

# 論文

## 災害時における次世代携帯電話網の電話疎通率向上方式の検討

安藤 恵<sup>†</sup> 川原崎雅敏<sup>††</sup>

Congestion Control Method of the Next-Generation Cellular Phone System (LTE) to Improve Telephone Service Throughput at the Time of Disaster

Megumi ANDO<sup>†</sup> and Masatoshi KAWARASAKI<sup>††</sup>

あらまし 災害発生時には電話はライフラインとなるものであるが、発着信規制によってほとんど使えなくなるのが現状である。災害用伝言板や災害用伝言ダイヤルといった蓄積型サービスも提供されているが、電話、特に携帯電話のニーズは大きいと想定される。本論文では、第 3.9 世代携帯電話システム (LTE) を対象に、大規模災害に伴う着信過負荷時にも電話の疎通率を維持する過負荷制御方式の提案と評価を行う。LTE では、電話トラヒックは IP 化され、呼制御は SIP サーバで行われる。また、無線帯域も大容量化される。シミュレーションにより LTE の過負荷特性とふくそうメカニズムを解明し、その結果に基づいて提案する制御方式により、システムの性能低下要因となる無効処理が軽減され、過負荷時にも高スループットを維持できることを示す。

キーワード 災害時ふくそう、第 3.9 世代携帯電話システム、ネットワークコントロール

### 1. ま え が き

現在、地震や台風など大規模災害が発生すると被災地に電話トラヒックが集中し、つながりにくい状態になる。これは電話が回線交換方式をとっているため、回線容量を超える呼が大量に呼損となるとともに、通信事業者がネットワークのふくそうを回避するために発着信規制を発動するためである。

これに対し第 3.9 世代携帯電話システム (LTE: long term evolution) では、無線帯域が大容量化するとともに、電話トラヒックは IP 化され、メールや Web 閲覧等のインターネット接続トラヒックと同様にパケット交換方式で処理されるために帯域の利用効率が向上する。

一方、LTE システムでは、電話をはじめとする回線交換サービス (CS サービス) の呼制御は IMS における SIP サーバで行われる。このため、無線帯域が拡大してリンク容量が増大すると相対的にノードネットワークになる可能性があり、極端な集中過負荷に対しても

ノードとリンクの負荷バランスを適切に制御する必要がある。

本論文では、LTE を対象としたシミュレーションにより、災害時に想定される集中過負荷に対するシステムの振舞いを解明し、適切なネットワークコントロールを行うことで電話の疎通率を向上させる方式の提案と評価を行う。その結果、提案方式により、システムの性能低下要因となる無効処理が軽減され、過負荷時にも高いスループットを維持できることを示す。

大規模災害時には、被災地からの発呼が増えるとともに、全国から被災地に向かう見舞い呼・問合せ呼が大量に発生する。2007 年に起きた新潟県中越沖地震では被災地からの携帯電話の発呼は通常時の約 42 倍に [1]、2004 年に起きた新潟県中越地震では携帯電話における新潟県内への着呼が通常時の 45 倍に達したとの報告がある [2]。

災害時に電話の代替手段として提供されているのが災害用掲示板や災害用伝言ダイヤルである。前者はインターネットの掲示板のようにメッセージを書き込むもので、後者は留守番電話のように音声を録音し、サーバに保持しておくものである。これらは 2003 年ごろから提供され認知度は徐々に広まりつつあるが、被災者が連絡をとるときに最も重視するのは「短い通話 (30 秒程度) でもかまわないので、すぐに相手にじ

<sup>†</sup> 筑波大学図書館情報専門学群、つくば市

School of Library and Information Science, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8550 Japan

<sup>††</sup> 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科、つくば市

Graduate School of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8550 Japan

かにつながる」とであるとの調査結果がある [3]。災害用伝言ダイヤルや災害用掲示板では「すぐに相手にじかにつながる」というニーズと合致しておらず、ふくそう発生に対する根本的な対策となっていないと考えられる。

災害時ふくそうの軽減を目的とした研究としては、通話時間に制限を設ける提案 [4] や発呼を制限する提案 [5] 等がある。前者は 1 回の通話を一定時間で強制的に切断することでより多くの呼の接続を目指すものである。後者は災害時に家族など「特定の相手」と通話できるまで「何度も再呼」を繰り返すというユーザー特性に基づく呼特性に着目し、再呼を制限することで接続できる呼を増やす制御方式を提示している。しかしこれらはユーザー側に対策を求めるものであり、システム側で方式を改善するものではない。

システム側での方式改善を目指したものとしては、NTT ドコモによる音声通信とパケット通信をシステム上で分離して規制を行う回・パ分離規制が挙げられる [1]。一方、NGN の IP 電話における対地別出接続規制（コードブロッキング）に関しては、0AB-J 番号による規制を行う場合に、番号ポータビリティの影響でふくそう対地以外の呼を規制してしまうことを防ぐための番号翻訳機能を有した規制の仕組みも研究されている [6]。一方、携帯電話機に再呼を制限する仕組みを組み込むことが省令で義務づけられている [7]。しかし、これらは本論文のように過負荷制御方式そのものを検討したものではない。

本論文は以下のように構成する。2. で LTE システムの方式構成と着信過負荷のネットワークモデル、3. でシミュレーション条件を述べ、4. で無制御時の過負荷特性とふくそうメカニズムの解明を行う。5. では過負荷制御方式の提案と評価を行い、6. でまとめと課題を述べる。

## 2. LTE システムの方式構成

本章では、LTE システムの構成と処理方式、着信過負荷のネットワークモデルについて述べる [8], [9]。

### 2.1 LTE と IMS の方式構成

本論文で対象としたのは第 3.9 世代携帯電話システム (LTE) と IMS (IP multimedia subsystem) である。システム構成を図 1 に示す。

LTE は、既存の 3G アクセス網と LTE アクセス網を S-GW (serving-gateway) を介して収容する。NodeB や eNB は無線基地局であり、3G アクセス網

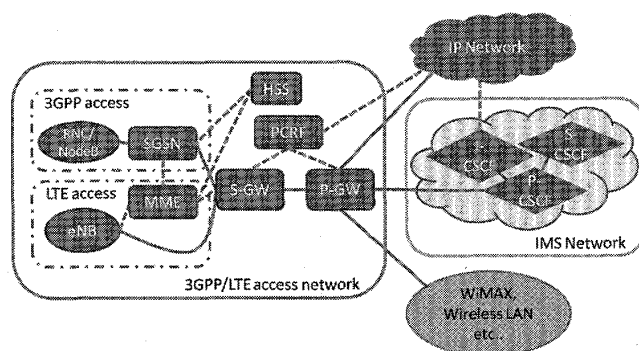


図 1 3G/LTE アクセスのシステム構成  
Fig. 1 3G/LTE Access system.

