

DTN アーキテクチャを利用した データ集配システムの提案と評価 -有限ストレージを持つ高信頼な低速移動体による-

橋口 裕太^{†1} 奥田 隆史^{†2}
井手口 哲夫^{†2} 田 学 軍^{†2}

災害時等において LAN 同士を結ぶバックボーンネットワークが故障し、利用できなくなると、データ通信が困難になる。我々の研究グループでは、そのような状況下でも、低速移動体と DTN アーキテクチャを利用してデータ通信を可能にする、データ集配システムの提案と評価を行ってきた。本稿では、データを集配する低速移動体が有限ストレージを用いた場合のデータ集配システムの提案と評価を行う。さらに、集配するデータに優先度を付与し、集配時間の変化を観察する。

Performance Evaluation of Data Delivery System Based on Delay and Disruption Networking Using High Reliable Slower Vehicles with Limited Storages

YUTA HASHIGUCHI,^{†1} TAKASHI OKUDA,^{†2}
TETSUO IDEGUCHI^{†2} and XUEJUN TIAN^{†2}

In our research group have proposed and evaluated system which based on Delay and Disruption Tolerant Networking (hereinafter called DTN) using slower vehicles, availability under the backbone network and existing communication facility can't use from out of order and destruction. In this paper, we proposed the data delivery system which slower vehicles have finite capacity storages and data have priority flag.

1. 研究の背景と目的

近年、通信ネットワークを利用したサービスが、医療、地方自治、商取引、教育など様々な分野で導入され、我々の日常生活に必要不可欠なものとなりつつある。そのため、災害や人的要因等によって通信ネットワークに異常が発生し、サービスが利用できなくなると、我々の生活は非常に大きなダメージを受ける。例えば、2011年3月に発生した東日本大震災では、地震や津波による浸水の影響で最大 15000 局の通信用サーバが故障によって利用不能になり、東北地方で 1 週間に渡って通話、パケット通信等の通信ネットワークを利用したサービスが利用できなくなるという事態が起きた¹⁾。

我々の研究グループでは、そのような状況下でデータを送受信することができる、DTN と低速移動体を用いたデータ集配システムの研究を行い、その有用性を示してきた²⁾。文献²⁾では、DTN と低速移動体を利用したデータ集配における、データの到着分布と到着率に対する集配時間を明らかにし、データ集配システムを運用する上で、実用的な結果を得ることができた。

しかし、文献²⁾では、データを集配する低速移動体がデータ集配のために所持するストレージの容量が無限大であった。実際にシステムを運用する場合、低速移動体のストレージ容量は有限である。よって、より現実の環境に近い状態でデータ集配システムを評価するために、本稿ではデータを集配する低速移動体のストレージ容量に上限を設定する。さらに、低速移動体のストレージ容量を有限にすると、各データ集配時間にばらつきが出る可能性があるため、データに優先度を付与して、優先度の高いデータが優先的に集配されるデータ集配システムを提案する。具体的には、本稿の目的は文献²⁾をベースにしたデータ集配システムに、次の 2 点を考慮したデータ集配システムを提案し、データ集配時間を明らかにすることである。

- 低速移動体が持つストレージの容量
- 優先度つきデータ

^{†1} 愛知県立大学 情報科学部 地域情報科学科

Department of Applied Information Science and Technology, Faculty of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

^{†2} 愛知県立大学 情報科学部 情報科学科

Department of Information Systems, Faculty of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

以下 2 節では、本研究の基盤技術である DTN と低速移動体について述べる。3 節では、性能評価モデルについて説明し、4 節でシミュレーションによる性能評価例を示し、その結果を考察、比較する。5 節でまとめと今後の課題について述べる。

2. データ集配システム

本研究のデータ集配システムは、ユーザが持つデータを、既存のバックボーンネットワークを利用せずに、有限ストレージを持つ低速移動体が DTN を利用して、街の各所に存在する LAN を巡回することで、データを物理的に集配するものである (図 1)。ここでは、本研究の基盤技術となる DTN と低速移動体について述べる。

