

# モバイルアドホックネットワークにおける消費電力を考慮したデータ複製へのアクセス方式

篠原 昌子<sup>†</sup> 原 隆浩<sup>†</sup> 西尾 章治郎<sup>†</sup>

モバイルアドホックネットワークでは、データの可用性を向上させるため、移動体が他の移動体の持つオリジナルデータの複製を作成することが有効である。移動体が相互接続する移動体の持つデータ（複製）にアクセスするとき、データ転送に最短経路を用いると、ネットワークの中心に存在する移動体は、多くのデータを中継するため、電力を多く消費してしまう。そこで本論文では、電力を使い果たす移動体の発生をできる限り抑制することを目的とし、データの転送に用いる経路を選択するデータアクセス方法を提案する。この方法では、データを要求する移動体が、経路長および経路上の移動体の電力残量の両者を考慮して経路を選択することで、ネットワーク全体の消費電力を小さくしつつ、電力残量の少なくなった移動体が電力を使い果たすことを抑制する。さらに本論文では、データアクセス方法の性能評価のためにシミュレーション実験を行い、その有効性を検証する。

## An Access Method for Data Replication Considering Power Consumptions in Mobile Ad Hoc Networks

MASAKO SHINOHARA,<sup>†</sup> TAKAHIRO HARA<sup>†</sup> and SHOJIRO NISHIO<sup>†</sup>

In mobile ad hoc networks, it is effective that each mobile host creates replicas of data items held by other hosts for improving data availability. When a mobile host requests a data item (replica) held by another mobile host, it usually uses the shortest path for the data transmission. In this case, a mobile hosts at the center of the network needs to relay many data items and consume much power than other hosts. In this paper, we propose a data access method that prevents mobile hosts from exhausting their batteries as much as possible. This method selects a data access path considering the path length and the remaining amount of mobile hosts' batteries on the path. Therefore, this method can reduce the power consumption in the entire network while preventing mobile hosts with little remaining amount of batteries from exhausting their batteries. We present simulation results to evaluate the performance of our proposed method.

### 1. はじめに

近年、無線通信技術の発展と計算機の小型化にとともに、ルータ機能を持つ移動体のみで一時的なネットワークを形成するモバイルアドホックネットワークへの関心が高まっている<sup>1),12),15)</sup>。モバイルアドホックネットワークでは、既存の通信インフラを必要とせず、移動体どうして自律的にネットワークを構築できるため、緊急災害時の救助活動やセンサネットワークへの利用が期待されている。ここで、モバイルアドホックネットワークでは、移動体の移動によりネットワークが分断されるため、分断された部分ネットワーク内

のデータにアクセスできず、データの可用性が低下してしまう。たとえば、図1の中央の無線リンクが切断された場合、左側の3台の移動体はデータ  $D_2$  に、右側の3台の移動体はデータ  $D_1$  にアクセスできなくなる。モバイルアドホックネットワークにおけるアプリケーションには、移動体どうしてデータを共有し、互いの持つデータにアクセスするものも多い。したがって、データの可用性を向上させるため、移動体が他の移動体の持つオリジナルデータの複製を作成することが有効であり、これまでいくつかの複製配置方法が提案されている<sup>3),8)-11),14),19),20)</sup>。

複製を配置する環境において、移動体が他の移動体の持つデータを要求する場合、要求したデータがネットワーク内に複数存在するため、要求したデータまでの経路が複数発見される。一般に、要求したデータは、データ転送による遅延やトラフィックを小さくするため、

<sup>†</sup> 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  
Department of Multimedia Engineering, Graduate  
School of Information Science and Technology, Osaka  
University.

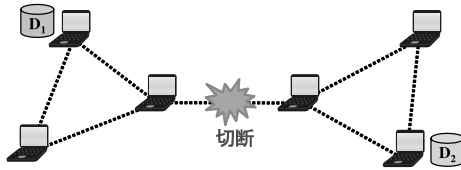


図1 ネットワークの分断  
Fig.1 Network partition.

最短経路を用いて転送される。このとき、ネットワークの中心に存在する移動体は、選択された経路上の移動体になりやすく、データを中継する機会が多くなる。モバイルアドホックネットワークでは、移動体の電力容量に制限があり、データ転送による消費電力が全体の大きな割合を占める場合が多い<sup>7)</sup>ため、データ転送の機会が多い移動体は電力を早く使い果たしてしまう。このとき、電力を使い果たした移動体がネットワークから退出すると、その移動体の持つデータにアクセスできなくなる。さらに、ネットワークから退出した移動体が多くなると、ネットワークが疎になり、移動体が他の移動体と接続できる機会が減るため、データの可用性が低下してしまう。したがって、このような問題を改善するため、電力を使い果たす移動体の発生を抑制し、移動体の生存時間（電力を使い果たすまでの時間）をできるだけ長くすることは重要な研究課題である。

そこで本論文では、電力を使い果たす移動体の発生をできる限り抑制することを目的とし、移動体が他の移動体の持つデータを要求するとき、データの転送に用いる経路を選択するデータアクセス方法を提案する。この方法では、データを要求する移動体が、経路長および経路上の移動体の電力残量を考慮して経路を選択することで、ネットワーク全体の消費電力を小さくしつつ、電力残量の少なくなった移動体が電力を使い果たすことを抑制する。さらに本論文では、データアクセス方法の性能評価のためにシミュレーション実験を行い、その有効性を検証する。

以下では、2章で関連研究を紹介し、本研究との比較を行う。次に、3章で想定環境について述べる。4章で提案するデータアクセス方法について述べ、5章でシミュレーション実験の結果を示す。最後に6章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

近年、モバイルアドホックネットワークにおける複製配置やキャッシングに関する研究がさかんに行われている。

文献8)では、移動体の各データへのアクセス頻度とネットワークポロジを考慮した複製配置方式を提案している。これらの方式は、移動体が多種類のデータにアクセスできるように、隣接移動体間や安定度の高いグループの移動体間でデータの重複を解消して、データの可用性を向上させる。また、文献8)の方式を拡張し、文献10)ではデータ間の相関性を、文献9)、11)ではデータ更新の発生を考慮した複製配置方式をそれぞれ提案している。これらの方式は、移動体間でデータ（複製）の重複を解消することで、頻繁にアクセスされるデータの数が減少し、これらのデータを持つ移動体にアクセスが集中して電力を早く使い果たしてしまう問題が発生する。

文献3)、19)では、データの可用性を向上させるため、ネットワークが分断される時間を予測し、分断前に、移動体間で複製を配置する方法を提案している。また文献14)では、配置する複製の数を抑制することで、複製配置のコストを削減しながら、データ転送による遅延を軽減する方法を提案している。また文献20)では、アクセス遅延の軽減とデータ転送によるトラヒックの削減を実現するキャッシング方式を提案している。これらの方式は、データ転送による遅延を小さくするように複製を配置することで、データを転送するホップ数が小さくなるため、結果的に移動体の消費電力を小さくしている。しかし、移動体の電力残量までは考慮しておらず、1章で述べた問題を十分に解決しているとはいえない。

筆者らの先行研究として、文献16)では、移動体の各データへのアクセス頻度、ネットワーク内のデータ（複製）の個数、および移動体の電力残量を考慮した複製配置方法を提案している。これらの方法では、移動体が、他の移動体からアクセスされる回数を均一化しつつ、自身や周囲の移動体が頻繁にアクセスするデータの複製を優先的に配置することで、データの可用性を向上させつつ、移動体間の消費電力を均一化する。これらの方法は、移動体の消費電力を考慮している点で本研究と目的が同じである。しかし、データアクセスについては特に検討しておらず、最短経路でのアクセスを想定している。一方、本研究では複製配置については特に対象としていないため、両方のアプローチを組み合わせることで適用することが有効と考えられる。

一方、ルーティングに関する研究では、移動体の生存時間を長くするため、消費電力を考慮した方法がいくつか提案されている。文献6)では、移動体が経路要求を転送するとき、自身の電力残量に基づいて転送開始までの時間を決定することで、電力残量の多い移

動体からなる経路を優先的に選択する方法を提案している．また文献 17), 18) では，移動体が他の移動体 (宛先) にデータを送信するとき，ホップ数だけでなく経路上の移動体の電力残量を考慮して，宛先までの経路を決定する方法を提案している．文献 4), 5) では，リンクや経路の生存時間を求めることで，消費電力が最小となる経路を探索する方法を提案している．これらの方法は，ネットワーク内から唯一の宛先までの経路を発見する方法である．一方，本研究では，移動体が他の移動体の持つデータを要求することを想定しており，データ (複製) を持つ複数の移動体までの経路を考慮するため，これらの研究とは基本的に異なる．

なお，既存のルーティング方法を拡張して，移動体が他の移動体の持つデータを要求することも可能であるが，その場合，次の 3 つの手順を行う必要がある．

- (1) データを持つ移動体をネットワーク内から発見する．
- (2) 発見した各移動体に対し，その移動体を宛先とした経路を，ルーティングを用いて発見する．
- (3) 発見した複数の移動体までの経路の中から最適な経路 (移動体) を選択し，その経路を用いてデータを要求する．

この場合，各手順を独立して行うため，同じような制御パケットを何度も送受信してトラヒックが増加してしまううえ，データ転送に用いる経路を発見するまでの時間 (遅延) も長くなってしまふ．特に手順 (2) では，データを持つ各移動体への経路を別々に発見するため，発見された経路には，そのデータを持つ他の移動体を中継移動体とするものも含まれ，無駄が多くなってしまふ．一方，本論文で提案するデータアクセス方法は，データを持つ移動体とそれらへの経路を効率的に発見する工夫をしている点で，消費電力を考慮したルーティングの単純な拡張とは異なる．

文献 13) では，アドホックネットワークにおいて，経路制御を行いつつサービスを発見する方法を提案しているが，消費電力は考慮されておらず，また複製配置方法と組み合わせた議論も行われていない．

### 3. 想定環境

本論文では，協調作業における作業の効率化を図るため，数十から百台程度の移動体で構成される中規模なモバイルアドホックネットワークを利用して，モバイルユーザが情報共有を行う環境を想定する．たとえば，通信基盤の破綻した緊急災害時の救助活動では，各救助隊員は，自身の作業情報や周辺の災害状況をオリジナルデータとして管理し，作業の効率化のため，