では RNC (radio network controller) が、LTE アクセス網では MME (mobility management entity) が無線回線の設定制御を行う。P-GW (PDN-gateway) は、i モードや IMS といったコア・ネットワーク外のパケットネットワーク (PDN: packet data network) との接続点となる。PCRF (policy and charging rules function) は、P-GW, S-GW において適用する品質制御や課金制御ルールを決定するポリシー制御装置であり、P-GW 及び S-GW は、PCRF からの通知情報に基づきパケット単位に QoS 制御を実施する。

IMS は LTE において呼制御を行う部分で、LTE に対してオーバレイ網となる。IMS 網への接続は、携帯端末 (UE) から P-GW に至る論理的な通信路 (PDN コネクション) を介して行われる。PDN コネクションは、携帯端末の電源を ON にしたときに設定され、電源を OFF にしたときに解放される。PDN コネクション自体は帯域をもたず、送信すべきパケットが発生したときにのみ帯域をアサインされる。

IMS 網における CSCF (Call Session Control Function) は交換機に相当する SIP サーバであり、携帯端末が発呼した場合は、SIP の INVITE メッセージが PDN コネクションを介して CSCF に伝えられる。CSCF を介して相手端末まで呼接続が完了すると、パケット化された音声トラヒックが PDN コネクションを介して伝送される。この際、3G/LTE アクセス網では無線帯域が割り当てられるが、これは PCRF から通知されるポリシーに基づいた受付制御 (CAC: connection admission control) によって行われる。

### 2.2 ネットワークモデル

#### 2.2.1 災害時ふくそうに対する既存過負荷制御方式

既存電話網 (固定電話、携帯電話) では、災害時に

発生する過負荷によって交換機や回線がふくそうするのを回避するために発着信規制を行っている。被災地からの発信に対しては発側交換機で発信規制を、被災地への着信に対しては、着側中継交換機での着信規制や、全国が発側交換機でふくそう対地へ向かう呼を規制する対地別出接続規制が実施される。これらの規制制御は、交換機での呼の到着率や CPU 使用率をふくそう指標とし、それらがしきい値を超えると発動される仕組みになっている。次世代通信網である NGN や LTE におけるふくそう制御方式は明確になっていないが、災害時の集中過負荷に対して既存網と同様の仕組みが必要であろう。

### 2.2.2 LTE ネットワークモデル

大規模災害発生時には、被災地からの発信よりは、見舞い呼・問合せ呼が殺到する被災地への着信の方が問題になると考えられる。そこで、本論文では被災地への着信過負荷を検討対象とする。

着信過負荷時のネットワークモデルを図 2 に示す。着信過負荷時には、交換機に相当する CSCF (SIP サーバ) や、基地局 (NodeB/eNB) と携帯端末 (UE) 間の無線帯域がふくそうすると考えられる。前者がノードネック、後者がリンクネックであり、どちらが先行するかは設備量と負荷の関係で決まり、ふくそう状態を適切にとらえて過負荷制御を行う必要がある。

### 2.3 接続処理シーケンス

図 3 に 3G アクセスの場合の着信処理シーケンスの一部を示す。

CSCF に前位 CSCF から INVITE メッセージが到着すると、S-GW に転送され、UE に向けてページングが行われる。応答した UE に INVITE メッセージが送られる (図 3 の最上段の INVITE がこれに相当する)。その後、UE と CSCF の間でコーデックのネゴシエーションが行われ、所要帯域が識別される。図 3 の網掛け部分が CAC で、所要帯域に見合う空き容量の有無を調べ、呼要求の受付可否を決める。空き帯域があれば無線ベアラ (RB) が設定され、空き帯域がなければ呼損として CSCF で話中処理が行われる。

無線帯域の割当てが完了し、CAC 制御によるサービス許可が下りた時点で SIP メッセージのやり取りを再開し、発信者/受信者が SIP メッセージの Ack を受信した時点で音声・映像・インターネット接続の各パケットを送受信し始める。保留時間後に SIP メッセージの BYE を送信し、応答を受け取ったところで無線リソースの解放を要求し、接続を終了する。

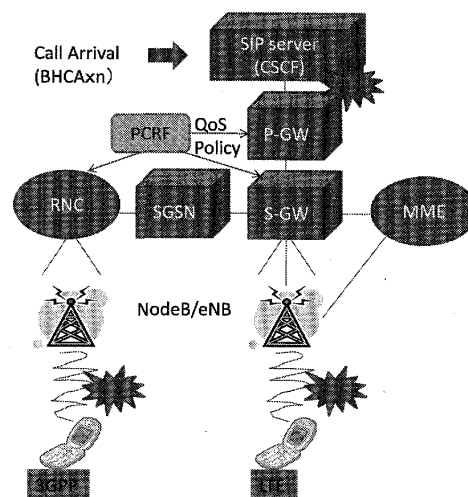
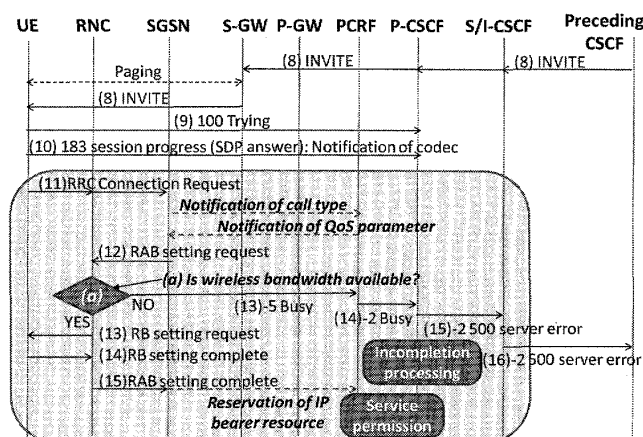


図 2 ネットワークモデル  
Fig. 2 Network model.



\*In all messages, time-out time for acknowledgement is 180 seconds

図 3 無線帯域捕そくにかかわる処理シーケンス  
Fig. 3 Protocol sequence of radio bandwidth acquisition.

## 3. シミュレーション条件

図 2 に示したネットワークモデルを対象に、災害時を想定した着信過負荷のシミュレーションを行う。電話、映像、インターネット接続トラフィックを模擬する。

### 3.1 呼レベルの発生過程

電話呼及び映像呼 (テレビ電話呼) は、平均生起率  $\lambda_1$  及び  $\lambda_2$  でポアソン生起し、保留時間は平均 180 秒の指数分布に従うと仮定する。所要帯域は、電話 12.2 kbit/s, 映像 64 kbit/s とする。インターネット接続は、メール通信や Web 閲覧といった接続要求に基づいて発生するので、1 セッションを 1 呼とみなし、セッションの平均生起率を  $\lambda_3$  とする。また、インターネット接続要求は、多数のインターネットユーザから

ランダムに生起すると考えられるので、電話呼と同様、その生起過程はポアソンと仮定する。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  の比率は、呼量が均等になるように 36:4:60 としている。

また、過負荷時には電話呼・映像呼・インターネット接続呼の生起率  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  を増大させることとし、過負荷期間中はそれぞれが設計負荷に対して、

過負荷タイプ 1: ( $n$  倍, 不変, 不変)

過負荷タイプ 2: ( $n$  倍, 2 倍, 不変)

過負荷タイプ 3: ( $n$  倍, 不変, 2 倍)

