

修士論文

災害時における情報通信のモデル化と分析

Modeling and Analysis of
Telecommunication during Disasters

2014年2月6日

指導教員 相田仁教授



東京大学大学院

工学系研究科電気系工学専攻

37-126497 渡邊圭寿

概要

2011年3月の東日本大震災のような大規模な災害が生じると、被災地の親類や知り合いへの安否確認のために通話需要が大幅に増加する。特に携帯電話は普段から持ち歩いているということもあり、災害という緊急時にも非常に有効なコミュニケーションツールとなりえる。しかし多くの電話端末が一斉に電話をかけようとする、通信需要の急激な増加により広範囲にわたり輻輳が発生する。通信における輻輳とは通信要求を処理するシステムの許容量を大幅に超える電話やメールが発生することである。そういった輻輳が起きる原因の一つとして再呼が考えられる。再呼とはシステムの許容量がいっぱいでも通信が拒絶されても、相手につながるまであきらめずに何度も電話をかけ直す行為のことである。

本研究では大規模災害が発生したときに発生する輻輳状態について待ち行列モデルを作りシミュレーションを行った。再呼確率や再呼待ち時間を変化させることによって入力トラヒックを観察し、東日本大震災時の通信状況に近づけることを目標とした。また、災害時における輻輳対策の一つである通信時間制限の有効性について検証した。

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 災害時の通信状況	2
1.3 本論文の目的	5
1.4 本論文の構成	6
第2章 研究背景	7
2.1 総務省のアンケート結果	8
2.1.1 調査対象者	8
2.1.2 アンケート結果	9
2.1.3 アンケートからの考察	11
2.2 発信規制制御	11
2.3 通信時間制限	13
2.3.1 通信時間制限の仕組み	13
2.3.2 発信規制と通信時間制限の組み合わせ	15
2.3.3 通信制限時間の見積もり	16
2.3.4 先行研究でのシミュレーション	17
2.4 再呼を考慮した待ち行列モデル	19
第3章 待ち行列モデルの構築	21
3.1 SOARS について	22
3.2 輻輳時の入力トラヒックモデル	22
3.3 通話時間、再呼間隔分布の作成	23
3.4 再呼を含む待ち行列モデルの構築	25
3.5 シミュレーションの実行	27
3.5.1 再呼確率 α を変化させたとき	27
3.5.2 再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたとき	27
3.6 考察	30

第 4 章 通信時間制限の検証	31
4.1 検証モデルの作成	32
4.2 調査実験	33
4.2.1 調査の目的	33
4.2.2 調査の方法	33
4.2.3 調査結果	33
4.3 通信時間制限モデルの構築	34
4.4 通信時間制限シミュレーションの実行	36
4.5 考察	38
4.6 通信時間制限の実用化	38
第 5 章 結論	39
5.1 まとめ	40
5.2 通信確保手法の提案	40
5.3 今後の課題	42
参考文献	45
発表文献	47

目次

1.1	東日本大震災時のトラヒック量	3
1.2	過去の大地震発生時の電話普及数	4
2.1	東日本大震災時の通話時間(全体)	9
2.2	東日本大震災時の通話時間(地域別)	9
2.3	電話がつながりにくい状況でも電話を利用した理由	9
2.4	安否確認に必要な通話時間	10
2.5	通信時間制限に対する賛否	10
2.6	通信時間制限における許容できる制限時間	10
2.7	発信規制	12
2.8	通信時間制限のモデル	14
2.9	通信制限時間の通知と切断警告	14
2.10	評価に用いたシミュレーションモデル	17
2.11	通信時間制限のシミュレーション結果	18
2.12	再呼を考慮した待ち行列モデル	19
3.1	輻輳時のトラヒックモデル	23
3.2	通話時間の指数分布	24
3.3	再呼間隔の指数分布	24
3.4	SOARS 上での待ち行列モデルの実装	25
3.5	シミュレーション時の移動経路の例 A	26
3.6	シミュレーション時の移動経路の例 B	26
3.7	再呼確率 α を変化させたときの入力トラヒック	28
3.8	再呼確率 α を変化させたときの再呼待ち人数の推移	28
3.9	再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたときの入力トラヒック	29
3.10	再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたときの再呼待ち人数の推移	29
4.1	通信時間制限のモデル化	32
4.2	通信時間制限を用いた際の満足度	33
4.3	通信時間制限の移動経路 A	35
4.4	通信時間制限の移動経路 B	35

4.5	通信時間制限を設けたときの入力トラヒック	37
4.6	通信時間制限を設けたときの再呼待ち人数	37
5.1	他サービスへの誘導例	41

表目次

1.1. 東日本大震災時の固定電話回線の被害	3
1.2. 東日本大震災時の携帯電話回線の被害	4

第 1 章 序論

1.1 はじめに

地震などの大規模な災害が生じると、被災地の親類や知り合いへの安否確認のために通話需要が大幅に増加する。特に携帯電話は普段から持ち歩いているということもあり、災害という緊急時にも非常に有効なコミュニケーションツールとなりえる。しかし多くの電話端末が一斉に電話をかけようとする、通信需要の急激な増加により輻輳が発生する。また、ケーブルが切断されたり、停電や故障により基地局が使えなくなった場合、その基地局がカバーしていたエリアでの使用ができなくなることもある。

そういった輻輳を悪化させる要因の一つとして再呼が挙げられる。再呼とは、通信要求が拒絶された場合にそこで諦めずに、再度通信要求を繰り返す行為のことである。大規模災害時の安否確認において通信要求が拒絶されたとき再呼が行われる可能性はかなり高いと考えられる。

1.2 災害時の通信状況[1][2]

1995年に起こった阪神淡路大震災では、固定電話は最大で通常時の50倍という通信要求があり、輻輳が問題となっていたが、当時の携帯電話の加入数は430万台程度だったため、輻輳はあまり問題にならず、携帯電話は災害に強いとまで言われていた[3]。

2003年5月に発生した宮城県北部沖地震については、固定電話と携帯電話を分けて述べる。固定電話では、地震発生から数時間の間東北地方に通話が殺到し、例えば宮城県では発生直後から約3分間で平常時の約29倍の通話要求があった。通話規制が解除されたのは地震発生からおよそ4時間後であった。また、携帯電話では、地震直後から3時間後までの総通話量が発信・着信ともに通常時の約30倍であったと推定される。発生直後から3時間の間87.5%の発信規制が行われ、約4時間後まである程度の規制が行われた。着信についても約5時間70%の規制が行われた[4]。

2008年6月に発生した岩手・宮城内陸地震では、固定電話・携帯電話ともに事業者により差はあるものの発生から約5時間発着信が最大で87.5%規制された[5]。

2011年3月の東日本大震災時には1億1800万台、阪神淡路大震災時の27倍にまで増えたため(図1.2)、携帯電話においても災害時には輻輳が発生してしまうようになった。

第1章 序論

東日本大震災の発生時には5倍の発信規制が発生し、事件直前から12.6倍の発信呼数、7.9倍の着信呼数が発生している。つまり、発信で約60倍、着信で約40倍のトラヒックが発生したと想定される。

