# 無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配布方式 ～キャッシュ無効化に関する検討

土 田　　元[†]　石 原　　進[††]

無線アドホックネットワークでは，端末の移動や無線リンクの状態の変化により，トポロジの変化が頻発し端末間の接続性が保障されない．その結果，ある端末が保持するデータに対してアクセスが不可能な状況が起きてしまう．このような問題の解決方法として各端末が持つデータの複製を他の端末に持たせる複製配布方式が提案されており，筆者らはその一方式として SC(Skip Copy) 方式を提案してきた．SC 方式では位置に依存したデータをサーバレスのアドホックネットワークで扱うことを前提として，利用されるデータが Geocast によってアクセスされることを想定し，データの複製をデータ発生源周辺にまばらに配置する．SC 方式はデータの冗長度を低く抑えつつデータへのアクセス成功率を高めている．しかしこれまでの評価においては，データ生成時刻の区別やキャッシュ無効化方式については十分な検討がなされていなかった．本稿では，これらの事項について検討し評価を行った．

# A study on cache invalidation methods for a replica distribution method for data associated with location on wireless ad hoc networks

Gen Tsuchida[†] and Susumu Ishihara[††]

In mobile ad hoc networks, because of change of topology caused by movements of terminals and change of a radio link, it is difficult to maintain connection between terminals. Therefore, situations that mobile nodes cannot access the data on other terminals will occur. As the solution method of such a problem, replica distribution methods which distribute the replicas of data items to other terminals and maintain them have been proposed, and we have proposed SC method as one of them.This method distributes location dependent data items requested by geocast around the source location of them, and achives high accessibility to data while it does not require many redundant replicas. However cache invalidation method have not been fully taken into consideration in our past evaluation. In this paper, we study on cache invalidation method and evaluate the SC method by simulation including some cache invalidation methods.

## 1. はじめに

近年，無線移動端末などを用いて通信インフラのない場所に一時的にネットワークを構築できる無線アドホックネットワーク[1] が注目されている．この応用として移動端末を用いてアドホックネットワークを構築し，詳細な地域情報を収集するシステムが検討されている．このシステムの利用場面としては，通信インフラに依存しない車々間通信による道路交通情報や街角情報の流通，あるいは災害復旧や救助活動など，通信インフラを使用できない場所で多くの作業員が協力して場所に依存した情報を収集・交換しながら作業を進める際の情報流通手段としての利用方法を想定している．以降，移動端末が収集する特定の位置に関連付けられた情報を位置依存情報と呼ぶ．筆者らは，アドホックネットワーク上における位置依存情報の収集，共有を効率的に行う手法を検討している．

無線アドホックネットワークの性質上，通信を行う端末同士が直接通信不可能な場合でも，他の端末を中継することで通信可能となるが，端末の移動や無線リンクの状態の変化によって端末間の接続性は保障されないため，通信性能が大きく変動する．さらにネットワークの分断など，ネットワークトポロジの変化によってある端末が持つデータへのアクセスができなくなる状況が発生する．そこで，ある端末が取得したデータの複製を別の端末に持たせることでデータ可用性を高く保つ手法が提案されている[3)4)]．原は文献 3) でノード毎のアクセス頻度が既知のデータに対して，アドホックネットワーク上の端末にネットワークトポロジとアクセス頻度に応じて定期的に配置する数種類の手法を提案している．Cao らは文献 4) でサーバと要求者の経路上にある端末がデータの複製を持つ端末への経路あるいはデータそのものをキャッシュする手法を提案している．

対象とする情報が位置依存情報である場合，情報の所有者をネットワーク上で特定できなくても，これらの情報を保持する端末が情報に関連づけられた位置周辺に存在するならば，この位置周辺に存在する端末に問い合わせを行うことで，目的とする情報を入手できる．特定の場所にいる複数の端末にパケットを転送する技術である

† 静岡大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University
†† 静岡大学工学部
Faculty of Engineering, Shizuoka University

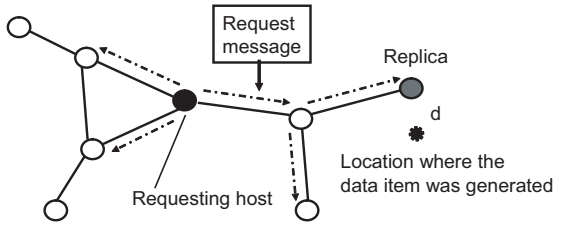


**図 1**　要求の転送

アドホックネットワーク上の Geocast[5)6)] を用いればこのような問い合わせは実現可能である．しかし，アドホックネットワークにおいては，前述の問題点があるため，端末が Geocast によって転送された要求を受信できなくなる状況が発生する．

そこで筆者らは，文献 7) で位置依存情報に焦点を当て，Geocast による要求メッセージ転送を行うこと（**図 1**）を前提とした複製配布手法として Skip Copy (SC) 方式を提案し，評価を行った．SC 方式は，i) 端末が位置依存情報を取得したとに行う情報発生位置周辺に存在する端末への投機的な複製配布，ii) 情報発生源からのホップ数による複製配布先の選択，iii) 複製の動的再配置から成り立っている．なお，SC 方式はデータへのアクセス頻度が未知あることおよびデータの提供者が未知であることを前提としており，これが既知であることを前提とする文献 3) の手法，データのオリジナルの提供者が既知であることを前提とする 4) とは性質が異なる．

