

広域ネットワークにおける M2M/IoT パケットのためのアグリゲーション方式の提案

石橋 亮太^{†,‡} 大羽 巧[†] 小池 新[†]

[†] 日本電信電話株式会社 ネットワーク基盤技術研究所

[‡] (現所属) 株式会社NTTドコモ サービスデザイン部

M2M/IoT の通信では、軽量プロトコルを使用してパケットサイズを小さく抑える等、貧弱な能力のデバイス向けのパケット処理の効率化、消費電力の削減及び通信帯域の節約を局所的なネットワークを構成するために試みている。この局所的なネットワークで生成される小さなパケットは、局所的なネットワークに閉じた問題でなく、多様なデバイス・局所的なネットワークを大量に収容する固定・移動網を含む広域インターネット網において解決すべき新たな課題を作り出す。本稿では、大量の小さなサイズのパケット処理に伴う消費電力削減、処理負荷軽減等を可能にする一技術として、アグリゲーション技術を、従来検討されてきた局所的なセンサ網等ではなく、広域インターネットにおける M2M/IoT の通信のサポート観点から考察する。

A packet aggregation scheme in wide-area networks for M2M/IoT

Ryota Ishibashi^{†,‡} Takumi Ohba[†] and Arata Koike[†]

[†] Network Technology Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corp.

[‡] (Current Affiliation) Service Design Department, NTT Docomo Inc.

There are several approaches seeking effectiveness for Machine-to-Machine (M2M)/Internet of Things(IoT) communications, where each device has very limited communication capabilities. One such example is the introduction of small-size packets for a lightweight communication protocol by which we can form a local network dedicated for M2M/IoT devices and can achieve effectiveness in packet processing, reducing power consumption, and minimizing bandwidth occupancy. The small-size packet can dissolve problems for local networks but it creates a new problem for the wide area Internet, where various devices and local networks are converged. This paper proposes an aggregation technique that makes it possible to reduce power consumption and processing loads caused by huge amount of small packets. Aggregation techniques have been considered for local area network but our proposal is focusing on the wide area Internet from the viewpoint of supporting M2M/IoT.

1 はじめに

人間が介在せずセンサやメータ等のデバイスが自律的に通信を行う、M2M(Machine to Machine)や IoT(Internet of Things)と呼ばれる新たな通信形態が注目を浴びている。従来のインターネットは、主としてパーソナルコンピュータや携帯電話など、人間が操作することを前提とした通信端末が接続されていた。M2M/IoT では、温度や放射線な

どの環境情報を収集するセンサ、電力などのモニタリングに用いられるメータ、機器の各部位の作動制御に用いられるアクチュエータなどの機器をもインターネットに接続するようになる。これらの機器が必ずしも人間の介在を必要としない通信を行うことで、より多様かつ高度な通信サービスがインターネットを通じて実現することができるようになると期待される。

これらのセンサ、メータ、アクチュエータといった機器は、多くの制約条件を有する貧弱な通信でバイスである。例えば、バッテリー駆動で動作するものが多いため、通信にあたっては高い省電力性が要求される。また、搭載可能なメモリ量が限られるため、通信処理には高い軽量性が求められる。そのためこれらの機器では例えば、パーソナルコンピュータや携帯電話等の従来の通信機器を使用した通信サービスを実現する技術として広く普及している HTTP (Hypertext Transfer Protocol) [1]をそのまま用いると、送受信されるメッセージサイズが大きくなり、通信時に大きな電力を消費してしまうなどの問題がある。

このような制約条件の厳しい機器を用いたデータ通信を可能とするための技術に、例えば[2]に示される CoAP (Constrained Application Protocol) のような軽量な通信プロトコル技術がある。

CoAP のようなプロトコル技術の設計目標の一つに、通信時の消費電力を削減するために、通信時に送受信されるメッセージサイズを可能な限り小さくする点がある。これにより、センサ、メータ、アクチュエータといった制約条件の厳しい貧弱なデバイスは、通信にかかる処理を短縮することができ、電力消費を抑えることができる。

