

## アドホックネットワークにおける移動特性の定量化と データ可用性への影響の検証

Quantifying Mobility Characteristics and Verifying the Impact on Data Availability in Ad Hoc Networks

原 隆浩†

Takahiro Hara

### 1 はじめに

近年、無線通信機能を持つ小型計算機(移動体)のみで一時的に構成されるアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークは、インターネットなどの固定インフラを必要としないという特徴から、災害時の救助活動や街中での口コミ情報の共有、車車間情報共有などの基盤として期待されている。しかし、ネットワークを構成する移動体自身が移動することから、安定した通信やデータアクセスを提供するために、従来とは全く異なる基盤技術が必要となる。

通信技術としては IETF などを中心に様々なルーティングプロトコルや MAC プロトコルの研究開発が行われている [5]。また、データ可用性の向上のための研究も、複製配置技術を中心に様々な取り組みが行われている [3]。これら従来研究のほとんどは、ランダム移動やランダムウェイポイントなど、特定の移動モデルを想定した評価を行っていた。

そこで最近では、移動モデルが通信性能に与える影響について多角的に検証した研究成果が盛んに報告されている。しかし、移動モデルがデータ可用性に与える影響について多角的に検証した研究は、十分に行われていないのが実情である。アドホックネットワークの応用としては、上述のように移動体間で情報共有を行うものが多いため、移動モデルがデータ可用性に与える影響の検証は、急務と考えられる。

本論文では、この課題に取り組むことを目的とし、まず移動モデルがデータ可用性に与える影響を定量化する。この際、特定の応用やデータ管理プロトコルを想定せず、汎用的ないくつかの性能指標を定義する。さらに、典型的ないくつかの移動モデルを対象とし、シミュレーション実験を用いて、定義した性能指標を計測する。この結果に対して考察し、典型的な移動モデルがデータ可用性に与える影響について検証する。

### 2 関連研究

近年、アドホックネットワークにおいて、移動体の移動が通信性能に与える影響を調査する研究が盛んに行われている [4]。これらは、システム性能に対する移動の影響を調査している点で本研究と類似している。しかし、従来研究では、通信経路の安定性を検証するために、主に無線リンクの安定性とエリア内の移動体分布に注目している。一方、データ可用性は、ネットワーク分断と接続移動体の流動性に影響を受けるため、これらを定量化する性能指標が必要となる。

移動がデータ可用性に与える影響を調べた研究も、いくつか報告されている [1, 2]。文献 [1] では、アドホックネットワークにおける情報散布に対する移動の影響を表すために、いくつかの性能指標が定義されている。これらのうち、「遭遇ノード数の期待値」は、データがどのくらい速く伝播するかを表している。ここで、遭遇ノードとは、各移動体が1ホップの無線リンクで接続した(無線通信範囲内に入った)移動体数と定義される。しかし、データはマルチホップの無線リンクで接続した移動体にも伝播可能なため、この性能指標は、データが伝播する速さを正確に表現できていない。本論文で提案する性能指標は、この点を考慮している。

文献 [2] は筆者らの知る限り、ネットワーク分断を定量化した最初の試みである。文献 [2] では、5つの性能指標が定

義されており、そのうちの3つがネットワーク全体の性能指標の「分断ネットワーク数」、「分断ネットワークサイズ」、「分断ネットワーク変化率」である。残り2つが移動体中心の性能指標の「所属分断ネットワーク変化率」、「移動体分離時間」である。最初の2つの性能指標は、各分断ネットワークのデータ記憶容量(どのくらいのデータを所持できるか)を表している。残りの3つの性能指標は、各分断ネットワークのメンバーがどのくらいの頻度で変化するかを表現している。しかし、各移動体が特定時間内に相互接続した移動体数などを表現する性能指標は定義されていないため、これら5つでは、ネットワーク分断の流動性を十分に表現できていない。本研究では、このような問題を解決するために、ネットワーク分断の流動性を表現する性能指標を定義する。