他の隊員の持つ情報を参照して自身の作業を決定する．救助隊員が自身の持つ端末の電力を使い果たすと，自身の作業情報を保持できないうえ，他の隊員もその情報を参照できないため，作業効率が低下する．さらに，その端末がネットワークから離脱するため，ネットワークの接続性も低下する．

モバイルアドホックネットワークを構成する各移動体は，自身および他の移動体の持つデータにアクセスし，自身のデータ領域に他の移動体が保持するオリジナルデータの複製を作成する．移動体がデータを要求するとき，自身がアクセス対象のデータ (複製) を持つ場合，その要求は即座に成功となる．そうでない場合，データアクセス方法を用いて相互接続している移動体の持つデータにアクセスする．なお本論文において，相互接続している移動体とは，1 ホップ以上の無線リンクで相互に通信可能な移動体の集合を指す．一方，相互接続しているどの移動体も要求したデータを持たない場合，その要求は失敗となる．他の移動体の持つデータにアクセスした移動体は，何らかの複製配置方法に従って，必要があればその複製を自身のデータ領域に作成する．本論文で提案するデータアクセス方法は，複製配置方法とは独立に動作するため，特に配置方法を限定しない．

想定環境のそのほかの詳細を以下に示す．

- $m$  個の移動体 (識別子:  $M_1, M_2, \dots, M_m$ ) が存在し，各々が自由に移動する．本論文では，ネットワークに参加する移動体が既知であり，ネットワークを構築する前に各移動体に識別子が付与されているものと想定する．たとえば，緊急災害時の救助活動のような特定グループ内の協調作業では，数十から百人程度でグループを形成して作業を行うことが考えられ，そのメンバは既知である．
- $n$  個のデータ (識別子:  $D_1, D_2, \dots, D_n$ ) が存在し，各々が特定の移動体にオリジナルデータとして保持されている．簡単化のため，すべてのデータのサイズは等しく，データ更新は発生しないものとする．なお，データ更新が発生する場合には，筆者らの先行研究<sup>9), 11)</sup> のアプローチを用いることで対応できる．
- 各移動体  $M_i$  は，自身のオリジナルを格納するデータ領域以外に，データ  $C_i$  個分の複製を配置するデータ領域を持つ．
- 各移動体  $M_i$  は，自身の電力残量  $P_i$  を測定できる．各移動体は外部から電力を供給できず，電力容量が限られている．

#### 4. 消費電力を考慮したデータアクセス方法

アクセス対象のデータ（複製）を複数の移動体が所持する場合、データ転送による遅延やトラヒックを小さくするため、通常は自身から最小ホップ数で到達できる移動体の持つデータにアクセスする。しかし、ネットワークの中心に存在する移動体は、データを中継する機会が多くなり、他の移動体より消費電力が増加する。そこで、提案するデータアクセス方法では、以下の2つのアプローチにより、電力を使い果たす移動体の発生をできる限り抑制する。

##### [ データを持つ移動体による経路の選択 ]

要求を発行した移動体からデータを持つ（1台の）移動体までの経路が複数存在する場合、4.2節の経路選択方法を用いて、これらの移動体間の経路長および経路上の移動体の電力残量を考慮し、1つの経路を選択する。たとえば、図2では、要求を発行した移動体  $M_1$  からデータ  $D_1$  を持つ移動体  $M_3$  までの経路 ( $M_1 M_2 M_3, M_1 M_5 M_4 M_3$ ) は2つ存在するため、 $M_3$  はどちらか1つの経路を選択する。[ 要求を発行した移動体によるアクセスする移動体の選択 ]

データ（複製）を持つ移動体がネットワーク内に複数存在する場合、4.2節の経路選択方法を用いて、要求を発行した移動体からデータを持つ移動体までの経路長および経路上の移動体の電力残量を考慮し、1つの移動体を選択する。たとえば、図2では、移動体  $M_3$  と  $M_7$  が要求されたデータ  $D_1$  を保持するため、 $M_1$  はどちらかの移動体にアクセスする。

以下では、まず、データアクセスの手順について説明する。次に、データアクセスの過程で用いる経路選択方法について述べる。

##### 4.1 データアクセス

表1にデータアクセスで用いるパケットを示す。表中の“データID”は要求したデータの識別子，“要求元ID”は要求を発行した移動体の識別子，“データ保持移動体ID”はデータを持つ移動体の識別子を示す。“移動体電力情報”は、経路上の移動体の識別子と電力残量を要素とするリストを示し，“移動体IDリスト”は、要求を発行した移動体からデータを持つ移動体までの経路上の移動体の識別子が含まれる。

以下では、移動体  $M_i$  がデータ  $D_j$  を要求する動作について説明する。なお、本研究では、移動体がパケットを初めて受信したとき、自身と隣接しているすべての移動体に転送することで、相互接続しているすべての移動体にパケットを転送するという単純なフラッ

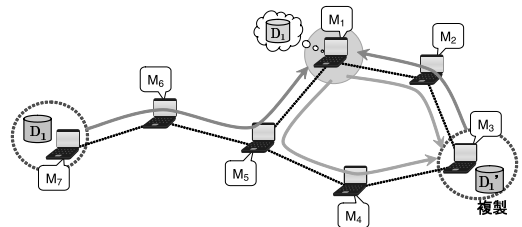


図2 移動体  $M_1$  によるデータ  $D_1$  へのアクセス  
Fig.2 Data access of  $M_1$  to  $D_1$ .

表1 データアクセスで用いるパケット  
Table 1 Packets for data access.

パケット名	要素
問合せ	データ ID, 要求元 ID, 移動体電力情報
問合せ返信	データ ID, 要求元 ID, データ保持移動体 ID, 移動体電力情報
データ要求	データ ID, 要求元 ID, 移動体 ID リスト

ディングを想定する。モバイルアドホックネットワークでは、消費電力を削減するためのフラッディング効率化手法が数多く提案されており、提案方法でも、これらの手法を用いることで、フラッディングに要する消費電力を削減できるものと考えられる。しかし、提案方法では、フラッディングによって、データを持つ移動体までの複数の経路を把握するため、フラッディング効率化手法を用いると、経路の発見機会が減少して効率的に経路を選択できず、電力を使い果たす移動体の発生を抑制できなくなる可能性がある。そのため、提案方法では、フラッディング効率化手法は用いないものとする。

- (1)  $M_i$  は  $D_j$  を持つ場合、即座にアクセスして、データアクセスの処理を終了する。そうでない場合、一定の待ち時間を設定して、相互接続している移動体に問合せパケットをフラッディングする。このパケットのデータIDには  $D_j$ 、要求元IDには  $M_i$  が含まれる。移動体電力情報には何も含まない。
- (2) 問合せパケットを初めて受信した  $M_k$  は、 $D_j$  を持つ場合、一定の待ち時間を設定して、別の経路を通ってきた問合せパケットも受信する。 $M_k$  は、問合せパケットの移動体電力情報により自身から  $M_i$  までの複数の経路の状況を把握できる。待ち時間が経過すると、4.2節の経路選択方法を用いて、複数の経路の中から1つの経路を選択して、 $M_i$  に問合せ返信パケットを送信する。このパケットのデータIDには  $D_j$ 、要求元IDには  $M_i$ 、データ保持移動体IDには  $M_k$  が含まれる。移動体電力情報には、自身も含めて、選択した経路上の移動体の識別子と電力残量が含まれる。一方、 $M_k$  が  $D_j$  を持たない

場合、自身の識別子と電力残量を移動体電力情報に追加してフラッディングを続ける。

- (3)  $M_i$  は、待ち時間が経過すると、返信してきた移動体にデータ要求パケットを送信する。このパケットのデータ ID には  $D_j$ 、要求元 ID には  $M_i$  が含まれる。移動体 ID リストには  $M_i$  からデータを持つ移動体までの経路上の移動体の識別子が含まれる。複数の移動体が返信してきた場合には、4.2 節の経路選択方法を用いて、データを要求する移動体を 1 つ選択する。問合せ返信パケットを 1 つも受信しなかった場合はアクセスが失敗となり、データアクセスの処理を終了する。
- (4) データ要求パケットを受信した移動体は移動体 ID リストの経路情報に従って、 $M_i$  に  $D_j$  を送信する。

提案するデータアクセス方法では、問合せパケットにデータの識別子を含めることで、要求するデータを持つ移動体を事前に発見する必要を排除しつつ、データを持つ複数の移動体への経路を一度に発見できる。また、データを持つ移動体は、問合せパケットのフラッディングを続けないことで、無駄なトラヒックの発生を防ぐ。

ここで、本論文では、中規模なモバイルアドホックネットワークを想定しているため、問合せパケットのフラッディングによるトラヒックや発見される経路数はそれほど膨大にならず、フラッディングとメッセージサイズ増加によるオーバーヘッドの増加は小さなものと考えられる。そのため、提案方法のノード数に対するスケーラビリティは問題とはならない。また、提案方法は、データを持つ移動体、およびこれらの移動体への経路を発見する方法であるため、データ数が増加しても、提案方法のために各移動体が管理する情報や、移動体間で送受信する制御パケットに含まれる項目、これらを用いたデータの要求手順は変化しない。したがって、データ数に対するスケーラビリティも問題とならない。なお、提案方法を大規模なモバイルアドホックネットワークに適用することを考える場合、フラッディングやメッセージサイズ増加のオーバーヘッドが問題になることが考えられるため、その場合は効率的なフラッディング方法や適切な TTL の設定などを検討する必要がある。

#### 4.2 経路選択方法

提案するデータアクセス方法では、データを持つ移動体が複数の問合せパケットを受信した場合や、要求を発行した移動体が複数の問合せ返信パケットを受信した場合に、要求を発行した移動体とデータを持つ移

動体間の経路を選択する。具体的には、経路長および経路上の移動体の電力残量を考慮した以下の 3 つの選択方法を用いる。なお、経路上の移動体の電力残量のうち、最小値をその経路の電力残量とする。

