

DTN 技術の現状と展望

著者	鶴 正人, 内田 真人, 滝根 哲哉, 永田 晃, 松田 崇弘, 巳波 弘佳, 山村 新也
雑誌名	電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン
巻	2011
号	16
ページ	57-68
発行年	2011-06-01
その他のタイトル	Delay tolerant networking technology: the latest trends and prospects
URL	http://hdl.handle.net/10228/00006339

doi: info:doi/10.1587/bplus.2011.16_57

DTN 技術の現状と展望

Delay Tolerant Networking Technology — The Latest Trends and Prospects

鶴 正人^{†1} Masato Tsuru^{†1}

内田真人^{†1} Masato Uchida^{†1}

滝根哲哉^{†2} Tetsuya Takine^{†2}

永田 晃^{†3} Akira Nagata^{†3}

松田崇弘^{†2} Takahiro Matsuda^{†2}

已波弘佳^{†4} Hiroyoshi Miwa^{†4}

山村新也^{†3} Shinya Yamamura^{†3}

Summary

インターネットは世界を結ぶ情報社会の基盤となっている。しかし、その基礎となる TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 技術の設計の中では、極端に長い通信遅延時間、頻繁なパケット損、間欠的な通信リンクの出現、などが発生する通信環境は想定されておらず、情報通信を必要とする環境の著しい多様化に対応するためには拡張が必要である。惑星間インターネットを起源に持つ、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay, Disruption, Disconnection Tolerant Networking) と呼ばれる技術領域は、従来の TCP/IP 技術では対応できなかった状況においてもエンドツーエンドの情報伝達を実現する枠組みとして誕生した。本論文では、従来技術をある程度知っている読者を想定し、近年研究が活発化している DTN 技術に関して概説を与える。DTN 技術を時間的・空間的不連続性の下で非実時間通信を効率的に行うための中継技術として捉え、その基本技術である蓄積形及び蓄積運搬形転送に焦点を当て、標準的なアーキテクチャや、中継経路の制御手法及び中継データの符号化手法についての技術動向を概観する。蓄積 (運搬) 形転送は、従来の TCP/IP 技術の制約を超える新世代ネットワーク技術として進展が期待できる。

Key words

遅延耐性ネットワーク (DTN), 蓄積運搬形転送, バンドル層, 新世代ネットワーク

1. まえがき —TCP/IP 技術の限界—

インターネットは、様々なアクセス網を包含し世界中を結ぶことのできる情報交換・共有システムとして、社会・経済のインフラストラクチャ (以下、インフラ) ともいえる役割を果たしている。バックボーン網の超高速・大容量化とブロードバンドアクセス網の普及に伴い、リッチコンテンツのサービスも始まりつつある。一方では、無線技術に支えられた屋外や移動体での通信利用が普及し、様々な機器が通信端末として使われるようになった。

無線及び移動体通信技術の進歩は、いつでもどこでも情報サービスを利用できる「ユビキタス情報社会」の可能性を開いたが、経済性と途切れがない高速・実時間通信サー

ビスとを両立することは様々な局面において困難である。移動体無線網の拡大と高速化は著しいが、全ての地域に高速無線通信サービスを提供することは、大きなコストが掛かる上に周波数資源の有限性からも現実的ではない。衛星通信は極めて広いエリアをカバーできるが、コストの問題だけでなく、往復遅延が長いので従来のフィードバック形の送信レート制御では網資源の効率的な利用が難しい。更に、情報通信の適用範囲の拡大はとどまるところを知らず、惑星や宇宙ステーション間のインターネット通信である Inter-PlaNetary Internet (IPN)、環境モニタリングにおける水中通信や動物に付けたセンサ間の通信など、数秒から数時間あるいはそれ以上の極端に長い遅延時間や、計画的または偶発的な通信リンクの間欠接続など、従来は想定されていなかったような劣悪な条件での通信アプリケーションの要求も出てきた。その一方では、インターネットへのアクセス手段を持たない地域で生活する人々はまだ世界中に多数存在し、そのようなデジタルデバイド地域において情報サービスを低コストで提供するインフラの構築も急務である。更にまた、災害などで本来の通信インフラの機能や性能が低下・停止した場合の緊急情報交換技術

^{†1} 九州工業大学, 福岡県
Kyushu Institute of Technology, Fukuoka, 820-8502 Japan

^{†2} 大阪大学, 大阪府
Osaka University, Osaka-fu, 565-0871 Japan

^{†3} 独立行政法人情報通信研究機構, 東京都
National Institute of Information and Communications Technology,
Tokyo, 100-0004 Japan

^{†4} 関西学院大学, 兵庫県
Kwansei Gakuin University, Hyogo, 669-1337 Japan

の必要性が認識されている。これらの課題の解決、すなわち、場所・時間を問わず利用できる情報サービスの実現、特殊な環境への情報通信技術の適用、地理的条件によるデジタルデバイドの解消、災害などに堅牢なネットワークの実現などは、我々の社会のネットワーク依存度が高まるにつれて、その重要性が高まっている。コストさえ掛ければすぐに実現できるものもあるが、社会的にはそれらを低コストで実現する技術が必要である。

これらの課題に共通する背景は、有線・固定網を想定して設計された当初のインターネットの通信方式、すなわち TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 技術が、その後もアドホックに改良はされてきたものの、通信条件の多様化に十分に対応できない点にある。話を単純化して、アプリケーションソフトウェアあるいはネットワーク利用者によるデータの送受信を実行する通信端末などをエンドノード、ネットワーク内部にあってデータを中継する実体を中継ノード、と呼ぶことにする。従来のインターネットでは、中継ノード間のデータ中継、すなわちパケット転送の規定が IP 技術であり、エンドノード間の信頼性のあるデータ送受信の規定が TCP 技術である。そして、中継ノード間ではできるだけ早くパケットを中継することに徹し、アプリケーション性能やネットワーク効率のための複雑な制御はエンドノード間のやり取り、すなわちエンドツーエンドプロトコルで実現することを指導原理とした。しかし、その原理は、従来は成立していた様々な暗黙の仮定の一部または全部が成り立たないようなネットワーク環境では必ずしも有効ではない。すなわち、極端に長い通信遅延時間、頻繁なパケット損、間欠的な通信リンクの出現、などが発生する場合、従来のプロトコルやそれに基づくソフトウェアは、正常に動作しないかまたは性能が悪く実用に耐えない場合が多い。

例えば、IP 技術は、宛先エンドノードの IP アドレスとそこまでの経路が確定していること、経路の途中では隣接ルータへの通信リンクが確立していることを前提にパケット転送を行うので、中継先ルータが未確定のときやそこへのリンクが未確立のときにはパケットは破棄される。TCP 技術は、エンドツーエンドで双方向に比較的短い遅延時間で通信が可能であることを、更にパケット損は主にふくそうによって発生することを前提に、確認応答 (ACK: Acknowledgement) に基づく送信レートの

調整によってふくそう制御などを行っている。よって、エンドツーエンドの ACK が戻るまでの遅延時間が長すぎたり、ネットワークふくそう以外の要因でパケット損が頻発したりすると、送信レートが不必要に低く抑えられてしまう。更に、アプリケーション共通機能に関して、例えば、DNS (Domain Name System) サーバによる名前とネットワークアドレスの変換、対話的なアクセス認証、あるいは NTP (Network Time Protocol) のようなネットワーク時刻同期も、エンドツーエンドで双方向に比較的短い遅延時間の通信が可能であることを前提にした設計がなされている。