### 3 移動の影響を定量化するための性能指標

#### 3.1 システムモデル

ユーザの活動領域内に  $m$  個の移動体 ( $M_1, \dots, M_m$ ) が存在する。簡単のため、全ての移動体の無線通信範囲は等しく  $C$  とする。ネットワークは、移動体の無線通信範囲の制限のみを要因として、分断するものとする。本論文では、「分断ネットワーク」とは、互いに通信パス(1ホップもしくはマルチホップ)が存在する移動体の集合を表し、異なる分断ネットワーク間に通信パスは存在しないものと定義する。同じ分断ネットワークに属している移動体を「相互接続している」と表現する。本論文では、時区間  $T$  において提案性能指標を観測する。 $T$  はさらにサイズ  $t$  の  $l$  個の小时区間に分割される ( $T = l \cdot t$ )。  $t_i$  は  $T$  における  $i$  番目の小时区間の開始時刻を表す。 $n_i$  は、時刻  $t_i$  におけるネットワーク内に存在する分断ネットワークの総数を表し、各分断ネットワークを  $P_{i,j}$  と表す ( $j = 1, \dots, n_i$ )。但し、 $P_{i,j}$  は分断ネットワーク内の移動体数により降順にソートされているものとする。

#### 3.2 記憶容量に関する性能指標

##### 3.2.1 分断ネットワークの平均サイズ

文献 [2] で用いている性能指標であり、一つの分断ネットワークに含まれる移動体数の平均値として次式で定義される。

$$AvgSize = l \cdot m / \sum_{i=1}^l n_i. \quad (1)$$

##### 3.2.2 分断ネットワークのサイズの分布

記憶容量の観点からは、平均値ではなく、分断ネットワークのサイズの分布がより重要と考えられる。そこでこの性能指標は、各サイズを持つ分断ネットワークの出現比のヒストグラムとして次式で定義される。

$$ParSize_h = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} eq(h, |P_{i,j}|)}{\sum_{i=1}^l n_i} \quad (h = 1, \dots, m)$$

$$\text{ここで, } eq(x, y) = \begin{cases} 1 & x = y \\ 0 & x \neq y. \end{cases}$$

(2)

†大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻

### 3.2.3 所属分断ネットワークのサイズの分布

この性能指標は、各移動体 ( $M_k$ ) の視点からのものであり、 $M_k$  が属する分断ネットワークのサイズの分布として、次式で定義される。

$$SizeParBel_{k,h} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l eq(h, |bel(M_k, t_i)|) \quad (3)$$

$(h = 1, \dots, m).$

$bel(M_k, t_i)$  は  $M_k$  が時刻  $t_i$  に属している分断ネットワークを返す関数である。この性能指標は、全移動体が活動領域をランダムに移動する場合、ネットワーク全体の性能指標である  $ParSize_h$  とほぼ同じ値となる。一方、移動体の移動に局所性がある場合などは、異なる値となる。

## 3.3 データ配布に関する性能指標

### 3.3.1 相互接続移動体の総数

この性能指標は、各移動体からの視点に基づいており、ある移動体  $M_k$  が特定時間区間  $l' \cdot t$  ( $1 \leq l' \leq l$ ) 内に相互接続した移動体の総数として、次式で定義される。

$$NumConnNode_k = \left| \bigcup_{i=1}^{l'} bel(M_k, t_i) \right|. \quad (4)$$

この性能指標の値が大きいき、例えば分断ネットワークのサイズが小さい (移動体の接続性が低い) 場合でも、短時間で広範囲の移動体にデータを配布可能となる。また、この性能指標は、データの配信に所持者の認証が必要な場合など、データ配布がデータ所持者によってのみ行われる状況を想定している。