の 3 通りを模擬することとする。

電話呼だけを  $n$  倍するのは、電話呼の増加に伴うメッセージ量（及びパケット量）の変化が LTE システムの過負荷特性に及ぼす影響だけを切り出して分析することに重点を置くためである。

### 3.2 パケットレベルの発生過程

インターネット接続トラヒックは、Busy/Idle 状態を平均 0.5 秒の指数分布時間で繰り返し、パケットは Busy 状態のときに平均生起率  $\lambda_4$  でポアソン生起するものとする。Busy 区間がセッションの持続期間となる。

LTE では電話・映像トラヒックもパケット化されるが、品質を保証するために固定長パケットが一定周期で発生する擬似回線交換 (circuit emulation) 方式をとっている。帯域は固定的に占有されるため、電話・映像トラヒックはパケットレベルの模擬を行わない。

### 3.3 接続処理の模擬

接続処理はアクセス網と IMS 網の 2 階層で行われる。IMS 網部分では、SIP プロトコルによる端末-CSCF 間の接続制御を模擬する。信号シーケンスの一部は図 3 に示したとおりである。アクセス網部分では、端末-基地局間における無線帯域の捕そくを模擬する。一連の呼設定処理が終わった時点で通話開始とし、通話が終了した時点で切断処理を行う。なお、位置制御・課金制御は模擬せず、S-GW, P-GW, MME 等のノードはネックフリーとした。

### 3.4 QoS 制御の模擬

無線帯域の設備量は、設計負荷における電話呼・映像呼・インターネット接続呼の呼損率が 1% 以下となるように設計する。電話呼及び映像呼は、無線帯域捕そく時に CAC を行い、所要帯域分の空きがなければ呼損とする。インターネット接続呼はベストエフォート扱いとし、電話呼及び映像呼が優先的に占有した無線帯域の残り帯域を利用することとする。

インターネット接続呼に呼損はないが、CAC によ

り「呼損」の概念を導入することは可能である。呼損率規格については、電話のような国際標準はなく、事業者が決めることであるが、今回のシミュレーションで無線帯域の設備量を決めるにあたり、インターネット接続呼の呼損率も電話呼と同様に設計負荷時 1% 以下とした。

これらの条件のもとで、インターネット接続呼のパケット待ち行列を模擬している。

### 3.5 過負荷制御、規制の模擬

現在、LTE システムで検討されている過負荷制御方式は以下のようなものである。

(1) SIP サーバ (CSCF) の CPU 使用率がしきい値を超えると、新たに到着する呼を規制する。

(2) 同時に、着端末へのページング信号を破棄する。

本論文で提案・評価する過負荷制御方式の詳細は 5.2 で述べるが、シミュレーションではふくそう指標として以下を用いる。

① CPU 使用率

② CAC 呼損率

① は交換機に相当する CSCF での過負荷制御に用い、しきい値を超えると着信ふくそうと判断して出接続規制を発動する。シミュレーション上は、出接続規制中に発生する呼は直ちに消滅させることで模擬している。① がしきい値以下に回復すると規制を解除する。

② は無線帯域の過負荷制御に用い、しきい値を超えた場合はページング信号を破棄若しくは出接続規制を行う。

### 3.6 その他の条件

シミュレーションの前実験により、以下の条件を設定した。

- シミュレーション時間は 0~3600 秒とした。時刻 0 で設計負荷を印加し、システムが定常状態になった後、時刻  $X_1$  で電話呼負荷を  $n$  倍にしてシステムを過負荷状態にする。その後、時刻  $X_2$  で負荷を設計負荷に戻す。前実験により、 $X_1 = 800$  秒、 $X_2 = 1800$  秒とした。
- CPU 負荷については、設計負荷時の CPU 使用率が 60% 程度となるように、1 呼当りの CPU 負荷を設定した。なお、完了呼と不完了呼の、1 呼当りの CPU 負荷比率は 2 対 1 とし、相手話中率は一律 10% とした。
- 位置管理、課金管理は模擬せず、上記 CPU 負荷

に固定的に含めることとした。

### 3.7 シミュレーション環境

シミュレータは C++ により自作した。規模は 3556 ステップ、実行時間は無制御時に 180 分程度である。また、シミュレーション環境は以下のとおりである。

- OS: Windows XP professional Version 2002 Service Pack3
- ソフトウェア: Microsoft Visual Studio 2008 Professional Edition
- メモリ: AMD Athlon(tm) 64 X2 Dual Core Processor 4200+ 2.20 GHz 1.87 GB RAM

## 4. LTE の過負荷特性とふくそうメカニズム

本章では、シミュレーション結果から、無制御時の LTE 過負荷特性を分析し、ふくそうメカニズムを明らかにする。

### 4.1 無制御時の過負荷特性

#### 4.1.1 スループット及び電話疎通率特性

過負荷制御を行わない場合における、過負荷タイプ 1 (過負荷時は電話呼のみ  $n$  倍) に対するスループット特性と電話疎通率 (完了率) 特性を図 4 に示す。横軸は電話呼負荷を設計負荷の  $n$  倍にする場合の  $n$  を、縦軸は電話呼のスループット (単位時間当りの完了呼数) と疎通率を表す。

電話呼負荷を上げていくと電話スループットは負荷に比例して増大していくが、やがて飽和し、更に高負荷になると逆に低下するようになる。電話疎通率も同様に低下する。両者とも  $n = 2.0$  が最大で、 $n = 4.0$  では低下している。 $n = 6.0$  になると疎通率は更に低下して 40% 以下になるが、スループットは 75% 程度に下げ止まっている。

図 5 は過負荷タイプ 2 (過負荷時は電話呼  $n$  倍、映像呼 2 倍) でのスループット・疎通率特性を示す。電話呼のみを  $n$  倍にした図 4 に比し、映像呼が増えたことでスループットと疎通率が更に低下することが分かる。

過負荷タイプ 3 (過負荷時は電話呼  $n$  倍、インターネット接続呼 2 倍) では、スループット・疎通率特性は過負荷タイプ 1 とほぼ同形となった。

このように、制御を行わないと、過負荷時における電話スループットが設計負荷時より低下する性能低下現象が現れる。性能低下の原因やメカニズムは 4.2 で解明する。

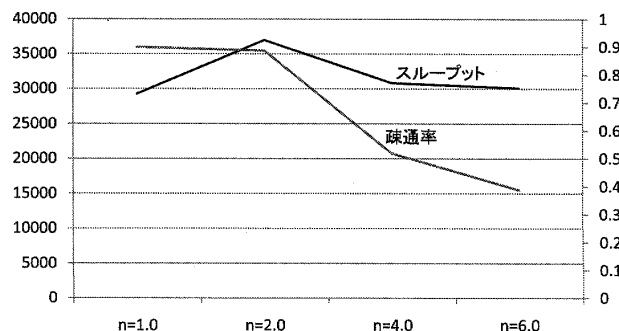


図 4 電話スループット、疎通率特性 (過負荷タイプ 1)

Fig. 4 Telephone throughput and success rate. (Overload Type 1)