しかしながら、このような機器が極めて大量に存在し、インターネットを介して互いに接続する場合、広域のネットワーク上にもこのような小さなサイズの packets が極めて大量に流通することとなる。一般的に、通信ネットワークを構成するルータなどのノードにおける転送処理は、通信帯域(ビット毎秒)の制限だけでなく、packets の処理数(packets 枚秒)による制限もある。つまり、通信帯域の制限には満たなくとも、小さなサイズの packets の転送が多くなるほどルータ等の機器の負荷が増大するため、消費電力が増大したり、処理遅延が発生したり、packet ロスが增加するなどの問題が発生し易くなる。また、実際に伝達したいデータそのものに比べて、ネットワーク処理にしか用いられないヘッダ情報等のオーバーヘッドが大きくなり、ネットワーク帯

域の利用も非効率化する。

本稿では、packet 処理に伴う消費電力削減、処理負荷軽減等を可能にする一技術として、アグリゲーション技術に着目する。ここでは M2M/IoT のためにアグリゲーション技術が従来検討されてきた局所的なセンサネットワークについてではなく、固定網・移動網を含む広域のインターネットにおける M2M/IoT の通信のサポート観点からアグリゲーション技術を考察する。

次章では、既存のアグリゲーション技術について述べ、その広域インターネットへ適用の際の課題について述べる。3 章では広域インターネットにアグリゲーション技術を適用する際の要求条件を述べる。4 章では広域インターネットでアグリゲーションを行うためのアーキテクチャと手順について提案を行い、CoAP による実装のためのフォーマット及びシーケンスを示す。5 章で、本論文をまとめ、今後の課題と可能性をオーバーレイネットワークの構築という観点から述べる。

2 M2M/IoT を支えるための工夫

M2M/IoT におけるセンサ、メータ等のデバイスの多くは、バッテリー容量や処理性能が貧弱であり、packet のサイズ・転送回数を可能な限り小さく・少なくする必要がある。packet サイズを小さくするために、M2M/IoT の通信では、6LoWPAN-HC[3]や CoAP[2]といった軽量プロトコルを使用する。CoAP は、貧弱なデバイスにて機器の制御のためのデータの送受信を行うために、HTTP などに見られるテキストベースではなく、バイナリを用いたプロトコルである。ヘッダサイズは 4byte 固定長で、オプション等は全て任意のため最小のメッセージサイズはヘッダのみの 4byte と非常に軽装とである。また、CoAP のアーキテクチャは、データの取得、更新、削除などを要求するリクエストを送信するクライアント、クライアントからの要求に応答するサーバ、および CoAP メッセージの中継を行うプロキシサーバから構成される。6LoWPAN-HC では、IEEE 802.15.4 [4]との連携を行い、下

位レイヤの情報を利用することで IP ヘッダの圧縮を行うことで、127 バイトの IEEE 802.15.4 のフレームに対応できるような軽装性を実現している。また、転送回数の削減のためには、個々のデバイスが送信するパケットをそのまま転送するのではなく、中継デバイスが複数パケットを一つのパケットに集約して転送するアグリゲーション技術が検討されている。複数のパケットを一つのパケットに集約することで、貧弱なデバイスによるパケット処理を効率化し、消費電力の削減、処理負荷の軽減、通信帯域の節約を試みている。

2.1 既存の M2M/IoT でのアグリゲーション技術

この問題に対する既存技術として、[5] に示されるような、センサネットワークにおけるデータ集約技術が多々ある。例えば [5] では、このデータ集約技術においては、センサネットワークにおいて、複数のセンサ端末が、単一の終端基地局に向かってマルチホップのツリーネットワークを構成する。中継センサは子センサから連続して受信した複数のパケットを単一のパケットに集約した後に親センサに転送する、という手順を繰り返す (図 1)。

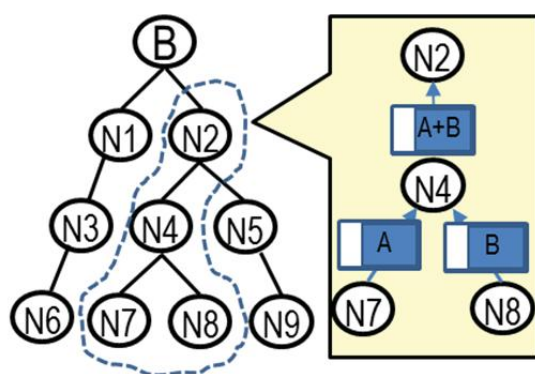


図 1: センサ NW におけるアグリゲーションのイメージ

複数のセンサから複数のセンシングデータを受信した中間センサが、それらを次ホップのセンサに転送する際に、単にそれらを個別に転送するのではなく、それらの複数データの和や平均等の演算処理を行った