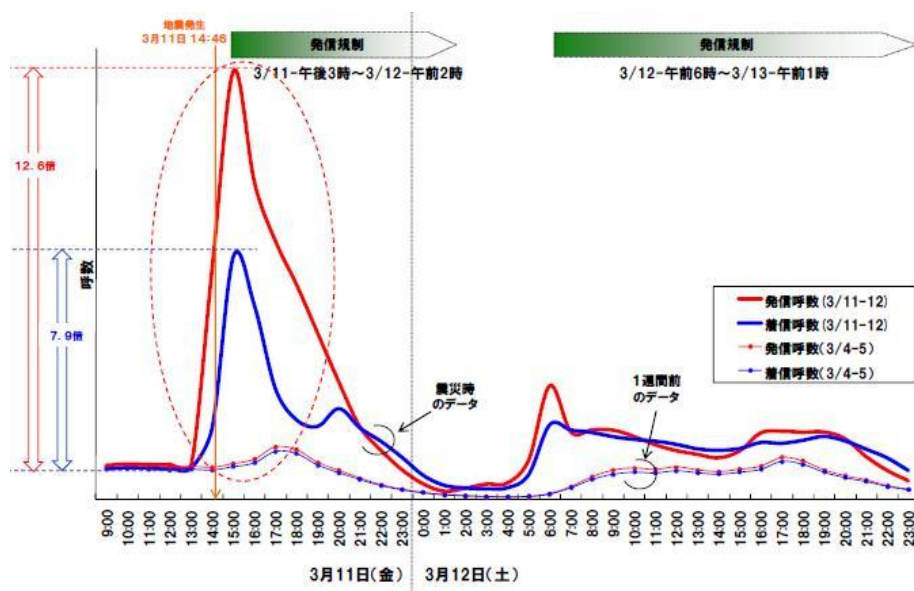


図.1.1 東日本大震災時のトラヒック量

また、通信システムが災害により実際に受けた被害の例として、東日本大震災における被害状況を紹介します(表1)。固定電話に関しては、最大で190万回線が被災した状態であり、事業者にもよるが80~90%の規制がなされた。同じように携帯電話でも最大で2万9千もの基地局が停止し、電話をかける際において70~95%が規制された状態であった。また、これらの被害回線、被害基地局の機能停止の要因は、地震による倒壊、津波による浸水、伝送路断などがあるが、原因の80%以上は広範囲かつ長時間に及ぶ商用電源の停電である。

表.1.1 東日本大震災時の固定電話回線の被害

通信会社	被災した基地局数	発信規制
Docomo	6,720	90%
KDDI	3,680	95%
Softbank	3,786	70%
E-mobile	704	0%
Willcom	13,760	

表.1.2 東日本大震災時の携帯電話回線の被害

通信会社	Types	被災した回線	発信規制
NTT	固定電話	1,006,000	90%
	FTTH	513,000	
ADSL	固定電話	141,000	90%
	FTTH	249,000	
Softbank	固定電話	31,000	80%

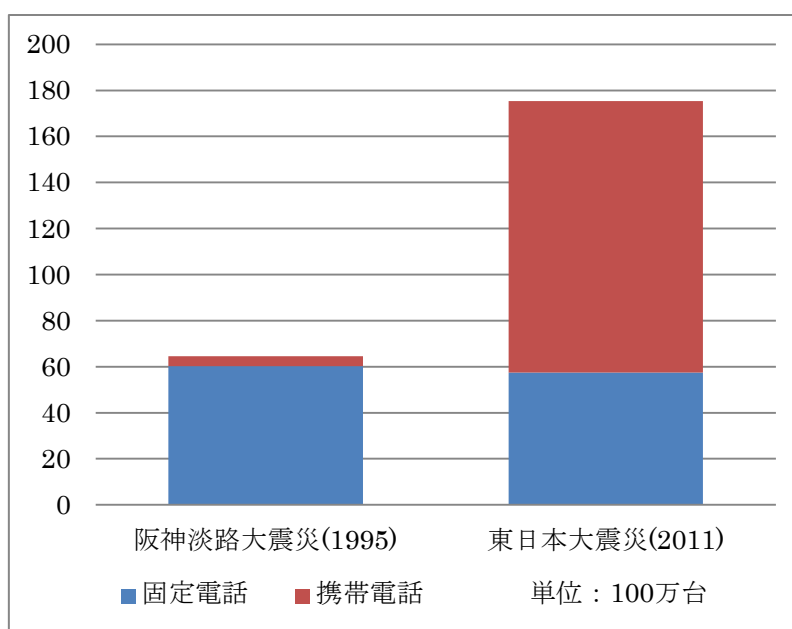


図.1.2 過去の大地震発生時の電話普及数

これらの原因から携帯電話やスマートフォンなどが広範囲でつながりにくい状況が発生し、大量の帰宅困難者が発生した首都圏では安否確認すら満足にできない状態が終日続いた。ユーザが真に通信要求しているときに、通信できないことは、ユーザにとって強い不満となる[6]。

1.3 本論文の目的

現在、大規模災害が発生した際の輻輳対策として、発信規制、待時系、通信時間制限、ボイスメールなどが提案されている。輻輳対策を行った時の通信手段としては、最初に呼が発生し、大量の入力トラヒックに対して適切な輻輳対策を行った結果、通信相手とつながり、用事が終わるとサービスが終了するといった流れである。

実際には、輻輳のために一度では相手につながらず、相手につながるか諦めるまで何度も繰り返し電話をかけ続けることになる。つまり入力トラヒックとは利用者が電話をかけたときの通信情報量として表現したものであるが、その検討には利用者が初めて電話をかけたときに発生する「発生トラヒック」と電話が繋がらないとき諦めずに2度3度と繰り返しかけ直した時の「再呼トラヒック」の識別が重要課題となる。

本研究では災害時における通信確保手法についての現状及び対策手段について述べる。また、災害時における呼量モデルを仮定し、待ち行列モデルに適用した際のシミュレーションを行う。

また、通信確保手法の一つである通信時間制限についてのシミュレーションを行い、その有効性を検証する。

第1章 序論

1.4 本論文の構成

本論文は5つの章から構成されている。以下に各章の構成を示す。

第1章

本研究の研究背景、問題点と目的を説明し、本論文の構成について述べる。

第2章

東日本大震災の際の輻輳発生状況や総務省によるアンケート調査、現在使われているものを含め輻輳対策方法について述べる。また、今回行うシミュレーションで用いる再呼を考慮した待ち行列について説明する。

第3章

シミュレーションを行うにあたって、細かい条件や予備実験について説明する。そして実際にシミュレーションを行い、妥当性を示す。

第4章

通信時間制限を用いたとしたときのシミュレーションについて述べる。

第5章

まとめと今後の課題について述べる。

第 2 章 研究背景

2.1 総務省によるアンケート調査[7]