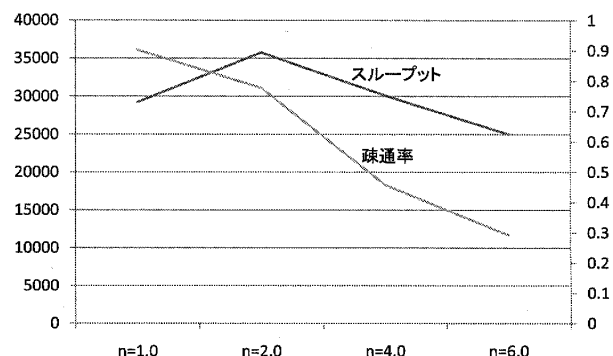


図 5 電話スループット、疎通率特性 (過負荷タイプ 2)

Fig. 5 Telephone throughput and success rate. (Overload Type 2)

#### 4.1.2 ノードの過負荷特性

IMS システムにおける SIP サーバ (CSCF) の過負荷特性を以下に示す。本項では過負荷タイプ 1 の場合を示すが、過負荷タイプ 2 もほぼ同形の特性となった。過負荷タイプ 3 については、インターネット接続呼はベストエフォート扱いのため、IMS の指標には影響を及ぼさず、過負荷タイプ 1 と同じ特性になる。

##### (1) CPU 使用率

図 6 は CSCF における CPU 使用率の時間変動を、シミュレーションの進行時刻を横軸にとって示したものである。CPU 使用率は 60 秒ごとに測定し、5 回の移動平均をとっている。

$n = 2.0$  以上では、過負荷をかけた 800 秒時点から CPU 使用率は急激に増大して 100% に達する。1800 秒時点で負荷を設計値に戻すと、 $n = 2.0$ ,  $n = 4.0$  の場合は CPU 使用率が設計レベルまで回復するが、回復に要する時間は  $n$  が大きいほど長くなり、 $n = 6.0$  ではシミュレーション時間中に回復することはなかった。

図 4 を見ると、 $n$  が 2.0 以上では電話の疎通率が著しく低下 (不完了呼の比率が著しく増大) している。これは CPU が不完了呼の処理に使われ、完了呼処理

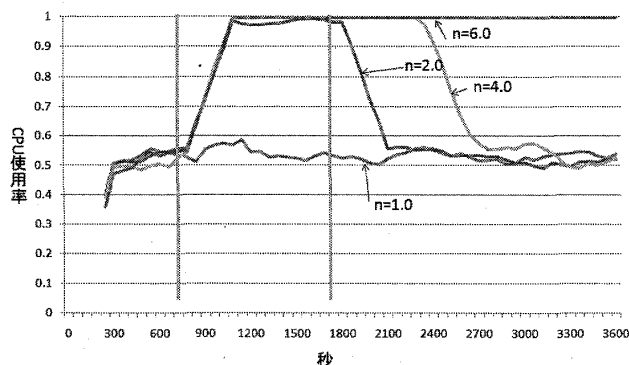


図 6 CPU 使用率の過渡特性

Fig. 6 Transit characteristics of CPU utilization.

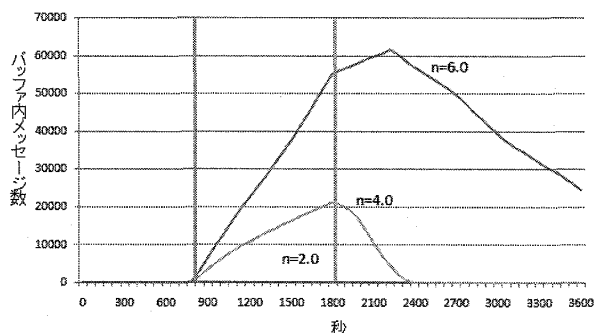


図 7 CPU バッファ内メッセージ数の変動

Fig. 7 Variation in the number of messages in CPU buffer.

を圧迫していることを意味する。このため、過負荷期間中は CPU 使用率がほぼ 100% であるにもかかわらず、スループットが低下する。

一方、負荷が設計負荷に戻っても CPU 使用率がなかなか低下しないのは、過負荷期間中に CPU バッファで待合せに入ったメッセージを順次処理しているためである。過負荷が大きいほど待合せメッセージ数が増えるので CPU 使用率が 100% の状態が継続している。

## (2) CPU バッファ特性

図 7 に CPU バッファ内のメッセージ数の変動を示す。過負荷になった 800 秒時点から CPU バッファで待ち合わせるメッセージ数は急激に増加していく。 $n = 6.0$  において 1800 秒以降も CPU バッファ使用率が緩やかに上昇しているのは、負荷があまりに大きいため、設計負荷に戻った後に発生した呼が正常に受け付けられるまでにタイムラグが生じているためと考えられる。これは CPU 使用率と同様の傾向である。

## (3) 同時接続数

図 8 に CSCF における同時接続数の時間変動を示す。過負荷をかけた時点から同時接続数が上昇し、負

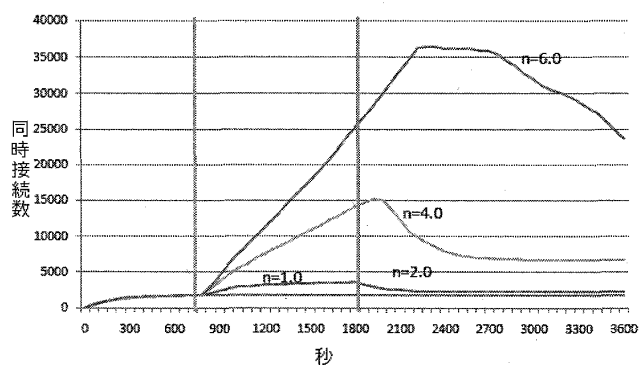


図 8 同時接続数の変動

Fig. 8 Variation in the number of simultaneous connections.

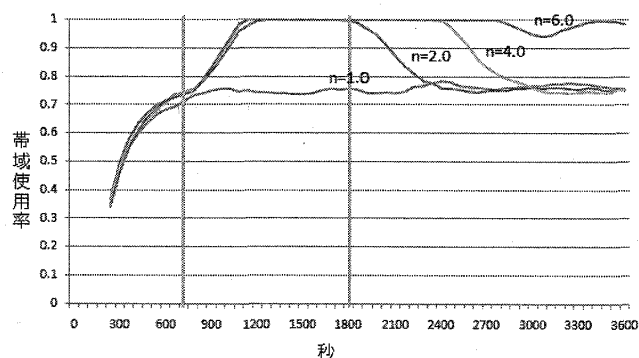


図 9 無線帯域使用率の変動

Fig. 9 Variation of radio bandwidth utilization.