- Minimum Hop (MH) 法

ホップ数が最小の経路を選択する。該当する経路が複数存在する場合は、経路の電力残量が最大のものを選択する。

この方法では、最短経路を用いるため、データ転送に関わる移動体数を少なくでき、データアクセスによるネットワーク全体の消費電力は小さくなる。しかし、ネットワークの中心に存在する移動体は選択された経路上の移動体になりやすく、多くのデータを中継して電力を早く使い果たしてしまう。

- Maximum Battery (MB) 法

経路の電力残量が最大の経路を選択する。該当する経路が複数存在する場合は、ホップ数が最小のものを選択する。

この方法では、電力残量が少ない移動体を含む経路を選択しないため、移動体間の電力残量が均一化され、電力残量の少なくなった移動体が電力を使い果たすことを抑制できる。しかし、ホップ数が大きくなりやすく、ネットワーク全体の消費電力が増加する。

- Battery-Hop (B-H) 法

経路の電力残量が閾値  $\sigma$  ( $\sigma$  は固定値) 以上の経路のうち、ホップ数が最小のものを選択する。該当する経路が複数存在する場合は、電力残量が最大の経路を、存在しない場合は MB 法を用いて経路を選択する。

初期状態では、移動体の電力残量が多いため、ほとんどの経路の電力残量が  $\sigma$  以上となり、MH 法と同じ動作になる。時間が経過すると、閾値以上の電力残量を持つ経路が少なくなり、MB 法と同じ動作になる。

この方法では、各移動体の電力残量を均一化しながら、データ転送に関わる移動体数を少なくできるため、MH 法と MB 法の欠点が緩和される。しかし、移動体の電力残量は時間の経過にともない減少するため、適切な閾値  $\sigma$  の設定は困難な問題となる。

図 3 は、移動体  $M_1$  がデータ  $D_1$  を要求する動作を示す。図中の吹き出しは、左が移動体の識別子、右が移動体の電力残量を示す。表 2 は、このときの候補となる経路とその状態を示す。ここで、上記の 3 つの

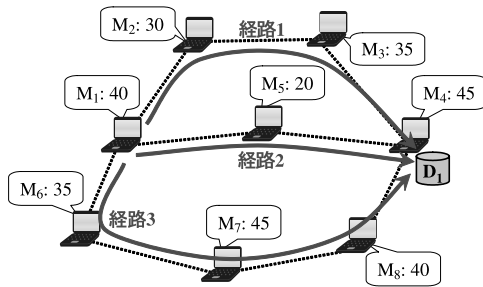


図 3 データアクセスでの経路選択

Fig. 3 Path selection on data access.

表 2 候補となる経路とその状態

Table 2 Path information.

経路 1	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	
ホップ数: 3, 経路電力残量: 30					
経路 2	$M_1$	$M_5$	$M_4$		
ホップ数: 2, 経路電力残量: 20					
経路 3	$M_1$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_4$
ホップ数: 4, 経路電力残量: 35					

方法をそれぞれ適用すると、MH 法ではホップ数が最小の経路 2 が、MB 法では電力残量が最大の経路 3 が選択される。また、B-H 法の  $\sigma$  を 25 に設定した場合、経路 1 と経路 3 が候補となり、ホップ数が最小の経路 1 が選択される。

## 5. 性能評価

本章では、提案方法の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。シミュレーション実験では、提案方法が、電力を使い果たす移動体の発生を抑制できているかを検証することを目的とする。まず、提案方法が、電力を使い果たす移動体の発生を抑制することで、移動体の生存時間をできるだけ長くできているかを検証するため、経過時間による生存移動体数と最短生存時間を指標として用いる。また、経路長と経路上の移動体の電力残量を考慮して、データの転送に用いる経路を選択することで、実際に選択される経路のホップ数や、それにより各移動体の電力残量が増減することを調べるための指標として、平均ホップ数と電力残量の分散を用いた、なお、平均ホップ数は、ネットワーク内で発生するトラヒック、データ転送の遅延、およびネットワークポロジの密度を把握するための指標としても用いる。さらに、各移動体は、データアクセスにともなうデータ転送によって電力を消費するため、データの可用性と移動体の電力消費には密接な関係があると考え、その関係を調べる指標として、アクセス成功率を用いた。

### 5.1 シミュレーション環境

$L$  [m]  $\times$   $L$  [m] の 2 次元平面上の領域に、50 台の移動体 ( $M_1, \dots, M_{50}$ ) が存在する。各移動体はランダムウォークモデル<sup>2)</sup>に従い、0 から 10 [m/秒] の範囲でランダムに決定した速度で、全方向に等確率に移動するものとした。各移動体の無線通信範囲は、半径 70 [m] の円とした。

ネットワーク内には、500 種類のデータ ( $D_1, \dots, D_{500}$ ) が存在し、 $D_j$  は  $M_k$  ( $j = 1, \dots, 500, k = j \bmod 50$ ) にオリジナルデータとして保持されるものとした。移動体  $M_i$  のデータ  $D_j$  へのアクセス頻度は、 $p_{i,j} = 2 \times [26 + \{(50 + \lfloor j/10 \rfloor - i) \bmod 50\}] \times 10^{-5}$  [回数/秒] とした。ここで、アクセス頻度とは、各移動体が各データに対してどの程度の頻度でデータ要求を発行するかを表す環境パラメータである。上記の式は、各移動体が 10 個のデータごとに異なるアクセス特性を持つが、ネットワーク全体では各データへのアクセス頻度が等しくなるような状況を表している。なお、本実験では、アクセス頻度が 1 以下であるため、この値をアクセス確率として、1 [秒] ごとに各移動体が各データにアクセス要求を発行するか否かを判断する。アクセス要求を発行する場合、4.1 節の手順に従い問合せパケットをフラッディングし、データ要求を行う。提案方法は新たなメッセージ交換等を追加することなく、最少メッセージ数で実行でき、また、各移動体での処理も非常に単純で、その遅延は無視できるほど小さい。つまり、メッセージ交換回数および各移動体での計算処理遅延が各方法でほぼ等しくなるため、本実験では、簡単化のため、データ検索における待ち時間は 0 とし、アクセス要求は、要求を発行した移動体が、データを持つ移動体までの経路を発見した場合、データを必ず受信でき、成功するものとした。各データのサイズは 1 [メガバイト] とし、各移動体は自身のデータ領域に最大  $C$  個の複製を作成するものとした。本実験では、移動体が他の移動体にアクセスしたデータを複製として保持し、データ領域が満杯のときには複製配置方法に従って複製を置き換える。この際、5.7 節以外では、LRU (Least Recently Used) 法を用いた。LRU 法では、移動体は、自身のデータ領域に空きがなく、自身の保持していないデータにアクセスした場合、自身のアクセス履歴に基づいて、最も長い間アクセスされていないデータを削除して、新たにアクセスしたデータの複製を配置する。

各移動体のバッテリー容量は  $50,000 \pm P_v$  [J] の範囲でランダムに決定した。また、移動体の電力はデータ転送のみによって消費され、データおよびすべての制

表 4 制御パケットのサイズ  
Table 4 Control packet size.

パケット名	サイズ [B]
問合せ	$4 \times \{ 2 + 2 \times (\text{パケットを受信した移動体数}) \}$
問合せ (Shortest Path)	$4 \times \{ 2 + (\text{パケットを受信した移動体数}) \}$
問合せ返信	$4 \times \{ 3 + 2 \times (\text{選択経路上の移動体数} - 1) \}$
問合せ返信 (Shortest Path)	$4 \times \{ 3 + (\text{選択経路上の移動体数} - 1) \}$
データ要求	$4 \times \{ 2 + (\text{選択経路上の移動体数}) \}$

表 3 線形モデルによる消費電力の測定結果

Table 3 Power consumption measurements calculated by linear formulations.

	消費電力 [ $\mu\text{J}$ ]
1 対 1 送信	$1.9 \times \text{size}[B] + 454$
1 対 1 受信	$0.5 \times \text{size}[B] + 356$
放送 送信	$1.9 \times \text{size}[B] + 266$
放送 受信	$0.5 \times \text{size}[B] + 56$

御パケットの送受信に必要な電力は文献 7) の線形モデルに従って消費されるものとした。1 対 1 通信と放送における送信と受信の消費電力の測定結果を表 3 に示す。また、提案方法で用いる各制御パケットに含まれる項目の 1 つを 4 [バイト] としたときの、各パケットのサイズを表 4 に示す。

表 5 に本実験で用いたパラメータを示す。各パラメータは基本的には定数値をとるが、そのパラメータの影響を調べる際には括弧内の範囲で変化させた。

ここで、領域を固定した状態で移動体数を大きくすると、移動体の密度が高くなるため、各移動体が他の移動体と接続する機会が増加し、他の移動体の持つデータへのアクセス成功率が高くなる。これは、移動体数を固定してシミュレーション領域  $L$  を変化させた場合 (5.3 節) と、相対的に同様の結果となる。本実験では、個々の移動体のアクセス頻度を設定しているため、移動体数が大きくなると、ネットワーク内で発生する総アクセス要求数が増加する。これにより、各移動体が複製を配置できる機会は増加するものの、データの転送により消費される電力が増加するため、生存時間は短くなる。移動体数を変化させた場合、このように複数の事象が影響しあい、各事象に対する検証を詳細に行えないという問題がある。そのため、本論文では、移動体数ではなく、領域を  $L$  を変化させる実験を実施した。また、データの種類およびサイズを変化させる実験の結果は、ともにデータ領域に作成できる複製数  $C$  を変化させる場合 (5.4 節) と相対的に同じ結果を示す。たとえば、データの種類が多くなると、各移動体が保持できる複製の種類割合は減少するため、データ領域を小さく設定した場合と同じ結

表 5 パラメータ設定

Table 5 Parameter configuration.