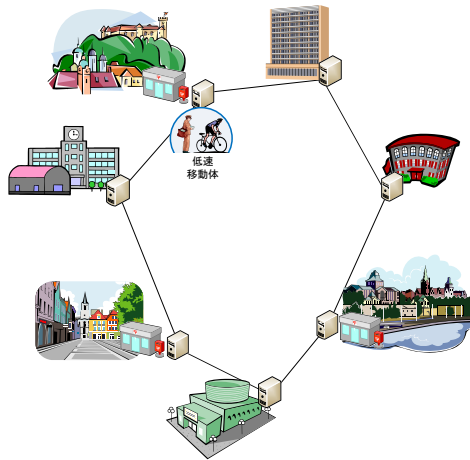


図 1 データ集配システム

2.1 DTN

DTN (Delay and Disruption Tolerant Networking) は、通信を行うノード間のリンクが断続的で接続性が低い状況や、伝送遅延が非常に大きい状況下 (以下、劣環境と総称する) でも確実にデータを送受信するための手法の一つである³⁾。本来は、宇宙空間に存在する惑星探査機が、インターネット技術を利用して地球上の管制塔と通信を行うために開発された

技術である。現在では、DTN を利用した通信は、宇宙空間だけでなく通信設備の整っていない南米やアフリカなどの大草原での学術調査や、湖での水質調査の際に利用されている⁵⁾。

DTN を利用した通信では、劣環境下でも確実に通信を可能にするために、OSI 参照モデルにおける、アプリケーション層とトランスポート層の間に新たにバンドル層⁴⁾を設け、バンドル層に送信データを一時蓄積するストレージを接続する。さらに、データ送信方式に Store and Forward 方式を採用する。これは、送受信ノード間で通信ができない間、送信予定のデータをストレージに保存し、送信が可能になった時点でストレージに保存していたデータを送信する方式である。宇宙空間では、通信を行う両ノードが絶えず動いているため、両ノードが通信可能な位置関係に常に存在するかわからない。そこでバンドル層を設け、各ノードの送信時期を任意にすることで、通信が可能である時間にデータを送受信し、確実なデータ通信を可能にしているのである。

本研究は、本研究のデータ集配システムが利用され得る環境に、既存のバックボーンネットワークが利用できない環境を置いている。これは劣環境と考えられるため、DTN による通信が有効であると考え、本研究では、データ集配に DTN を利用するものとする。

2.2 低速移動体

本研究では、既存のバックボーンネットワークが故障や損壊などにより利用できないものとしているため、電子的にデータを送受信することが不可能である。そのため、データの集配に低速移動体を利用する。低速移動体には自転車を想定する。低速移動体に自転車を利用する理由は以下の 4 点である。

1. 免許が不要
2. 自動車では通行できない悪路でも通行可能
3. 初期コスト・運用コストが自動車に比べて安価
4. 修理・メンテナンスが容易

低速移動体に、機動力の高い犬などの動物を利用する方法も考えられるが⁶⁾、動物は集配中のトラブルに即座に対応することが難しい上、予測不可能な行動を起こす可能性も考えられる。感情的、直感的に行動する動物に対し、人間は理性的に行動できることから、人間が運転する自転車による集配が、最も確実にデータを集配できると考え、これを利用するものとする。自転車が、災害時に物資の運搬を行ったという事例もある⁷⁾。

3. 性能評価モデル

本研究のデータ集配システムのモデルを図 2 に示す。システムには M [個] のサブネット

ワークが存在する．各サブネットワークは，データを生成する不特定多数のユーザ端末と，ユーザ端末とデータ集配エージェントの間でデータを一時保存する1台のデータサーバから構成されている．サブネットワーク同士はバックボーンネットワークにより相互に接続されているのだが，今このバックボーンネットワークが故障し，バックボーンネットワークを利用しての相互通信はできないものとする．またシステム内には，サブネットワーク間でデータの集配を行うデータ集配エージェントが N [人] 存在する．