SC 方式はデータの冗長度を低く抑えつつデータへのアクセス成功率を高めている．しかしこれまでの評価においては，同一の場所で生成されるデータはすべて同一の識別子をもつものとし，これらの生成時刻による区別を行っていなかった．また，キャッシュ無効化方式についての十分な検討がなされていなかった．本論文では，SC 方式におけるデータバージョンの違い，キャッシュ無効化方式の違いによる影響について検討する．

## 2.　位置依存情報複製配布方式

### 2.1　想 定 環 境

本論文では，以下の環境を想定する．

- 各端末は現在位置を GPS で取得する．
- アドホックネットワークにおいて複数の端末が自由に移動し，情報の収集，交換を行う．
- 固定のデータサーバは存在しない．各端末は目的とする位置依存情報を持っているホストの特定はできない．
- 各端末は，目的とする位置周辺の情報を持っていない場合に，その位置の周辺にいる複数の端末へ Geocast により要求を行う．
- 各端末の記憶領域は制限されている．
- 各端末は，現在位置によって識別されるデータを発生する．各データにはその発生時刻と有効期限が与えられる．

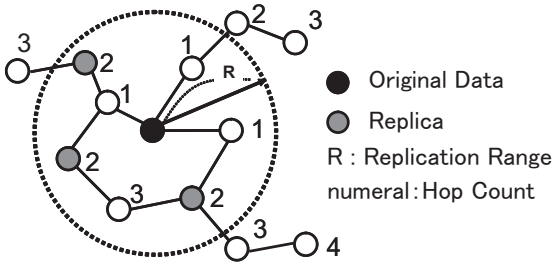


**図 2**　SC 方式（$s$=2）による複製配布

以下，文献 7) で評価した SC 方式の概要について述べる．

### 2.2　投機的複製配布と複製配布先の選択

SC 方式では，端末間の接続性が保障されないアドホックネットワーク上でのデータ可用性を向上させるため，各端末から発生する位置依存情報への要求に対して，適切な応答が高確率で得られることを目的として設計されている．このため，各端末はオリジナルデータを取得後，直ちに周辺にいる端末へまばらに複製データを配布する．

複製データをオリジナルデータ取得端末が直接，または間接的に接続可能な全ての端末に配布した場合を考える．各端末の記憶容量が十分にあれば，確実にデータ可用性は高まるが，記憶容量に制限のある携帯端末では，必ずしも発生した全ての複製を保持することができるとは限らない．このような複製配布は多大なトラフィックを必要とし，同一データの複製が過度に存在する可能性が高い．そのため，接続可能な全ての端末に複製を保持させることは現実的ではない．そこで SC 方式では，データの複製をアドホックネットワーク内の端末に数ホップおきに，かつ複製配布範囲を制限して配布することで，複製による記憶容量の圧迫の抑制と同一データの過度な複製配布防止を実現している．パラメータとして複製密度決定要素 $s$ と複製配布範囲 $R$ を定義し，複製は情報取得端末から $s$ ホップごと，かつ情報取得端末から半径 $R$ 内に存在する端末にのみ複製を配布する（**図 2**）．

### 2.3　複製の再配置

複製を配布しても，端末が移動すると複製も情報発生源から離れてしまう．このため，時間の経過とともに，複製を保持している端末は，Geocast によって転送される要求メッセージを受け取ることができなくなり，アクセス成功率が低下してしまう．この防止策として複製の再配置（**図 3**）を用いる．これは，データ応答時の経路上に，SC 方式と同様に複製密度決定要素 $s_r$ ホップおきに複製を再配置する．このとき複製データを保持する端末は，オリジナルデータの発生位置を中心とした半径 $R_r$(複製再配置範囲) の円の内部に存在するもののみである．再配置を行うことで端末は移動しても複製はその発生場所周辺に留めることができ，Geocast による要求に対してデータへのアクセス成功率を高めることができる．なお，今回の評価では $s = s_r$，$R = R_r$ としている．

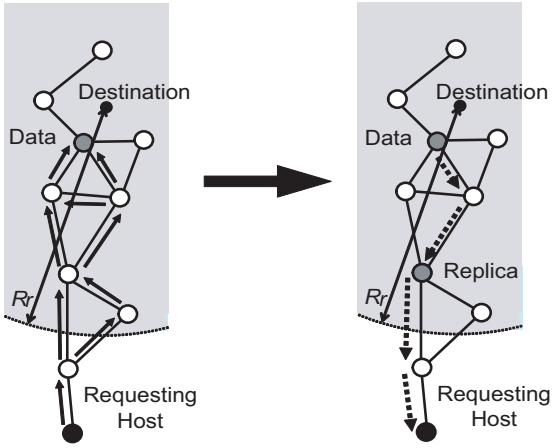


**図 3**　複製の再配置

## 3. キャッシュ無効化方式

本章では，位置依存情報複製の無効化方式について検討する．なお，アドホックネットワークにおけるキャッシュ無効化方式については文献 8) でいくつか検討されている．これらが想定する環境は，オリジナルデータの提供者は固定である．一方我々の想定している環境では，ある時点で地域 $A$ に関するデータを生成する端末と地域 $A$ のデータを更新する端末は同一であるとは限らないため，これらの方式を我々が想定する環境へ適応するのは困難であると考える．そのため，我々の提案手法に適用可能なキャッシュ無効化方式について検討する．