### 3.3.2 データ到達可能移動体の総数

この性能指標も各移動体からの視点に基づいており、ある移動体  $M_k$  が所持するデータが、特定時間区間  $l' \cdot t$  内に到達可能な移動体の総数として、次式で定義される。

$$NumReachNode_k = \left| \bigcup_{i=1}^{l'} R_i \right|$$

但し、 $R_i = \bigcup_{M_j \in N_i} C_{i,l',M_j},$  (5)

$$N_i = bel(M_k, t_i) - C_{1,i-1,M_k},$$

$$C_{s,f,M_j} = \bigcup_{i'=s}^f bel(M_j, t_{i'}) \quad (s \leq f).$$

ここで、 $C_{s,f,M_j}$  は、 $M_j$  が時間区間  $[t_s, t_f]$  に相互接続した移動体の集合を表している。 $N_i$  は、 $M_k$  が時刻  $t_i$  に初めて相互接続した移動体の集合を表している。したがって、 $R_i$  は、 $N_i$  内の移動体が時刻  $t_i$  から観測終了時刻までの時間  $l' \cdot t$  に相互接続した移動体の集合を表している。この性能指標は、データの所持者が相互接続した際に直接データを送信しなくても、データをバッファしている他の移動体を仲介して、データが伝播される状況を考慮している。

## 4 シミュレーション実験

本章では、提案した性能指標を、いくつかの典型的な移動モデル上でシミュレーション実験により観測する。

### 4.1 移動モデル

**ランダム移動 (RW) :** 最も単純な移動モデルの一つで、各移動体が単位時間ごとに移動方向、速度 ( $0 \sim V$ ) をランダムに決定する。この移動モデルは、長期的には初期位置を中心にほとんど移動しないことが知られている。

表 1: パラメータ設定

パラメータ	記号	値
移動体・参照点の速度	$V, V'$	4 [m/秒]
グループ半径 (RPGM)	$R$	250 [m]
休息期間	$S, S'$	10 [秒]
無線通信範囲	$C$	100 [m]
ホームエリア選択率	$H$	0.9
特定時間区間	$l'$	(1 ~ 100,000)

表 2: 分断ネットワークの平均サイズ

RW	RWP	MM	RPGM	RWP-L
2.21	2.86	3.60	5.55	2.44

**ランダムウェイポイント (RWP) :** 最も一般的な移動モデルの一つで、各移動体は休息期間  $S$  の後、活動領域内から目的地をランダムに決定し、ランダムに決定した速度 ( $0 \sim V$ ) で移動する。目的地に着いた後は、再び休息し、同じ動作を繰り返す。このモデルでは、移動体が活動領域の中央付近に集中しやすいことが知られている。

**マンハッタン移動 (MM) :** 市街地を想定した移動モデルで、各移動体は縦方向と横方向からなるグリッド状の道路路上を移動する。各移動体は、交差点ごとに、四方向のいずれに向かうかをランダムに決定し、次の交差点までランダムに決定した速度 ( $0 \sim V$ ) で移動する。

**参照点グループ移動 (RPGM) :** グループでの移動を想定したモデルで、各移動体は特定のグループに所属し、各グループは参照点と呼ばれる移動の中心点を持つ。各参照点は、RWP モデル ( $V', S'$ ) に基づいて移動し、その参照点を持つグループ内の移動体は、参照点から半径  $R$  内の範囲で RW モデル ( $V$ ) に基づいて移動する。

**局所性を持つ RWP (RWP-L) :** 活動領域が複数のエリアに分割される。各移動体は基本的に RWP モデルに基づいて移動するが、ホームエリアを持ち、目的地を設定する際にホームエリア内の地点を高い確率 ( $H$ ) で選択し、ホームエリア外の地点を低い確率 ( $1 - H$ ) で選択する。