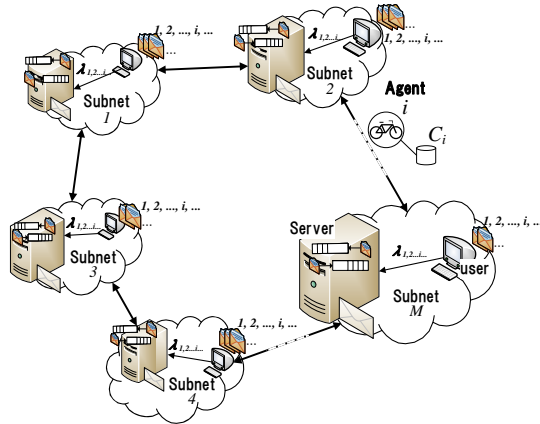


図 2 性能評価モデル

本稿で集配するデータは，従来の TCP/IP によるパケット通信と同じように，ヘッダ部とデータ部から構成される．ヘッダ部は宛先サブネットワーク番号，送信元サブネットワーク番号，データ識別 ID，優先度フラグ等，データの集配に必要な情報から構成されており，データ部には任意の情報が書き込まれていると想定する．TCP/IP による通信では，宛先および送信元は通常，各ネットワークに割り振られた IP アドレスを使用するが，本研究では，各サブネットワークにサブネットワーク番号 (1 ~ M) をつけ，サブネットワーク番号を宛先および送信元として利用する．

本研究のデータ集配システムの集配手順に，本稿で新たに提案する優先度つきデータの集

配を考慮した場合の，各サブネットワークにおけるシステムの構成要素の関係を図 3 に示す．また，その手順を次の (1) ~ (4) に示す．なお，データ集配システム内のすべてのキューの転送処理規律は FIFO とし，転送処理時間は μ^{-1} の指数分布に従うものとする．

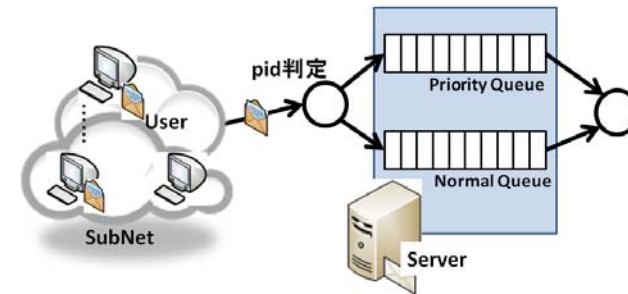


図 3 各サブネットワークにおけるデータ集配

- (1) 各サブネットワーク内のユーザ端末からそのサブネットワーク内のデータサーバに，平均到着率 λ の一般分布に従い，データが到着する．データ到着率の分布は，指数分布，超指数分布 (平方変動係数 $C_a^2 = (\text{分散}/\text{平均}^2) = 10$)，一様分布に従うものとする．データに優先度が付与されていた場合，データサーバは優先度ありのデータを優先通信用キューに保存し，優先度なしのデータを通信用キューに保存する．なお，データに優先度が付与される確率は p とする．
- (2) システム内にはデータ集配エージェントが平均 v [km/h] で巡回している．データ集配エージェントは任意のデータサーバに到着後，データ集配エージェントが保持するサブネットワーク宛のデータを，データサーバ内の受信用キューに転送する．
- (3) データ集配エージェントは，データサーバ内の優先通信用キューに保存されているデータを，自身が所持する容量 C_i [GB] のストレージに，優先通信用キューが空になるか，データ集配エージェントのストレージが満量になるまで転送する．優先通信用キューが空になり，かつストレージに空きがある場合，データ集配エージェントは，通信用

キューに保存されているデータを、通信用キューが空になるか、またはデータ集配エージェントのストレージが満量になるまで転送する。データ集配エージェントのストレージに転送されたデータは、データ集配エージェントのストレージ内の宛先サブネットワーク別キューに蓄積される。データサーバ内の双方のキューが空になるか、またはデータ集配エージェントのストレージが満量になった時点で、ストレージへの転送処理は終了する。

