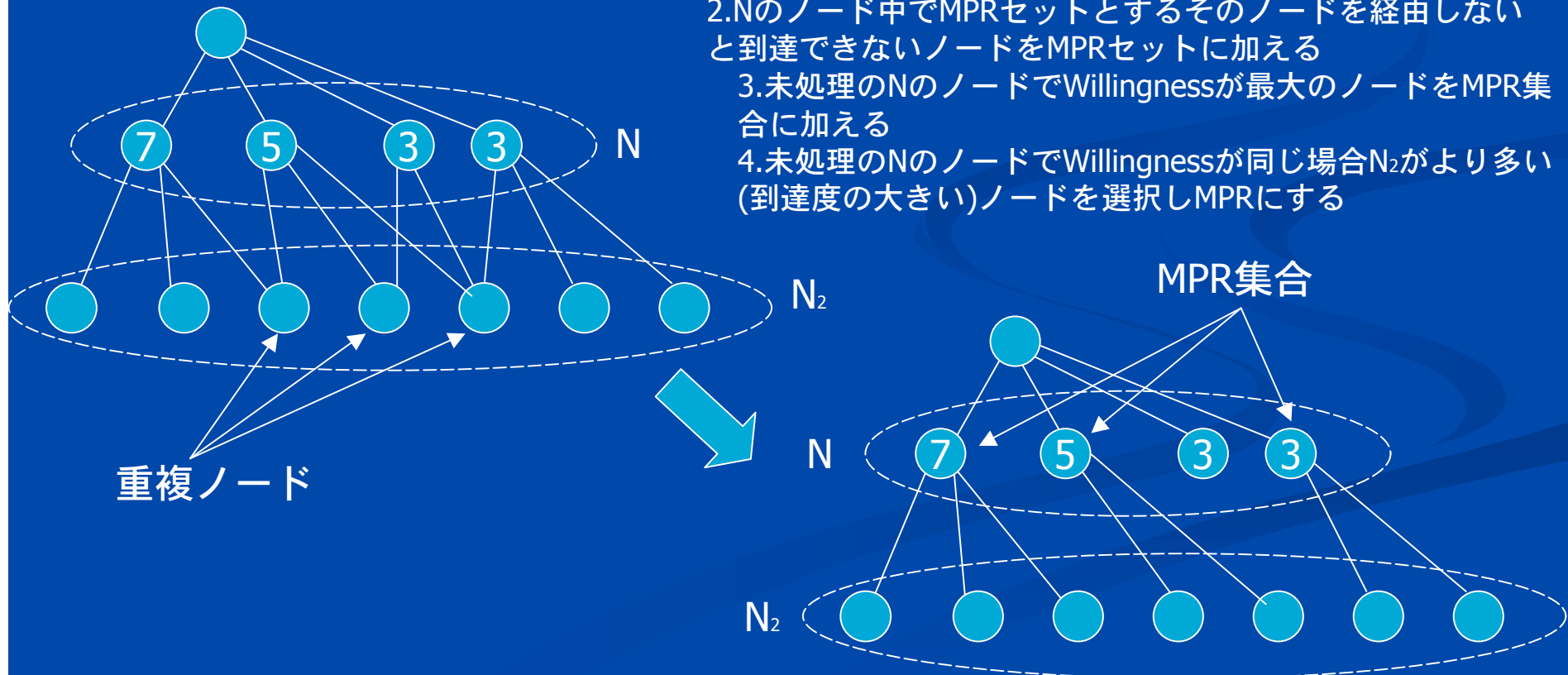
※MPRセレクトタ(集合):あるノード自身をMPRとして選択してきたノードの集合

# OLSR(MPRセットの更新)

- MPR集合  
このノード自身がMPRとして選択した対称隣接ノードのサブセット
- 各ノードには中継許容レベルをあらわす *willingness* を設定  
*willingness* は0~7の数値で設定され、0は中継不可、7は常時中継可であることを示す

以下の条件でMPR集合を決定する

1. *Willingness* が7のノードをMPRセットとする
2. Nのノード中でMPRセットとするそのノードを経由しないと到達できないノードをMPRセットに加える
3. 未処理のNのノードで *Willingness* が最大のノードをMPR集合に加える
4. 未処理のNのノードで *Willingness* が同じ場合  $N_2$  がより多い (到達度の大きい) ノードを選択しMPRにする