2. DTN 技術

1. で述べたような、従来想定されていなかった通信環境を含むエンドツーエンドでの情報伝達において、実用的な性能を低コストで実現するには、従来の TCP/IP 技術を拡張し、中継ノード及びエンドノードの機能を再設計する必要がある。例えば、有線でも無線でもつながっていない場所に車や人などが物理的に移動して情報を運ぶ、というやり方は昔から存在するが、インターネット通信の枠組みでは捉えられていなかった。遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking) とは、このような従来の TCP/IP 技術の制約に対する問題認識から発生した技術領域である。遅延だけが問題ではないので、Delay, Disruption, Disconnection Tolerant Networking と呼ばれ、また、そのような極端な変動性や不連続性を含む劣悪な通信環境は、曖昧に DTN 環境とも呼ばれる。ただし、必要な技術や適用可能なアプリケーションは、通信環境の変動や不連続性の時間粒度によっても異なり、どんな通信環境においてもあらゆるアプリケーションサービスが魔法のように実現される技術が存在するわけではない。

本稿では、従来の TCP/IP 技術をある程度知っている読者に対して、DTN 技術の本質に関する概説を与える。DTN 技術は、従来から研究されてきた様々な領域、例えば、移動体通信ネットワーク、衛星通信ネットワーク、ワイヤレスセンサネットワーク、モバイルアドホックネットワークなどでも扱われ、あるいはそれらと密接に関係しているが、一方では、それらを超えた汎用的な枠

組みの検討が始まり [1], [2], 近年極めて活発に研究されている。また, DTN という言葉が指す範囲は立場や文脈によっても異なるかもしれない。例えば, 劣悪な条件の単一の通信リンク上でのデータ伝送性能を向上させる技術は, DTN 環境での通信には必要不可欠である。しかし, そのような「解決すべき課題」指向の整理では, 様々なものを包含していくだけで, 技術としての本質を捉えられない。そこで筆者らは, DTN 技術を, エンドツーエンドの情報伝達のための「中継転送技術」の視点から整理する。特に, 劣悪な条件のリンクを含む閉じた一つのネットワーク内の中継だけでなく, 異種のネットワークを縦断する情報伝達の枠組み, すなわち劣悪な通信条件を克服する中継転送という側面と極めて不均一なネットワークをつなぐ中継転送という側面の両方を含む, 中継技術及び通信アーキテクチャとして捉える。よって, 従来のインターネットだけでなく, ほかの別通信体系のネットワークがある場合にもそれらをつないで情報を伝達することを想定している (図 1)。

ここで, Delay Tolerant Networking という言葉は, 本来は, 大きな遅延があっても通信アプリケーションの要求する性能を満足するように工夫して情報を伝達することを意味するが, 逆にいえば, アプリケーションが許容する範囲での遅延を認めることで, 不十分な網資源を効率良く共用したり, 実現のコストを低減できる可能性を暗示している。従来の即時中継形のネットワーク層の

前提を超えて, アプリケーション特性を考慮した上で, ネットワーク内部での転送データの蓄積を導入することで, 時間スケジューリングや待ち時間を利用したデータ変換処理などを活用できる可能性が広がる。つまり, DTN 技術を適用することで, DTN 技術を使わなくても通信が可能な局面においても, 実時間性を犠牲にすることで, 網資源の利用効率を向上し, 性能向上やコスト低減が実現できる可能性がある。

よって本稿では, DTN 技術を, 時間的・空間的不連続性の下でのエンドツーエンド通信を実現するための中継転送技術と捉える。すなわち, 情報の送信ノード, 中継ノード, 受信ノードが連携して, 情報伝達の時間・空間・符号化に関する制御を行い, 網資源共用や通信性能の最適化を目指す。その特徴的な技術として, 蓄積形転送, 特にその中でも蓄積運搬形転送 (SCF: Store-Carry-Forward) がある。中継ノード接続の時間的不連続性に対応するには, 再開を待つ, あるいは最適なタイミングを待つための一時的「蓄積」が必要であり, 空間的不連続に対応するには, その間で物理的に, 例えば車や列車を用いて情報を運ぶ「運搬」が必要になる。また, 運搬によって無線通信の距離 (干渉範囲) を短くすることで, 大容量のデータ転送を無線資源を浪費することなく実行することが可能になる。ただし, ここで述べた「蓄積」(Store) は, 従来の即時中継形ネットワークにおける蓄積に比べて, 時間の粒度が日単位やそれ以上にまで大きくなる可能性もあるため,

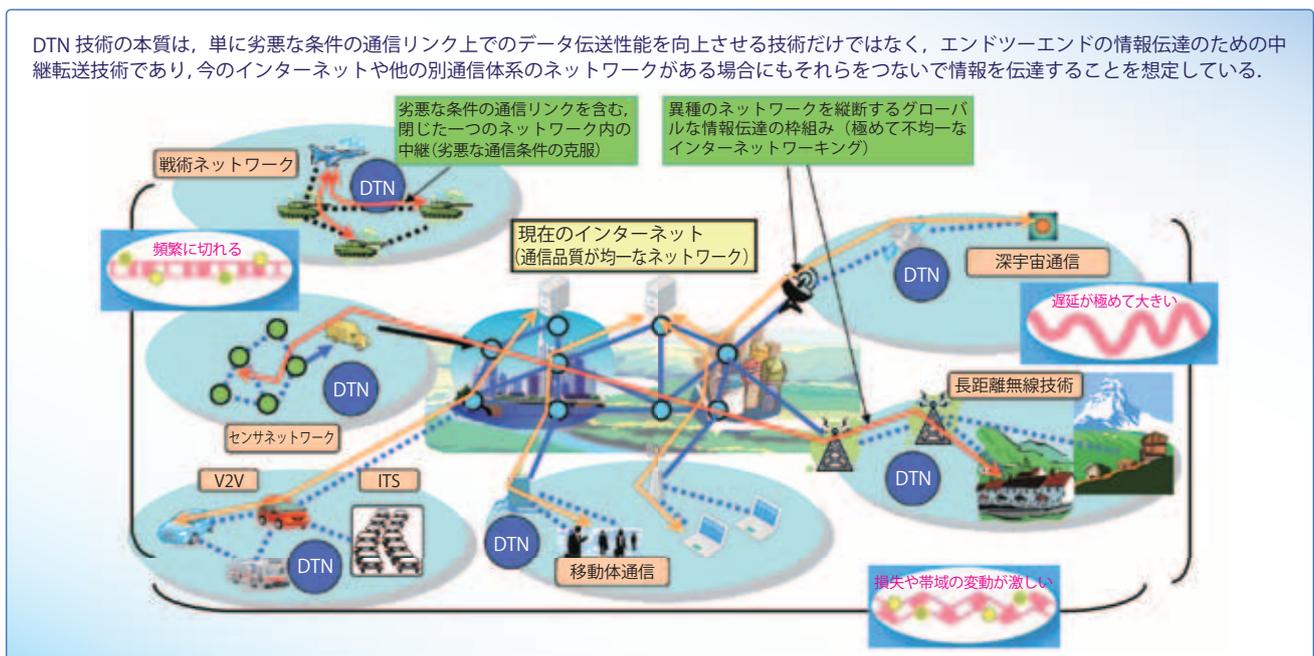


図 1 DTN 技術に基づくグローバルなネットワーク

メモリだけではなく外部記憶の利用を想定している。一方、そのような不連続性を持つ単一の経路やネットワークを利用するだけではアプリケーションの要求する通信性能を達成できない場合、複数のものを効果的に併用することが必要になる。特に、利用したい複数の経路やネットワークの時間的・空間的な特性が異なる場合の同時利用における、複製、符号化、再送、データ送信レートの調整などは新しい研究課題である。