### 4.2 シミュレーション設定

300 台 ( $m = 300$ ) の移動体が、 $2,500[m] \times 2,500[m]$  の活動領域に存在する。MM モデルでは、道路は縦横ともに 6 本ずつとし、各方向の道路間隔は  $500[m]$  とする。RPGM モデルにおいては、移動体は 25 個のグループに分けられ、各グループは参照点  $rp_1, \dots, rp_{25}$  を持つ。移動体  $M_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) は、自身の参照点を  $rp_{[j/(m/25)]}$  に設定する。RWP-L モデルにおいては、活動領域が 25 個の等しいサイズ ( $500[m] \times 500[m]$ ) のエリア  $R_1, \dots, R_{25}$  に分けられ、移動体  $M_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) は  $R_{[j/(m/25)]}$  をホームエリアに設定する。

各移動体は、シミュレーション開始時に、ランダムに初期位置を決定する。この際、MM モデルでは道路上、RWP-L モデルではホームエリアから初期位置が選ばれる。 $T = 100,000$  [秒]、 $t = 1$  [秒] ( $l = 100,000$ ) とし、初期状態の影響を低減するため、シミュレーションの最初の 1,000 秒の結果は無視する。表 1 に、実験で用いるパラメータの値を示す。

### 4.3 シミュレーション結果

まず、表 2 と図 1 に、分断ネットワークの平均サイズとサイズの分布を、それぞれ示す。図 1 では、横軸が分断ネットワークのサイズ、縦軸がそのサイズを持つ分断ネットワークの割合を表している。表 2 の結果から、RWP モデルにおける平均サイズは、RW モデルより大きいことが分かる。これは、RWP モデルでは、領域の中央に移動体が収集する傾向があるためである。この事実は、図 1 において、RWP モデルがサイズ 20 以上の分断ネットワークを頻繁に生成してい

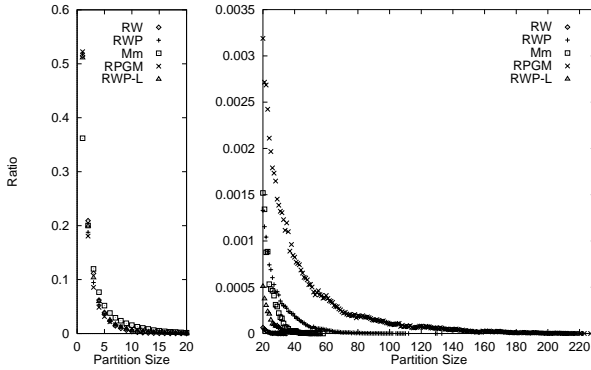


図 1: 分断ネットワークのサイズの分布

表 3: サイズ 1 の分断ネットワークの割合と最大サイズ

RW	RWP	MM	RPGM	RWP-L
0.515	0.520	0.362	0.414	0.511
(34)	(104)	(56)	(227)	(53)

ることからも確認できる．さらに詳しく調べるために，図 1 の結果から，サイズが 1 の分断ネットワークの割合と，観測期間  $T$  の間に生成された最大の分断ネットワークのサイズを抜粋したものを，表 3 に示す．この結果，サイズが 1 の分断ネットワークの割合は RWP と RW モデルでほぼ同じだが，最大サイズは RWP モデルが大幅に大きいことが分かる．

RWP と RWP-L モデルを比較すると，RWP-L モデルの方が分断ネットワークのサイズの方が小さい傾向にある．これは，RWP-L モデルでは，異なるホームエリアを持つ移動体同士は接続性が低いためである．予想通り，RPGM モデルは他のモデルよりも分断ネットワークのサイズが大きくなる傾向がある．これは，グループ内の接続性の高さに加えて，参照点が RWP に基づいて移動するため，複数のグループが領域の中心に集まる傾向があるからである．

表 2 および表 3 から，MM モデルは，RW, RWP, RWP-L よりも分断ネットワークの平均サイズが大きく，最大サイズは 2 番目に小さい．つまり，中規模の分断ネットワークが多数生成されており，この事実は図 1 の結果からも確認できる．これは，MM モデルでは，同一道路を移動する少数台の移動体が列状に相互接続する傾向があるからである．