2.1.1 調査対象者

総務省は以下の前提条件下で3/11当時の状況や音声電話、メールなどの連絡手段についてアンケート調査を行った。その結果のいくつかを抜粋して以降に載せる。

- ・アンケート対象者は東日本大震災発生直後から3/14までの期間に東京・神奈川・千葉・埼玉・茨城・青森・岩手・宮城・福島に向け電話やメールで連絡を取ろうとした16歳以上の1650名。(実際に通じなかった場合を含む)
- ・男女比は50:50
- ・年齢構成は、20代以下・30代・40代・50代・60代以上で均等割り各330名
- ・地域別構成は関東・東北・その他で均等割り各550名
関東・・・東京・神奈川・埼玉・千葉・茨城・群馬・栃木
東北・・・青森・岩手・秋田・宮城・山形・福島
その他・・・関東、東北以外の県
4県・・・岩手・宮城・福島・茨城(計402名)

第2章 研究背景

2.1.2 アンケート結果

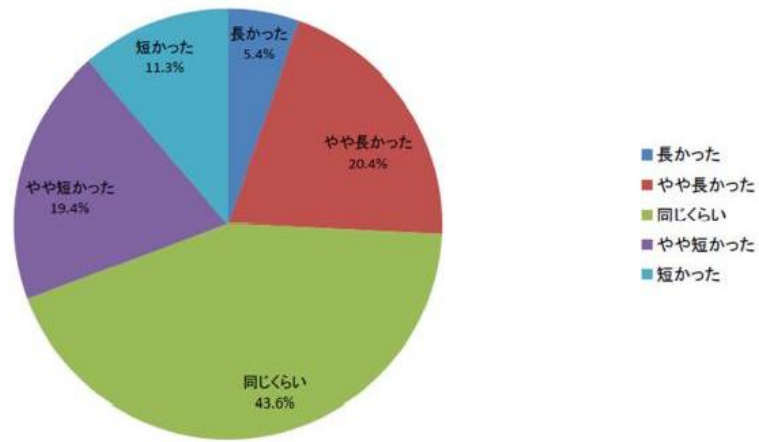


図 2.1 東日本大震災時の通話時間(全体)

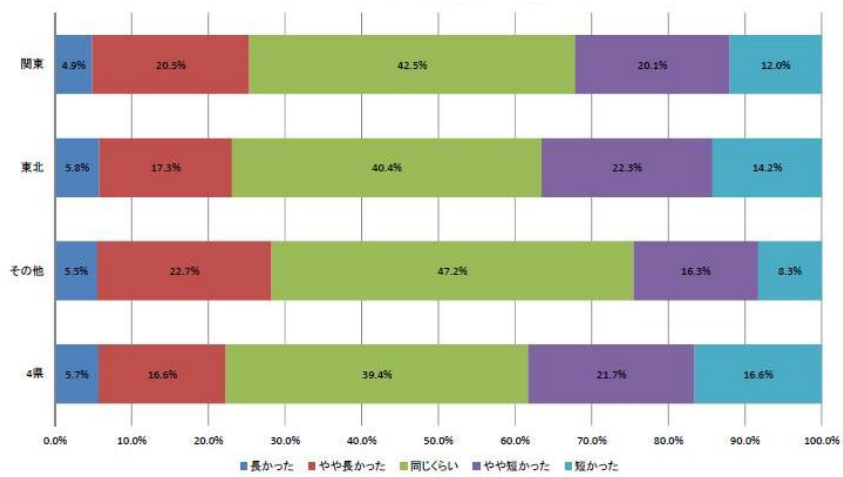


図 2.2 東日本大震災時の通話時間(地域別)

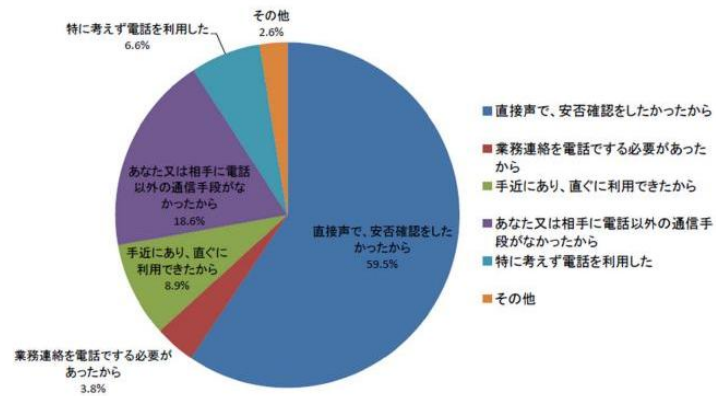


図 2.3 電話がつながりにくい状況でも電話を利用した理由

第2章 研究背景

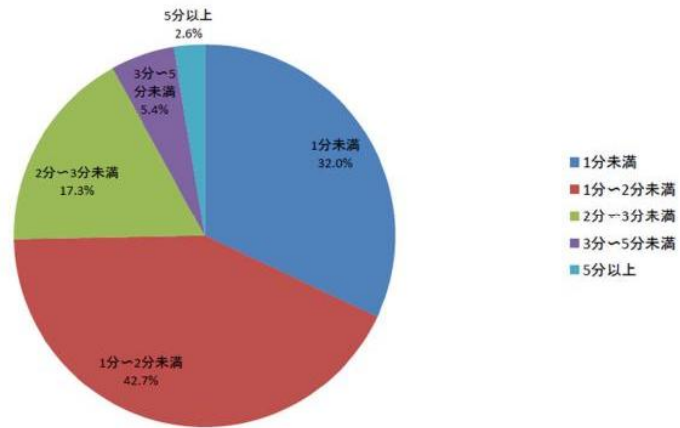


図 2.4 安否確認に必要な通話時間

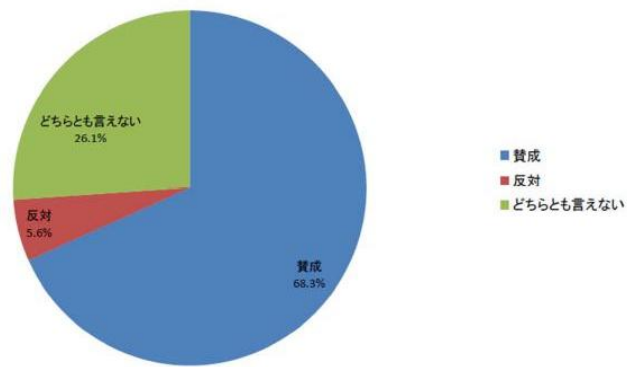


図 2.5 通信時間制限に対する賛否

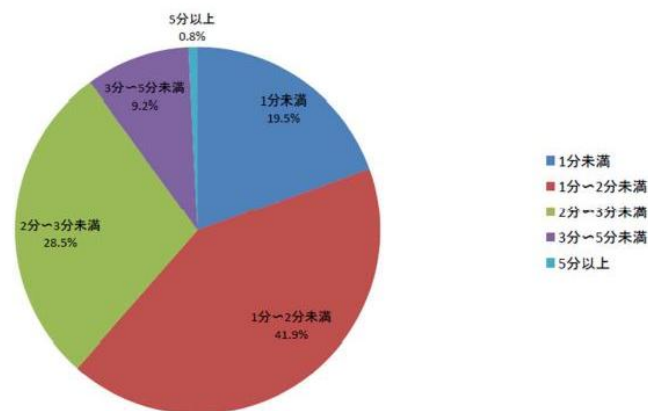


図 2.6 通信時間制限における許容できる制限時間

第2章 研究背景

2.1.3 アンケートからの考察

あくまで主観的な感覚のアンケートではあるが、図 2.1,2.2 から、当日の通信時間は通常時と変わらないという割合が多く、「短かった、やや短かった」の割合が被災地ほど多くなっている。これにより、災害時の通話時間においては通常時と同等と仮定できる。