以降、DTN 技術を、(1) 蓄積形転送のための標準アーキテクチャとしてのバンドル (Bundle) 層とその周辺、(2) 蓄積形転送や蓄積運搬形転送で用いられる具体的な中継転送制御技術、の二つに分けて説明する。(1)には、バンドルと呼ばれる転送単位の中継プロトコルだけでなく、逐次名前解決 (Late Binding) や情報セキュリティ機構なども必要になる。一方、(2)は、(1)のバンドル層だけでなく、それより上位の階層、あるいはそれより下位の階層にも適用される可能性がある。3.で、(1)に関する標準化研究グループでの検討状況を説明し、4.で、(2)に関する研究動向をサーベイする。

なお、DTN 技術を適用した情報ネットワークの実用化には、アプリケーションデザインや通信条件・性能の推定・予測技術などの課題もある。DTN 環境においてはエンドツーエンドのアプリケーションや利用者間での情報交換は実時間性をもち得ない場合が多く基本的に非同期形になる。前者の課題は、それをどう意識させるべきか、あるいは意識させるべきでないか、に関する問題である。これはアプリケーション自体に強く依存し、非同期・非実時間性を意識してよいアプリケーションとそうでなく隠蔽すべきアプリケーションが存在するが、それらの設計指針が必要である。DTN 技術のアプリケーションに関しては、5.でも少し触れる。後者の課題は、メッセージが送信元を出発してから宛先に届くまでにかかる時間が長く、そもそも出発時点では中継経路も確定していない場合、まだ確定していない未来の状態を予測しながら、様々な中継の判断をするための技術である。特に、蓄積運搬形転送の場合、通信リンクの中断・再開のタイミングや中継先ノードが宛先ノードにたどり着く可能性などは、人、車、列車などの移動量や移動パターンと直接関係している。これらの情報を推定・予測するために、対象システムにおいてどのような情報が利用できるのかも含め、分野をまたがった新しい研究が始まりつつある。

3. バンドル層

2.で述べたように、DTN 環境を横断するエンドツーエンド通信においては、従来の TCP/IP 技術やそれを前提にしたアプリケーションプロトコルだけを用いて必要な性能を実現することは困難である。また、DTN 環境へ対応するために個々のアプリケーションごとにプログラムやプロトコルを開発することは非効率である。そこで、エンドツーエンドのアプリケーション通信に対して共通的な非同期・非実時間形のメッセージ転送サービスを提供するため、バンドル層という一つの DTN アーキテクチャの検討・標準化が、IRTF (Internet Research Task Force) の中の研究グループ DTNRG (The Delay Tolerant Networking Research Group) を中心に始まった。このアーキテクチャは、以下に示す機能を提供することで、極めて多様なネットワーク環境に適用可能なアプリケーションの開発を容易にする。

- 可変長メッセージ
- 多様な名前とアドレスの対応の解決をサポートする名前解決手法
- 蓄積 (運搬) 形転送のための永続ストレージ
- 不正な利用を速やかに棄却するセキュリティ機構
- アプリケーション特性に応じた、サービスクラス、配信オプション、データの有効生存時間 (Lifetime) による効率的な転送

現在、IRTF/DTNRG によって採択された RFC (Request for Comments) として、DTN アーキテクチャ全体の概要を記述した RFC 4838 [3] があり、これは、V. Cerf らによる惑星間インターネットのためのアーキテクチャ IPN を源流としている [4]。またバンドル層のための基本プロトコル仕様は RFC 5050 [5] で提案されている。以降、3.1 では、バンドル層の基本モデルを、3.2 では、バンドルの信頼性ある中継を行う枠組みを、3.3 では、バンドルの宛先としての名前を中継のためのアドレスに変換する枠組みを、そして、3.4 では、バンドル層の実現に必要なその他の技術に関して、概観する。

3.1 バンドル層の基本モデル

RFC 4838, 5050 は、バンドル (Bundle) と呼ばれる可変長データのエンドツーエンドでの転送を制御するオー

バレイレイヤ (バンドル層) を定義している (図 2)。バンドル層は、参照モデルのアプリケーション層とトランスポート層の間に挿入され、永続ストレージを保持し、バンドルの蓄積形転送を行う。蓄積形転送では、転送されてきたバンドルを永続ストレージに一旦蓄積して、次の中継ノードと接触し、転送のための通信リンクが利用可能になるのを待つ。また、中継ノード (移動ノード) が移動することで次の中継ノードに接触できるようになる場合を、特に蓄積運搬形転送と呼ぶ。アプリケーションは ADU (Application Data Unit) と呼ばれる可変長メッセージをバンドル層に渡すことで通信を開始する。バンドル層は、ADU をバンドルに変換する。バンドルは、転送中に更に分割され別のバンドルを形成することがある。バンドルの送信元と宛先は、URI (Uniform Resource Identifier) 形式に準拠したエンドポイント識別子 (EID : Endpoint Identifier) で識別される。その他に有効生存時間、サービス品質表示、配信オプション、長さなどの情報がバンドルに含まれている。

バンドル層の下方には、様々なトランスポート層やあるいは直接にデータリンク層を使う場合も想定し、それらの違いを吸収して共通のインタフェースを定義するための吸収層 (Convergence Layer) が設けられている。吸収層プロトコルの例として極端に長い遅延や間欠性を持つリンク上での通信を想定した LTP (Licklider Transmission Protocol) が検討されている [6]。

3.2 保管転送

インターネットでの TCP のように信頼性のあるエンドツーエンド転送を可能にするために、バンドルの転送と同時にそれを保管・配達する責任も委ねていく保管転送 (Custody Transfer) という方式がある。これは保管可能ノード (Custodian) 間のホップごとに、受信側にバンドルが問題なく転送・保管できた時点で、保管シグナル (Custody Signal) というシグナルを送信側に送って、送信側の保管・配達責任を解くような仕組みである。惑星間インターネットで最初の概念が現れ [4]、その後仕組みが提案されている [7], [8]。

ストレージが有限な場合、既に受信したバンドルを次の保管可能ノードに渡す機会を得られぬまま新しいバンドルを受信し続けてストレージスペースが埋め尽くされると、それ以上のバンドルを受け取れない。より高い優先度を持つバンドルがあった場合にも受け取れないし、また、受け取れば転送する機会が得られたはずのバンドルも受け取れない HOL (Head-of-Line) ブロッキング問題も生じる。この状態が保管転送におけるふくそうであり、網資源を最大限に活用するためには、ふくそう制御、すなわち、保管可能ノードのストレージ競合制御が必要である。永続ストレージは、DTN 技術において明示的に導入された網資源であり、研究が進められている [9], [10]。