以下 5 種類の方法を示すが，いずれの方式においてもデータ発生から有効期限（$T_{TTL}$）が経過したデータは無効化されるものとする．

### 3.1　ランダム法 (Random)

ランダム法では，自身が持っているデータの中からランダムで無効化するものを決定する．この方式の問題点は，利用頻度が高いデータも一定の確率で無効になってしまうことである．

### 3.2　Least Recently Used (LRU)

Least Recently Used (LRU) では，端末自身が持っているデータに対するアクセス時刻が最も古いものを消去する．また，アクセスされていないデータが存在する場合は，そのデータを優先して消去する．

この方式をキャッシュ無効化に用いる際に問題となるのは，アクセスされていないデータが存在する場合に，そのデータを優先して消去するため，発生したばかりでまだ使われていないデータを消去してしまう可能性があることである．発生したばかりのデータを消去してしまうことで，新しいデータに対するロバスト性が低くなる．

### 3.3　Least Frequency Used (LFU)

Least Frequency Used (LFU) の考え方に即して，キャッシュ無効化に端末が位置依存情報に対する要求を受信した回数を利用する．要求受信回数が多い位置依存情報の複製を優先的に保持し，要求受信回数が少ない位置依存情報の複製を無効化の対象にする．

この方式で問題点となるのは，情報発生源から遠ざかりすぎて，位置依存情報の更新データを受信できないが，遠ざかる前までの短期的なアクセス頻度が極端に高い場合である．このケースでは，現在位置から遠い場所で発生した古いデータが端末に記憶され続ける．複製を保持する端末が情報発生源から遠ざかってから時間がそれほど経過していない状態では問題にはならないが，情報発生源から遠ざかってからある程度時間が経過した場合に問題が生じる．

例えばある端末が持っている地域 $A$ で発生した位置依存情報に対するアクセス頻度が，他の地域で発生した位置依存情報に対するアクセス頻度より極端に高いとすると，この端末が地域 $A$ 周辺から離れてしばらくたったとしても，それまでの地域 $A$ で発生したデータに対するアクセス頻度が極端に高かったため，実際は地域 $A$ で発生したデータに対するアクセス頻度が短期的には低くなったとしても，この端末上では地域 $A$ で発生したデータに対するアクセス頻度が高いとみなされつづける．この結果，古くなった地域 $A$ の情報が保持され続けることになる．これにより，古すぎる情報が端末に保持され続けることで記憶領域を圧迫し，本来保持されなければならない情報が保持できない可能性がある．

### 3.4　情報発生源からの距離を利用する方法 (Distance)

この方法では，現在位置からより遠い場所で発生したデータを優先して捨て，情報発生源周辺に情報の複製を残すことを目的としている．

この方式を用いることの問題点として考えられるのは，情報発生源周辺にその場所で発生したデータの複製を持つ端末が多くなる可能性があることである．複製を持つ端末が多すぎると，要求，応答のトラフィックが多く発生する．また，情報発生源周辺にその場所で発生したデータの複製を持つ端末が多くなることで，記憶領域を端末の現在地の近くで発生したデータが占めることになり，データの多様性が低下する可能性がある．

### 3.5　複製のタイムスタンプを利用する方法 (TimeStamp)

この方法では，データ発生・更新時刻の古いデータを優先して捨て，新しいデータのみを端末に保持させることである．すなわち有効期限切れに最も近いデータを破棄する．

この方式で問題となるのは，データの発生あるいは更新頻度が低いが利用頻度が高いデータが存在する場合である．この場合，データ更新頻度が低いため，このデータのネットワーク上の多くの複製は古いものとみなされ優先的に破棄される可能性が高い．このため，利用頻度が高くてもネットワーク上に複製がなくなり，データの可用性を低下させる可能性がある．

## 4. シミュレーションモデル

提案する位置依存情報複製配置方法について，シミュレーションによる評価を行った．本章ではそのためのモデルについて説明する．シミュレータとして GloMoSim[9] を用い，提案方式に基づく位置依存情報複製管理機構をアプリケーションとして実装した．

### 4.1 シミュレーションモデル

1000[m] × 1000[m] の 2 次元平面上に 100 台の移動端末が存在すると仮定する．このうち 50 台は，以下で説明するデータ生成モデルとデータ要求モデルに従って動作させる．残りの端末はデータの中継および複製配布方式のルールに基づく複製データの保持のみを行う．

MAC 層プロトコルには IEEE802.11 を用い，通信帯域幅を 2[Mbps]，通信可能半径を 100[m] とした．要求，応答，複製配布，全ての通信は UDP ブロードキャストで行うものとした．ルーティングはアプリケーションレベルで行われ，アドホックネットワーク用の IP ルーティングプロトコルは使用していない．これは，各メッセージを中継する端末が応答に必要な複製を保持しているかの判定，および複製の配置の判定を行うためにアプリケーションレベルで扱う必要があるためである．