上で、その結果を新たな一つのデータとして次ホップに転送する。これをツリーネットワークの端点から終端基地局まで同様に実施することで、全てのセンサ端末からのセンシングデータを個別に転送する場合に比べ、転送するデータ量を削減し、ネットワーク帯域、センサ端末における転送処理に要する電力消費を削減することができる。

2.2 アグリゲーション技術の広域インターネットへ適応時の課題

消費電力、処理負荷等の問題は、貧弱なデバイスおよびそれらで構成する局所的なネットワークだけでなく、多様なデバイス・局所的ネットワークを大量に収容する固定網・移動網等の広域網においても解決すべき問題である。しかしながら、このようなセンサネットワーク上でのデータ集約技術は、温度データ、電力データなどの決まった種類のセンシングデータを一元的に集約するという、用途が限定された局所的なネットワーク上に適用することを前提としている。そのため、多種多様なセンサ類、メータ類を大量に収容し、多様な通信パターン・経路による多様なデータの送受信を実現する広域的なネットワーク上には適用しづらいという課題がある。

具体的には、端点のセンサ端末から終端基地局まで一方向的に一律的に集約が行われるため、広域ネットワークのある部分において集約を行いたい、ある部分においては集約を行わない、という区別ができない。

また、センサネットワーク等の局所的ネットワークでは、センサ類がセンシングしたデータを送信する送信先は、常に同じ終端基地局であることが専らである。従って、そのネットワークを構成するセンサ類等のノードは、最終的に集約したデータを受信する基地局がそれを正しく処理できると分かっているため、常に複数のデータを集約して送信する単純な処理を行えば良い。

ところが、より広域的なネットワークでは、あるセンサ端末が送信するデータが最終的に到達するノードないしはその経路上にあるノード、またそれらノードの自体の

能力は、常に一定・一つとは限らない。そのため、単純に一律にデータの集約を行うと、最終的な到達点、あるいはその経路上のどこかで、その集約されたデータを正しく処理できなかったり、そもそもデータが正しく届けられなかったりすることがあり、意図した通信が達成できなくなる可能性がある。

さらに、局所的なネットワークでは、複数データに含まれている情報自体の和や平均等の演算処理による非可逆的な集約も可能であった。データの中身を変えずに転送することが役割の広域インターネット上では、このようなデータ自体の操作は、想定できない。

3 広域インターネットにおける要求条件

ここでは、広域インターネットに、小さなパケットが、大量に流入する状況を仮定する。前節で述べたような局所的な非可逆な集約を施した結果としての小さなパケットや、あるいは可逆な集約な場合はそれがほどかれて元の小さなパケットに再構成された状態のパケットが、大量に流入する状況を仮定する。すなわち、局所的なネットワークで実施されたアグリゲーションの有無を広域ネットワークで考慮することはなく、あくまで大量の小さいパケットが流入しているという状況のみに着目する。

前節の単純・一方向的なアグリゲーションは、パケットの宛先、方向、内容が一樣・固定的なセンサ NW 等の局所的 NW では良く機能するが、多種多様なデバイスが様々なアプリケーションと連動し、通信の宛先、方向、内容が多岐に渡る広域 NW (図 2) においては正しく機能しない場合がある。このことから、広域インターネットにおけるアグリゲーションは以下の要求条件を満たすべきであると考えられる。

① 多方向性・② 双方向性: 多様なデバイス・アプリケーションの組み合わせを収容する NW 内でパケット集約を可能にするため、最終宛先の異なるパケット同士の集約、およびパケット転送の双方向での集約