図 2.3 から、電話がつながりづらい状況でも電話を利用した理由では、「直接声で、安否確認をしたかったから」(60%)と「あなた又は相手に電話以外の確認手段がなかったから」(19%)の割合が高い。

安否確認に最低限必要な通話時間は2分未満で約75%、3分未満で約90%という結果になっている(図 2.4)。そしてのちに述べる通話時間制限に対する賛否としては賛成が68%であり、2分未満が61%、3分未満が90%となっている(図 2.5,2.6)。これらのアンケート結果からのちに行うシミュレーションにおいて値を決める。

2.2 発信規制制御

トラヒック(呼量)というのは単位時間当たりの呼数と平均保留時間の積で表わされるので、呼量が増大した際、そのどちらかを制限する必要がある。この節ではそれぞれを制限することによる輻輳対策を紹介する。

輻輳に対して、現在、重要通信確保のため、あらかじめ契約している優先端末以外の一般端末の発信動作を一定の割合で無効とする発信規制が行われている。優先端末とは、電気通信事業法第8条で、「天災、事変その他の非常事態が発生し、又は発生するおそれがあるときは、災害の予防若しくは救援、交通、通信若しくは電力の供給の確保又は秩序の維持のために必要な事項を内容とする通信を優先的に取り扱わなければならない」と定められている、確保されるべき重要通信であり、電気通信事業法施行規則第56条で指定される機関がもつことができる。具体的には気象庁などの府省庁、都道府県、市町村、消防庁、消防署、国家公安委員会、警察庁から警察署、電力会社、ガス事業者、電気通信事業者、学校、銀行などの金融機関と多岐にわたる。

携帯電話各社は、災害時に通話が集中して負荷が許容量を超えないように発信規制を行う。携帯電話は、図 2.7 のようにあらかじめ割りつけられた10個の

第2章 研究背景

グループ群ごとに管理されてある。通常状態においてはこのグループ群を意識せずに通話ができるようになっている[8]。しかし、発信規制制御時には規制のレベルに応じて一定時間ごとにそれぞれのグループ群に発信可能、規制を割り振る仕組みになっている。

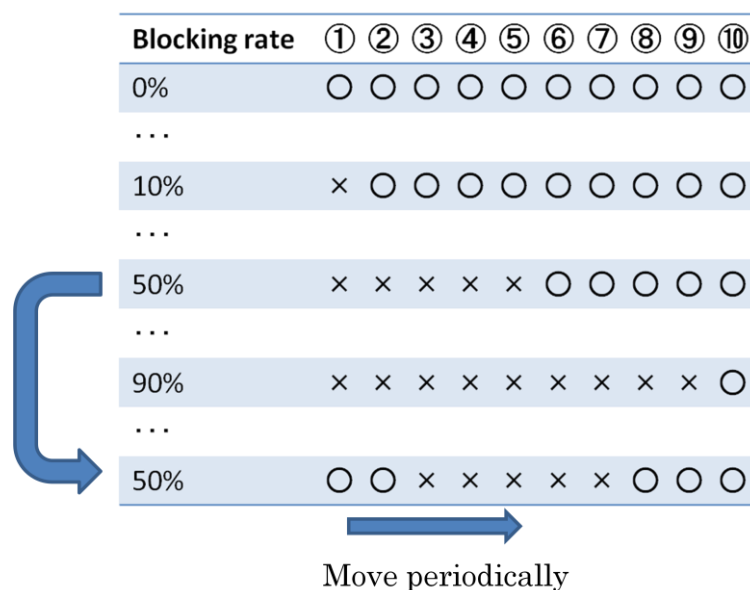


図 2.7 発信規制

ただし、一般契約端末への基地局発信規制中においても、110 番、119 番、118 番などの緊急通報呼の発信は、優先電話と同様に発信は可能である。

また、流入するトラヒックを規制しないと、処理しきれない呼を破棄するための処理負荷が重くなってしまい、接続処理に影響を及ぼしてしまう。このため、適正な規制措置の運用が必要となってくる[9]。

この発信規制の長所としては緊急時に必要な優先端末には規制をかけないため重要通信が確保されているということと、通信の量を減らしていることで負荷を交換機の容量以内で抑えられることにある。しかし、先ほどから述べているように多くの一般端末は通信が出来ないということと、つながらないためにかげなおし続けるということで通信需要自体が減らないということが欠点としてあげられる。

2.3 通信時間制限[10][11][12]

2.3.1 通信制限時間の仕組み

安否確認を目的とする緊急時の電話に求めることとしてとったアンケート[9]によると、「短い通話(30秒程度)でも構わないので、すぐに、相手にじかにつながること」が76.2%、「すぐにではなくても、必ず、相手にじかにつながること」が15.8%、「すぐに、相手には同時にはつながらなくても、伝言板のような記録、登録媒体で確認できること」が6.2%という結果がある。つまり、相手との即時的で直接的な通話への要望が強いことが分かる。そこで災害時に多くの通話ができることを目指した通信時間制限という方法を紹介する。

呼量は単位時間当たりの呼の総延べ保留時間であるため、単位時間当たりの呼数と平均通信時間の積であらわされる。発信規制が呼数を制限し呼量を制限させるのに対して、通信時間制限は通信時間を制限することで呼量を制限させる。このため、発信規制では優先端末だけ規制しないことにより重要通信が確保されるかわりに多くの一般端末の通信は規制されるのに対し、通信時間制限では、個々の通信時間は制限され短い、多くの呼が受け入れられ多くの端末の通信が可能となる。

通信時間制限をモデル化して説明すると図2.8のようになる。

この方式において通話を試してつながった場合、通信相手と通常通り話せるが、通信時間のリミットが設定される。その制限時間時に急に通信を切断するのは利用者にとって不便であり、再呼の原因にもなるため、その制限時間はディスプレイ表示や音声通知により知らせる。そして切断前にはバイブレーションを起こすなどして利用者に切断を警告することが重要である。