#### 4.1.1 移動モデル

各端末は移動領域内をランダムウェイポイントモデル[10] で移動するものとした．移動速度は 0–2[m/s] とし，Pause Time =3[sec] とした．端末の初期位置はランダムに決定した．

#### 4.1.2 データ生成モデル

位置依存情報の取り扱いを容易にするため，シミュレーション上の移動領域を正方形の領域に等分割し，端末はその現在位置をカバーする領域の中心に関連付けられたデータを取得する．端末は以下で述べるデータ生成モデルに従って現在位置に関連するデータを取得し，後述するデータ要求モデルに従って他の領域に関連したデータをアドホックネットワークを介して要求する．

移動領域の分割サイズは 100[m] とした．従って 100 箇所から異なるデータが発生することになる．本評価では生成データに有効期限 $T_{TTL}$ を設定して，データのバージョンの違いを考慮することとした．各端末は最大 $N$ 個の位置依存情報を保持することができる．シミュレーションの初期状態ではどの端末もデータを保持していない．

データ生成を行う端末は平均 60 秒のポアソンモデルに従い，その時端末自身が存在する領域に関するデータを取得する．取得されるデータは，端末の存在する領域の中心位置と発生時刻をパラメータとして持ち，UDP，IP ヘッダを含めて 1500bytes のパケットで配送されるものとする．各端末はデータを取得後ただちに近隣の端末へ複製を配布する．複製配布半径 $R$ を 300[m]，スキップパラメータ $s$ を 2 とし，有効期限 $T_{TTL}$ を 5000[sec] とした．

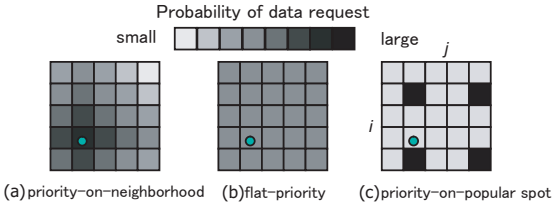


**図 4** データ要求モデル

#### 4.1.3 データ要求モデル

半数の端末は平均 60 秒のポアソンモデルに従ってデータ要求を行う．データ要求パケットは目的データが存在する位置をキーとして持ち，サイズは UDP，IP ヘッダを含めて 128bytes とした．

アプリケーション利用におけるさまざまな状況を考慮して，データ要求モデルには 7) の評価で用いた (a) 近隣優先モデル，(b) 一様アクセスモデル，(c) 人気スポットモデルの 3 つを用意した．

**(a) 近隣優先モデル (図 4(a))**

近隣優先モデルでは，データの要求は Zipf の法則[11] に従い，要求を行う端末の現在位置に近い領域に関する情報に対して高い確率で要求を発生するものとする．データ要求を行う端末に対して，$r_i$ を端末とデータ $d_i$ の発生した領域 $i$ の中心との距離，データが発生する領域数を $n$ とすると，データ $d_i$ に対する要求確率は以下の式のように表される．

$$P(i) = \frac{1/{r_i}^{\theta}}{\sum_{j=1}^{n} 1/{r_j}^{\theta}} \quad (0 \le \theta \le 1) \tag{1}$$

$\theta$ は調整係数である．式 (1) において，$\theta$ が 1 に近づくほどより近隣で発生したデータを優先的に要求する．今回のシミュレーションでは $\theta = 1$ とした．このモデルでは，レスキュー隊員による近くの危険地域等の探索や，運転者による道路沿いの情報収集等の場面を想定している．

**(b) 一様アクセスモデル (図 4(b))**

すべての領域に対応するデータに対し，同じ確率で要求を発生させる．式 (1) において $\theta = 0$ とすると一様アクセスモデルとなる．このモデルは他のモデルとの比較用に用いた．

**(c) 人気スポットモデル (図 4(c))**

全体のうち特定の数%の領域に対して要求を発生する確率が高いものとし，確率 $P_h$ で人気のある領域のいずれかに要求を発生する．人気スポットは，図 4(c) に示すような正方格子において，領域の位置を上から $1, 2, \cdots, i, \cdots$，左から $1, 2, \cdots, j, \cdots$ として数えたときに，$i \bmod 3 = 0$ かつ $j \bmod 3 = 0$ を満たす領域とした．それ以外の領域には確率 $1 - P_h$ で要求を発生する．今回のシミュレーションでは $P_h = 0.9$ とした．このモデルでは旅行者が自分の興味のある場所の情報を収集する場面を想定している．

### 4.2 要求・応答の送信

要求メッセージは Geocast によって目的となる領域の中心に向かって転送される．アドホックネットワーク上

の Geocast については[5),6)] などが検討されているが，今回のシミュレーションでは以下で述べる手法を用いた．

要求メッセージを送信・中継する端末 $i$ は，宛先の位置と自分自身の現在位置を含んだ要求メッセージを UDP によりブロードキャストする．このメッセージを受信した端末 $j$ は，直前にメッセージを送信した端末 $i$ の位置と宛先の位置，および自分自身の位置と比較して，自分自身が $i$ よりも宛先の位置に近く，かつ応答データを持っていない場合は，受け取った要求を再度ブロードキャストする．要求に該当し，かつ発生からデータの有効期限 $T_{TTL}$ が経過していないデータの複製を所持している場合，この複製を応答として要求元へ送信する．そうでない場合は要求を再度ブロードキャストする．