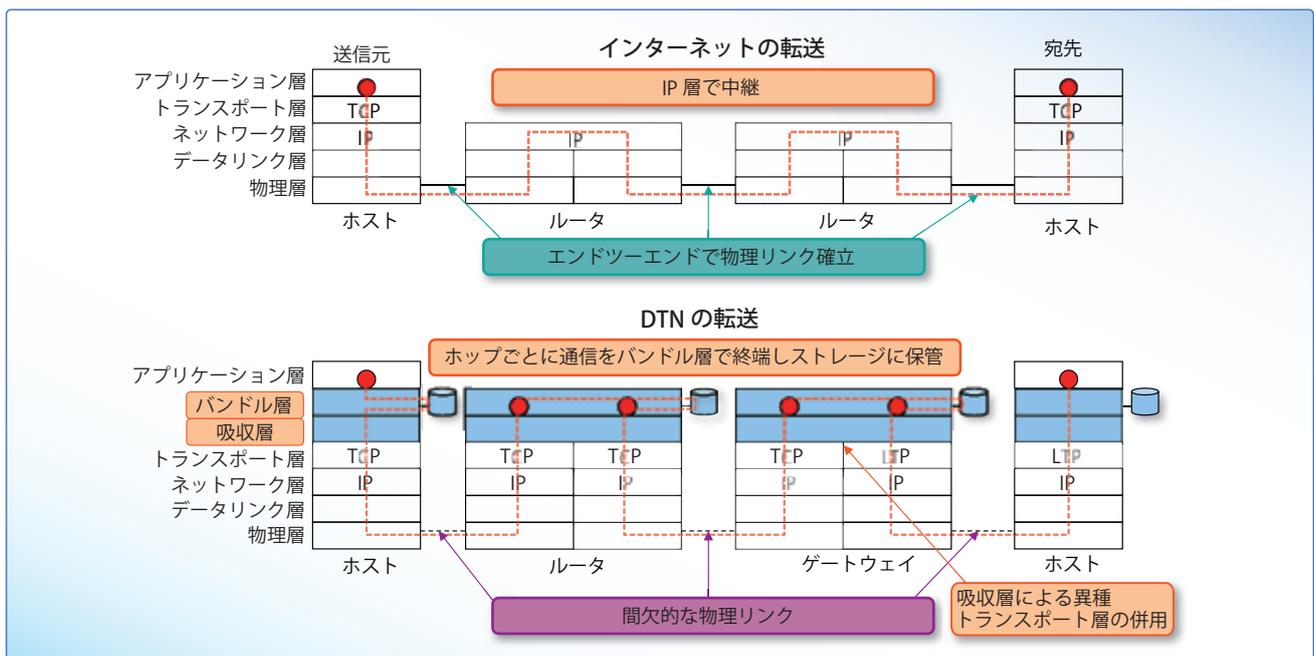


図 2 ネットワーク階層におけるバンドル層

3.3 名前解決

インターネットでの DNS のようにデータ送信前に名前とアドレスの対応を解決する方式は事前名前解決 (Early Binding) 方式と呼ばれる。DTN 環境では、データ送信前に DNS サーバと情報交換が行えるとは限らないため、名前解決は利用できない。そのため、バンドルを配送する際、名前解決をせずに識別子のままで、その識別子を管理するネットワークのゲートウェイまで転送し、そこで名前解決して、そのネットワーク内部のノードへ転送する逐次名前解決方式が用いられる。逐次名前解決方式は、主に名前解決スキームが異なる、リージョンと呼ばれる異種ネットワーク間でのバンドル転送に用いられることが想定されている。一方で、蓄積運搬形転送で、接触したノード同士でバンドルの複製を交換する方式が主流であり、名前解決が必ずしも必要とされないが、蓄積運搬形転送と宛先アドレスベースのルーチングを組み合わせたエンドツーエンド転送が行われる場合は、逐次名前解決方式が同一リージョン内でも必要になる。

3.4 その他の技術

バンドル層での中継では、バンドルの宛先までの到達時間は不定であるため、生存時間を設け、それが満了すると、バンドルがネットワークで転送途中であっても削除することで、永続ストレージの資源管理を実現している。このために、バンドルに付与されたメッセージ生成時刻のタイムスタンプと現時刻を比較して経過時間を計算するが、このような絶対時刻を用いる方式では、ノード間の時刻同期が必須であり、DTN 環境でどのように時刻同期を行うかが課題である。GPS や電波時計等を用いることでネットワークに依存しない時刻同期の方法もあるが、コストが高く、絶対時刻ではなく相対時刻で生存時間管理を行う方式も議論されている。

また、蓄積 (運搬) 形通信は、十分に管理されていない不特定の中継ノードがメッセージ転送に関与するケースが多いため、セキュリティの強化は、実用化に向けて重要な課題である。バンドル層でのプロトコルを暗号化する方式が提案されたが [11]、これまでの TCP/IP をベースにしたセキュリティ技術が適用できない部分も多く、今後の研究が待たれている [12]。

4. 中継転送技術に関する研究動向

4.1 中継転送技術の分類

頻繁に途切れる、遅延が極めて大きい、損失や帯域の変動が激しい、ことを特徴とする DTN 環境においては、ノード同士の接続性が断続的、若しくは持続的であったとしても利用可能な網資源が極めて乏しい状態となることは避けられない。ノード同士の接続性が断続的である場合に、それらが通信可能な状態になることを接触 (Contacts) と定義している。接触のパターンは、計画的接触 (Scheduled Contacts) と偶発的接触 (Opportunistic Contacts) に大きく分類される。

計画的接触とは、接触する時間や場所が事前に予測できる接触のことである。例えば、惑星間インターネットにおいては、固定された軌道上を定期的に移動する惑星 (ノード) 同士が太陽の陰に隠れずに通信可能な状態となる時間や場所はあらかじめ決定されているため、その接触パターンは計画的接触に分類される。一方、偶発的接触とは、計画的ではない偶然の接触のことを表す。人間や動物のように不規則に移動するノード同士の接触パターンが偶発的接触に分類される。

DTN 環境において通信を効率良く実現するには、ノード同士が接触する機会を効果的に活用した中継転送技術が必要であり、これまでに、接触パターンの時間・空間領域での特徴に応じた様々な中継転送技術が提案されて

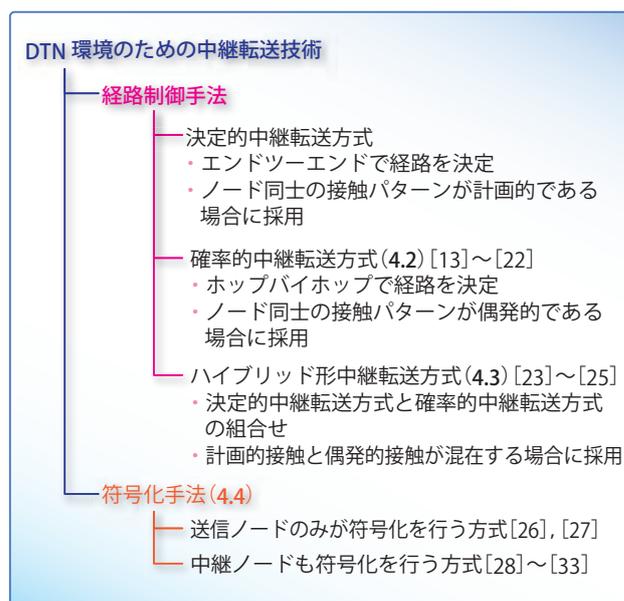


図3 中継転送技術の分類

きている (図 3)。以下の節では、その代表的なアプローチとして、中継転送における経路制御手法 (4.2, 4.3) と、中継転送における符号化手法 (4.4) を紹介する。前者の手法は更に、決定的 (Deterministic) 中継転送方式と確率的 (Stochastic) 中継転送方式に大きく分類することができる。また、それらを融合したハイブリッド形中継転送方式も提案されている。