次に，移動体視点の性能指標の結果を示す．RWP-L モデルでは，ホームエリアの位置により結果が異なることが予想されるため，エリア  $R_1$  (活動領域の角) と  $R_{13}$  (中心) をそれぞれホームエリアに持つ移動体  $M_1$  と  $M_{145}$  に注目する．なお，本論文ではこの 2 台の結果のみを示すが，筆者らは全ての移動体について調べている．その結果，僅かな差はあるものの，全ての移動体 (RWP-L の場合は同一ホームエリアをもつ移動体) でほぼ同じ結果を示すことを確認している．

図 2 は，各モデルにおける  $M_1$  と  $M_{145}$  の所属分断ネットワークのサイズの分布を示している．横軸は分断ネットワークのサイズ，縦軸はその移動体が該当サイズの分断ネットワークに属していた時間的割合を表している．この結果から，RWP-L モデルを除いて， $M_1$  と  $M_{145}$  はネットワーク全体の場合 (図 1) とほぼ同じ結果を示している．これは，これら 4 つのモデルでは，全ての移動体と同じ移動規則に従っているからである．一方，RWP-L モデルでは， $M_{145}$  は  $M_1$  よりも大きな分断ネットワークに属する傾向がある．これは， $M_{145}$  のホームエリアが活動領域の中心に位置するため，ホームエリアが異なる移動体とも接続しやすいからである．

図 3 は，各モデルにおいて，移動体  $M_1$  と  $M_{145}$  が相互接続した移動体の総数を示している．横軸は観測を行う特定時間区間  $l \cdot t$  を表している．RWP-L モデル以外でも， $M_1$  と  $M_{145}$  の結果が異なっているのは，この性能指標が移動体の

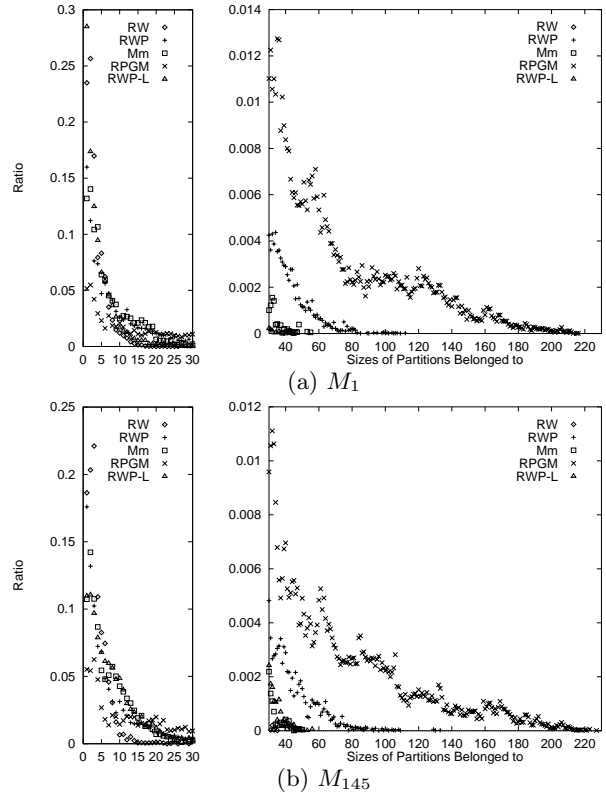


図 2: 所属分断ネットワークのサイズの分布

現在位置など偶発的事象に大きく影響を受けるためである．しかし，モデルごとに共通する興味深い現象も観測できる．まず RW モデルは，移動性の低さにより，他のモデルよりも，相互接続移動体の総数が大幅に小さくなっている．一方，RWP と RPGM モデルは，移動性の高さから分断ネットワークのサイズの大きさから，他のモデルよりも高い数値を示している．RWP-L モデルでは，ホームエリアが活動領域の角のある  $M_1$  は，他の移動体と接続する機会が非常に少ないため，観測時間区間が大きくなっても，数値の上昇が非常に遅い．一方，ホームエリアが活動領域の中心にある  $M_{145}$  は，この性能指標の上昇の速度が速い．また，図 3(b) では，最初は RWP-L モデルの上昇速度が MM モデルよりも速いが，その後，追いつかれている．これは，RWP-L モデルは移動に局所性が強いから，移動体が全ての移動体と接続することが困難である一方，MM モデルは中規模の分断ネットワークが数多く生成されるため，急速な相互接続移動体数の増加は困難であるが，移動性の高さから着実に増加するからである．