パラメータ	値
$L$	500 (250 ~ 700)
$C$	50 (5 ~ 500)
$P_v$	0 (0 ~ 25,000)
$\sigma$	5,000 (0 ~ 50,000)

果となる。同様に、データのサイズが大きくなると、各移動体が保持できる複製の数は減少するため、データ領域を小さく設定した場合と同じ結果となる。そのため、データの種類およびサイズを変化させる実験も実施しない。

なお、表 5 のパラメータ設定は、3 章で述べた、通信基盤の破綻した緊急災害時におけるモバイルアドホックネットワークを利用した救助活動を想定したものである。まず、各移動体は、低速の徒歩から走行の範囲で移動するものとした。さらに、各移動体は、作業しながら自身の作業情報や周辺の状況を音声、写真、およびビデオ画像などの形式で管理しているものとした。各移動体は、自身の作業に必要なデータなども管理しているものとし、他の移動体の持つデータの複製を配置できるデータ領域は、5 から 500 [メガバイト] 程度とした。また、各移動体は IEEE802.11g などの無線通信方式を用い、平均 2 秒に 1 回、1 つのデータに対してアクセス要求を発行する。各移動体は、リチウムイオンなどのバッテリー (あるノート PC の場合、7.2 [V] 5.8 [Ah]  $\simeq$  約 150,000 [J]) を搭載し、40% 程度の電力をデータ転送で消費するものとした。残りの 60% の電力は、CPU による処理やハードディスクへのアクセス、ディスプレイの表示などにも電力を消費しているものとしたが、本実験ではこの影響は考慮しない。

ここで、54 [Mbps] の無線通信帯域を用いて、1 [メガバイト] のデータを転送する場合、2 から 3 ホップの経路であれば、データ転送でも 1 [秒] 以内に完了するため、データや制御メッセージの転送に要する時間は、移動体の移動にともなうネットワークポロジの変化の間隔に比べて十分に小さいものと考えられる。

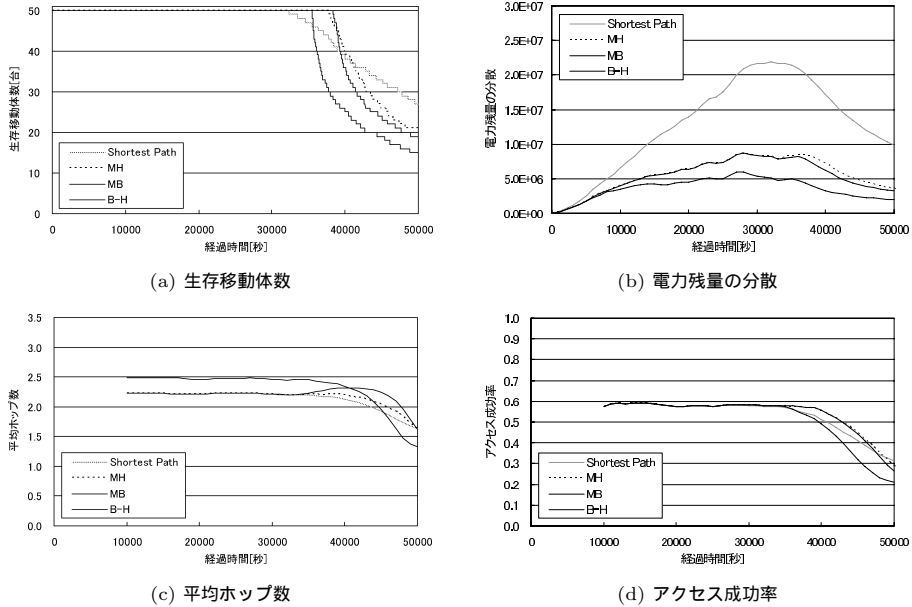


図 4 経過時間の影響

Fig. 4 Effects of elapsed time.

そのため、本実験では、転送中に中継する移動体の移動によって経路上の無線リンクが切断することはないものとした。また、データ転送速度や各メッセージの到着待合せのための待ち時間は考慮せず、データや制御メッセージは、送信元と宛先となる移動体が相互接続し、転送に関わるすべての移動体（送信元、宛先、および送信元から宛先へデータを中継する移動体）が転送後も電力を使い果たしていない場合、宛先の移動体に必ず届くものとした。一方、転送に関わるいずれかの移動体が転送中に電力を使い果たした場合、データや制御メッセージは再送されず、即座に失敗となる。また、簡単化のため、要求元の CPU 処理やデータ保持移動体の HDD アクセスなど、データ転送以外に要する遅延も十分に小さいとして無視した。さらに、MAC 層では、プロトコルによって、転送効率、衝突の発生頻度、および再送手順が異なる。本実験では、得られた結果の一般性を重視して、これらの影響を排除するため、MAC 層でのパケット衝突や再送は考慮せず、データを転送する移動体は無線通信帯域のすべてを使用できるものとした。同様の理由により、トランスポート層も、プロトコルを特定せず、再送も考慮しないものとした。

以上のシミュレーション環境において、各移動体の初期位置をランダムに決定し、10 回のシミュレーション実験を行った。このとき、1 回の実験ごとに下記の評価値を調べ、10 回の実験から得られた値の平均を

実験結果とした。

- 生存移動体数（5.2 節のみ）  
電力を使い果たさずネットワークに参加している移動体の個数。
- 最短生存時間（5.2 節以外）  
初めて電力を使い果たした移動体が現れるまでの時間。
- 電力残量の分散  
移動体の電力残量の分散。
- 平均ホップ数  
他の移動体の持つデータにアクセスしたときに用いられた経路のホップ数の平均。
- アクセス成功率  
アクセス要求の総数に対するアクセス成功回数の割合。

## 5.2 経過時間の影響

まず、50,000 [秒] までの経過時間と生存移動体数、電力残量の分散、平均ホップ数、およびアクセス成功率の関係について調べた結果を図 4 に示す。この図において、横軸は経過時間を表している。縦軸は、図 4(a) では生存移動体数、図 4(b) では電力残量の分散、図 4(c) では平均ホップ数、図 4(d) ではアクセス成功率を表している。なお、比較のため、各移動体がアクセス要求をフラッディング（4.1 節で説明したフラッディングと同様）し、移動体の消費電力を考慮せずに、要求したデータを持つ移動体に最短ホップ数で



アクセスする（該当する経路が複数存在する場合は、ランダムに選択する）場合の結果を‘Shortest Path’として示す．‘Shortest Path’では、データアクセスで用いる各制御パケットに移動体の電力残量を含める必要がないため、各パケットのサイズは、提案方法より小さくなる（表 4）．

図 4(a) の結果より、いずれの経路選択方法においても、初めて電力を使い果たした移動体が現れるまでの時間（最短生存時間）は、Shortest Path に比べて長いことが分かる．具体的には、最短生存時間は、MH 法では約 5,400 秒（約 1 時間 30 分）、MB 法では約 3,200 秒（約 53 分）、B-H 法では約 6,000 秒（約 1 時間 40 分）長い．また、いずれの経路選択方法も、初めて電力を使い果たした移動体が現れた後は、生存移動体数の減少度合いが大きく、多くの移動体の生存時間がほぼ同じであることが分かる．これは、経路選択方法では、移動体の電力残量を考慮して経路を選択するため、電力残量の少なくなった移動体が電力を使い果たすことを抑制するからである．一方、シミュレーション終了時の生存移動体数は Shortest Path が最も多い．これは、Shortest Path では、移動体がデータを中継する回数が少なくなり、移動体の消費電力が少ないからである．また、ある程度の移動体がネットワークから退出した状況では、各移動体の他の移動体の持つデータへのアクセスが失敗する機会が多く、逆に、自身の持つデータにのみアクセスする機会が多くなる．その結果、電力を消費せず、生存時間が長くなる．なお、MB 法では、電力残量の多い経路を選択する反面、ホップ数の大きい経路を選択して、ネットワーク全体の消費電力が増加するため、生存時間が MH 法や B-H 法に比べて短い．また B-H 法は、初期状態ではほとんどの経路の電力残量が閾値以上であるため、38,000 [秒] 付近までは MH 法とほぼ同じ結果となる．

図 4(b) の結果より、いずれの方法も時間が経過すると、電力残量の分散は大きくなった後、小さくなることが分かる．シミュレーションの開始時は、各移動体のバッテリー容量が同じであるため、分散は 0 であるが、時間経過とともに電力残量の分散は大きくなる．さらに時間が経過すると、電力を使い果たした移動体の電力残量が変わらないため、電力残量の分散が小さくなる．また、電力残量の分散の最大値は Shortest Path に比べて、MH 法と B-H 法で約 40%程度、MB 法では約 27%程度に小さいことが分かる．これは、経路選択方法が、効果的に移動体間の電力残量を均一化していることを示す．MB 法は経路の電力残量が最大の経路を選択するため、特にその効果が顕著に現れている．

また B-H 法は、閾値以上の電力残量を持つ経路の中から最短ホップ数の経路を選択するため、35,000 [秒] 付近からの電力残量の分散が MH 法に比べて小さい．

図 4(c) の結果より、時間が経過すると平均ホップ数は、Shortest Path, MH 法、および MB 法は基本的に短くなるが、B-H 法は少し長くなった後、短くなるのが分かる．これは、時間が経過すると、移動体が電力を使い果たすことで、ネットワークが疎になり、データ転送のための経路のホップ数が小さくなるからである．一方、B-H 法では、閾値以上の電力残量を持つ経路が少なくなると、MB 法と同じ動作になるため、平均ホップ長が長くなる．また、MB 法は、ホップ数の大きい経路を選択するため、MH 法と B-H 法に比べて、平均ホップ長がづねに長くなる．

図 4(d) の結果より、すべての移動体が生存している期間では、いずれの方法を用いてもアクセス成功率は等しい．これは、経路選択方法は、データ転送に用いる経路が複数発見された場合に、移動体の電力残量や経路長を考慮して経路を選択するため、各移動体がアクセスできるデータの種類の等しく、アクセス成功率に影響を与えないからである．一方、いずれの方法も時間が経過すると、電力を使い果たした移動体がネットワークから退出して生存移動体数が減少するため、他の移動体の持つデータへのアクセスが成功しにくくなり、アクセス成功率は低下する．これは、ネットワークから退出した移動体の持つデータにアクセスできなくなるうえ、ネットワークが疎になり、移動体が他の移動体と接続できる機会が減るからである．特に、経路長のみを考慮する‘Shortest Path’や移動体の電力残量のみを考慮する MB 法は、この特徴が顕著に現れており、MH 法や B-H 法とのアクセス成功率の差は最大 4%程度まで開いた．