- (4) 双方の処理が完了したら、データ集配エージェントはデータサーバから退去し、別のデータサーバへ移動する。

本研究のデータ集配システムは、評価対象として、データ集配エージェントがデータを保持している時間であるデータ保持時間を定義し、集配時間とする。各データサーバに到着するデータのサイズは、平均 S [MB] の指数分布に従うものとする。1週間相当のシミュレーションを5回行い、その平均値を本稿のデータ集配システムの評価結果とする。数値計算には、C言語と離散事象シミュレーションパッケージ Csim20⁸⁾ を利用する。

4. 数 値 例

本研究のデータ集配システムの想定利用環境には、本学の存在する愛知県長久手市を想定する。本研究のデータ集配システムには、長久手市に実際に存在する学校や体育館などの公共施設の合計と同数である32個のサブネットワークが存在し、サブネットワーク同士の位置関係は実際のものと同じとする⁹⁾。なお、サブネットワーク間の巡回経路は、巡回セールスマン問題の近似解をもとに最短経路を採用するものとする¹⁰⁾。表1に、本研究のデータ集配システムを長久手市で運用することを想定した場合の、シミュレーションで用いる数値を示す。

以下4.1節では、到着分布別に、データの到着率に対する平均データ保持時間を示す。4.2節では、ストレージ容量に対する平均データ保持時間を示す。4.3節では、各到着分布別に、データ集配エージェントのストレージが1週間相当のシミュレーション時間中、満量になった時間の割合を示す。4.4節では、データ集配エージェントのストレージが、1週間相当のシミュレーション時間中、満量になった時間の割合を、データ集配エージェントのストレージ別に示す。以上4.1節～4.4節は、データに優先度を付与しない場合の結果を示す。4.5節では、各確率分布別に、集配されるデータに優先度を付与した場合の、データの到着率に対するデータ保持時間の結果を示す。

表1 設定パラメータ一覧

項目	記号	数値
サブネットワーク数	M	32[個]
データ集配エージェント数	N	1~5[人]
データ平均到着間隔	λ^{-1}	1~10[sec]
データ集配エージェント移動速度	v	15,30[km/h]
データ平均処理時間	μ^{-1}	0.01[sec]
データ集配エージェントストレージ容量	C_i	1~1000[GB]
平均集配データサイズ	S	1[MB]
優先データ発生確率	p	10~50[%]

4.1 平均データ保持時間・データ到着分布別の結果

図4～図9に、データの到着分布別、到着率 λ に対する平均データ保持時間をデータ集配エージェントの移動速度 v ごとに示す。

なお、この時 $M = 32$, $N = 1$, $v = 15, 30$ とし、データの到着分布は、(1) 指数分布 (exponential) (2) 2次の超指数分布 (平方変動係数 Ca^2 (分散/平均²) = 10) (hyper-exp), (3) 一様分布 (constant) に従うものとする。

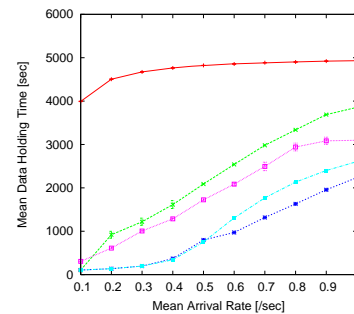


図4 到着分布別平均データ保持時間 (指数分布, $v = 15$)

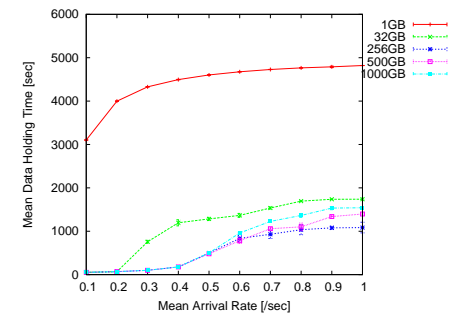


図5 到着分布別平均データ保持時間 (指数分布, $v = 30$)