決定的中継転送方式は、エンドツーエンドの経路を事前に決定して中継転送を行うアプローチである。このアプローチは、ノード同士の接触パターンが計画的接触である場合のように、経路を決定するために必要となる情報が事前に得られる場合に採用されることが多い。

確率的中継転送方式 (4.2) は、エンドツーエンドの経路を事前に決定せずに、ホップバイホップで次の中継ノードを決定しながら中継転送を行うアプローチである。このアプローチは、ノード同士の接触パターンが偶発的接触である場合のように、経路状態に関する情報が曖昧である場合に採用されることが多い。最も単純な方法には、接触状態にある一部もしくは全部のノードへデータを転送する感染形中継転送方式がある。また、接触パターンの履歴情報などを活用した手法も提案されている。このように、確率的中継転送方式においては、接触パターンに関する情報の多寡や内容によって、情報転送を行う時間や場所や相手が確率的に決定されることになる。

ハイブリッド形中継転送方式 (4.3) は、ノード同士の接触パターンが計画的接触と偶発的接触が混在する場合に採用されることが多いアプローチであり、決定的中継転送方式と確率的中継転送方式を組み合わせることで、それぞれの利点を生かした効率的な情報転送を行うものである。ノード同士の接触パターンの特徴に合わせて、メッセージフェリー、Data Mule、Virtual Segment などの手法が提案されている。

4.2 確率的中継転送方式

疎密度モバイルアドホック網における感染形中継転送方式 (Epidemic Routing) [13] は確率的中継転送方式の中で最も代表的な方式であり、蓄積運搬転送パラダイムに基づく最も初期に提案された方式でもある。感染形中継転送方式では、メッセージを保持する端末がほかの端末と交信可能となったとき、いつでも、保持しているメッセージの複製をほかの端末に送信する。この結果、あた

かも伝染病が広まるように、複製メッセージが網内の端末にまき散らされ、少なくとも、これらのいずれかが宛先端末に到達することとなる。感染形中継転送方式は宛先端末へ到達可能な全ての経路に複製メッセージを送出するため、網資源が十分にある場合には、あらゆる方式の中で最も優れた遅延性能を示す。しかし、複製メッセージを受信した端末もまた複製メッセージを生成する権利を持つため、網資源を最も消費する方式でもある。一般に、メッセージ転送遅延とバッファやバッテリーなどの網資源の消費量はトレードオフの関係にある。

今まで、感染形中継転送方式の網資源消費量を抑制することを目的として、感染形中継転送方式を改良した様々な方式が提案されてきた。その中の代表的な方式である 2 ホップ転送方式 (Two-Hop Forwarding) は送信元端末がメッセージの複製を持たない端末と交信可能となるたびに複製メッセージを送信し、中継端末を生成する手法である [14] ~ [19]。この方式では、複製メッセージを保持する端末は宛先端末にのみメッセージを送信するため、最大 2 ホップでメッセージが宛先端末に到達する。また、網内で生成される複製パケットの個数に上限を設ける Spray and Wait 方式も提案されている [20]。

メッセージ転送遅延と網資源の消費量との間のトレードオフを評価するための一般的枠組みとして、感染形中継転送方式と 2 ホップ転送方式を包含する新たな方式が文献 [15] で提案されている。理論解析の結果、感染形中継転送方式は達成可能な遅延性能と比較して資源消費量がかかなり多いこと、2 ホップ転送方式は資源消費量を過度に抑制していること、並びに 2 ホップ転送方式よりも多少積極的に複製メッセージを生成すれば、ある基準の下で最適な中継転送方式となることが示されている。

一方、過去の履歴に基づいて各端末の将来の動きが予測可能な状況を想定し、将来の予測に基づいて、複製するメッセージやそれを転送するノードを決定する手法も多数提案されている [19]。例えば、文献 [21] ではバッファ容量や帯域に制限があるという前提の下、各メッセージに対する効用関数の値を過去の履歴並びに将来予測に基づき算出し、それをメッセージの大きさに割ることで得られる優先度指標が提案されている。これを用いた方式では、他端末との遭遇時に優先度の高いメッセージから順にその複製を転送することで中継制御が行われる。

蓄積運搬転送パラダイムに基づく中継転送方式では、

一般に、メッセージが宛先端末に到達したとき、網内に多くの複製メッセージが残存する。これらの不要となったメッセージは端末のバッファを無駄に消費する。更に、多くの端末は通信の完了を知ることができないため、これらの複製メッセージを持つ端末は、引き続き複製パケットを網内にまき散らし続けることになる。よって、いかなる中継転送方式も、不必要となったメッセージを網内から消去する、いわゆる回復手法 (Recovery Scheme) を併用しなければならない。

文献 [18], [22] では様々な回復手法が考察されている。一般に、不必要となったメッセージの除去には、タイマを利用した方法と明示的通知を行う方法の二通りがある。タイマを利用した方法では全てのメッセージを有限時間内に除去可能であるが、タイマを適切に設定することには困難が伴う。一方、明示的通知を行う方式では宛先端末がメッセージを受信したとき、網内に残存する複製メッセージを消去するための除去パケット (Anti-Packet) をブロードキャストする。また、除去パケットを受け取った端末は、当該の複製メッセージを消去する。除去パケットは受信確認信号の役割も果たすため、送信元端末はメッセージが正しく配送されたことを知ることができる。なお、タイマを利用した方式と明示的通知を行う方式は併用することが可能である。

4.3 ハイブリッド形中継転送方式

4.2 で紹介した感染形中継転送方式は、ノードの移動範囲が領域全体である場合は効果が高い。しかし、ノードの移動範囲が局所的である場合も少なくない。例えば、人や動物が通信端末を持って移動する状況を考えると、人や動物は完全にランダムに移動するわけではなく、集まりやすい特定の場所 (クラスタ) があることが多い。また、全てのノードが対等の役割を持つのではなく、特定の役割を持つ場合も考えることができる。このような場合、単純な感染形中継転送方式では、メッセージの伝搬が非効率となり通信が困難になるため、他の手段を組み合わせたハイブリッド形のアプローチも必要となる。4.3 では、ノード同士の接触パターンの特徴やノードの役割、あるいはアプリケーション特有の要求条件や制約条件を考慮した幾つかの手法を紹介する。