# その他の経路制御プロトコル

- ZRP
  - ・ Zone Routing Protocol
  - ・ プロアクティブ形とリアクティブ形を組み合わせた経路制御プロトコル
  - ・ すべてのノードに最小ホップ数が与えられた経路制御ゾーンが存在する
  - ・ 経路制御ゾーンの中の終点ノードへの経路はプロアクティブ形のIARP( IntraZone Routing Protocol )により生成
  - ・ 終点ノードがゾーン外の場合リアクティブ形のIERP( InterZone Routing Protocol )を用いて経路発見を行う
- LAR
  - ・ Location Aided Routing
  - ・ 各ノードがGPSを利用して位置情報を持つことが前提
  - ・ 経路発見のメカニズムはDSRと同様
  - ・ RREQが伝播するノード数を削減しトラフィックの軽減を期待できる
- TORA
  - ・ Temporary Ordered Routing Algorithm
  - ・ 経路要求に対して各ノードに終点ノードから順に「高度」が決められる
  - ・ 各ノードの隣接ノードの状態のみを知るだけで経路制御が可能
  - ・ リンク故障時の制御メッセージ転送範囲が制限される
- ABR
  - ・ Associativity Based Routing for Ad-Hoc Mobile Networks
  - ・ 経路の寿命が長くなるように安定したリンクを利用して経路を生成することを狙いとしている
  - ・ 各ノードはデータリンク層のプロトコルを用いて周期的にビーコンを送信
  - ・ ビーコンの受信回数から安定度を決定
- PAR
  - ・ Power Aware Routing
  - ・ モバイル端末のエネルギー有効利用の観点から経路選択を行うプロトコル
  - ・ ノードが使用するエネルギーを最小限に抑える経路を選択する

# MANET経路制御プロトコルの 実装

## ■ MANET経路プロトコル実装に当たっての課題

- ・リアクティブ形の経路制御では経路表にすべての経路が用意されるわけではないので経路表に存在しない場合でも該当パケットを廃棄するわけには行かない

そのためパケットを待機させ経路制御デーモンに経路要求を通知し、経路発見後にパケット転送を再開することが必要である

- ・リアクティブ形の経路制御プロトコルでは経路発見のオーバーヘッドを削減するために最近使用された経路キャッシュをユーザ空間に保持することが多いこのためカーネル内の経路が一定時間使用されないときその情報をユーザ空間の経路制御デーモンに通知することが必要になる

現在のOSはカーネル内の経路の利用記録をユーザ空間のプログラムには利用できない

- ・リアクティブ形には経路表を作成・更新するための周期的な隣接ノードの発見、隣接ノードの広告などの処理が存在せず、データパケットの送信要求時に経路を発見する

したがって経路制御機能をパケット転送機能の一部として実現される必要がある

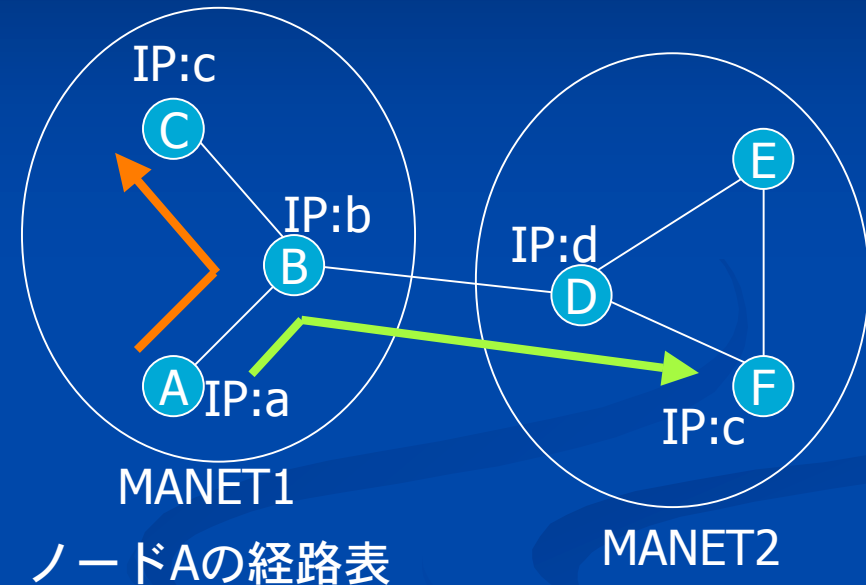
- ・リアクティブ形にはDSRのように始点経路制御やその変形であるフローに基づく転送などを採用するものがある。これらは現状のホップごとの転送機能と異なり汎用OSではサポートしていない。