4.2 平均データ保持時間・ストレージ容量別の結果

図10～11に、ストレージ容量別データ保持時間を示す。この時、 $N = 32$, $M = 1$, $v = 15, 30$, $\lambda^{-1} = 2.0$, データの到着分布は指数分布に従うものとする。

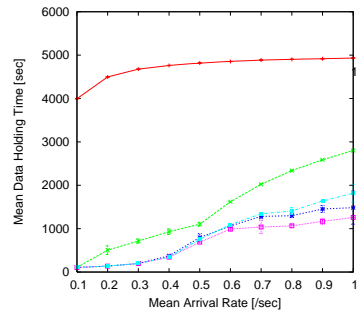


図 6 到着分布別平均データ保持時間
 (超指数分布, $v = 15$)

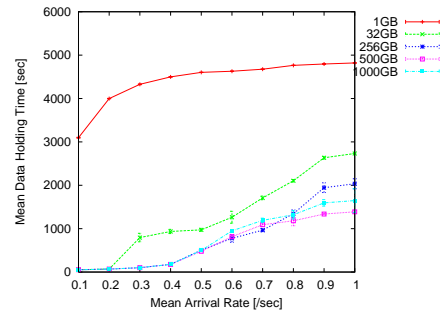


図 7 到着分布別平均データ保持時間
 (超指数分布, $v = 30$)

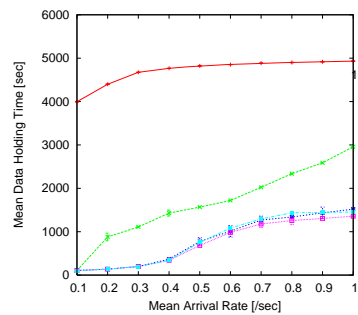


図 8 到着分布別平均データ保持時間
 (一様分布, $v = 15$)

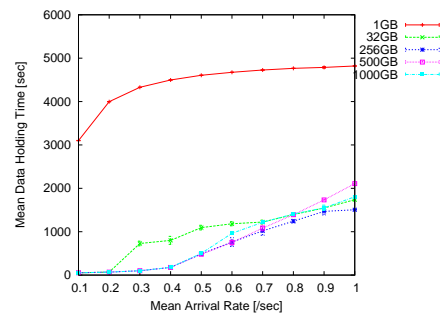


図 9 到着分布別平均データ保持時間
 (一様分布, $v = 30$)

ストレージ容量を大きくするに従って、データ保持時間が減少していくが、必ずしもその関係が成り立つわけではないことがわかる。これはストレージ容量を大きくすることで、より多くのデータを保持することができるが、その分データ集配エージェントが巡回すべき宛先サブネットワークの数が増えるため、データ集配エージェント内の宛先サブネットワーク別キューの後方のデータが宛先サブネットに届くまで時間がかかるからである。

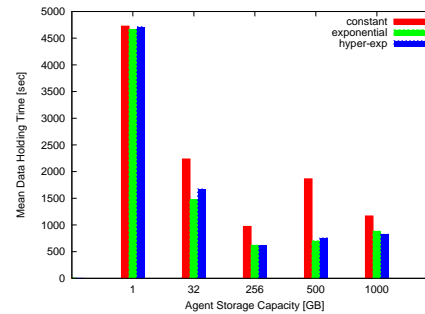


図 10 ストレージ容量別データ保持時間 ($v = 15$)

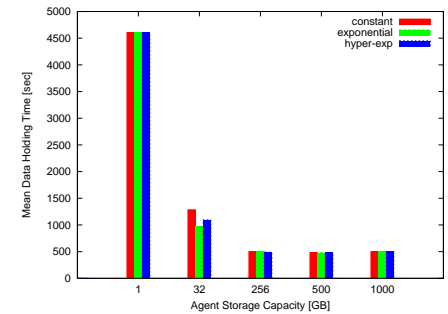


図 11 ストレージ容量別データ保持時間 ($v = 30$)