### 5.3 シミュレーション領域の影響

次に、シミュレーション領域  $L$  を変化させたときの提案方法の性能を調べた．なお、本節以降では、ネットワークが正常に機能している期間として、すべての移動体が生存している期間（最短生存時間）内で電力残量の分散、平均ホップ数、およびアクセス成功率を評価した．その結果を図 5 に示す．この図において、横軸は  $L$  を表している．縦軸は図 5(a) では最短生存時間、図 5(b) では電力残量の分散、図 5(c) では平均ホップ数、図 5(d) ではアクセス成功率を表している．

図 5(a) の結果より、シミュレーション領域が大きくなると、いずれの方法も、最短生存時間は短くなった後で、長くなるのが分かる．シミュレーション領域が小さい場合、各移動体が多く移動体と隣接してい

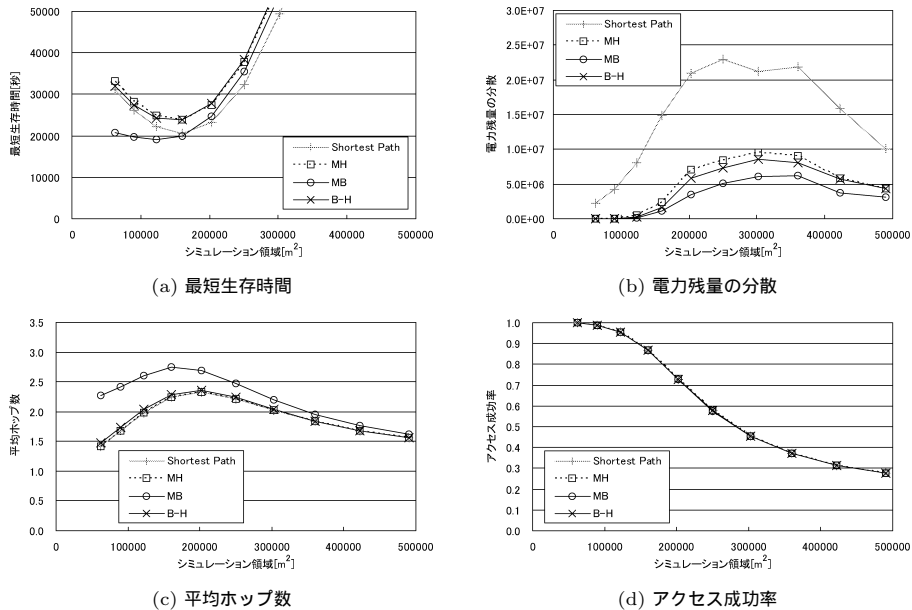


図5 シミュレーション領域の影響  
Fig. 5 Effects of simulation area.

るため、データ転送のための経路のホップ数が小さくなり、消費電力も小さくなる。シミュレーション領域が大きくなるにつれ、データ転送のための経路のホップ数が大きくなるため、データの中継による消費電力が多くなる。さらに、シミュレーション領域が大きくなると、移動体は他の移動体の持つデータにアクセスできる機会が少なくなるため、逆に消費電力が小さくなる。シミュレーション領域が小さい範囲では、最短生存時間は、MB法が最も短くなる。これは、MB法では、ホップ数の小さい経路が発見された場合にも、ホップ数にかかわらず、電力残量の多い経路を選択するからである。シミュレーション領域が大きい範囲では、最短生存時間は経路選択方法を用いた方が長く、この特徴はMH法とB-H法が顕著であった。これは、図4(a)の結果における考察と同様である。

図5(b)の結果より、シミュレーション領域が大きくなると、いずれの方法も、電力残量の分散は大きくなった後で、小さくなるのが分かる。シミュレーション領域が小さい場合、データ転送のための経路が多く発見されるため、分散してデータを中継できる。シミュレーション領域が大きくなると、データ転送のための経路のホップ数が大きくなるため、ネットワークの中心に存在する移動体を選択された経路に含まれやすく、これらの移動体の消費電力が増加する。さらに、シミュレーション領域が大きくなると、ホップ数の小さい経路しか発見されず、移動体は近くの移動体

の持つデータにのみアクセスする。また、電力残量の分散は、経路選択方法を用いた方が小さく、この特徴はMB法が顕著であった。これは、図4(b)の結果における考察と同様である。

図5(c)の結果より、シミュレーション領域が小さい場合、各移動体が多く移動体と隣接しているため、平均ホップ数は小さい。シミュレーション領域が大きくなると、移動体間の接続性が低くなるため、平均ホップ数が大きくなる。さらに、シミュレーション領域が大きくなると、移動体は近くの移動体の持つデータにしかアクセスできなくなるため、平均ホップ数が小さくなる。また、平均ホップ数は、図4(c)の結果における考察と同様の理由により、MB法が他の方法よりつねに長い。

図5(d)の結果より、シミュレーション領域が大きくなると、移動体は他の移動体の持つデータにアクセスできる機会が少なくなるため、いずれの方法も、アクセス成功率が低くなるのが分かる。また、いずれの方法も、図4(d)の結果における考察と同様の理由により、ほぼ同じ結果を示す。

#### 5.4 データ領域の影響

データ領域  $C$  を変化させたときの提案方法の性能を調べた結果を図6に示す。この図において、横軸は  $C$  を表している。縦軸は図6(a)では最短生存時間、図6(b)では電力残量の分散、図6(c)では平均ホップ数、図6(d)ではアクセス成功率を表している。

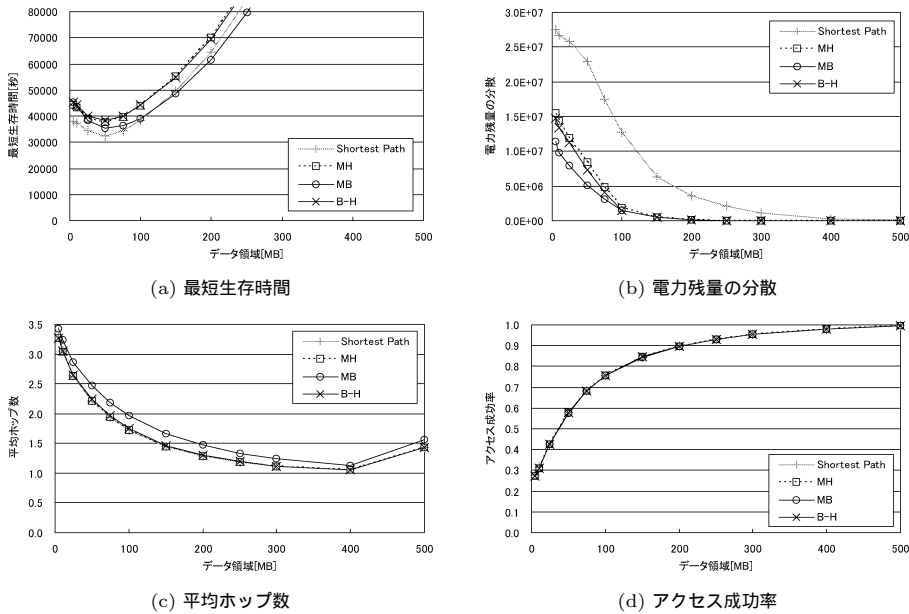


図 6 データ領域の影響

Fig. 6 Effects of memory space.

図 6(a) の結果より、データ領域が大きくなると、いずれの方法も、最短生存時間は短くなった後で、長くなるのが分かる。データ領域が小さい場合、各移動体がアクセスできるデータの種類の少ないため、データの中継による消費電力が小さく、最短生存時間は長くなる。データ領域が大きくなるにつれ、各移動体が多種類のデータにアクセスできる反面、多くのデータを中継することになり、消費電力が大きくなる。さらにデータ領域が大きくなると、自身の持つデータにアクセスできる機会が多くなるため、データの中継による消費電力は小さくなる。また、最短生存時間は経路選択方法を用いた方が長く、この特徴は MH 法と B-H 法が顕著であった。これは、図 4(a) の結果における考察と同様である。

図 6(b) の結果より、データ領域が大きくなると、いずれの方法も、電力残量の分散は小さくなるのが分かる。これは、データ転送のための経路のホップ数が小さくなるため、特定の移動体にデータ転送が集中しなくなるからである。また、電力残量の分散は、経路選択方法を用いた方が小さく、この特徴は MB 法が顕著であった。これは、図 4(b) の結果における考察と同様である。

図 6(c) の結果より、データ領域が大きくなると、いずれの方法も平均ホップ数は小さくなる。これは、各移動体が自身や近くの移動体の持つデータにアクセスできる機会が多くなるため、データ転送のための経路

のホップ数が小さくなるからである。一方、 $C$  が 500 の場合（各移動体がすべてのデータの複製を配置できる場合）、平均ホップ数が大きい。これは、時間の経過にともない、他の移動体の持つデータにアクセスする機会がなくなるため、シミュレーション開始時（各データへの最初のアクセス時）に用いた経路のホップ数が大きく影響するからである。また、平均ホップ数は、図 4(c) の結果における考察と同様の理由により、MB 法が他の方法よりつねに長い。

図 6(d) の結果より、データ領域が大きくなると、移動体が多種類のデータにアクセスできる機会が多くなるため、いずれの方法も、アクセス成功率が高くなるのが分かる。また、いずれの方法も、図 4(d) の結果における考察と同様の理由により、ほぼ同じ結果を示す。

### 5.5 $P_v$ の影響

バッテリー容量の幅  $P_v$  を変化させたときの提案方法の性能を調べた結果を図 7 に示す。この図において、横軸は  $P_v$  を表している。縦軸は図 7(a) では最短生存時間、図 7(b) では電力残量の分散、図 7(c) では平均ホップ数、図 7(d) ではアクセス成功率を表している。

図 7(a) の結果より、 $P_v$  が大きくなるといずれの方法も、最短生存時間は短くなるのが分かる。これは、 $P_v$  が大きい場合、バッテリー容量の初期値が小さい移動体が早く電力を使い果たしてしまうからである。ま