応答データの送信には，要求メッセージが中継されてきた経路の逆順を辿る方法を用いた．各端末は要求メッセージを中継するときに，自身の識別子を経路情報として要求メッセージに付加する．応答端末は応答データにその経路を付加してブロードキャストをする．そのデータを受信した端末は経路情報を参照し，自身が中継を行うか否かを判断する．

応答データのサイズは応答経路の情報を含めて 1500bytes とした．要求端末は応答データを受信すると，応答データをローカルに保存する．

### 4.3 評価指標と評価項目

提案手法の評価を行うために以下の評価指標を用意した．

**■アクセス成功率 $A_S$**

$$A_S = \frac{A_C}{R_C} \tag{2}$$

$R_C$(Request Count) は各端末がアクセス要求を送信した回数の総和であり，$A_C$(Answer success Count) はアクセス要求元が対象となる応答データを受け取り，要求が完了した回数の総和である．$A_S$ の算出にはシミュレーション時間全体での $A_C$，$R_C$ を利用した．

**■トラフィック**

データ要求のトラフィックを $T_{request}$，データ応答のトラフィックを $T_{reply}$ とし，それぞれをシミュレーションにデータ要求，データ応答による送信回数と定義する．

## 5. シミュレーション結果

本章では，検討したキャッシュ無効化方式を SC 方式に適応した場合のシミュレーション結果について述べる．シミュレーションはシミュレータ上の時間で 20000 秒行った．このうち最初の 1000 秒分は定常状態になるまでの猶予期間とし，評価値の計測を行っていない．以降に示すシミュレーションの大部分は各端末が保持できる最大のデータ数 $N$(Memory Size) を 5 から 50 まで 5 間隔に変化させて得たものである．シミュレーション条件をまとめたものを**表 1** に示す．

また，3 章で述べた各キャッシュ無効化方式において，SC 方式およびパス複製法で用いた場合の性能をしたべた．パス複製法は非構造型トポロジをもつピュア P2P 型ネットワークで一般的に用いられる複製配布の方法の 1 つで，応答メッセージの経路上のすべての端末に複製を配置する手法である．この方法では，SC 方式で用いている投機的複製配布やホップ数による複製配置先の選択は行われない．なお，データの発生時刻によるバージョンの違いおよびデータの有効期限を考慮していなかった以前の評価では，人気スポットモデルにおいて，パス複製法のアクセス成功率が SC 方式のアクセス成功率よりも高いことが示されている．

**表 1** シミュレーション条件

| Parameter | Default value | Range |
|---|---|---|
| Number of Regions | 100 | |
| Data size [KB] | 1.5 | |
| Number of nodes | 100 | 50 to 150 |
| $v_{max}$ [m/s] | 2 | |
| Pause time [s] | 3 | |
| Bandwidth [Mbps] | 2 | |
| Communication range [m] | 100 | |
| Replica distribution range [m] | 300 | |
| Data generation interval [s] | 60 | |
| Data request interval [s] | 60 | |
| $T_{TTL}$ [s] | 5000 | |

### 5.1 各キャッシュ無効化方式の比較

**図 5**〜**図 7** に SC 方式において各キャッシュ無効化方式を適用したときのシミュレーション結果を示す．図 5 がアクセス成功率 $A_S$ とメモリサイズの関係，**図 6** が要求トラフィック $T_{request}$ とメモリサイズの関係，図 7 が応答トラフィック $T_{reply}$ とメモリサイズの関係を示している．また，各図において (a) が近隣優先モデル，(b) が一様アクセスモデル，(c) が人気スポットモデルである．各要求モデルごとにシミュレーション結果を検証する．

**■近隣優先モデル**

近隣優先モデルにおいて各キャッシュ無効化方式を比較した場合，メモリサイズが小さいときは Distance，すなわち情報発生源からの距離をキャッシュ無効化に利用する方法を用いたときのアクセス成功率が他の方法を利用した場合に比べて高い．メモリサイズが大きくなると，各方式の差はほとんどみられない．

近隣優先モデルでは，端末自身の現在位置に近い場所で発生したデータを優先して要求する．情報発生源からの距離をキャッシュ無効化に利用した場合，ある場所で発生した情報の複製がその発生源周辺に留まることになる．したがって現在位置から近い場所で発生したデータを取得しようとした場合，多数の端末から応答が返信され，Distance を利用した場合のアクセス成功率が向上する．このことは図 7(a) で，メモリサイズが小さいときに Distance が他の方法よりも応答トラフィックが多いことからも確かめられる．