4.3 ストレージの満量時間の割合・データ到着分布別

図 12 ~ 図 17 に、データの到着分布別、データ集配エージェントのストレージが、1 週間のシミュレーション時間中満量であった合計時間の割合をデータ集配エージェントの移動速度 v ごとに示したものを示す。なお、この時 $M = 32, N = 1, v = 15, 30$ とし、データの到着分布は (1) 指数分布 (exponential) (2) 2 次の超指数分布 (平方変動係数 Ca^2 (分散/平均²) = 10) (hyper-exp) (3) 一様分布 (constant) に従うものとする。

データ集配エージェントのストレージが満量であると、末尾のデータが宛先サブネットワークに届くまで時間がかかる。特にデータ集配エージェントのストレージ容量が大きくなると、その影響は大きくなる。

4.4 ストレージの満量時間の割合・ストレージ容量別

図 18 ~ 19 に、データ集配エージェントのストレージが、1 週間相当のシミュレーション時間中満量であった合計時間の割合をストレージ別に示したものを示す。なお、この時

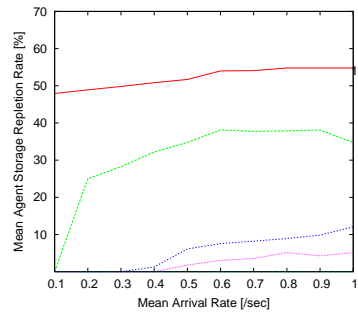


図 12 到着分布別ストレージ満量時間
(指数分布, $v = 15$)

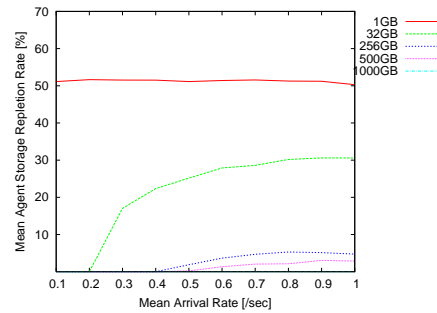


図 13 到着分布別ストレージ満量時間
(指数分布, $v = 30$)

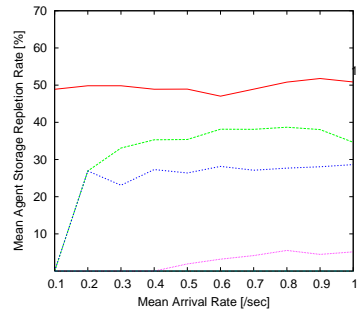


図 14 到着分布別ストレージ満量時間
(超指数分布, $v = 15$)

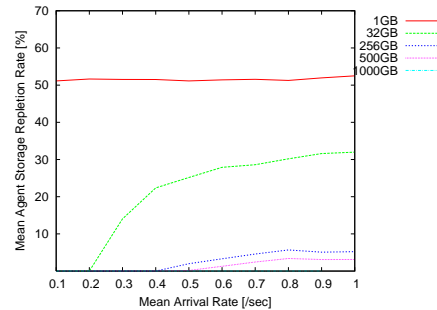


図 15 到着分布別ストレージ満量時間
(超指数分布, $v = 30$)

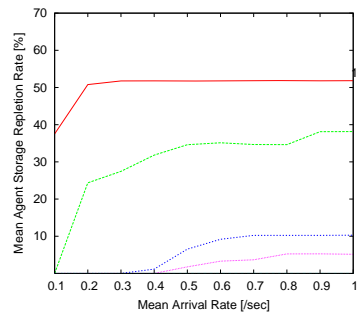


図 16 到着分布別ストレージ満量時間
(一様分布, $v = 15$)

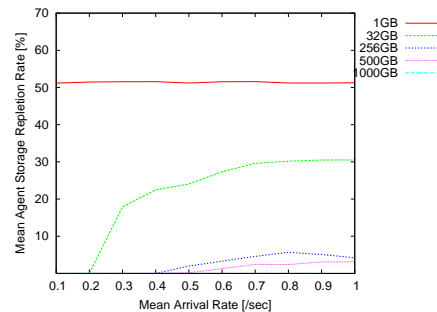


図 17 到着分布別ストレージ満量時間
(一様分布, $v = 30$)

$M = 32, N = 1, v = 15, 30, \lambda^{-1} = 2.0$, データの到着分布は指数分布に従うものとする。
 $C_i = 1000$ の時, ストレージが満量にならない. 文献²⁾では, データ集配エージェントのストレージ容量を無限大としていたが, 今回の結果より, 本研究の想定利用環境では $v = 15, 30$ のとき, $C_i = 1000$ で, データ集配エージェントのストレージ容量を無限大と見ることが出来る.