ができること

③ 選択性: 集約処理による遅延の増加を嫌うアプリケーション等に対して一律的な集約が悪影響を及ぼすことを避けるため、特定のパケットのみ選択的に集約できること

④ 適応性: 集約パケットを正しく処理できないノードを混在的に収容可能とするため、ノードの能力に適応して集約動作を実行できること

これらの要求条件は局所的なネットワークでの要件とは異なる要件であるため、広域インターネットで実現するためには、新たな方式の検討が必要になる。

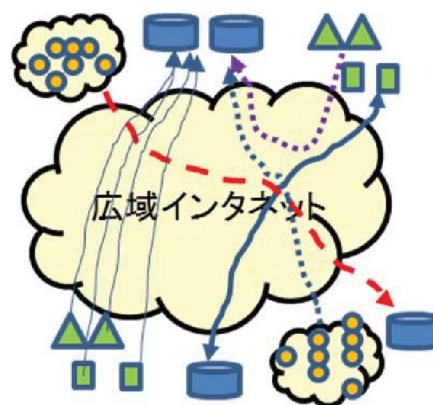


図 2: 広域インターネットにおける多種多様な通信のイメージ

4 広域インターネットにおけるアグリゲーション方式

本章では 3 章で述べた要求条件を満たすアグリゲーションの一方式として提案するアーキテクチャを述べる。

① 多方向性と② 双方向性を満たすためには、中継ノードがパケットを集約・転送するだけでなく、受信した集約パケットを再分割して宛先の異なるパケットを取り出し、転送し分ければ良い。つまりメッセージを送信／転送するルータ等のノードが、複数のメッセージを単一のメッセージに集約する(集約機能)だけでなく、メッセージを転送するノードが、集約されたメッセージに含まれる個別のメッセージを復元し、それぞれのメッセージ毎に処理を行う(復元機能)。

③選択性は、パケットに集約を許可しないしは拒否するフラグを明示的に設定し、中継ノードがフラグに応じて集約動作を行うことで実現できる。更に、メッセージの送信ノードがそのメッセージの転送経路上での集約を禁止する手段を提供する。これにより、メッセージの特性、そのメッセージに含まれるデータを利用するアプリケーションの要求条件などに応じて、ネットワーク上での集約動作を制御することを可能にし、不適切な集約の発生を防止する。

④適応性を満たすには、集約パケットを転送しようとするノードが、転送先ノードが集約パケットを処理する能力があるかどうかを確認し、結果に応じて集約動作を行えば良い。また、ノードがメッセージの集約機能・復元機能をサポートしているかどうかを自ら表明し、メッセージの送信元ノードが、送信先ノードの復元機能のサポート要否を確認する。これにより、かならずしも端末から基地局への一方方向的・一律的な集約だけでなく、広域的ネットワーク内の部分的な集約実行と集約の非実行の区別を実現する。

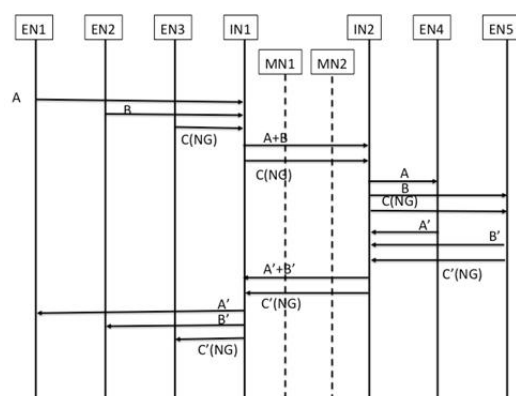


図 3: 広域インターネットにおけるパケットアグリゲーションのフロー例

これらの機能を備えたノードによる広域インターネットにおけるパケットアグリゲーションのイメージを図3に示す。始点ノード(EN1, 2, 3)からパケットが送出される。始点ノードEN1, 2, 3は、ホームゲートウェイやM2Mゲートウェイのような、局所ネ

ットワークの出口にある装置である。中継ノードIN1, 2(アプリ層のプロキシ相当)は一定タイマ期間中に受信した複数のパケットに対してそれぞれ集約・再分割処理を行う。中継ノードIN1, 2は、具体的にはエッジルータに相当するものである。IN1では、宛先アドレスが同じあるいは、同じASに属する宛先等毎に、ある閾値より小さなパケットを複数束ね、集約して1つのパケットとして転送する。中間ノード(MN1, 2)は集約・再分割を行わず転送のみを行うノードである。中間ノードMN1, 2は、具体的には広域インターネットのバックボーンルータである。終点ノード(EN4, 5)がパケットを受信する。終点ノードEN4, 5は例えばあるインターネットプロバイダと別のプロバイダ(あるいはデータセンタ)との境界ルータ等である。この時、次の転送先が集約パケット受信能力を持つかどうかを確認するとともに、禁止フラグNGのあるパケットを集約から除外する。また集約パケットに含まれる異なる転送先宛パケットは再分割後に別のパケットとして転送を行う。逆方向の応答パケットも同様に処理する。センサネットワーク等では各ノードはネットワーク構成の変化に応じてエンドノードと中継ノードの役割を使い分けるが、広域ネットワークでは各ノードの役割は固定的である。