要求・応答トラフィックの量は前述の Distance のケースを除いて，メモリサイズの大小によらず，各方式の差はほとんどみられない．

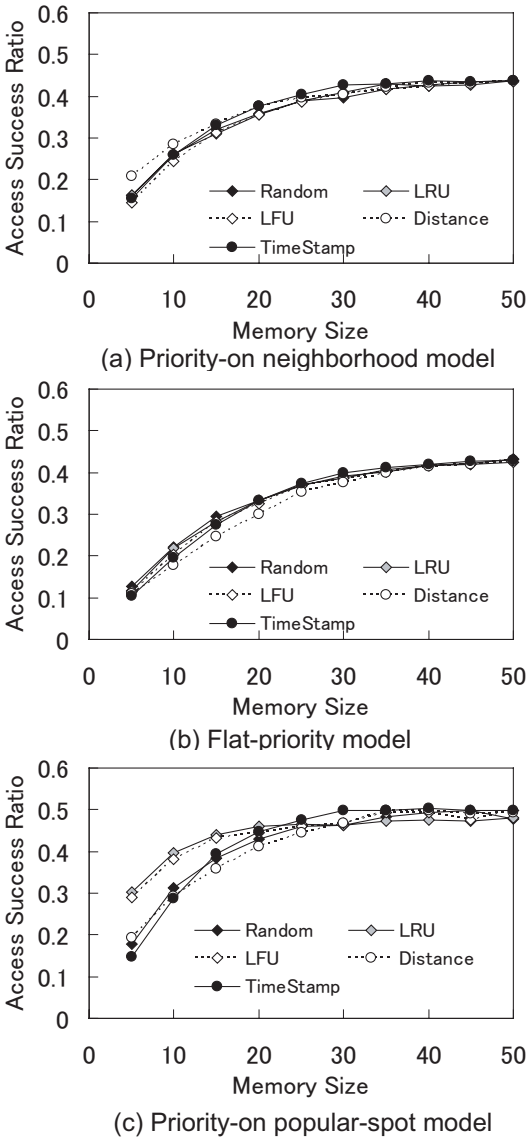


**図 5** メモリサイズに対するアクセス成功率の変化（端末数 100 台，R=300[m]）

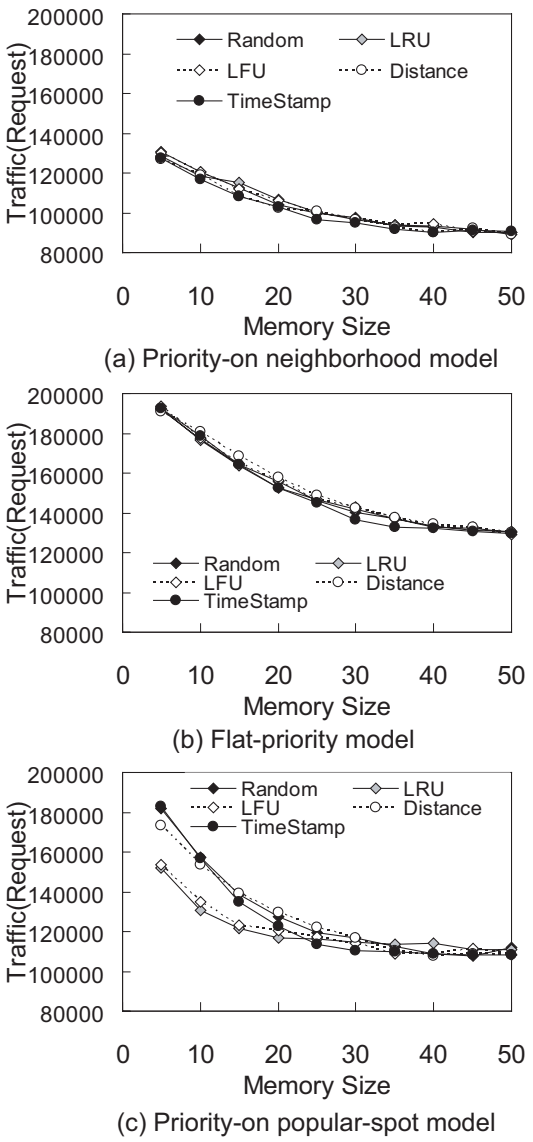


**図 6** メモリサイズに対する要求トラフィック（端末数 100 台，R=300[m]）

**■一様アクセスモデル**

一様アクセスモデルにおいて各キャッシュ無効化方式を比較した場合，メモリサイズが小さいときに，Distance のアクセス成功率が他の方法より低い．Distance ではある場所で発生した情報の複製がその発生源周辺に存在する端末に保持される一方，端末の現在位置から遠い場所で発生したデータは優先的に破棄される．一様アクセスモデルでは，各端末が近隣優先モデルと比較して，より遠くで発生したデータに対して要求を送信する傾向にある．Distance は他の方式と比較して，端末の現在位置から遠くの位置で発生したデータは保持されにくいため，要求メッセージをより遠くへ送信しないと必要なデータを取得することが困難になる．このことは，図 5(b) においてアクセス成功率が低く，図 7(b) において応答トラフィックが多いことからも確かめられる．メモリサイズが大きい場合には，近隣優先モデルと同じく，各方式間の違いは見られない．

要求・応答トラフィックの量は全体的に近隣優先モデルより多い．これは要求モデルに一様アクセスモデルを用いた場合，近隣優先モデルと比較してより遠くの位置で発生したデータに対して要求を送信するため，要求応答の転送により多くのホップ数を要するためである．

**■人気スポットモデル**

人気スポットモデルにおいて各キャッシュ無効化方式を比較した場合，メモリサイズが小さいときは LRU，LFU のアクセス成功率が他の方法より高い．この要求モデルでは特定箇所で発生したデータに対してアクセスする確率が高い．またキャッシュ無効化方式に LRU，LFU を用いることにより，アクセス頻度が比較的高いデータが端末に保持され続ける．一方，他の方法では，アクセス頻