第2章 研究背景

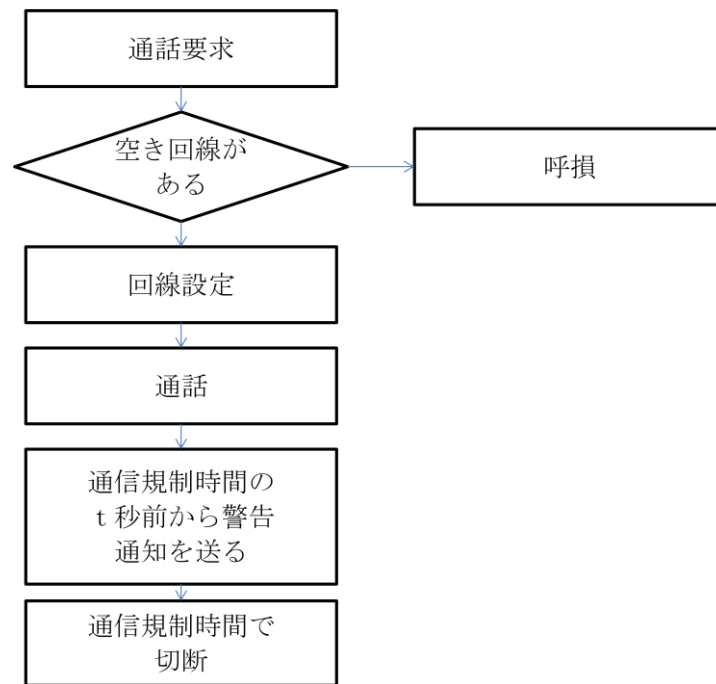


図 2.8 通信時間制限のモデル

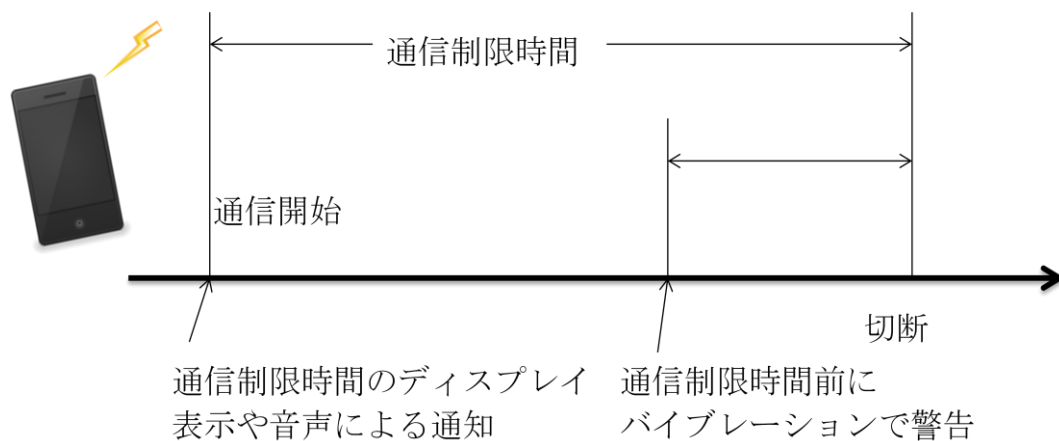


図 2.9 通信制限時間の通知と切断警告

この方式の長所としては、まず多くの一般端末の通信が可能となることや、呼損率の減少によってかかりやすくなることによって重要通信の確保に利用できることがあげられる。また、災害時の通信要求は強いものであるため、通信ができないときは再呼を繰り返すことが多く、通信需要がなかなか減少しない。

第2章 研究背景

通信時間制限によって少しでも多くの通信を実現することで、通信需要自体の減少が見込まれ、輻輳の軽減にもつながると考えられる。さらに、かかりにくいため一度つながったら長時間つないだままにするという、長時間の回線占有を避けることができる。

しかし、通信時間が短くなってしまうという欠点もある。これについてはある程度情報交換が出来る程度の意味のある通信になるように通信制限時間に限度を設ける必要がある。また、負荷が交換機容量や信号網の容量以内の制御にする必要があるということがある。この欠点を対処しないと負荷が交換機容量を超えてしまい、交換機が故障してしまうため、より悪化してしまう恐れがある。よってこれらの容量以内に制御する必要がある。発信規制と通信時間規制を組み合わせ、発信規制により交換機や信号網の容量内に十分に発信を制限した上で、一般端末への通信時間制限を導入するのが、現在のシステムでは適切であり、かつ両者の長所を生かせると考えられる。

2.3.2 発信規制と通信時間制限の組み合わせ

参考文献[13]の結びとして、発信規制と通信時間制限を組み合わせることが提案されている。通信時間制限を行うためには交換機や信号網に新たな制御を加える必要があるので通信時間制限を行うだけでは交換機や信号量の容量を超えてしまう可能性が高い。そこで、まず発信規制により交換機や信号網の容量以内に通信量を制限してシステムの破綻を防ぎ、そこに呼量に応じた通信制限時間を設定し、制限時間を超えた端末に対しては警告をした上で切断するという方法が考えられる。

具体的には、端末を次の3つに分類する。

- ・ 優先端末で通信時間制限をしないもの
- ・ 優先端末で通信時間制限をするもの
- ・ 一般端末で通信時間制限をするもの

優先端末の中での分類について述べると、例えば警察・消防・救急などの通信で時間を制限されてしまうと安全に重大な影響を及ぼす可能性がある。他方で公衆電話などの優先端末での一般市民の安否確認などは制限をかけても大きな問題はないと考えられる。

このような制御により以下のような効果が期待できるとされている。

- ・ 通信時間制限により回線に空きができ、通信できる端末が増加する
- ・ 重要通信端末が一般端末の回線占有によりつながりにくくなることを避ける

第2章 研究背景

- ・ 通信可能な端末を増やすことで、利用者の満足度を上げるとともに再呼による需要増加が低減される

制御を実現する方法として、交換局で呼数をカウントし、非常時であることや制限時間を報知チャネルを用いて報告するものや、端末に非常時における動作をインストールしておき、通信開始時に制限時間を表示させ、制限時間の直前にバイブレーションなどで通知し、制限時間を超えたら自ら切断するというものが挙げられている。

2.3.3 通信制限時間の見積もり

通信制限時間を見積もるために、呼損率(電話をかけてもつながらない確率)が通常状態と同じになる制限時間を求める[12]。そのためにいくつかの仮定を設ける。

- ・ 呼の発生はランダムである
- ・ 通信時間は指数分布に従う
- ・ 端末は静止しているものとする

呼量は生起呼数に平均通信時間をかけた後観測時間で割ったものであるから、災害が発生して生起呼数が n 倍になったとき、平均通信時間を $1/n$ にすると呼損率は等しくなる。ここで、平均通信時間を h 、制限時間を α とする。通常時の平均通信時間は指数分布に従うので $1/\lambda$ として、通信時間が制限時間 α を超える場合と超えない場合に分けて考えると、

$$h = \int_0^{\alpha} x\lambda e^{-\lambda x} dx + \int_{\alpha}^{\infty} \alpha\lambda e^{-\lambda x} dx$$

これから α を求めると、以下のようなになる。

$$\alpha = \frac{-1}{\lambda \log_e(1 - \lambda h)}$$

第2章 研究背景

例として平均通信時間 $1/\lambda$ を 120 秒であるとする、呼数が 5 倍になった場合平均通信時間を $120/5=24$ 秒にすればよい。(2) 式に代入すると、制限時間 α は 26.77 秒となる。