荷が大きいほど減少に転ずる時間が長い。これも過負荷期間中に CPU バッファにたまった呼を処理するのに時間がかかっているためである。一方、図 4 の疎通率特性から、同時接続数のうち、 $n = 4.0$  では 50%、 $n = 6.0$  では 70% が不完了呼であると推定される。これは同時接続数の多くが不完了呼であることを意味する。

### 4.1.3 リンクの過負荷特性

リンクの過負荷特性として、無線帯域の利用特性を以下に示す。

#### (1) 無線帯域使用率

図 9 は過負荷タイプ 1 に対する無線帯域使用率の変動を示す。 $n = 1.0$  以外は過負荷時にすべて使用率 100% に達していることが分かる。過負荷が大きいほど、帯域使用率が 100% となっている時間が長い。帯域使用率が低下し始めるのは、 $n = 2.0$  では設計負荷に戻った直後の 1800 秒から、 $n = 4.0$  では 2400 秒あたりからである。 $n = 6.0$  では 3000 秒あたりでいったん低下するが再び上昇している。これは SIP サーバでの CPU 使用率の特性に一致している。

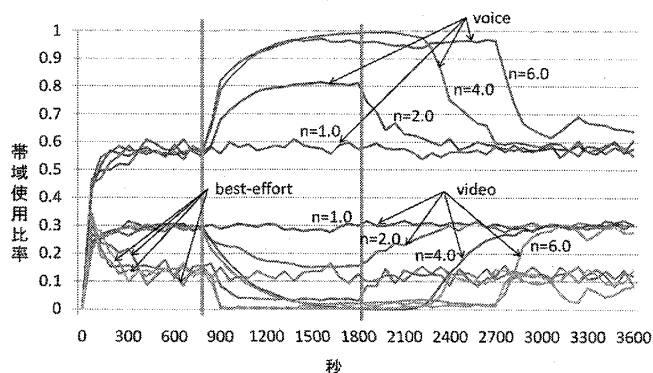


図 10 無線帯域使用比率の変動 (過負荷タイプ 1)  
Fig. 10 Variation in radio bandwidth utilization ratio. (Overload Type 1)

この現象は以下のように解釈できる。負荷レベルが  $n = 2.0$  まではスループットや疎通率 (完了率) は低下せず、呼の到着と終了は平衡状態を保っている。このため、帯域の捕そく・解放も速度が均衡しており、負荷が下がると直ちに帯域使用率は低下し始める。 $n = 4.0$  になると SIP サーバの CPU がふくそうして終了処理に遅延が生じ、帯域解放が遅れるため、帯域利用率がなかなか回復しない。 $n = 6.0$  になると CPU ふくそうが更に進み、呼の終了速度が到着速度に追いつかなくなる。このため帯域の解放が進まず、シミュレーション期間中の帯域利用率はほぼ 100% のままになっている。

## (2) 呼種別の無線帯域使用比率

図 10 は過負荷タイプ 1 に対する無線帯域使用比率を示す。 $n = 1.0$  では電話・映像・インターネット接続の各種別が一定の使用比率を示している。対して、 $n$  が 2.0 以上では電話の帯域使用比率が大幅に上昇しており、ベストエフォート型の帯域を圧迫していることが分かる。

映像呼の帯域使用比率が低いのは、映像呼は生起率が低く所要帯域が大きいいため、過負荷期間中に到着した映像呼は、既に到着した電話呼が帯域を占有してしまっているために呼損となる確率が高いためである。

図 11 は過負荷タイプ 2 に対する無線帯域使用比率である。映像呼を増やしたため、帯域使用比率における映像呼の比率が上がり、その分だけ電話呼が圧迫されて使用比率が下がっている。

過負荷タイプ 3 では、インターネット接続トラヒックは電話呼・映像呼トラヒックに対して非優先であるため、帯域使用比率特性は過負荷タイプ 1 とほぼ同形となった。

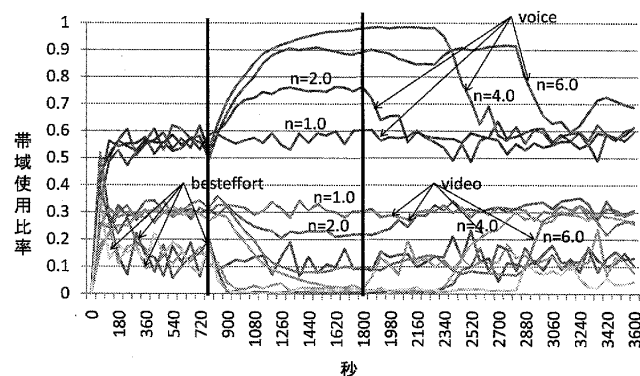


図 11 無線帯域使用比率の変動 (過負荷タイプ 2)  
Fig. 11 Variation in radio bandwidth utilization ratio. (Overload Type 2)

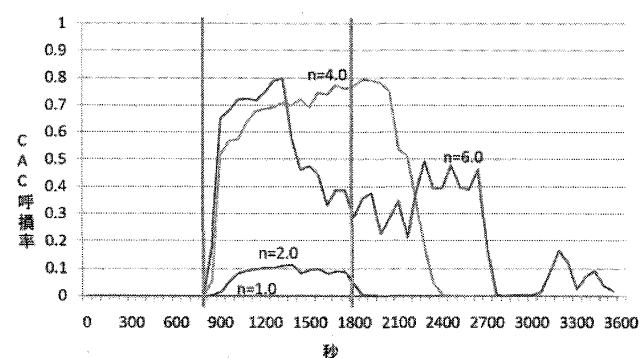


図 12 CAC 呼損率の過渡特性 (過負荷タイプ 1)  
Fig. 12 Transit characteristics of CAC loss probability. (Overload Type 1)

LTE システムでは、電話や映像等のリアルタイム型トラヒックをベストエフォート型トラヒックに優先させているが、災害時には電話呼だけでなく、メール・災害時掲示板の利用等によりベストエフォート型のサービス利用も増加すると考えられるため、リアルタイム型トラヒックにも一定の制限が必要であろう。

## (3) CAC 呼損率

図 12 は過負荷タイプ 1 に対して、シミュレーション時間の進行を横軸に、無線帯域の CAC 呼損率の推移を示したものである。 $n = 4.0$  では、過負荷をかけた 800 秒時点から呼損率は急激に上昇し、過負荷期間中は高い状態が続く。1800 秒時点で設計負荷に戻すと、呼損率はやや遅れて低下し、2400 秒あたりで零に戻る。この特性は、帯域使用率や CPU 使用率と同様である。一方、 $n = 6.0$  では、呼損率はいったん急激に上昇するが、過負荷期間中に減少していく。これは帯域使用率や CPU 使用率には見られなかった現象であるが、負荷があまりにも大きいため SIP サーバの CPU がほとんど不完了処理に消費され、完了呼自体が減って帯域が空いてくることが原因であると考え

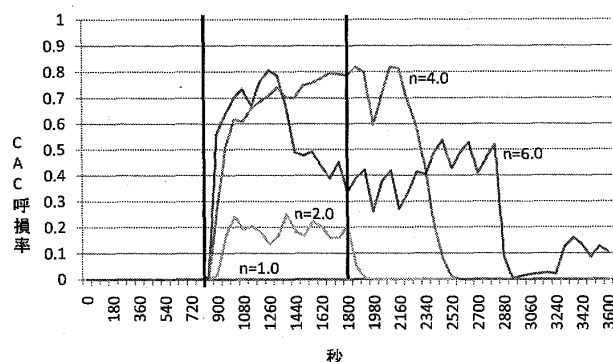


図 13 CAC 呼損率の過渡特性 (過負荷タイプ 2)

Fig. 13 Transit characteristics of CAC loss probability. (Overload Type 2)

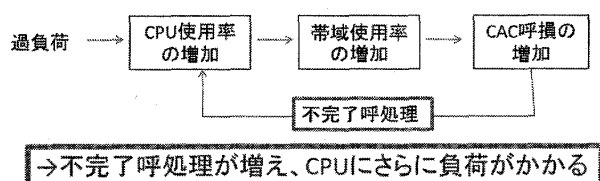


図 14 ノードふくそうのメカニズム

Fig. 14 Node congestion mechanism.