まずメッセージフェリーとは、互いの位置が遠く離れているために直接通信できない端末間でメッセージの送

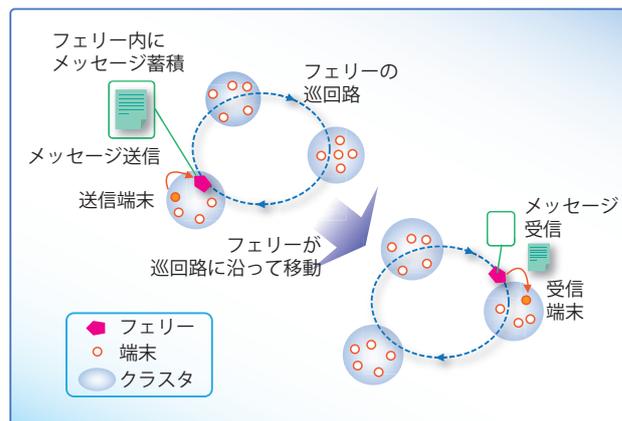


図4 メッセージフェリーの概念

受信を行うために、あらかじめ定められた経路上を移動するノード (フェリー) をメッセージ運搬のための手段として利用するものである [23]。端末が通信範囲内でない他の端末へメッセージを送信したい場合、送信元ノードは、フェリーが近くに来て交信可能な範囲に入ると、フェリーに対してメッセージを送信する。経路上を移動するフェリーは、送信ノードからメッセージを収集し、宛先の受信端末と交信可能になった際、メッセージを送信する (図4)。フェリーを複数台用意し、フェリー間でのメッセージの転送も行うことによって、各フェリーの巡回回路長を短くできるため、メッセージの伝搬時間を短縮することもできる。このように、端末の移動範囲が局所的であっても、クラスタ間をつなぐ経路上をメッセージフェリーが動くことによって、メッセージの伝搬が可能である。

メッセージフェリーに類似した技術として Data Mule というものがある [24]。これは、固定されたセンサに蓄積された情報の収集を目的としている。必ずしも経路が決まっていない移動ノードがセンサとの交信範囲に入るとセンサから情報を収集する。移動ノードが安定したネットワークのアクセスポイントとの交信範囲に入ると、蓄積しているメッセージを、アクセスポイントを介してデータセンサに送信する。これもメッセージフェリーと同様に、移動可能なノードにメッセージの運搬を仲介させることによって、通信の到達可能性を高めるものである。

メッセージフェリーや Data Mule では、クラスタ間を移動ノードが動くことで情報を収集するが、クラスタが地理的に動かず安定している場合は、クラスタ間を固定的なネットワークで連結する、Virtual Segment [25] というものも考えられている。[25] では、移動ノードとして車を想定しており、多くの移動ノードがあることが前提

となっている。送信端末は近くに来た移動ノードにメッセージを送信し、移動ノードはアクセスポイントに近づくと固定ネットワークにメッセージを送信する。メッセージは宛先ノードに近いアクセスポイントに送られる。そのアクセスポイントに近づいた移動ノードにメッセージを送信し、その移動ノードが宛先ノードに近づくと、メッセージが送信される。各クラスタ内にアクセスポイントがあると、そこまで、若しくはそこからの到達可能性は比較的高いが、その間を固定ネットワークでつなぐことによって大幅なショートカットができる。

以上のように、ノードの移動可能性、移動ノード数、移動経路制御可能性などの前提にも様々なバリエーションがあり、それぞれに適切な方法が考えられている。

4.4 符号化技術を用いた中継転送技術

データのロバスト性、到達性を向上させるため、符号化技術を用いた中継転送方式が提案されている [26] ~ [30]。各送信ノードで生成されたパケットを情報パケットと呼ぶことにする。これらの方式では、複数の情報パケットを符号化により符号化パケットへ変換し、符号化パケットを中継転送する。感染形中継転送 [13] 等ネットワーク内でパケットを複製して転送を行う技術では、高い到達率を実現するために、全パケットを十分な数だけ複製する必要がある。それに対し、符号化を用いた場合、一つの符号化パケットに複数の情報パケットを含ませることができるため、高い到達率を維持したままネットワーク内のパケットの複製数を削減することが可能である。

符号化を用いた中継転送技術で用いられている符号化技術は大きく二つに分類できる。一つは情報パケットが生成された送信ノードで符号化を行い、宛先である受信ノードで復号を行う従来からの手法である。もう一つは、送信ノードだけでなく、パケットを中継するノードも符号化を行うネットワークコーディング (Network Coding) [31] を用いた手法である。

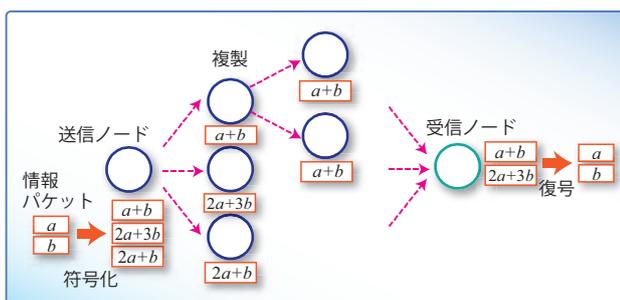


図5 送信ノードで符号化を行う場合

[31] を用いた手法である。

送信ノードのみで符号化を行う場合の例を図5に示す。一般に、送信ノードで生成された k 個の情報パケットは、 rk 個 (r は実数で $r > 1$) のパケットに符号化され、符号化パケットはそれぞれ別々の中継ノードに転送される。符号化方法として例えばリードソロモン符号 [32] を用いた場合、 rk 個のパケットのうち、 k 個のパケットを受信すれば受信ノードは情報パケットを復元することができる。中継ノードは、感染形中継転送等の中継転送技術を用いて受信ノードまでパケットを転送する。文献 [26] では、符号化パケットを複数の中継ノードに等分配し、これらの中継ノードが宛先ノードへとパケットを配送する方式を提案している。また、符号化を行わずにパケットを複数の中継ノードに等分配する方式と提案方式を比較し、提案方式が遅延時間の最悪値の意味で優れた性質を有することを示している。文献 [27] では、符号化パケットを Spray and Wait [20] と同様の方法により配送する方式を提案している。

ネットワークコーディングを用いた場合の例を図6に示す。図のように、ネットワークコーディングを用いた場合、中継ノードは複数のパケットから単一の符号化パケットを生成し、他の中継ノードに転送する。符号化パケットに含まれる情報パケットの最大数を n とする。線形演算により符号化を行う線形ネットワークコーディング [33] を用いた場合、受信ノードは線形独立な演算により符号化された n 個のパケットを受信すれば n 個の情報パケットを復元することができる。送信ノードのみで符号化を行う場合と比べて、ネットワークコーディングを用いた場合、異なる送信ノードで生成された情報パケットを符号化することができる。また、送信ノードのみで符号化を行う場合、符号化パケットの種類は送信ノードの符号化方式により決まるが、ネットワークコーディングでは、パケットを転送する中継ノードごとに異なる演