# Ad Hocネットワークのコンフィギュレーション

- IPアドレス割り当て問題  
ノードにはIPアドレス、ネットマスク、デフォルト経路のゲートウェイなどが必要
- 単純解決策  
IPv6の導入によってAd hocネットワークを使用する可能性のあるすべてのノードに事前に割り当てる
- DHCPのような自動割り当てを使用する  
MANETはノード移動によってネットワークの分割が生じるためDHCPサーバにアクセスできる保証はない
- DAD( Duplicated Address Detection:重複アドレス検出 )が不可欠なケースが多い

# DADの動作

- DADには強検出形(StrongDAD)と弱検出形(WeakDAD)が存在する
- S-DADはアドレス割り当て時のDAD  
新たなアドレスの一意性確認を要求するメッセージをMANET全体に送り、一定時間内に重複を通知する応答がなければ重複がないと判断する方式
- W-DADはMANET運用中のDADであり各ノードは一意に定められた鍵を持つことを前提とする
- W-DADはMANET動作時にMANETがマージした場合、マージされた経路表中でアドレスが同じで鍵が異なるノードを検出すると重複アドレスと判断、対応するエントリを無効化する
- AERR(アドレスエラー)メッセージにより他のノードへ通知することによって重複アドレスの解消を迅速化できる