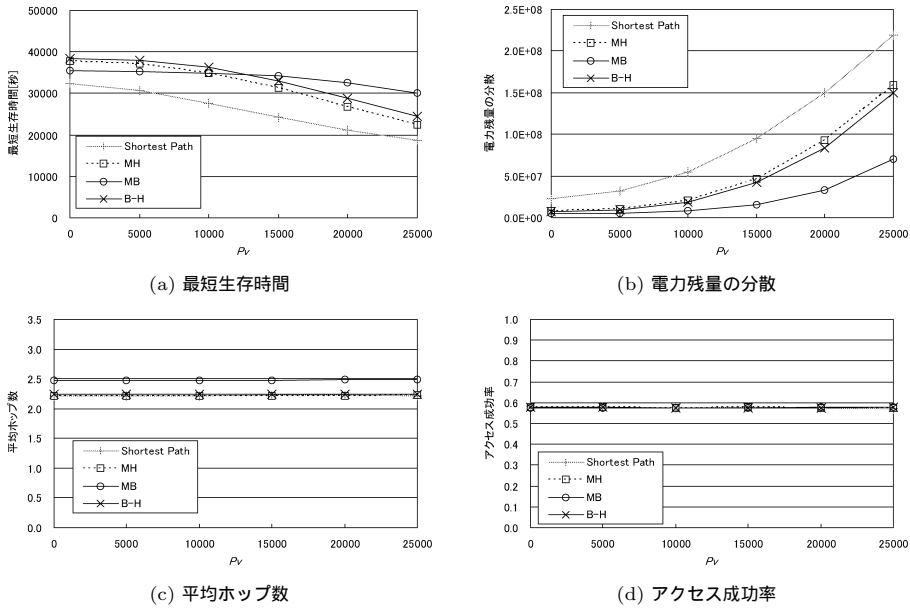


図 7  $P_v$  の影響  
Fig. 7 Effects of  $P_v$ .

た、最短生存時間は経路選択方法を用いた方が長く、 $P_v$  が小さい範囲では、MH 法や B-H 法の方が長く、 $P_v$  が大きい範囲では、MB 法の方が長くなる。特に、 $P_v$  が非常に大きい場合、MB 法の最短生存時間は、'Shortest path' より約 11,300 秒 (約 3 時間 9 分) 長く、約 30,000 秒 (約 8 時間 20 分) となることが確認できた。MB 法では、バッテリー容量が小さい移動体を含む経路を選択しないため、 $P_v$  が大きくなると、これらの移動体が電力を使い果たすことを抑制するからである。

図 7(b) の結果より、いずれの方法も、 $P_v$  が大きくなるとシミュレーションの開始時の電力残量の分散が大きくなるため、電力残量の分散は大きくなる。また、電力残量の分散、およびその増加度合は、経路選択方法を用いた方が小さく、この特徴は MB 法が顕著であった。これは、MB 法が、経路の電力残量が最大の経路を選択することで、移動体間の電力残量を最も均一化していることを示す。

図 7(c) の結果より、 $P_v$  が大きくなっても、平均ホップ数はほぼ一定であることが分かる。これは、電力残量の多い経路を選択する MB 法や B-H 法では、経路のホップ数が大きくなるか否かはランダムであるからである。一方、MH 法では、移動体はホップ数が最小の経路を選択するため、 $P_v$  が変化しても、平均ホップ数には影響しない。また、平均ホップ数は、図 4(c) の結果における考察と同様の理由により、MB 法が他

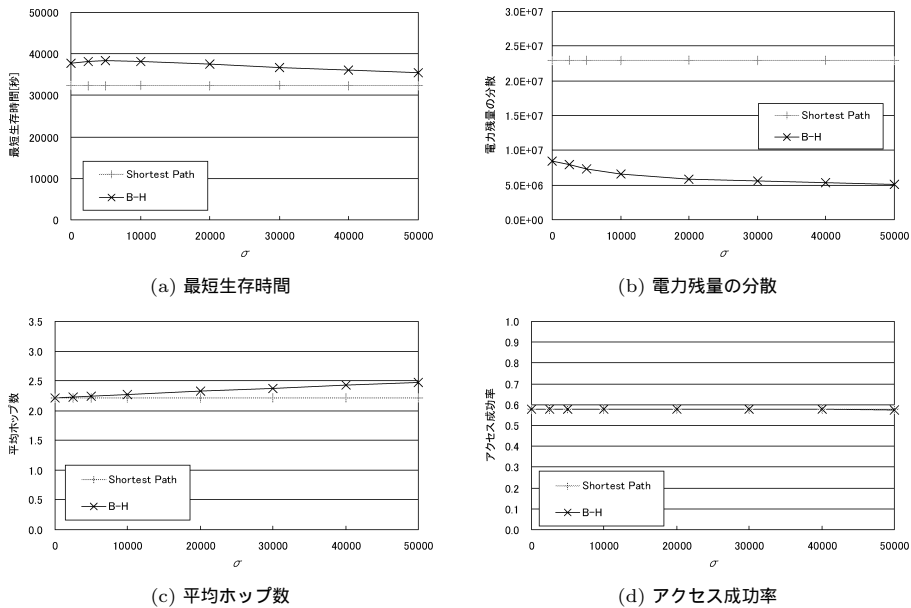
の方法よりつねに長い。

図 7(d) の結果より、 $P_v$  が大きくなっても、アクセス成功率はほぼ一定であることが分かる。これは、すべての移動体が生存している期間では、各移動体がアクセスできるデータの種別はほぼ同じであるからである。また、いずれの方法も、図 4(d) の結果における考察と同様の理由により、ほぼ同じ結果を示す。

### 5.6 $\sigma$ の影響

B-H 法で用いる閾値  $\sigma$  を変化させ、提案方法の性能を調べた結果を図 8 に示す。この図において、横軸は  $\sigma$  を表している。縦軸は図 8(a) では最短生存時間、図 8(b) では電力残量の分散、図 8(c) では平均ホップ数、図 8(d) ではアクセス成功率を表している。なお、 $\sigma = 0$  の場合、すべての経路の電力残量が閾値以上となるため、MH 法と同じ結果を示す。一方、 $\sigma = 20,000$  の場合、初期状態以外の経路の電力残量は閾値未満となるため、MB 法と同じ結果を示す。

図 8(a) の結果より、 $\sigma$  が大きくなると、最短生存時間は少し長くなった後、短くなるのが分かる。 $\sigma$  が小さい場合、大部分の経路の電力残量が  $\sigma$  以上となり、ネットワークの中心に存在する移動体を選択された経路に含まれやすいため、これらの移動体の消費電力が増加する。一方、 $\sigma$  が大きい場合、 $\sigma$  以上の電力残量を持つ経路の数がすぐに少なくなり、MB 法と同じ動作になるため、ホップ数とネットワーク全体の消費電力が増加する。また、B-H 法は、図 4(a) にお

図 8  $\sigma$  の影響Fig. 8 Effects of  $\sigma$ .

ける結果の考察と同様の理由により, Shortest Path より最短生存時間が長い.

図 8(b) の結果より,  $\sigma$  が大きくなると, 電力残量の分散は小さくなるのが分かる. また, 図 8(c) の結果より,  $\sigma$  が大きくなると, 平均ホップ数は小さくなるのが分かる. これらは, 図 4(b), (c) の結果における考察と同様で,  $\sigma$  以上の電力残量を持つ経路の数がすぐに少なくなり, MB 法と同じ動作になるため, 電力残量の多い経路を選択して移動体間の電力残量は均一化される反面, 選択される経路のホップ数は大きくなるからである.

図 8(d) の結果より,  $\sigma$  が大きくなっても, アクセス成功率はほぼ一定であることが分かる. これは図 7(d) の結果における考察と同様である. また, B-H 法と Shortest Path はともに, 図 4(d) の結果における考察と同様の理由により, ほぼ同じ結果を示す.

### 5.7 複製配置の影響

最後に, データアクセスと複製配置方法の組合せが消費電力に与える影響を調べた. 本節では, LRU 法, 文献 8) において提案されている DCG 方式, および文献 16) において提案されている WEA+B 法で比較した. 以下に, これらの方式の概要を示す. なお, どちらの方法においても, フラッディングには, 4.1 節と同様の方法を用いるものとする. また, DCG 方式および WEA+B 法では, プロトコル上, アクセス頻度の情報が必要となる. そのため, 本節では, 各移動

体は, 自身の各データへのアクセス頻度を把握しているものとする.

DCG 方式: 各移動体は, 一定の周期 (実験では 256 [秒]) ごとに, 自身の識別子を含む相互接続移動体問合せパケットをフラッディングして相互接続している移動体を把握し, ネットワークの 2 連結成分を安定度の高い移動体のグループとして作成する. グループ内で最も識別子の小さい移動体 (これをコーディネータと呼ぶ) は, グループ内の移動体にデータ情報問合せパケットを送信する. これを受信した移動体は, すべてのデータへのアクセス頻度を含むデータ情報返信パケットをコーディネータに送信する. コーディネータは, 受信した情報を元に, グループ内で複製が重複せず, グループ内の移動体のアクセス頻度の高いデータを配置するよう, グループ内の移動体が配置する複製を決定し, その情報を含めた配置データ通知パケットをグループ内の移動体に送信する. 移動体は, 配置データ通知パケットに従って自身の配置する複製を変更する.

WEA+B 法: 各移動体は, 自身のデータに空きがなく, 自身の保持していないデータにアクセスした場合に, 自身の持つデータ (複製) と今アクセスしたデータの識別子を含んだデータ情報問合せパケットを周囲の移動体 (実験では自身から 2 ホップ内で相互接続している移動体) にフラッディングする. これを受信した移動体は, 該当するデータへのアクセ

表 6 制御パケットのサイズ (DCG 方式, WEA+B 法)  
Table 6 Control packet size (DCG and WEA+B).