2.3.4 先行研究でのシミュレーション

評価に用いたシミュレーションモデル[10]は、図のようになっている。このモデルの詳細、モデルに加える条件は以下のようにになっている。

- ・ サービスエリア：2次元格子モデル(12×12セル)
- ・ セルの形状：正方形で一辺の長さは 1km
- ・ 統計対象エリア：中央部 16セル
- ・ 呼の発生：ランダム
- ・ 繰り返しセル数：16セル
- ・ チャンネル数：160チャンネル(1セル当たり 10チャンネル)
- ・ 移動体の方向と速さ：4方向に 0~20km/h
- ・ チャンネル割当：固定チャンネル割当法
- ・ 規制しない場合の通信時間：平均 120秒の指数分布
- ・ 生起呼数の監視間隔：120秒

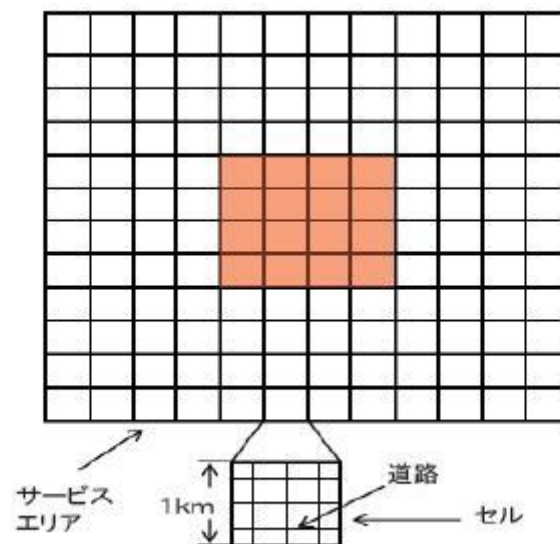


図 2.10 評価に用いたシミュレーションモデル

第2章 研究背景

このモデルのシミュレーションを行った先行研究[10]の結果が図 2.11 である。一般端末の通信時間のみ制限した結果、通信制限時間が短くなるほど、呼損率は減少し多くの呼が受け入れられているのがわかる。呼損率 10 %を実現するためには生起呼数が約 6 倍のときは制限時間を 30 秒、生起呼数が約 16 倍のときは制限時間を 10 秒とすればよいという結果が得られた。

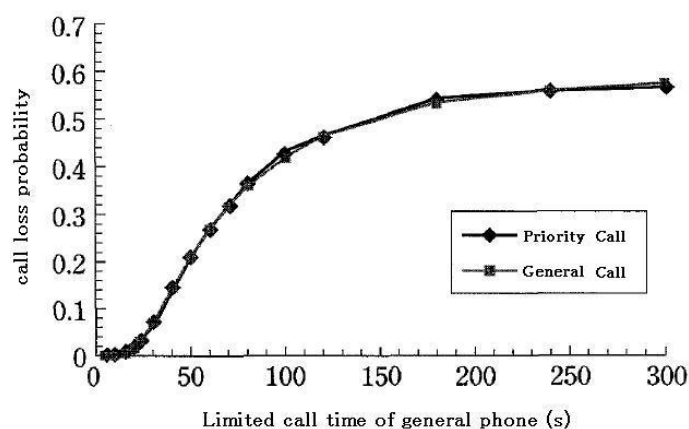


図 2.11 通信時間制限のシミュレーション結果[12]

ただし、通信時間規制によって満足に話せなかった場合、もう一度同じ相手にかけるおすはずである。図 2.11 の通信時間規制のモデルは電話のかけなおし(再呼)の影響を考慮していないため、実際とは異なる挙動を示すはずである。そのため今回再呼を考慮した、より現実在即した情報通信モデルを作成し、シミュレーションを行うことにした。

2.4 再呼を考慮した待ち行列モデル

通信が輻輳状態となって電話がつながりにくいという環境では、発信規制によって制限しても、電話がつながるまで通信要求を繰り返す利用者が多発する、と考えられる。この、電話がつながらないときかけなおすことを再呼というが、この再呼を考慮した待ち行列モデルにしたものが図 2.12 になる[14]。

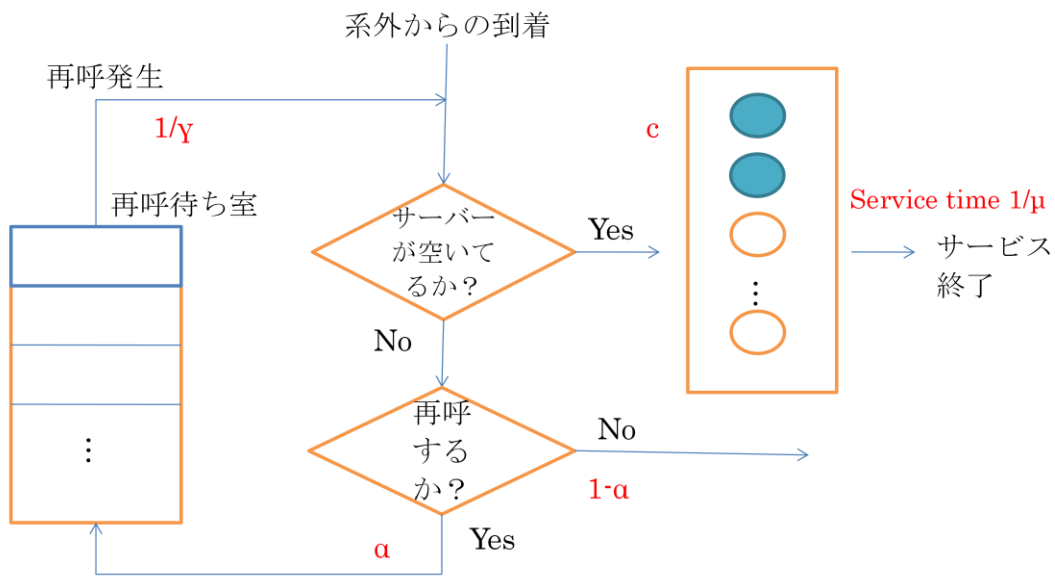


図 2.12 再呼を考慮した待ち行列モデル

電話をかけようとするユーザは図 2.12 の上の系外からシステムに到着する。まず発信規制による制御をおこなう。一定の発信規制率を設定し、その割合で発信を許可するものと発信を規制するものに分ける。発信が許可されなかった場合、即座に再呼待ち室へと移動する。発信が許可されたものも、サーバの空きがない場合は通話が出来ない。電話がつながらなかった場合、再呼をするかどうかの選択を行う。もし、再呼しないことを選んだならば、つまりその客は通話をあきらめたということである。再呼することを選んだ場合、再呼待ち室へ入る。そしてそこで時間待機した後、再度電話をかける。再呼待ち室での待機時間は、リダイヤルボタンをワンプッシュする程度の非常に短い時間ではあるが、それでもいくばくかのタイムラグは発生する。これを、再呼間隔と