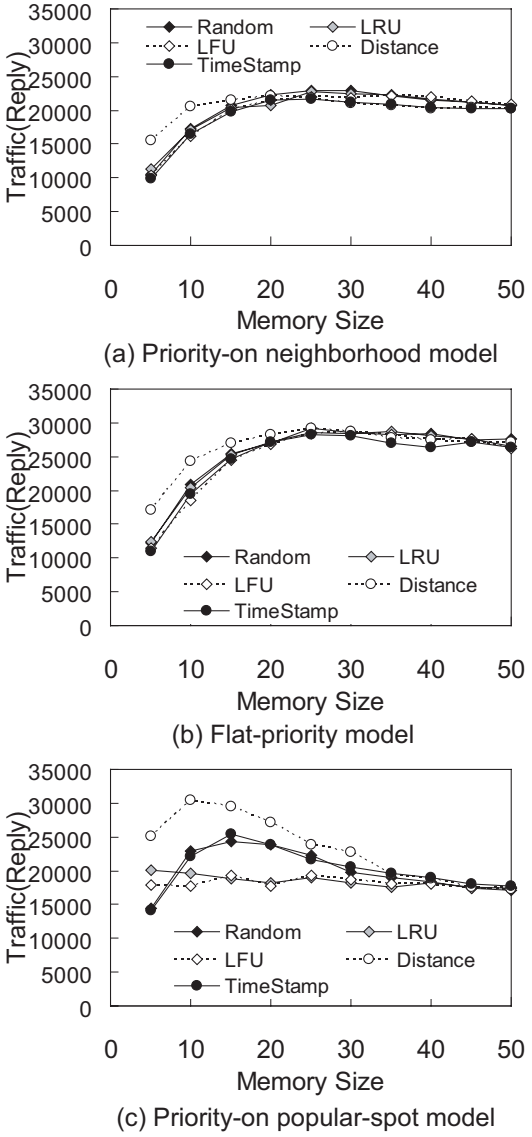


**図 7**　メモリサイズに対する応答トラフィック（端末数 100 台，R=300[m]）

度を考慮していないため，アクセス頻度が高いデータを破棄する可能性がある．このため，メモリサイズが小さいときは LRU，LFU のアクセス成功率が高い．ただし，メモリサイズが大きくなると多数のデータを保持できるため，データ破棄の頻度が少なくなり，各方法でのアクセス成功率の差は小さくなる．

また，メモリサイズが小さいときは LRU，LFU の要求トラフィックは他の方法に比べて少ない．これは，アクセス頻度の高いデータの複製を保持している端末が多く，要求元から近い場所に目的のデータを持っている端末が存在する確率が高いため，メッセージ転送に必要なホップ数が少なくなるからである．

### 5.2　パス複製法との比較

本節では，5.1 で評価したキャッシュ無効化方式を使用して，SC 方式とパス複製法の性能比較を行う．使用する

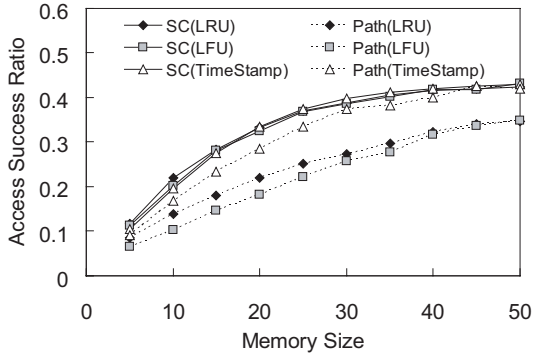


**図 8**　メモリサイズに対するアクセス成功率（一様アクセスモデル，パス複製法との比較）

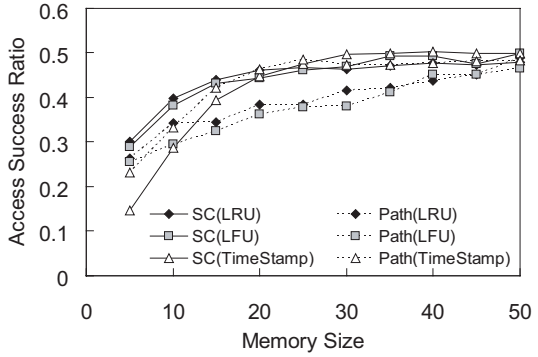


**図 9**　メモリサイズに対するアクセス成功率（人気スポットモデル，パス複製法との比較）

キャッシュ無効化方式は (i) LRU，(ii) LFU，(iii) TimeStamp の 3 つである．

**図 8**，**図 9** にデータ要求モデルにそれぞれ一様アクセスモデル，人気スポットモデルを用いたときの SC 方式とパス複製法のアクセス成功率とメモリサイズの関係を示す．要求モデルが一様アクセスモデルのときは，いずれのキャッシュ無効化方式においても SC 方式のアクセス成功率がパス複製法よりも高い．一様アクセスモデルでは，各端末は近隣優先モデルに比べてより遠い場所に対して要求を発生させる．すなわち，要求端末が情報発生源よりも遠い位置から要求を送ることになる．このため，パス複製法では，要求端末自身が要求しようとするデータを保持している端末との距離が，複製を投機的に配布したときに比べて長くなるため，ネットワークの分断によってデータ保持端末との接続性が失われる可能性が高い．また，データに有効期限が設定されているため，パス複製法を用いて複製を配置したとしても，配置された複製が古くなって無効になり，配置された複製が利用されない可能性が高い．一方 SC 方式では，データ生成後ただちに複製を投機的に配布するため，複製を配布するタイミングがパス複製法より早い．したがって，有効期限までの残存時間の長い複製がネットワーク上に多く存在することになる．このため，SC 方式のアクセス成功率が高い．