方式名	パケット名	サイズ [B]
DCG	相互接続移動体問合せ	$4 \times 1$
	データ情報問合せ	$4 \times \{ 1 + (\text{グループ内の移動体数}) \}$
	データ情報返信	$4 \times \{ 2 + (\text{データ数}) \}$
	配置データ通知	$4 \times \{ 2 + (\text{作成できる複製の数}) \}$
WEA+B	データ情報問合せ	$4 \times \{ 1 + (\text{保持する複製の数} + 1) \}$
	データ情報返信	$4 \times \{ 2 + 2 \times (\text{保持する複製の数} + 1) \}$

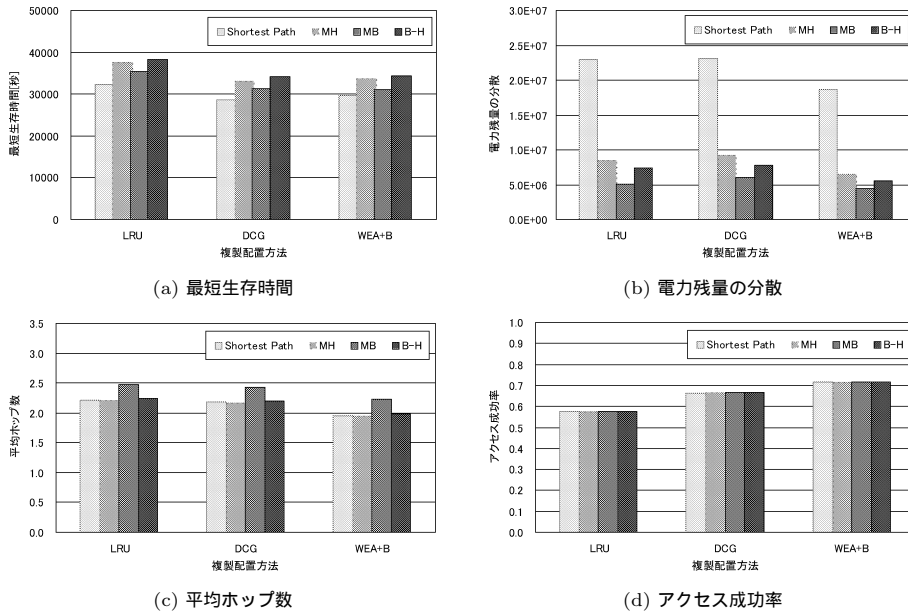


図 9 複製配置方法の影響  
Fig.9 Effects of replica allocation.

ス頻度, および各データを保持しているかどうかを含めたデータ情報返信パケットを送信する. 移動体は, 受信した情報を元に, 自身と周囲の移動体の, 該当するデータへのアクセス回数の期待値をそれぞれ計算し, これに電力残量による重みを付加した値を用いて, 今アクセスしたデータを配置するために破棄するデータを決定し, 複製の置き換えを行う. これらの方法についても, 提案方法と同様に, 各制御パケットに含まれる項目の 1 つを 4 [バイト] として, 各パケットのサイズを決定した (表 6).

結果を図 9 に示す. 縦軸は図 9 (a) では最短生存時間, 図 9 (b) では電力残量の分散, 図 9 (c) では平均ホップ数, 図 9 (d) ではアクセス成功率を表している.

図 9 (a) の結果より, いずれの経路選択方法においても, 最短生存時間は, 複製配置方法に LRU 法を用いた場合が最も長く, 最長で約 4,600 秒 (約 1 時間 15 分), 最短で約 2,700 秒 (約 45 分) 長いことが分かる. これは, LRU 法は, データの利用性が低い (図 9 (d))

ため, 移動体がデータを転送する機会が少なく, 移動体の消費電力が減少するからである. また, DCG 方式と WEA+B 法は, ほぼ同じ結果を示した. 最短生存時間は経路選択方法を用いた方が長く, この特徴は MH 法と B-H 法が顕著であった. これは, 図 4 (a) の結果における考察と同様である. さらに, データアクセスと複製配置の両方で消費電力を考慮した場合 (データアクセス方法に B-H 法, 複製配置方法に WEA+B 法を用いた場合), ともに考慮しない場合 (データアクセス方法に 'Shortest Path', 複製配置方法に LRU 法を用いた場合) と比べて, 最短生存時間は, 約 2,000 秒 (約 34 分) 長くなっており, 電力を使い果たす移動体の発生をできるだけ抑えるためには, 両者の併用は非常に有効であることが分かる.

図 9 (b) の結果より, 電力残量の分散は, DCG 方式を用いた場合が最も大きく, LRU 法, WEA+B 法の順に小さくなることが分かる. DCG 方式では, 2 連結成分の連結点となる移動体が多くデータの中継

して、消費電力が増加する。一方、WEA+B法では、電力残量の少なくなった移動体は、他の移動体からアクセスされる機会を少なくするため、移動体の消費電力が減少する。また、電力残量の分散は、経路選択方法を用いた方が小さく、この特徴はMB法が顕著であった。これは、図4(b)の結果における考察と同様である。

図9(c)の結果より、平均ホップ数は、LRU法を用いた場合が最も大きく、DCG方式、WEA+B法の順に小さくなるのが分かる。WEA+B法では、狭い範囲内の移動体どうしてアクセス頻度の高いデータを共有するため、近くの移動体を持つデータにアクセスできる。また、平均ホップ数は、図4(c)の結果における考察と同様の理由により、MB法が他の方法よりつねに長い。

図9(d)の結果より、アクセス成功率は、WEA+B法を用いた場合が最も高く、DCG方式、LRU法の順に低くなるのが分かる。特に、WEA+B法は、LRU法と比べて、アクセス成功率が約24%も高い。これは、WEA+B法が、アクセス頻度が高く、ネットワーク内の個数の少ないデータの複製を優先的に配置することの有効性を示している。一方、DCG方式では、2連結成分を構成する移動体の数が多かったため、共有するデータに重複が多くなり、アクセス成功率が低くなった。また、いずれの方法も、図4(d)の結果における考察と同様の理由により、ほぼ同じ結果を示す。さらに、データアクセスと複製配置の両方で消費電力を考慮した場合は、ともに考慮しない場合と比べて、アクセス成功率が約25%向上していることが分かる。

## 5.8 考 察

以上の実験結果から、提案方法は、従来方法である‘Shortest Path’と比べて、最短生存時間が長く、電力残量の分散が非常に小さくなることを確認できた。特に、MH法やB-H法では、電力残量を考慮しながら最短ホップ数の経路を選択することで、ネットワーク全体の消費電力をできる限り少なくするため、この効果が顕著に現れている。具体的には、中規模なモバイルアドホックネットワークを利用した災害時の救助活動を想定した本実験では、アクセス成功率を高く維持したまま、最短生存時間は、MH法では約1時間30分、MB法では約53分、B-H法では約1時間40分長くなり、電力残量の分散の最大値は、MH法とB-H法で約40%程度、MB法で約27%程度に抑制できた。また、アクセス成功率は、時間が経過すると低下するが、MH法とB-H法は、‘Shortest Path’やMB法と比べて低下の度合いが小さく、最大4%程度までそ

の差が開いた。このように提案方法は、少数の移動体にアクセスが集中して、電力を早く使い果たしてしまうことを防ぐことで、高いデータの可用性を長時間維持できる。さらに、ネットワークから退出した移動体は、自身や他の移動体の持つデータにアクセスできなくなるだけでなく、データアクセス以外のローカルな計算処理などもできず、実環境で作業を行ううえで、大きな支障をきたす。たとえば、緊急災害時の救助活動では、自身や他の隊員が持つ各自の作業情報を参照できないうえ、周囲の状況の確認や、状況把握のためのデータ収集もできない。したがって、アクセス成功率を約58%程度に維持しつつ、最短生存時間を平均約1時間20分長くする提案方法は、実環境において大きな意義があると考えられる。

また、実環境では、各移動体のバッテリー容量が一定でないことが一般的である。このような場合、5.5節で述べたように、電力残量を考慮する提案方法の有効性が大きくなる。特に、電力残量のみを考慮することで、電力残量の少ない移動体が電力を使い果たすことを最大限抑制するMB法では、この効果が顕著であり、最短生存時間は‘Shortest path’より最大で約3時間9分長く、約8時間20分となることが確認できた。したがって、MB法は、緊急災害時の救助活動のように、移動体の退出が許されない環境において、非常に有効性が高いものと考えられる。

さらに、5.7節では、複製配置のWEA+B法は、LRU法と比べて、アクセス成功率を約24%向上させているにもかかわらず、最短生存時間が最長でも約1時間15分、最短では約45分しか低下していないという結果が得られた。しかも、データアクセスと複製配置の両方で消費電力を考慮した場合（データアクセス方法にB-H法、複製配置方法にWEA+B法を用いた場合）は、ともに考慮しない場合（データアクセス方法に‘Shortest Path’、複製配置方法にLRU法を用いた場合）と比べて、アクセス成功率を約25%向上させているにもかかわらず、最短生存時間が約34分も長くなっている。したがって、データアクセスと複製配置の両方で消費電力を考慮する方法が、非常に有効であることを確認できた。

なお、本実験では、5.5節以外は、各移動体のバッテリー容量が等しいものとしているため、B-H法は、ほとんどの時間でMH法とほぼ同じ動作となる。また、5.3節以降は、すべての移動体が生存している期間（最短生存時間）内の評価であるため、この特徴がさらに顕著となり、さらにすべての方法間でアクセス成功率は等しくなる。以上のような理由から、本実験では、

電力残量の分散を除き、ほとんどのグラフにおいて、複数の方法の結果がほぼ等しくなるという事象が生じている。しかし、結果がほぼ等しいことが、結果の重要性を損なうわけではない。たとえば、平均ホップ数において、MB 法のみが大きく、その他の方法の結果がほぼ等しいことは、MB 法の特徴を顕著に表している。また、他の 3 つの方法の結果がほぼ等しいにもかかわらず、電力残量の分散は大きく異なり、さらにその結果として最短生存時間の差につながっているという事実は、非常に興味深いものと考えられる。これらの結果をすべて示すことで、MH 法や B-H 法がホップ数を特に増加することなく、効果的に目的を達成していることを確認できる。