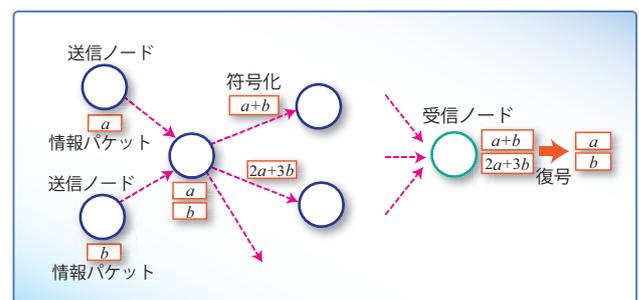


図6 ネットワークコーディングを用いた場合

算方法で符号化を行うことにより様々な種類の符号化パケットを生成することができる。文献 [29] では、中継ノードが確率的に転送を行う中継転送方式とネットワークコーディングを組み合わせた方式を提案しており、提案方式がパケット到達率の意味で優れていることを様々なノード密度の環境において評価している。文献 [28], [30] では、感染形中継転送方式とネットワークコーディングを組み合わせた方式を提案し、その性能解析の結果、バッファサイズに制限のある環境ではパケット到達率及び遅延時間特性の意味でネットワークコーディングが効果的であることを示している。

5. むすび —今後の展望—

近年、DTN 技術を活用するアプリケーションや実システムの研究開発及びフィールド実験も増えてきている。2. でも述べたように、DTN 技術は特殊な環境のための特殊な技術ではない。発展途上地域や過疎地域でのデジタルデバイス解消のためにも重要であるが、ネットワークが整備された都会においても、サービス提供者によるネットワークインフラストラクチャの一部、あるいは利用者間のアドホックな通信をサポートする端末に DTN 技術を導入することによって、人対人、物対人、物対物の膨大な情報の非同期形交換・共有をコスト効率良く実現する新しい「情報流通」を切り開く可能性がある。具体例として、道路上を走る車、線路上を走る列車、空港間を結ぶ飛行機などの交通インフラストラクチャと無線通信を組み合わせた情報ネットワークの可能性の検討がなされている [25], [36], [37]。また、人の移動を利用した、携帯端末間での情報伝達・共有も研究されている [38]。ただし、ビジネスとして成功するための課題も多く残っている [35]。なお、本号の解説記事にも事例を載せているので参照されたい [39]。

実用化の流れの中で、標準的なアーキテクチャに関しては、3. で述べたように、様々な課題、例えば、名前解決、認証、セキュリティ、時刻同期などに対する研究・検討が行われており、IRTF/DTNRG において多数のインターネットドラフトが提案されている。4. で述べた中継転送技術に関しても、扱いやすい単純なモデル上での理論やシミュレーションだけでなく、具体的なシナリオに基づ

く課題の分析と解法の研究が進展している。特に、人や車の移動に基づく大規模なネットワークでの蓄積運搬形転送においては、移動パターンの特性が手法の性能に大きく影響するため、その現実的な特性を把握・モデル化する研究が進められている [40] ~ [42]。また、そのような具体的なシナリオを想定した性能評価のために ONE (Opportunistic Network Environment simulator) を用いたシミュレーション研究が盛んに行われている [43]。

DTN 技術が有効に適用できる環境やそれを必要とする状況は、今後ますます増加すると考えられる。例えば、省電力の必要性から間欠的にしか機能しないノードを含むセンサネットワーク上でのデータ転送には DTN 技術が有効であるが、省電力要求の拡大に伴い、他のネットワークでもこのような不連続性が出現し、DTN 技術を適用する可能性がある。また、無線の利用が今後急増することが予想され、今の固定的な無線周波数の割当ではその枯渇が避けられないため、コグニティブ無線技術の研究が盛んになってきた。しかし、アプリケーションの特性に応じた周波数の柔軟な共用を追及するためには、時間的・空間的不連続性に対応できる DTN 技術をコグニティブ無線技術と組み合わせることが必要になると考えられる。

より大きく捉えるならば、DTN 技術は従来の TCP/IP 技術の制約を超えるための新世代ネットワーク技術の一部に位置付けることもできる。例えば、米国国立科学財団 NFS の FIND (the Future Internet Design initiatives) による新世代ネットワーク技術の基礎研究プロジェクトの一つである「Postcards from the Edge: A Cache-and-Forward Architecture for the Future Internet」では、蓄積形転送技術の汎用アーキテクチャとしての側面が考察された [34]。それが発展し、昨年 9 月には NFS の新世代インターネットアーキテクチャ (Future Internet Architecture) 研究プログラムの一つとして、移動する通信主体を第一級の対象とした GDTN (Generalized Delay Tolerant Networking) を掲げるプロジェクト「MobilityFirst」が採択されている。このように、DTN 技術の拡張・一般化は、新世代ネットワーク技術として更なる進展が期待できる。

本論文の内容の一部は、グローバル COE、科学研究費基盤 (S) 18100001、基盤 (C) 20500080、基盤 (C) 22500059、若手 (B) 22700069、及び (財) 電気通信普及財団の支援による。

文献

- [1] S. Farrell, V. Cahill, D. Geraghty, I. Humphreys, and P. McDonald, "When TCP breaks: Delay and disruption-tolerant networking," *IEEE Internet Comput.*, vol. 10, no. 4, pp. 72-78, July/Aug. 2006.
- [2] S. Farrell and V. Cahill, *Delay and Disruption Tolerant Networking*, Artech House, 2006.
- [3] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, "Delay-tolerant network architecture," *IETF RFC 4838*, April 2007.
- [4] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, E. Travis, and H. Weiss, "Interplanetary internet IPN: Architectural definition," *IETF Internet Draft*, <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-ipnrg-arch-00/>, Nov. 2001.
- [5] K. Scott and S. Burleigh, "Bundle protocol specification," *IETF RFC 5050*, Nov. 2007.
- [6] M. Ramadas, S. Burleigh, and S. Farrell, "Licklider transmission protocol-specification," *IETF RFC 5326*, Sept. 2008.
- [7] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," *Proc. ACM SIGCOMM '03*, pp. 27-34, Aug. 2003.
- [8] K. Fall, W. Hong, and S. Madden, "Custody transfer for reliable delivery in delay tolerant networks," *Tech. Rep. IRB-TR-03-030*, Intel Research Berkeley, July 2003.
- [9] G. Zhang, J. Wang, and Y. Liu, "Congestion management in delay tolerant networks," *Proc. 4th Ann. Int. Conf. Wirel. Internet (WICON '08)*, Digital Object Identifier: 10.4108/ICST/WICON2008/4807, Nov. 2008.
- [10] M. Seligman, K. Fall, and P. Mundur, "Alternative custodians for congestion control in delay tolerant networks," *Proc. 2006 SIGCOMM Workshop on Challenged Networks (CHANTS '06)*, pp. 229-236, Sept. 2006.
- [11] S. Symington, S. Farrell, H. Weiss, and P. Lovell, "Bundle security protocol specification," *IETF Internet Draft*, <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-bundle-security-15/>, Feb. 2010.
- [12] S. Farrell, S. F. Symington, H. Weiss, and P. Lovell, "Delay-tolerant networking security overview," *IETF Internet Draft*, <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-sec-overview-06/>, Sept. 2009.
- [13] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," *Duke Tech. Rep. CS-2000-06*, July 2000.
- [14] R. Groenevel, P. Naina, and G. Koole, "The message delay in mobile ad hoc networks," *Perform. Evaluat.*, vol. 62, no. 1-4, pp. 210-228, Oct. 2005.
- [15] T. Matsuda and T. Takine, "(p, q)-epidemic routing for sparsely populated mobile ad hoc networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 783-793, June 2008.
- [16] M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 477-486, Aug. 2002.
- [17] E. P. C. Jones and P. A. S. Ward, "Routing Strategies for Delay-Tolerant Networks," Available: <http://ccng.uwaterloo.ca/~pasward/Publications/dtn-routing-survey.pdf>, 2006.
- [18] X. Zhanga, G. Negliab, J. Kurose, and D. Towsley, "Performance modeling of epidemic routing," *Comput. Networks*, vol. 51, no. 10, pp. 2867-2891, July 2007.
- [19] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges," *IEEE Commun. Surveys*, vol. 8, no. 1, pp. 24-37, First Quarter, 2006.
- [20] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendr, "Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 16, no. 1, pp. 77-90, Feb. 2008.
- [21] A. Balasubramanian, B. Levine, and A. Venkataramani, "DTN routing as a resource allocation problem," *Proc. ACM SIGCOMM '07*, pp. 373-384, Oct. 2007.
- [22] Z. Haas and T. Small, "A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 14, no. 1, pp. 27-40, Feb. 2006.
- [23] W. Zhao and M. H. Ammar, "Message ferrying: proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks," *Proc. 9th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing System (FTDCS '03)*, pp. 308-314, May 2003.
- [24] R. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," *Proc. IEEE Int. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pp. 30-41, May 2003.
- [25] S. Yamamura, A. Nagata, M. Tsuru, and H. Tamura, "Virtual segment: store-carry-forward relay-based support for wide-area non-real-time data exchange," *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT)*, vol. 19, no. 1, pp. 30-46, Jan. 2011.
- [26] Y. Wang, S. Jain, M. Martonosi, and K. Fall, "Erasure-coding based routing for opportunistic networks," *Proc. 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking*, pp. 229-236, Aug. 2005.
- [27] Y. Liao, K. Tan, Z. Zhang, and L. Gao, "Estimation based erasure-coding routing in delay tolerant networks," *Proc. Int. Conf. Wirel. Commun. and Mobile Comput.*, pp. 557-562, July 2006.
- [28] Y. Lin, B. Li, and B. Liang, "Stochastic analysis of network coding in epidemic routing," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 794-808, June 2008.
- [29] J. Widmer and J. Y. Le Boudec, "Network coding for efficient communication in extreme networks," *Proc. 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking*, pp. 284-291, Aug. 2005.
- [30] X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose, and D. Towsley, "On the benefits of random linear coding for unicast applications in disruption tolerant networks," *Proc. 2nd Workshop, Network Coding, Theory, and Applications (NetCod 2006)*, April 2006.
- [31] R. Ahlswede, N. Cai, S. -Y. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1206, July 2000.
- [32] A. J. McAuley, "Reliable broadband communications using