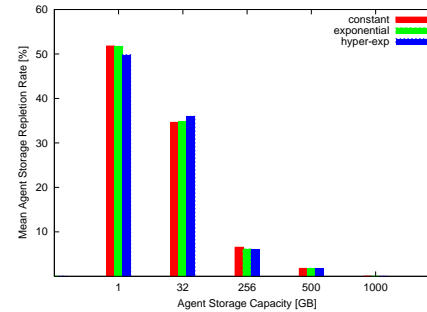


図 18 ストレージ容量別ストレージ満量時間の割合
($v = 15$)

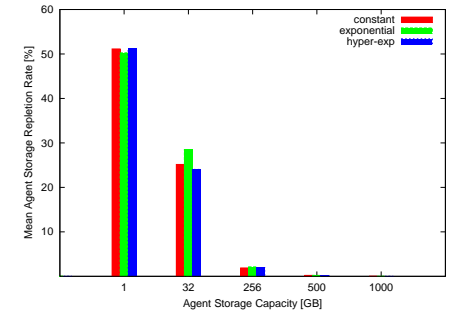


図 19 ストレージ容量別ストレージ満量時間の割合
($v = 30$)

4.5 データに優先度を付与した場合のデータ保持時間

図 20 ~ 22 にデータの到着分布別, 到着率 λ に対する, 優先度つきデータのデータ保持時間を示す. なお, この時 $M = 32, N = 1, v = 15, C_i = 256[\text{GB}], \lambda^{-1} = 2.0[\text{sec}]$, データの到着分布は, (1) 指数分布 (exponential) (2) 2 次の超指数分布 (平方変動係数 $C_a^2 = (\text{分散}/\text{平均}^2) = 10$) (hyper-exp) (3) 一様分布 (constant) に従うものとする.

優先度を付与したデータを適当な確率で生成させることで, データ保持時間を減少させることが可能であることが明らかとなった.

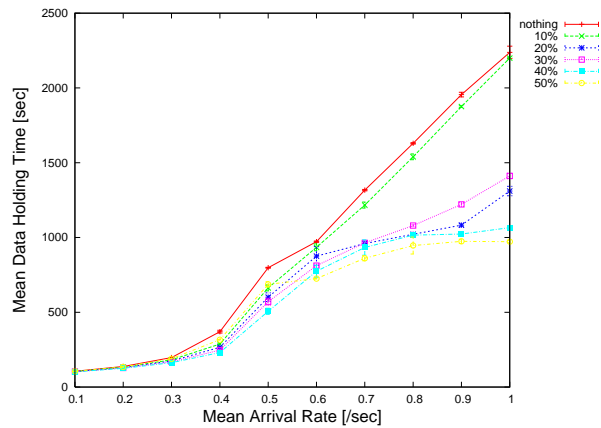


図 20 到着分布別平均データ保持時間
 (指数分布, 優先度あり, $v = 15$)

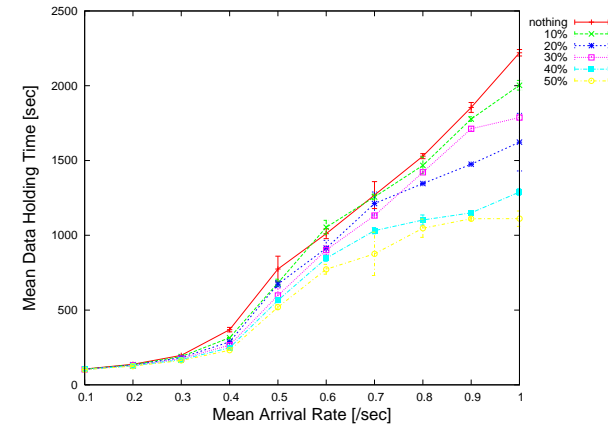


図 22 到着分布別平均データ保持時間
 (一様分布, 優先度あり, $v = 15$)