## 6. ま と め

本論文では、電力を使い果たす移動体の発生をできる限り抑制することを目的として、データの転送に用いる経路を選択するデータアクセス方法を提案した。この方法では、要求を発行した移動体からデータを持つ移動体までの経路が複数存在する場合、データを持つ移動体が要求を発行した移動体までの経路長および経路上の移動体の電力残量を考慮して、1 つの経路を選択する。また、データを持つ移動体がネットワーク内に複数存在する場合、要求を発行した移動体がデータを持つ移動体までの経路長および経路上の移動体の電力残量も考慮して、データを要求する 1 つの移動体を選択する。

シミュレーション実験の結果より、提案したデータアクセス方法は、最短経路を用いてデータを転送する方法に比べて、最短生存時間を長くしつつ、移動体間の電力残量を均一化できることを確認した。MH 法は、最短ホップ数の経路を選択するため、消費電力を抑えて移動体の生存時間が長い。一方、MB 法では、電力残量の多い経路を選択する反面、ホップ数の大きい経路を選択してしまうため、移動体の電力残量は最も均一化されるものの、生存時間はそれほど長くない。B-H 法は、MH 法と MB 法の欠点を緩和して、各移動体の電力残量を均一化しながら、ホップ数が最小の経路を選択するため、移動体の生存時間が最も長い。

なお、本論文のシミュレーション実験では、データのサイズが大きい環境を想定しているため、提案方法のトラヒックや遅延の削減効果は小さくなる。特に、各移動体が IEEE 802.11g などの無線通信方式を用いることを想定し、データや制御メッセージの転送に要する時間は小さいとしているため、遅延の削減効果は無視できるほどになる。しかし、通信帯域が狭い環

境において、文書を共有する場合などデータのサイズが比較的小さいときには、制御メッセージの交換が性能に与える影響が大きくなるため、提案方法によるトラヒックや遅延の削減効果が有効に機能するものと考えられる。

本論文では、提案方法のパラメータ  $\sigma$  を固定のものとした。しかし、移動体の電力残量が時間の経過と共に減少することを考慮すると、 $\sigma$  を動的に変化させることで、B-H 法の性能を向上させることができるものと考えられる。たとえば、電力残量が  $\sigma$  を超える経路が発見できなかった場合には、 $\sigma$  を下げて、候補となる経路を発見することが考えられる。そこで今後は、閾値  $\sigma$  の値を動的に変更する方法について検討する予定である。

本論文のシミュレーション実験では、データ検索における待ち時間は 0 とし、アクセス要求は、要求を発行した移動体が、データを持つ移動体までの経路を発見した場合、データを必ず受信でき、成功するものとした。しかし、実環境においては、各移動体でのメッセージの処理およびデータや制御パケットの送受信に時間を要する。これらは、メッセージ交換回数および各移動体での計算処理遅延が各方法でほぼ等しくなるため、手法間の優劣（結果の相対性）には影響がないものと考えられる。一方、データの転送時間に関しては、経路のホップ数に応じて変化するため、移動体の移動性が非常に高い環境では、性能に一定程度影響することが予想される。そのため、今後はこれらを考慮した実験を行う予定である。

また本論文では、提案方式が実装されるアプリケーション層のみを考慮したシミュレーション実験により、性能評価を行った。しかし、実環境では、その下位層に、トランスポート層や MAC 層のプロトコルが存在し、シミュレーション実験で考慮していない事項が提案方法の性能に大きな影響を与える可能性がある。たとえば、移動体が密集する環境などでは、パケット衝突と再送が頻繁に発生することで、データの転送に多大な時間やトラヒックを要し、さらに移動体の消費電力も増加してしまうことが予想される。また、天候や周囲の状況によって十分な転送速度が出ない環境では、データの転送中に中継する移動体の移動によって経路上の無線リンクが頻繁に切断される可能性も考えられる。これらは提案方法以外の手法にも同等に影響するため、手法間の性能差の相対性にはほとんど影響がないものと考えられる。しかし、それぞれの性能自体には大きな影響を与える可能性があるため、今後は、これら下位層のプロトコルを考慮した評価も行い、提案方法



を総合的に評価する予定である。

提案方法は、電力を使い果たす移動体の発生を抑制するものの、ネットワーク全体での消費電力は多少増加するため、平均的には各移動体の生存時間が短くなってしまふ。そこで今後は、提案方法を拡張し、移動体の生存時間を長くする方法について検討する。たとえば、データを持つ移動体が遠くにいる場合は即座にアクセスせず、できる限り短いホップ数でアクセスする方法などが考えられる。

また本論文では、移動体がネットワークから退出しない環境を想定していた。一方、移動体の退出がある程度許容できる環境では、退出する直前の移動体の持つデータを他の移動体に配置することで、データの可用性の低下を防ぐことができる。今後は、移動体の退出が許容できる環境において、このようなデータの再配置方法などについて検討する予定である。

さらに本論文では、簡単化のため、異なるサイズのデータが混在する環境は想定しなかった。サイズの小さいデータは、データ領域に占める割合が小さいため、複製配置に要する負荷が小さいうえ、データ転送に要する時間、トラヒック、および消費電力も小さくなる。一方、サイズの大きいデータは、その逆となる。このように、データサイズが異なる環境では、複製配置方法およびデータアクセス方法が性能に大きく影響するものと考えられる。具体的には、まず複製配置に関しては、サイズの小さな多種類のデータの複製を各移動体が配置する方法が、アクセス成功率を高くし、消費電力を削減できる。一方、データアクセスに関しては、サイズの大きなデータに対してはできる限り経路長の小さい経路を選択するなどの考慮が必要となる。今後は、このような環境を想定した提案方法の拡張を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(A)(17200006)、財団法人コミュニケーション基金、および特別研究員奨励費(19-2204)の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) Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.-C. and Jetcheva, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *Proc. IEEE/ACM MOBICOM'98*, pp.85-97 (1998).
- 2) Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, Vol.2, No.5, pp.483-502 (2002).
- 3) Chen, K. and Nahrstedt, K.: An Integrated Data Lookup and Replication Scheme in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. ITCom'01*, Vol.4534, pp.1-8 (2001).
- 4) Cheng, Z. and Heinzelman, W.B.: Exploring Long Lifetime Routing (LLR) in Ad Hoc Networks, *Proc. ACM MSWiM'04*, pp.203-210 (2004).
- 5) Doshi, S., Bhandare, S. and Brown, T.X.: An On-Demand Minimum Energy Routing Protocol for a Wireless Ad Hoc Network, *Mobile Computing and Communications Review*, Vol.6, No.3, pp.50-66 (2002).
- 6) Du, X.: A Simulation Study of An Energy Efficient Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE ANSS'04*, pp.125-131 (2004).
- 7) Feeney, L. and Nilsson, M.: Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment, *Proc. IEEE INFOCOM'01*, pp.1548-1557 (2001).
- 8) 原 隆浩: アドホックネットワークにおけるデータ利用性向上のための複製配置, 電子情報通信学会和文論文集 B, Vol.J84-B, No.3, pp.632-642 (2001).
- 9) Hara, T.: Replica Allocation Methods in Ad Hoc Networks with Data Update, *ACM/Kluwer Journal on Mobile Networks and Applications (MONET)*, Vol.8, No.4, pp.343-354 (2003).
- 10) Hara, T., Murakami, N. and Nishio, S.: Replica Allocation for Correlated Data Items in Ad-Hoc Sensor Networks, *ACM SIGMOD Record*, Vol.33, No.1, pp.38-43 (2004).
- 11) 林 秀樹, 原 隆浩, 西尾章治郎: アドホックネットワークにおけるデータ更新間隔を考慮した複製配置, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.12, pp.2898-2911 (2003).
- 12) Johnson, D.B.: Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts, *Proc. IEEE WMCSA '94*, pp.158-163 (1994).
- 13) Koodli, R. and Perkins, C.E.: Service Discovery in On-Demand Ad Hoc Networks, *IETF Internet draft*, draft-koodli-manet-servicediscovery-00.txt (2002).
- 14) Nuggehalli, P., Srinivasan, V. and Chiasserini, C.-F.: Energy-Efficient Caching Strategies in Ad Hoc Wireless Networks, *Proc. MobiHoc'03*, pp.25-34 (2003).
- 15) Perkins, C.E. and Royer, E.M.: Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing, *Proc. IEEE WMCSA '99*, pp.90-100 (1999).
- 16) 篠原昌子, 林 秀樹, 原 隆浩, 西尾章治郎:

アドホックネットワークにおける消費電力を考慮したデータ複製配置方法, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.1, pp.15–27 (2006).

- 17) Singh, S., Woo, M. and Raghavendra, C.S.: Power-Aware Routing in Mobile Ad hoc Networks, *Proc. MobiCom'98*, pp.181–190 (1998).
- 18) Toh, C.-K.: Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks, *IEEE Communications*, Vol.39, No.6, pp.138–147 (2001).
- 19) Wang, K. and Li, B.: Efficient and Guaranteed Service Coverage in Partitionable Mobile Ad-hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM'02* (2002).
- 20) Yin, L. and Cao, G.: Supporting Cooperative Caching in Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM'04* (2004).

(平成 19 年 1 月 18 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



篠原 昌子 (学生会員)

2004 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2006 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。現在, 同大学院情報科学研究科博士後期課程在学中。モバイル環境における消費電力を考慮したデータ管理に興味を持つ。日本学術振興会特別研究員。日本データベース学会の学生会員。



原 隆浩 (正会員)

1995 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科博士後期課程中退後, 同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手, 2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手, 2004 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻准教授となり, 現在に至る。工学博士。1996 年本学会山下記念研究賞受賞。2000 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003 年本学会研究開発奨励賞受賞。データベースシステム, 分散処理に興味を持つ。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本データベース学会の各会員。



西尾章治郎 (フェロー)

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業。1980 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手, 大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授, 大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て, 2002 年より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教授となり, 現在に至る。2000 年より大阪大学サイバーメディアセンター長, 2003 年より大阪大学大学院情報科学研究科長, その後 2007 年より大阪大学理事・副学長に就任。この間, カナダ・ウォータールー大学, ピクトリア大学客員。データベース, マルチメディアシステムの研究に従事。現在, Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。電子情報通信学会フェローを含め, ACM, IEEE 等 8 学会の各会員。