られる。2200 秒あたりから呼損率が再び上昇しているが、これは系が不安定になっているために生ずる現象であると考えられる。

過負荷タイプ 2 に対する CAC 呼損率を図 13 に示す。過負荷タイプ 1 の場合に比し、呼損状態から回復するのに要する時間が長くなっている。これは映像呼が増えているため、映像呼の保留時間中は大量の CAC 呼損状態から回復できないためである。

過負荷タイプ 3 については、インターネット接続呼には CAC を行わないので、CAC 呼損率は過負荷タイプ 1 と同形になる。

## 4.2 ふくそうのメカニズム

前節で述べた過負荷特性から、無制御時のシステムふくそうは以下のようなメカニズムで起きると考えられる。

### 4.2.1 SIP サーバのふくそうメカニズム

電話呼・映像呼に過負荷をかけると SIP サーバの CPU 使用率が增大するとともに、無線区間での帯域使用率が增大して呼損が増え、呼損に伴う不完了処理が過負荷状態にある SIP サーバに更に負荷をかける。その結果、SIP サーバがふくそうし、スループットが低下する性能低下現象が生じ、疎通率は著しく低くなる。このメカニズムを図 14 に示す。

性能低下が始まるのは、不完了呼の増加によって SIP サーバにおける呼の到着率と終了率の均衡がくず

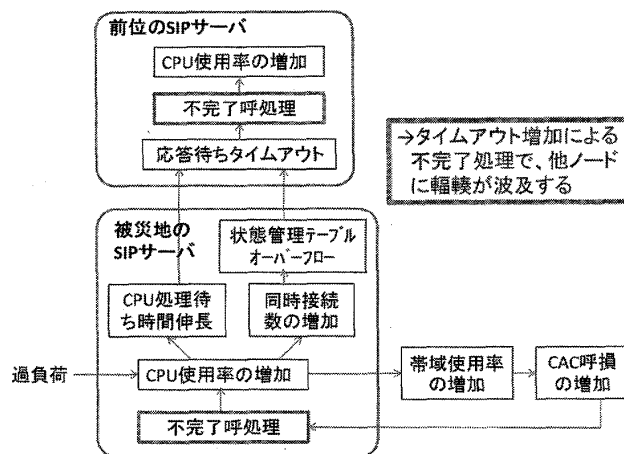


図 15 他ノードへのふくそう波及のメカニズム

Fig. 15 Congestion propagation mechanism.

れ始めるときである。SIP サーバ内に不完了呼を含む処理待ち呼が滞留し、SIP サーバは CPU ふくそう状態に陥る。

### 4.2.2 ふくそうの伝搬メカニズム

着信過負荷により SIP サーバがふくそうすると、図 7、図 8 のように CPU バッファでの待合せメッセージ数や同時接続数が急増する。その結果、以下のように前位の SIP サーバにふくそうが伝搬する。

SIP プロトコルでは、後位ノードにメッセージを送出すると応答待ちタイマをセットし、180 秒経過しても応答がないと不完了処理を行う。被災地の SIP サーバがふくそうして CPU 処理待ち時間が伸長すると、前位の SIP サーバで応答待ちタイムアウトが発生し、不完了処理が行われる。不完了処理負荷が急増すると、前位の SIP サーバもふくそうしてしまう。

同時接続数の増加もふくそう伝搬の要因となる。SIP サーバは呼の状態管理を行っており、そのための管理テーブルをもっている。通常この管理テーブルの容量は十分大きいですが、同時接続数が急増すると、管理すべき呼数も急増してテーブル容量を超える可能性がある。管理テーブルが満杯になると、到着する SIP メッセージはオーバフローして消滅するため、前位の SIP サーバにその応答が返らなくなり、応答待ちタイムアウトが発生して不完了処理が行われる。その頻度が増えると前位の SIP サーバもふくそうする。

前位の SIP サーバのふくそうは、同様のメカニズムで更に前々位の SIP サーバに伝搬していく。この一連のふくそう伝搬により、IMS システム全体にふくそうが波及し、システム崩壊につながる可能性がある。

このようなふくそう波及のメカニズムを図 15 に

示す。

## 5. 過負荷制御方式とその評価

### 5.1 過負荷制御方式への要件

無制御時の過負荷特性の分析から得られた過負荷制御への要件は、不完了呼を発生させないことである。図 11, 図 12 のふくそうメカニズムで、ふくそうが進展・波及するルートを断ち切るためには CPU 使用率と CAC 呼損率を抑える必要がある。

そこで、これらを指標とした過負荷制御方式を考える。過負荷状態を敏感にとらえ、ふくそうに至る前に入力を適切に規制する必要がある。入力規制は、網の入口で規制する対地別出接続規制とする。これは、着側 SIP サーバで入力規制すると、それまでの接続処理が無効になり、性能低下を招くおそれがあるためである。

### 5.2 過負荷制御方式とアルゴリズム

これらの要件に対応する過負荷制御方式として、以下の 3 方式を検討する。

[方式 1] CPU 使用率を用いた制御

SIP サーバの CPU 使用率がしきい値 (95%, 90%, 80%) を超えると 75% の出接続規制を行う。

[方式 2] CAC 呼損率を用いた制御

無線帯域における CAC 呼損率がしきい値 (10%, 30%, 50%) を超えると、

方式 2A: 75% の出接続規制を行う。

方式 2B: ページング信号を破棄する。

[方式 3] CPU 使用率と CAC 呼損率を併用した制御  
方式 1 と方式 2A を同時に適用する。

### 5.3 各制御方式の特性

#### 5.3.1 スループット特性

図 16 に各アルゴリズムを用いた場合の過負荷タイプ 1 に対するスループット特性を示す。グラフから、スループットは方式 3 が最も高く、方式 2, 方式 1 と続くことが分かった。

制御効果はアルゴリズムにおけるしきい値の設定に大きく依存する。今回のシミュレーションでは、CPU 使用率 95%, CAC 呼損率 30% の組合せにすると、スループットが最も高く、負荷を上げてスループットが低下しない理想的な特性になった。