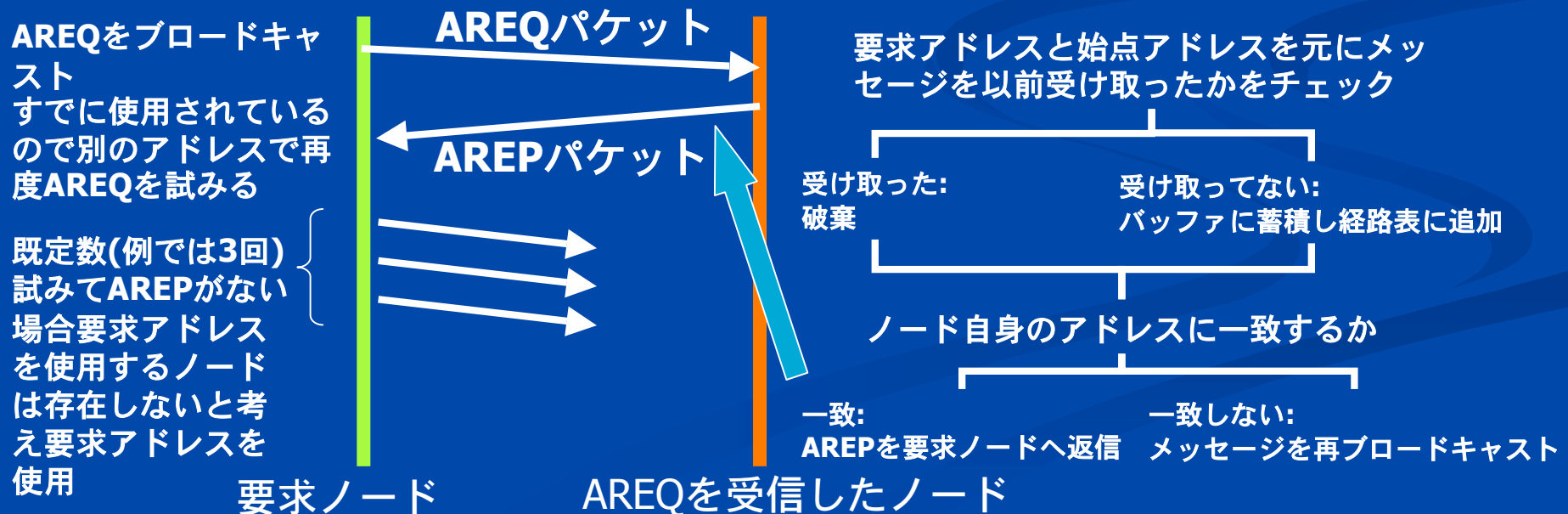


終点IPアドレス	鍵	次ホップ
b	k <sub>1</sub>	b
c	k <sub>2</sub>	b
c	k <sub>3</sub>	d

無効なエントリ

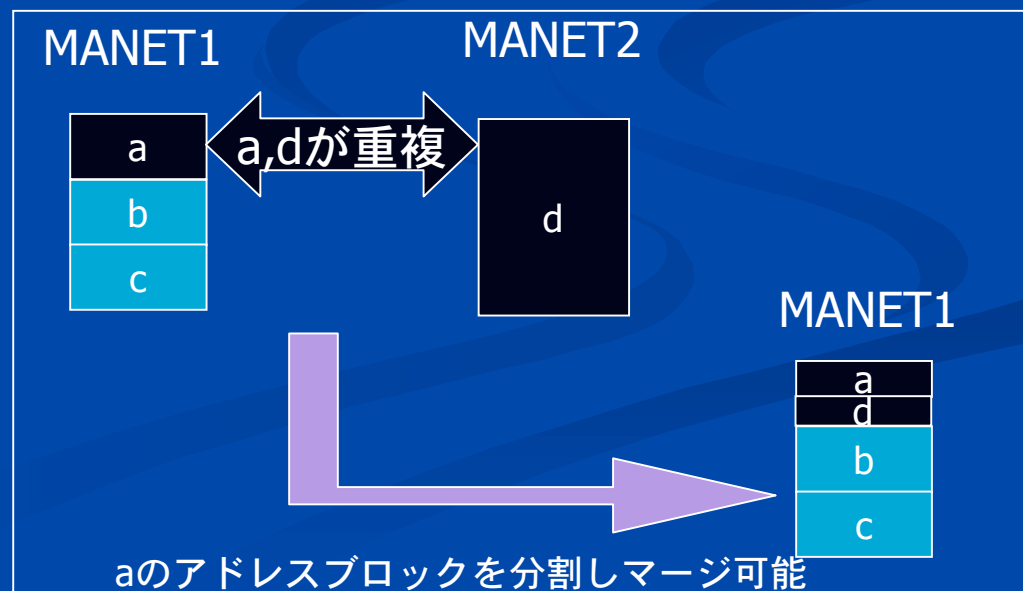
# IPアドレスの自動割り当て方式 (ランダム割り当て方式)

- アドレス要求メッセージ(AREQ)とアドレス応答メッセージ(AREP)はIPv4でのICMPパケットとなっている
- ノードが使用するアドレス候補としてアドレスブロックの下位16bitから範囲[2048,65536]を選択する(要求アドレス)
- ノードが一時的に割り振るアドレスとしてアドレスブロック下位16bitから範囲[1,2047]で選択して割り振る(一時アドレス)
- 一時アドレスはAREQの始点アドレスとして短時間使用される



# IPアドレスの自動割り当て方式 (アドレスブロック分割方式)

- 自身のIPアドレスとIPアドレス割り当てに使用するアドレスブロック(割り当て用アドレスを分割されたもの)、各ノードへのアドレスユニット割り当て状態を表すIPアドレステーブルを使用する
- 初期状態のMANET参加ノードはアドレスユニットを管理するサーバとして機能する
- 分割元を同じにするアドレスブロックを「ピア」とよぶ
- ノードがMANETから退去することから生じるアドレスブロック消失にはピアを監視することによって検出を行う
- MANETが分割されていても重複アドレス解決をする必要がない



# IPアドレスの自動割り当て方式 (割当情報共有方式)

- 隣接ノード確認方式
  - ・ 隣接ノードの有無を確認し、隣接ノードが発見できなければ、自身を最初のノードとしてMANETを構成し、自分自身にIPアドレスを割り当てる方法
  - ・ MANETの各ノードはIPアドレスを「未割当」「割当中」「割当済み」に分類して管理
- エージェント方式
  - ・ アドレスを持っているノードがエージェントとなり、まだアドレスを持たないノード(フリーノード)からの要求に基づいて割り当てる
  - ・ プロアクティブ形の経路制御プロトコルをおこなうMANETに適している

# MANETのインターネット接続

- インフラ補完形、インフラ共存型のMANETに要求される機能
- MANET内の経路(ホスト経路)に加えてインターネットを  
終点ノードとするパケット転送に使用されるデフォルト経路が必要
- インターネット接続時の課題  
MANETがインターネットに接続する際、MANETにおける  
ブロードキャストの扱いが問題となってインターネット  
アーキテクチャとの整合性が崩れる恐れがある
- ゲートウェイの情報の広告、ゲートウェイにおける  
MANETノードの管理、IPアドレスの生成とデフォルト経  
路設定の導入によってMANETからのパケットをインター  
ネットに中継できる