a burst erasure correcting code," Proc. ACM SIGCOMM '90, pp. 297-306, Sept. 1990.

- [33] S. -Y. Li, R. W. Yeung, and N. Cai, "Linear network coding," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 29, no. 2, pp. 371-381, Feb. 2003.
- [34] L. Dong, H. Liu, Y. Zhang, S. Paul, and D. Raychaudhuri, "On the cache-and-forward network architecture," Proc. IEEE ICC 2009, Digital Object Identifier: 10.1019/ICC.2009.5199249, June 2009.
- [35] A. Lindgren and H. Pan, "The quest for a killer app for opportunistic and delay tolerant networks," Proc. CHANTS '09, pp. 59-66, Sept. 2009.
- [36] A. Keraenen and J. Ott, "DTN over aerial carriers," Proc. CHANTS '09, pp.67-76, Sept. 2009.
- [37] M. Doering, T. Pögel, and L. Wolf, "DTN routing in urban public transport systems," Proc. CHANTS '10, pp.55-62, Sept. 2010.
- [38] E. Nordström, P. Gunningberg, and C. Rohner, "Haggle: A data-centric network architecture for mobile devices," Proc. 2009 MobiHoc S³ Workshop, pp.37-40, May 2009.
- [39] 山村新也, 永田晃, "DTN: 遅延と仲良くするネットワーク," 信学通誌, no. 16, pp. 52-56, March 2011.
- [40] K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rhee and S. Chong, "SLAW: A mobility model for human walks," Proc. INFOCOM, pp.855-863, April 2009.
- [41] U. Lee, S. Y. Oh, K. -W. Lee, and M. Gerla, "Scaling properties of delay tolerant networks with correlated motion patterns," Proc. CHANTS '09, pp.19-26, Sept. 2009.
- [42] S. Ahmed and S. Kanhere, "Characterization of a large-scale delay tolerant network," Proc. 35th IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN2010), pp. 56-63, Oct. 2010.
- [43] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The ONE simulator for DTN protocol evaluation," Proc. SIMUTools '09, p.10, March 2009.

(平成 22 年 8 月 25 日受付, 11 月 4 日再受付)



鶴 正人 (正員)

昭 58 京大・工・数理卒。昭 60 同大学大学院工学研究科修士課程了。沖電気工業株式会社, 長崎大, などを経て, 現在, 九工大・情報工・電子情報教授。同大学ネットワークデザイン研究センター長及び情報科学センター長兼務。主として情報ネットワーク工学に関する研究に従事。博士(情報工学)。ACM, IEEE, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。



内田真人 (正員)

平 11 北大・工・情報卒。平 13 同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。平 17 九工大ネットワークデザイン研究センター助教授。現在, 同准教授。主として情報ネットワーク工学に関する研究に従事。博士(工学)。ACM, IEEE 各会員。



滝根哲哉 (正員)

昭 59 京大・工・数理卒。平元同大学大学院工学研究科博士課程了。現在, 阪大・工・電気電子情報教授。通信トラヒック工学に関する研究に従事。工博。平 9 日本 OR 学会文献賞, 平 15, 平 21 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 平 16, 平 21 本会論文賞, 平 18 年システム制御情報学会論文賞。日本 OR 学会フェロー, 情報処理学会, システム制御情報学会, IEEE 各会員。



永田 晃 (正員)

平 12 阪大・工・通信卒。平 14 同大学大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程了。同年(株)富士通研究所入社。平 19 より(株)ネットワーク応用技術研究所。主としてネットワークシステムに関する研究に従事。現在, 独立行政法人情報通信研究機構に出向中。



松田崇弘 (正員)

平 8 阪大・工・通信卒。平 11 同大学大学院工学研究科通信工学専攻博士後期課程了。同年同大学大学院助手。平 17 同大学院講師。平 21 同大学院准教授, 現在に至る。通信ネットワーク, 特に無線ネットワークに関する研究に従事。博士(工学)。IEEE, 情報処理学会各会員。



已波弘佳 (正員)

平 4 東大・理・数学卒。同年日本電信電話株式会社入社。以来, ネットワーク設計・制御・性能評価, グラフ理論・最適化理論とその応用に関する研究開発に従事。平 14 関西学院大・理工・情報科学, 現在同大学准教授。平 12 京大博士(情報学)。情報処理学会, 日本 OR 学会, ACM, IEEE 各会員。



山村新也 (正員)

昭 63 大分大・工・電子卒。同年富士通株式会社九州通信システム(現富士通九州ネットワークテクノロジーズ株式会社)入社。主としてネットワークアーキテクチャに関する研究に従事。現在, 独立行政法人情報通信研究機構に出向中。