CAC 呼損率だけで制御する方式 2A は、性能低下現象が現れた。これは規制が発動される前に CPU がふくそうしてしまい、規制遅れになっているためである。

CPU 使用率だけで制御する方式 1 は、過負荷レベ

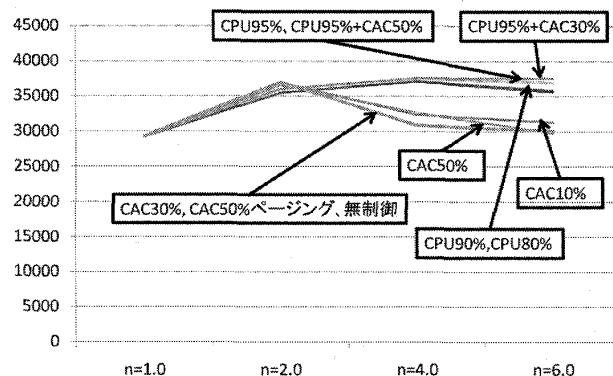


図 16 スループットの比較 (過負荷タイプ 1)

Fig. 16 Throughput comparison. (Overload Type 1)

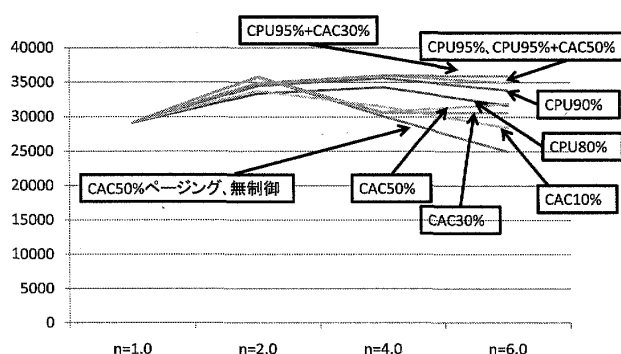


図 17 スループットの比較 (過負荷タイプ 2)

Fig. 17 Throughput comparison. (Overload Type 2)

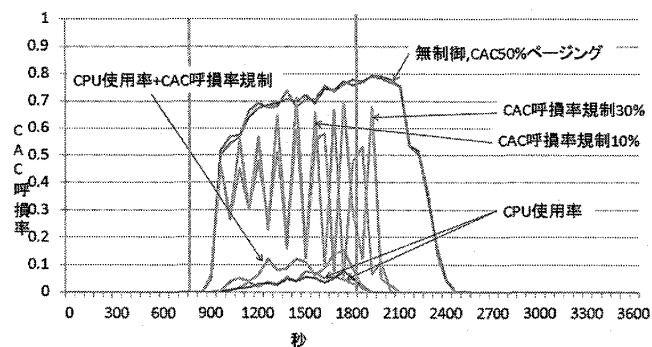
ルが高い領域でスループットが少し低くなっているが、これは過規制になっているものと考えられる。

なお、図 16 では  $n = 6.0$  までの過負荷制御特性を示しているが、 $n = 6.0$  が限界ではなく、規制率を上げればより高い負荷でも高スループットを維持できる。本シミュレーションでは規制率を 75% としたが、例えば 95% 規制を行えば設計負荷の 24 倍 ( $n = 24$ ) の過負荷時に加わる負荷は 1.2 倍となるため、システムに 20% の過負荷耐力があるすれば、 $n = 24$  まで耐えられることになる。このような極度の過負荷状態では、ふくそうをいち早く検出して規制発動することがより重要になる。また、ふくそうの度合に応じて規制率を段階的に強化・緩和する制御が必要になる。

図 17 に過負荷タイプ 2 に対する制御時のスループット特性を示す。電話呼・映像呼の比率を変えても提案方式により性能低下を抑止し、スループットを高く維持できている。過負荷が大きい場合は、帯域を多く消費する映像呼に対して、より規制を強化するなどの方策が必要になると考えられる。

#### 5.3.2 帯域利用特性

図 18 は、過負荷タイプ 1 の場合、無制御時には性

図 18 CAC 呼損率の変動 ( $n = 4.0$ )Fig. 18 Variation in CAC loss probability. ( $n = 4.0$ )

能低下を起こす  $n = 4.0$  の過負荷に対して、各制御方式における CAC 呼損率の変動を表したものである。

無制御時と方式 2B はほとんど変わらない。これはページング破棄を行うだけでは SIP サーバにおけるタイムアウト処理が増えるだけで CAC 要求自体を抑えられていないことが原因である。

一方、方式 2A は、無制御や方式 2B より CAC 呼損率が抑えられているものの、方式 1 ほどではない。これは、帯域ふくそうよりもサーバふくそうが先行し、CPU バッファで待合せとなった呼が処理されて CAC を行っているため、サーバふくそうの規制遅れが原因であると考えられる。

方式 3 では、無制御時に比べ 1/8 程度に CAC 呼損率が抑えられている。CPU 使用率で規制された呼は CAC を行わないため、帯域負荷が大きく軽減された結果である。

### 5.3.3 同時接続数特性

図 19 は過負荷タイプ 1 で、同じく  $n = 4.0$  における SIP サーバの同時接続数の変動を、各制御方式について示したものである。方式 2A は SIP サーバのふくそうを制御できず、むしろ制御遅れにより無制御時よりも同時接続数が多くなっている。CPU 使用率規制を行うことで、同時接続数の増加を抑えられることが分かる。

### 5.4 応答待ちタイムアウト数

前述のように SIP プロトコルの各メッセージは、送信後 180 秒経過しても応答が返らないとタイムアウトし、不完了処理を行う。これは図 15 に示したように他ノードへのふくそう伝搬の要因となる。図 20 は、過負荷タイプ 1 に対して、提案する制御方式によるタイムアウト数の抑制効果を示したものである。タイムアウト数は SIP サーバ内で待合せが 180 秒を超えた

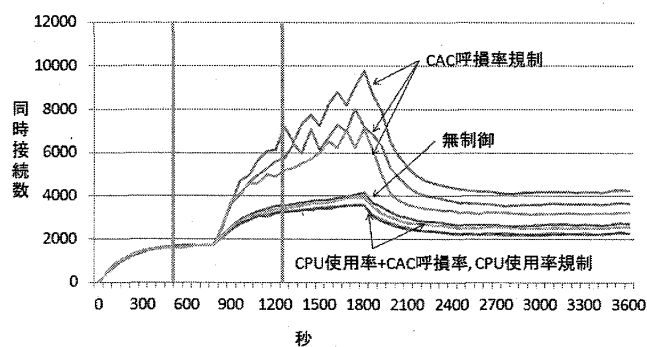
図 19 同時接続数の変動 ( $n = 4.0$ )

Fig. 19 Variation in the number of simultaneous connections.

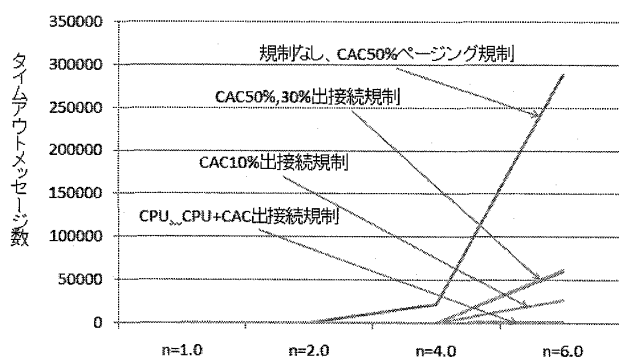


図 20 応答待ちタイムアウト数特性

Fig. 20 Number of timeout messages.