このことが実現できると、アグリゲーション技術の適用先が、限られた種類・数の端末と基地局が接続して限られた用途の通信を行う局所的なセンサネットワーク等の内部だけでなく、多種多様な端末、終端ノードを直接ないしは間接的に大量に接続した広域インターネットへと広がる。ただし、局所的なネットワークでは図1のような、非可逆な情報自体の集約も行われたが、広域インターネットではあくまでもパケット自体の集約であり、中に含まれる情報自体を改変することは行わないことが、大きな違いである。

このようにアグリゲーション技術を導入することで、広域インターネットにおいても小さなパケットの大量の送受信によるネットワーク機器のパケット転送処理負荷の軽

減、ネットワーク帯域利用非効率化の防止、ネットワーク機器の消費電力の削減が可能になる。なお、すべてのノードで集約・復元処理を行うと、パケット処理の負荷をネットワーク全体でかえって増加させることになる。このため、パケットの集約・復元処理を行うノードは、限定された数のノードで行う必要がある。具体的な実現例としては、センサネットワークとインターネットのゲートウェイや、センサ情報を収集するサーバを運用するサービス事業者のネットワークの境界に設置したノードで行うことが想定できる。このように設置することで、図3に示したMN1、2のように、インターネットのコア部分に存在するノードは、集約されたパケットのみを処理することができ、処理負荷を低減させることが可能になる。

具体的なアグリゲーション例の一つとして、ネットワークプロトコルにIP (Internet Protocol)、トランスポートプロトコルにUDP (User Datagram Protocol) を用い、メッセージ集約処理を、CoAP レイヤにおいて行う場合のパケットフォーマット例を図4に示す。

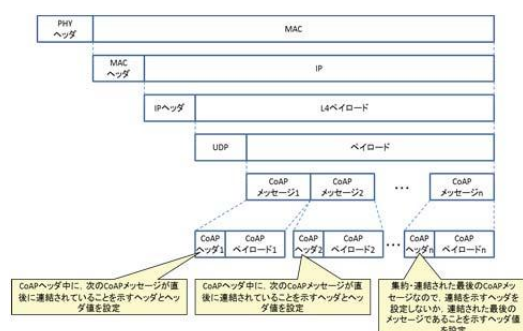


図4: CoAPを用いた集約パケットフォーマット

メッセージの集約は、大きく以下の流れで処理される。

初めに、集約対象メッセージ群を決定する。具体的には、受信した複数のメッセージのうち、どのメッセージとどのメッセージを集約して転送することができるのか、

あるいは、送信しようとしている複数のメッセージのうち、どのメッセージとどのメッセージを集約して送信できるのか、を決定する。この集約対象のメッセージ群は、宛先のIPアドレスや、あるいはネクストホップのルーティング先が同じものを識別することで、同定する。

次に、決定した集約対象メッセージ群に対して集約処理を実行する。具体的には、複数のメッセージを連結し、一つのパケットにする。

最後に、複数のメッセージが集約されたパケットを送信／転送する。

ノードがメッセージを受信した際にメッセージを処理キューに格納する手順は以下の通り。

動作を開始したノードは、集約タイマを起動する。タイマ起動中に受信したメッセージに対して、自身が集約メッセージの復元機能をサポートしている場合は、メッセージの復元処理を行う。復元されたメッセージ群を、処理キューに格納する。

集約タイマが完了するまでの間にメッセージの受信、復元、処理キューへの格納の手順を繰り返す。一度復元したメッセージを再び後の集約処理のための処理キューに格納することで、集約されたメッセージを受信したノードが、更にそれを別のメッセージと集約する、多段集約が可能になる。

集約タイマが完了したら、集約タイマをリセットし、処理キューに格納されたメッセージ群に対して、集約対象メッセージを特定する処理を起動し、集約タイマを再起動して再び次のメッセージの受信を待機する。以降、これを繰り返す。