第2章 研究背景

呼び、すなわち再呼待ち室における待ち時間は再呼間隔を表現するものである。

さらにこのモデルでは次のような仮定を導入する。

- ・ 到着した累積の客数は λ のポアソン分布に従う
- ・ 各サーバのサービス時間は $1/\mu$ の指数分布に従う
- ・ 再呼の間隔は客ごとに独立で $1/\gamma$ の指数分布に従う
- ・ 再呼をするか諦めるかは各回ごとに独立な確率 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ のベルヌーイ試行である
- ・ サーバの容量を c とする

第 3 章 待ち行列モデルの構築

3.1 SOARS について

本研究では、シミュレータとして SOARS[15]を用いた。

SOARS は、東京工業大学総合理工学研究科知能システム科学専攻出口研究室並びに株式会社バイケークにより開発されている、社会シミュレーションモデルが構築できるように設計されたエージェントベースシミュレーション用の言語である。

エージェントベースのシミュレーションでは、エージェントと呼ばれる意思決定を行える主体が定められたルールに従ってモデル内で行動する。SOARS では Visual Shell と呼ばれるツールを用いることでこのルールを設定し、モデルを構築することができる。

SOARS は本来社会シミュレーションを行うためのものであるため、その時間設定は非常に粗く、最小の時間単位が 1 分である。SOARS における 1 分を本研究では現実における 10 秒に対応させ、細かな時間設定を行えるようにした。

3.2 輻輳時の入力トラヒックモデル

災害時にユーザが電話をかけた後、サービスを終了するまでの輻輳時のトラヒックモデルは図 3.1 のようになる。

電話がスムーズにつながる平常時の通信状況は、まず電話をかけることで発生トラヒックが発生し、発信規制を受けずに相手に電話がつながる。そして用件が済み、電話を切ることでサービスが終了となる。

しかし、災害時の輻輳状態では、通常電話の利用者が発信制限によってブロックされて相手につながらない、発信規制は免れたが相手が通話中、電話が込み合っていて通話に至らない、電話が一旦はつながったが通信時間制限などによって通話が切断されて満足できなかったユーザが再びかけ直す、などの理由で再呼トラヒックが発生する。

発生トラヒックは東日本大震災の電話トラヒック資料をもとに各時間帯における入力トラヒックを算出し、それに合うように発生トラヒックを調整した。

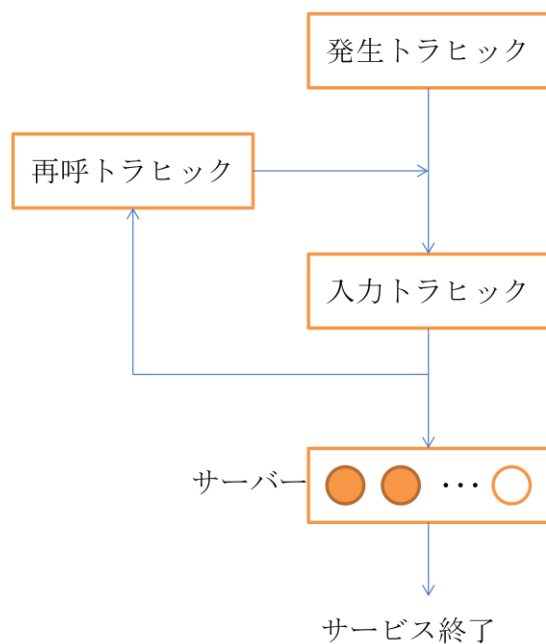


図 3.1 輻輳時のトラヒックモデル

3.3 通話時間、再呼間隔分布の作成

通話時間として始めに総務省における調査をもとに、平均通話時間が 2 分の指数分布となるような通話時間分布を作成することを目標とした。SOARS では時間条件に確率分布を適用することができないため、そこで、表計算ソフトを用いて平均が 2 分となるような指数分布を作り、それを細かく分割した後、各々に特定の通話時間を設定した。同様に、再呼間隔を平均時間 1 分の指数分布となるように設定した。