メッセージ数を計数している。

無制御及び方式 2B では  $n = 4.0$  でタイムアウト数が増加し、 $n = 6.0$  では膨大な数になっている。これらは、CPU バッファでの待合せ、及び方式 2B においてページング破棄に伴う待合せによって発生したものである。CPU 使用率で規制を行う方式 1 と方式 3 ではタイムアウト数はほとんどなくなっている。これは CPU ふくそうが回避されたためである。

### 5.5 各制御方式の評価

CPU 使用率だけを指標とする方式 1 よりも、CPU 使用率と CAC 呼損率を併用する方式 3 のスループットが高くなっているのは、無線帯域を有効に使い切っているため、帯域利用に対して適切にふくそうを検出していることになる。リンクネックとノードネックのいずれかが先行する場合には、単一の指標ではカバーできないため、指標の併用は有効であるといえる。

CAC 呼損率だけを指標とする方式 2 はあまりスループットが上がらない。特にページング破棄を行う方式 2B は無制御と変わらず、単独での指標としてはふくそうをとらえ切れていないと考えられる。ページング信号を破棄する方式は、SIP サーバで応答待ちタイム

アウトが発生して不完了処理を増やすため、有効な方式とはいえない。

結論的には、SIP サーバに対する CPU 使用率、無線帯域に対する CAC 呼損率のいずれかではなく、両方の指標を併用することでスループットが改善され、ふくそうの進展や他ノードへの波及が抑制されることが判明した。

## 6. む す び

本論文では、LTE システムを対象に、災害時に想定される集中過負荷に対するシステムの過負荷特性をシミュレーションにより解明し、ふくそうのメカニズムを明らかにした。更に、その結果に基づいて、過負荷時にもシステム性能を劣化させず、高いスループットを維持できる制御方式を提案し、その有効性をシミュレーションにより確認した。提案方式は、集中過負荷となる着側 SIP サーバのふくそうを回避するだけでなく、サーバふくそうが前位の SIP サーバに波及してネットワーク全体に拡散するのを阻止する方式にもなっている。

提案方式は、ふくそう指標として SIP サーバの CPU 使用率と無線帯域利用における CAC 呼損率を併用して用い、しきい値以上であれば発側の SIP サーバにおいて当該地向けの呼を制限するものである。シミュレーションによってしきい値の最適化を図ったが、実システムに適用する場合におけるしきい値の決定や、その決定方法は今後の課題である。

提案する過負荷制御方式は、CPU 使用率と CAC 呼損率（回線呼損率相当）の組合せという、旧電話網の場合の制御とほぼ同様なものになっている。従来の携帯電話網システムでは、回線交換とパケット交換の接続方式は独立しており、発災時でもふくそうが個別に発生するが、LTE ではこれらがすべてパケット交換方式に統一され、通信容量も拡充されるため、発災時のふくそうも大きくなると考えられる。LTE の接続方式は、無線帯域を捕そくする部分（コアネットワーク）とセッション管理部分（IMS）に分かれており、発災時には被災地外からの多くの接続要求により、呼ごとのセッション制御や位置情報管理を行うセッション管理部分に負荷がかかると想定される。しかし、大規模な地震・洪水時に被災者が市町村をまたぐような広域移動を行うことは少ないため、位置管理に伴う処理負荷は微小であり、位置管理を行う MME/HSS はボトルネックにはならないと考えられる。一方、無線帯域

は即時系であるため過負荷時にも性能低下の要因とはならない。結果として、無線帯域ビジーに伴う SIP サーバでの話中処理による CPU の無効保留が正常呼処理を圧迫し、性能低下を引き起こす要因となる。これは旧電話網の場合と同じ構造であり、過負荷制御方式も同様なものとなる。

更に、本論文では電話・映像等のリアルタイム型トラヒックがインターネット接続等のベストエフォート型トラヒックに優先して無線帯域を利用するものとしたが、災害時には電話呼だけでなくメールや災害時掲示板の利用などベストエフォート型トラヒックの帯域利用も増加すると想定される。リアルタイム型トラヒックの優先帯域使用に一定の規制を行う方式や、ベストエフォート型トラヒックのために帯域留保を行う方式等についても今後更に検討して行きたい。

謝辞 本研究を進めるにあたり御議論を頂いた NTT ドコモ無線アクセス開発部の保田佳之部長、滝田亘主幹研究員、萩谷範昭グループリーダー、林貴裕主査に感謝致します。

## 文 献

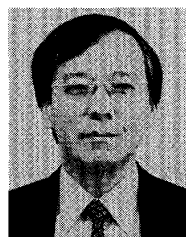
- [1] (株) NTT ドコモ, “重要通信の現状及び課題について,” 重要通信の高度化の在り方に関する研究会資料, 3-8, p.6, p.20, Dec. 2007.
- [2] 総務省信越総合通信局 大震災における情報通信の在り方に関する検討会～中越地震を教訓に災害時の円滑な情報流通を確保するために～報告書概要, “3. 新潟県中越地震における通信施設等の状況,” p.3, May 2004.
- [3] 中村 功, “災害時の情報ニーズ 重要通信と関連して,” 重要通信の高度化の在り方に関する研究会資料, 2-5, p.12, Dec. 2007.
- [4] 岡田和則, “大規模災害等における重要通信確保のための通信時間規制の提案,” 信学技報, CQ2003-26, Sept. 2003.
- [5] 秋永和計, 佐々木純, 金田 茂, 井原 武, 杉山一雄, “通信関係を考慮した災害輻輳の早期解消の一考察,” 信学技報, NS2006-72, Sept. 2006.
- [6] 荒井健次郎, 辻河 亨, 有満秀浩, “IP 電話網における輻輳制御に関する一考察,” 2009 信学総大, B-6-97, March 2009.
- [7] 総務省, “端末設備等規則（平成 16 年 3 月 22 日総務省令第 44 号）第四章 電話用設備に接続される端末設備, 第二節 移動電話端 第十八条.
- [8] 服部 武, 藤岡雅宣, ワイヤレス・ブロードバンド HSPA+/LTE/SAE 教科書, インプレス R&D, 東京, 2009.
- [9] 藤岡雅宣, 小田稔周, 仲田和彦, そこが知りたい最新技術 IMS 入門, インプレス R&D, 東京, 2007.

(平成 22 年 4 月 20 日受付, 8 月 4 日再受付)



安藤 恵

平 22 筑波大・図情卒。携帯電話の疎通率向上方式に関する研究に従事。平 22 年 4 月より京都大学大学院情報学研究科在学中。



川原崎雅敏 (正員)

昭 50 京大・工・電気卒。昭 52 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。トラヒック制御, B-ISDN/ATM ネットワーク構成法, 情報流通基盤等の研究に従事。平 16 より筑波大学大学院図書館情報メディア研究科教授。

IEEE, 情報処理学会, 日本医療情報学会各会員。