ノードが処理キューに格納したメッセージ群の中から集約対象メッセージを特定する処理手順は以下の通り。処理が開始されると、処理キューからメッセージを一つ取り出す。このメッセージの最終宛先が自分自身ではなく転送が必要なものかどうかの判定を行う。転送が不要なく自分自身が最終宛先であるメッセージは、通常の受信処理を起動する。転送が必要な場合は、そのメッセージが集約禁止かどうかの確認を行う。集約禁止の場合、通常の転送処理を起

動する。集約禁止でない場合、転送先ノードが集約メッセージの復元機能をサポートするかどうかの確認を行う。サポートしない場合は、そのメッセージに対して通常の転送処理を起動する。サポートする場合は、そのメッセージを、そのメッセージの転送先毎の集約対象メッセージ群に追加する。その転送先の集約対象メッセージ群が存在しない場合は、その転送先の集約対象メッセージ群を構成する最初のメッセージとなる。

その後、処理キューが空になっているかどうかを確認する。空になっている場合は、転送先毎にリストアップされた1つ以上の集約対象メッセージ群に対して、それぞれ集約処理を起動する。処理キューが空でない場合は、次のメッセージを一つ取り出し、同様の処理を行う。また、集約したパケットのサイズが、転送先／送信先までのパケット転送経路上の最大サイズ (Path MTU)、あるいは、予め設定される転送時／送信時最大サイズを超えた場合には、集約を終了して、パケットを送信する。

メッセージの転送先／送信先に対して集約メッセージを転送／送信して良いかどうかを判断するために、転送先／送信先ノードが集約メッセージを適切に処理できるかどうか、すなわち集約メッセージから個々のメッセージを復元して処理を継続する (復元機能) ことができるかどうかを確認する手順が必要となる。この復元機能サポート可否の確認のための問合せおよび通知は、本集約および復元の対象となるメッセージと同じ通信プロトコルで実現することも可能であり、別の通信プロトコルによって実現することもできる。具体的に CoAP メッセージの集約・復元を実施する場合に、復元機能サポート可否の確認を行う際の問合せ・応答メッセージ、および通知メッセージを図 5、図 6 にそれぞれ示す。なお、図 5、図 6 では分かりやすさのためテキスト形式で表現しているが、実際に CoAP を用いた場合はバイナリフォーマットである。図 5 の問い合わせメッセージの場合は、例えば次ホップのノードあるいは、さらにその先のノードに対して、パケットアグリゲ

ーションに関してどのような能力を持っているかの問い合わせを行う際に用いる。これは、実際に転送を行うユーザデータとは独立に、定期的にあるいは、経路情報が更新された際などに行う。これにより、ノード A は常に周囲のノードがどのような情報をもっているかについての、最新情報を持つことができる。図 6 の通知メッセージについては、例えば新たなノードが追加された際に、そのノードが自分自身の能力を広告するために、周囲のノードに対して通知を行うために利用できる。あるいは例えば自身の負荷状況に応じて、アグリゲーション機能を提供できるか否かについて変化させるような場合にも、この通知メッセージで行うことができる。