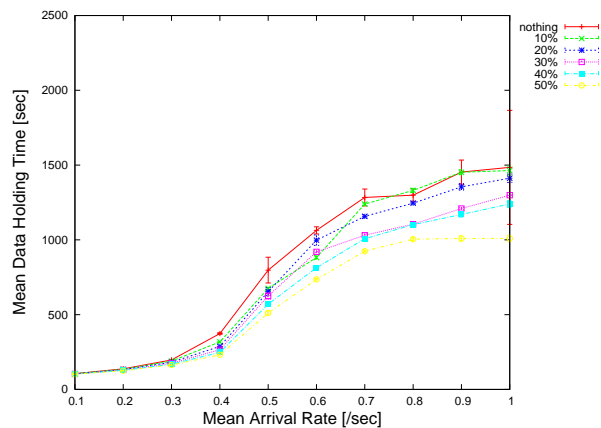


図 21 到着分布別平均データ保持時間
 (超指数分布, 優先度あり, $v = 15$)

5. 終わりに

本稿では、データ集配エージェントが持つストレージの容量を有限にし、さらに優先度つきデータを用いたデータ集配システムを提案した。そしてシミュレーションによるデータ保持時間の評価を行い、集配されるデータの到着分布、到着率ごとの、ストレージ容量に対するデータ保持時間と、優先度を付与した場合のデータ保持時間の変化を観察した。その結果、低速移動体を利用して一時データを物理的に集配するような手法でも、運用可能な集配時間を示すことが明らかとなった。また、優先度を付与したデータを、一定の確率で発生させることによって、データ保持時間を短縮させることができることが明らかとなった。

このことから、災害時のようなバックボーンネットワークが物理的に故障し、利用できなくなった状況でも、本稿で提案したデータ集配システムを用いて物理的にデータを運搬することで、短時間でネットワーク内の任意の場所へデータを送信することができることが明らかとなった。

今後の課題として、各到着分布や到着率における、データ保持時間を最適にするストレージ容量を求めることや、データ保持時間をさらに短縮するために、経路決定やデータ転送処理において新たな提案手法を開発すること等が挙げられる。

参 考 文 献

- 1) 総務省, “平成 23 年版 情報通信白書”, available from
(<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/index.html>)
, 2011.
- 2) 恩田他, “低速移動体を用いた蓄積型データ配送手法の検討”, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-114, vol.110, no.341, pp. 99-104, 2010.
- 3) S. Farrell and V. Cahill, *Delay- and Disruption-Tolerant Networking*, Artech House, 2006.
- 4) Keith Scott, Scott Burleigh, “Bundle Protocol Specification”, IETF RFC 5050, <http://www.ietf.org/rfc/rfc5050.txt>, 2007.
- 5) Pei Zhang, “ZebraNet Deployment: Impact of Sparseness and Mobility on Hardware and Software”, <http://www.peizhang.com/research/research/research.htm>, 2011.
- 6) 日本救助犬協会, “活動報告”, http://www.kinet.or.jp/kyujoken/04_kat.php, 2011.
- 7) (株) ジャイアント, “東日本大震災復興支援に MTB1000 台を提供’”, <http://www.giant.co.jp/information/2011/04/post18.php>, 2011.
- 8) Mesquite Software, <http://www.mesquite.com>.
- 9) 長久手町, “平成 23 年度 なかくての統計”, <http://www.town.nagakute.aichi.jp/chosei/tokeideta/kikaku/ntoukei22.html>, 2011.
- 10) GNU Linear Programming Kit, <http://www.gnu.org/software/glpk>.