図 4 は，各モデルにおける  $M_1$  と  $M_{145}$  のデータ到達可能移動体の総数を示している．この結果から，データ到達可能移動体数は，相互接続移動体数と比較して，大幅に速く上昇している．したがって，急速にデータを配布するためには，積極的なデータ転送が重要であることが分かる．また，MM モデルでは，相互接続移動体数の上昇は比較的遅いが，データ到達可能移動体数の上昇は非常に急速であることが分かる．

なお，本論文では特定のシミュレーション設定における実験結果のみを示したが，筆者らは，移動体数や移動速度などさまざまな設定での実験を行っている．その結果，設定に応じて性能指標の挙動は異なるものの，モデル間の特性は，本論文で示したものとほぼ等しくなることを確認している．

#### 4.4 考察

本節では，前節の実験結果から得られた知見を元に考察を行う．まず RW モデルは，分断ネットワークの記憶領域，

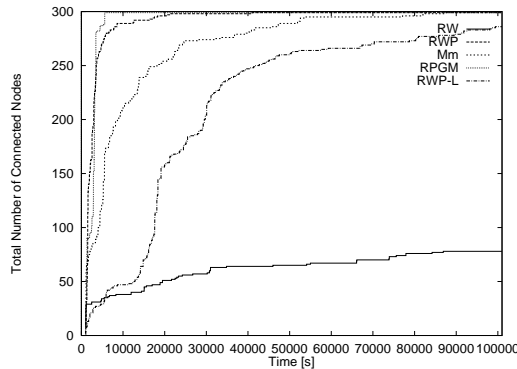
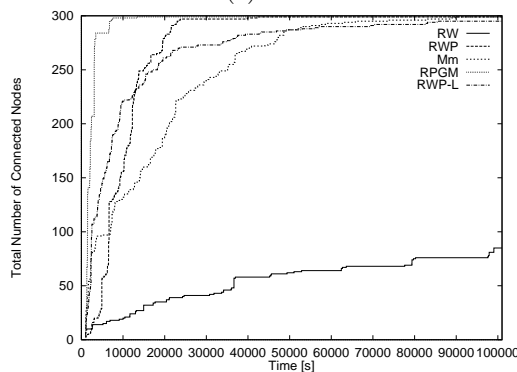
(a)  $M_1$ (b)  $M_{145}$ 

図 3: 相互接続移動体の総数

データ配布の両方の観点から優位性が低い。しかし、移動性の低さは、分断ネットワークの安定性の高さも表している。

RWP モデルは、移動体が活動領域の中心に集まりやすいという特徴から、非常に大きな分断ネットワークを形成する傾向があり、その反面、どの移動体とも接続していない孤立した移動体が多いという特徴もある。したがって、移動体が大きな分断ネットワークに属している場合は、記憶領域の面で優位性の高いモデルである。しかし、その分断ネットワークから外れると、急激に相互接続移動体数が減少するという特徴もある。したがって、他の移動体と情報共有を行う際には、これらの特徴を考慮して、慎重に共有相手を決定する必要がある。一方、データ配布に関しては、移動性の高さから、非常に優位性の高いモデルである。

MM モデルは、同一道路上の少数の移動体が分断ネットワークを形成する傾向があるため、記憶領域の観点からは優位性は低い。しかし、短期的には分断ネットワークの安定性は高く（同一道路上を同一方向に移動する移動体は切断しにくい）、孤立した移動体も少ないことから、少数の移動体と情報共有するには、比較的優位なモデルである。また、移動場所の制限は強いものの、移動体は領域内を広く移動するため、データ配布に関しての優位性は高い。