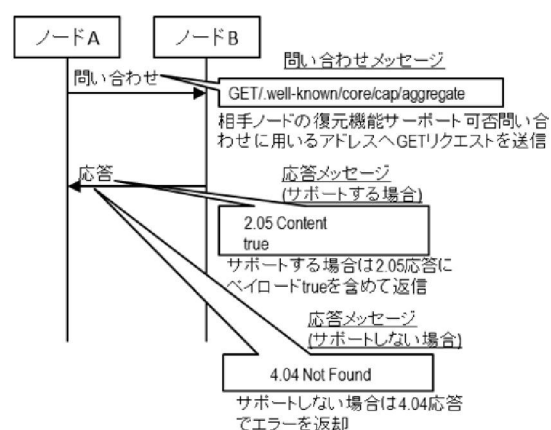


図 5: CoAP 問合せ・応答

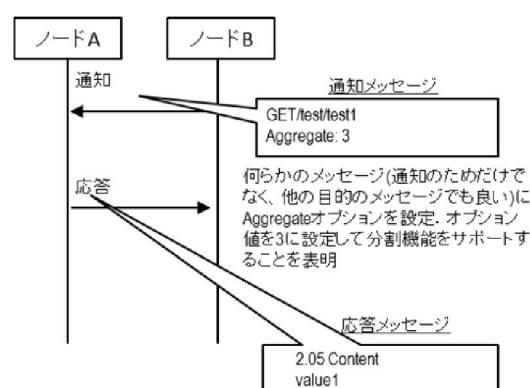


図 6: CoAP 通知

また、情報は、Out-of-Band で実現する全て独立の設定情報としても実現可能である

が、図 7 に、CoAP オプションとして Aggregate オプションを定義し、このオプションの値によってそれらを表現する場合を示す。この Aggregate オプションをあらかじめ統一的に定義しておくことにより、CoAP プロトコル自体を他のプロトコルに変換することなく、広域ネットワークでも利用しつつ、パケットの集約の可否なども合わせて、広域ネットワーク内のノードに In-Band メッセージあるいはデータ自身に piggy back させたメッセージとして通知することができるようになる。

Aggregateオプション				
オプション名	オプション番号	フォーマット	長さ(バイト)	デフォルト値
Aggregate	2	uint	1	0

Aggregateオプションのオプション値	
オプション値	意味
0	集約されたメッセージではなく単独のメッセージであるか、または集約されたメッセージの最後のメッセージであり、直後に他のメッセージが連結されていない
1	集約されたメッセージのうちの一つであり、直後に他のメッセージが連結されている
2	このメッセージは他のメッセージと集約してはならない
3	このメッセージを送信したノードが、メッセージの復元機能をサポートする

図 7: CoAP Aggregate オプションによるメッセージ集約、復元機能、集約禁止を表現する情報の記述

5 まとめと今後の課題についての議論

本論文では、パケット転送のアグリゲーション技術に着目し、広域 NW におけるアグリゲーションのための要求条件と、それを満たすアグリゲーションの一方式を示した。

本論文で提案した方式により、各ノードの能力、振る舞い、通信のパターン、経路、用途などが一様・決定論的でなく、多種多様なものが混在する大規模な広域ネットワークにおいても、データの集約により、特にネットワークのコア部分でのパケット処理の適切な軽量化を可能することができる。

このようなパケットの集約・復元を行うことは、アーキテクチャ的には、オーバーレイネットワークを構築していると言える。今後きわめて多数のデバイス等の M2M/IoT 機器がインターネットに接続され

ることが予測されるが、オーバーレイネットワークを構築することで、単なるルータのパケット処理負荷を下げるということだけではなく、論理的なネットワークがインターネットの上に定義され、デバイスが生成する情報の種類に応じたネットワークを構築することにつながる可能性がある。デバイスが生成する情報によって、遅延や廃棄に対する要求条件も異なるが、適切に集約を行うことで、異なる要件を満たす論理ネットワークを構築できる。さらにこのようにアグリゲーションのメカニズムの中に、センサ情報の意味を埋め込むことへ発展できると、情報の意味・価値によるネットワークキング[6]の具現化ができる可能性がある。

本稿では、IoT/M2M の通信でトランスポートレイヤに近い形で利用が想定される CoAP をベースにした拡張の実装を検討した。今後は、上述のアグリゲーションによる論理ネットワークの構築という観点もふまえた、本方式を適用するレイヤについての検討が課題である。

参考文献

- [1] R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, T. Berners-Lee, "Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1", RFC2616, IETF, June 1999.
- [2] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, "The Constrained Application Protocol (CoAP)," RFC7252, IETF, June 2014.
- [3] J. Hui (Editor), and P. Thubert, "Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks," RFC6282, IETF, September 2011.
- [4] IEEE Computer Society, "IEEE Std. 802.15, 4-2006," October 2006.
- [5] Esam Mlaih, and Salah A. Aly, "Secure Hop-by-Hop Aggregation of End-to-End Concealed Data in Wireless Sensor Network," Proc. 2nd IEEE MCN'08 workshop, Phoenix, AZ, 2008.
- [6] Van Jacobson, Diana K. Smetters, James D. Thornton, Michael F. Plass, Nicholas H. Briggs, and Rebecca L. Braynard, "Networking named content," Proc. of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies, 2009.