一方人気スポットモデルでは，キャッシュ無効化方式にLRU，LFU を用いたときのアクセス成功率は SC 方式の方が高く，TimeStamp を用いたときの関係はパス複製法の方が高い．また，メモリサイズが小さいときは SC 方式（LRU，LFU）のアクセス成功率がパス複製法（TimeStamp）より高いが，メモリサイズが大きくなると各方式間の差はなくなる．

以上の議論より，SC 方式でキャッシュ無効化方式にLRU，LFU を用いる場合に，多くの状況で高いアクセス成功率が得られることがわかる．特に人気スポットモデルのようにデータアクセスに大きな偏りがある場合は，メモリサイズが小さいときでも他の方式に比べてアクセス成功率が高い．それ以外の状況においても，LRU，LFU は他の方式とほぼ同等のアクセス成功率を示した．また，パス複製法との比較でも，人気スポットモデルにおいて，SC 方式（LRU，LFU）はメモリサイズが小さいときに高いアクセス成功率を示した．メモリサイズが大きくなると, パス複製法（TimeStamp）と差はなくなるが，多様なケースに対応可能であるという点で，SC 方式（LRU, LFU）はパス複製法よりも有効な複製配布方式であるといえる．

## 6. ま と め

本稿では，位置依存情報複製配布方式 SC 方式におけるキャッシュ無効化方式について検討を行い，検討した手法についてデータのバージョンを考慮した評価を行った．

シミュレーションの結果，人気スポットモデル以外のデータ要求モデルでは，各キャッシュ無効化方式間で差はほとんど見られなかった．また人気スポットモデルのように，データアクセスに大きな偏りがある場合は，データに対する最終アクセス時刻やアクセス頻度を利用する LRU, LFU をキャッシュ無効化に用いることにより，メモリサイズが小さいときに他の方法より高いアクセス成功率を示した．このことから，SC 方式においてはキャッシュ無効化に LRU または LFU を用いるのがよいといえた．

また，今回評価したキャッシュ無効化方式を利用して，P2P ネットワークでよく利用されるパス複製法との性能比較を行った．データ発生時刻によるバージョンの違いやデータの有効期限を考慮していない以前の評価では，パス複製法が SC 方式よりも高いアクセス成功率を示したが，データ発生時刻によるバージョンの違いやデータの有効期限を考慮した今回の評価ではメモリサイズが小さいときに SC 方式がパス複製法より高いアクセス成功率を示した．

ただし今回のシミュレーションでは，アクセス成功率が全体を通して 50%以下であり，高い信頼性が得られたとはいえない．今後は，より高い信頼性を得るための手法を検討し，提案方式を改良する予定である．また，現在のシミュレーションで用いている移動モデルは現実的ではないため，今後はより現実に即した移動モデルを考慮して評価を行う必要がある．

## 謝　　辞

本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金若手研究（A）（16680002）によるものである．ここに記して謝意を示す．

## 参 考 文 献

1) J. Broch, D. Malt, D. Johanson, Y. Hu and J. Jetcheva, “A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols,” The Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 85–97, (1998).
2) B. Xu, A. Ouksel, and O. Wolfson, “Opportunictic resource exchange in inter-vehicle ad-hoc networks,” fifth IEEE International Conference on Mobile Data Management, pp.4–12, (2004).
3) T. Hara: “Effictive Replica Allocation in Ad Hoc Networks for Improving Data Accessibility,” IEEE INFOCOM2001 (2001).
4) L. Yin and G. Cao, “Supporting cooperative caching in ad hoc networks,” IEEE INFOCOM2004, (2004).
5) Y. -B. Ko and N. H. Vaidya: “Ceocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-Based Multicast Algorithms,” IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications, pp. 101–110 (1999).
6) Y. -B. Ko and N. H. Vaidya: “Flooding-Based Geocastiong Protocols for Mobile Ad Hoc Networks,” *in proc. of Mobile Networks and Applications*, Vol. 7 No. 6 pp. 471–480 (2002).
7) G. Tsuchida, T. Okino, T. Mizuno and S. Ishihara, “Evaluation of a replication method for data associated with location in mobile ad hoc networks,” Second International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking, pp.116-121 (2005).
8) 林秀樹，原隆浩，西尾章治郎: “不定期データ更新が発生するアドホックネットワークにおけるキャッシュ無効化方式,” 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 12, pp.3139–3151, (2003).
9) GloMoSim: http://pcl.cs.ucla.edu/project/glomosim/ .
10) C. E. Perkins, “Ad hoc networking,” Addition-Wesley, (2001).
11) G. Zipf: “Human Behavior and the Principle of Least Effort,” Addison-Wesley (1949).