RPGM モデルは、分断ネットワークの平均サイズ、最大サイズともに全モデルの中で最も大きく、記憶領域の面で最良といえる。同一グループ内の移動体の接続性が高いため、情報共有の面でも優れている。さらに、参照点が RWP に基づいて移動するため、データ配布の観点からも優位性が高い。

RWP-L モデルは、分断ネットワークの平均サイズ、最大サイズともに比較的小さな値を示し、記憶領域の面で優位性が低い。しかし、ホームエリア内での移動体の接続性は高いため、情報共有の面での優位性はある。また、ホームエリアの位置により、移動体間の公平性が低いという点も大きな特徴である。特に、データ配布の観点から、移動体間の不公平性が大きく、モデル全体としても優位性が低い。

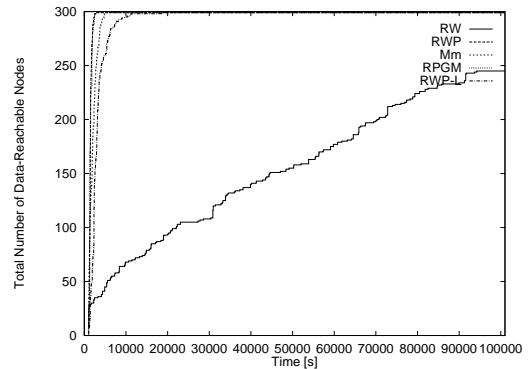
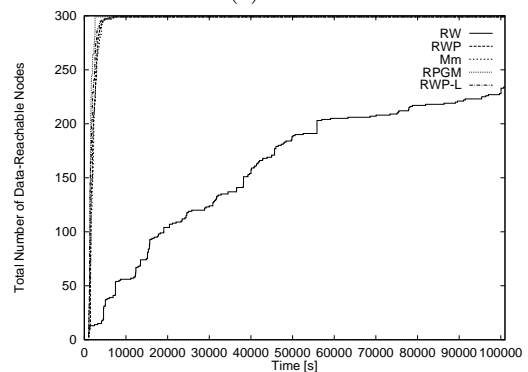
(a)  $M_1$ (b)  $M_{145}$ 

図 4: データ到達可能移動体の総数

全体的には、提案した性能指標が移動モデルに大きな影響を受けることを確認できた。また、これらの性能指標により、情報共有およびデータ配布に関する特性の調査が可能であることが示された。したがって、提案した性能指標は、今後のアドホックネットワークの研究開発において、プロトコル設計や検証に大きく貢献するものと期待できる。

## 5 まとめ

本論文では、移動体の移動が情報共有・配布に与える影響を定量化するため、いくつかの性能指標を提案した。さらに、シミュレーション実験により、提案した性能指標を、いくつかの典型的な移動モデル上で計測した。提案した性能指標は、今後のアドホックネットワークの研究開発において、プロトコル設計や検証に大きく貢献するものと考えられる。

謝辞 本研究の一部は、財団法人国際コミュニケーションの調査研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] F. Bai and A. Helmy, "Impact of mobility on mobility-assisted information diffusion (MAID) protocols," *USC Technical Report*, 2005.
- [2] J. Hahner and D. Dudkowski, "Quantifying network partitioning in mobile ad hoc networks," *Proc. of Int'l Conf. on Mobile Data Management 2007*, 2007.
- [3] T. Hara, "Effective replica allocation in ad hoc networks for improving data accessibility," *Proc. IEEE Infocom 2001*, pp.1568-1576, 2001.
- [4] B.-J. Kwak, N.-O. Song, and L.E. Miller, "A mobility measure for mobile ad-hoc networks," *IEEE Communications Letters*, Vol.7, pp.379-381, 2003.
- [5] C.E. Perkins and E.M. Royer, "Ad hoc on demand distance vector routing," *Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and App.*, pp.90-100, 1999.