第3章 待ち行列モデルの構築

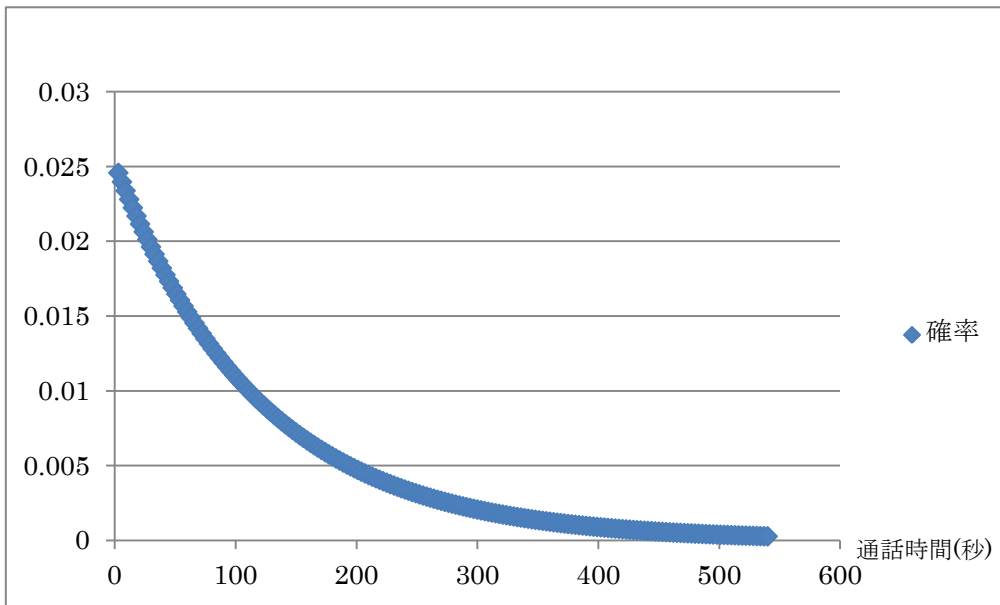


図 3.2 通話時間の指数分布

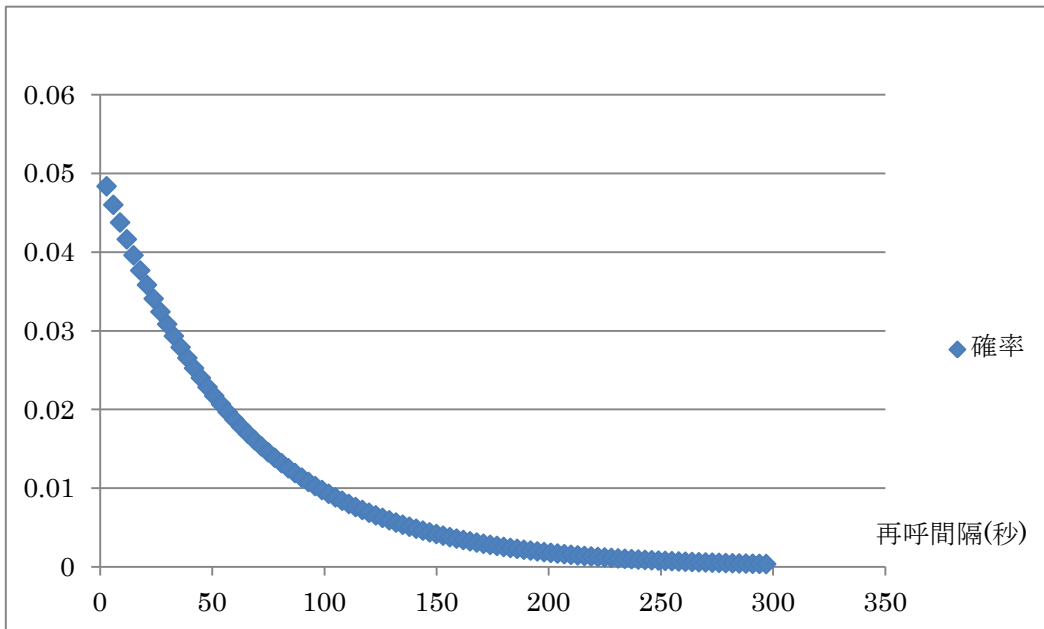


図 3.3 再呼間隔の指数分布

3.4 再呼を含む待ち行列モデルの構築

図で示した再呼を含む待ち行列モデルを実際に **SOARS** で構築して本研究の妥当性を検討した。全体の流れとしては以下ようになる。

1. 系外から呼を移動させ、サーバに空きがあればサーバに移動する
2. サーバにある呼は通話時間だけ経過した後、サービスを完了する
3. サーバにある呼数が一定値を超えたとき、再呼確率に従い再呼の判断をする
4. 再呼すると判断された場合、再呼待ち室へ移動して再呼間隔だけ経過した後、再びサーバへの移動を試みる
5. 再呼しないと判断された場合、呼損として処理する
6. サービスが完了するか、呼損した呼は再び系外へ戻る

以上のサイクルを 1 カウント内で行うこととし、1 カウントを **SOARS** における最小単位の 1 分とした。これは現実では 10 秒に値する。

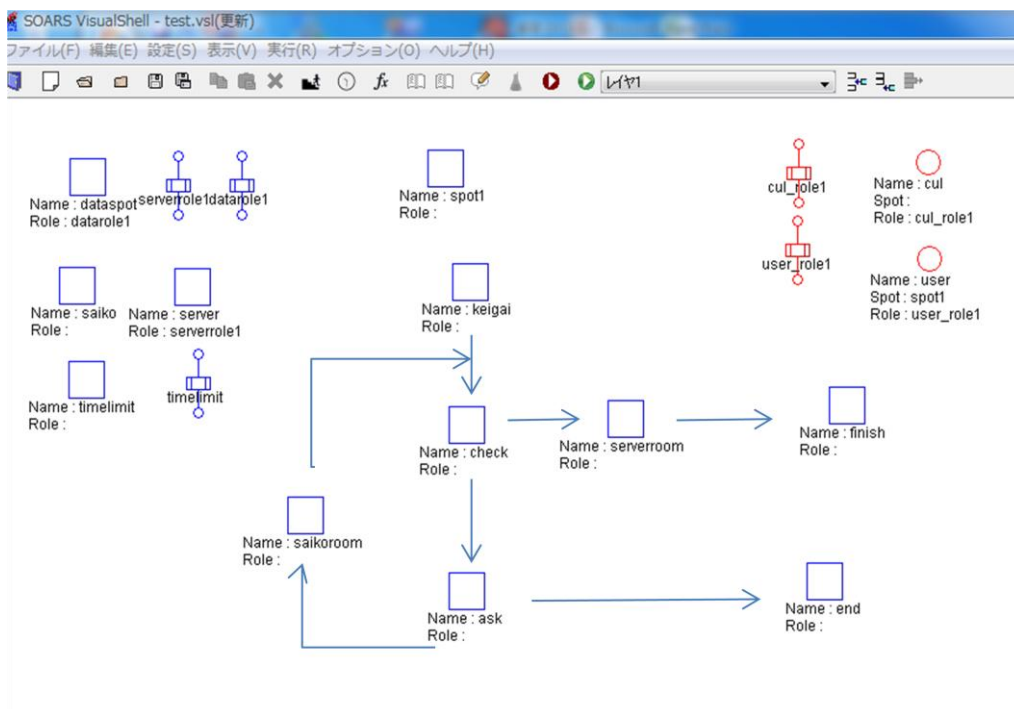


図 3.4 SOARS 上での待ち行列モデルの実装

第3章 待ち行列モデルの構築

この流れを SOARS 上で表わすと図 3.5~3.6 のようになり、それらをこの図における check の位置にいる人数が入力トラヒック(=発生トラヒック+再呼トラヒック)である。この挙動が東日本大震災時の入力トラヒック(図 1.1)と同じ曲線を描くことを目標とする。

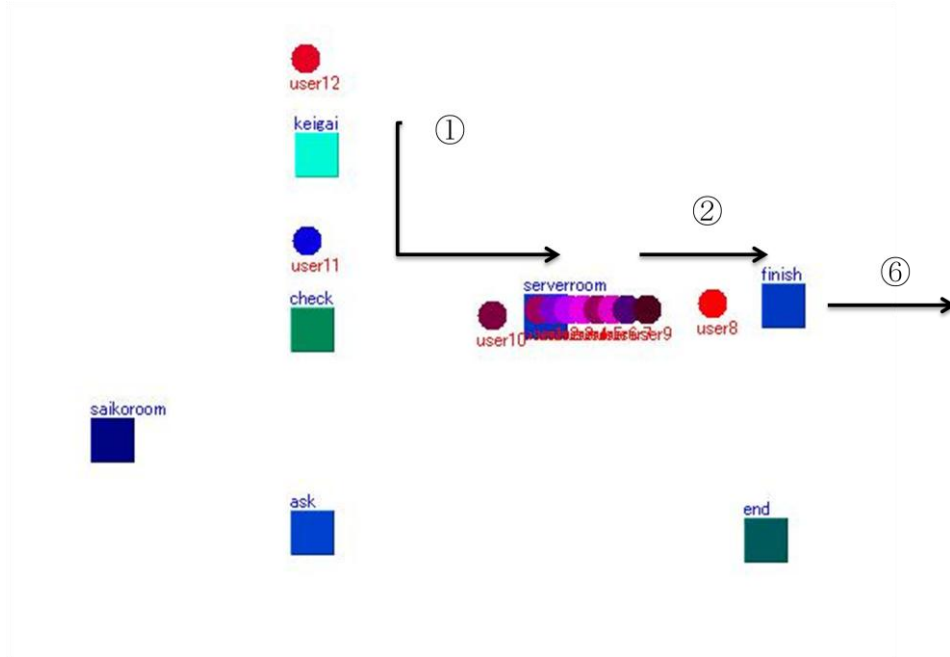


図 3.5 シミュレーション時の移動経路の例 A

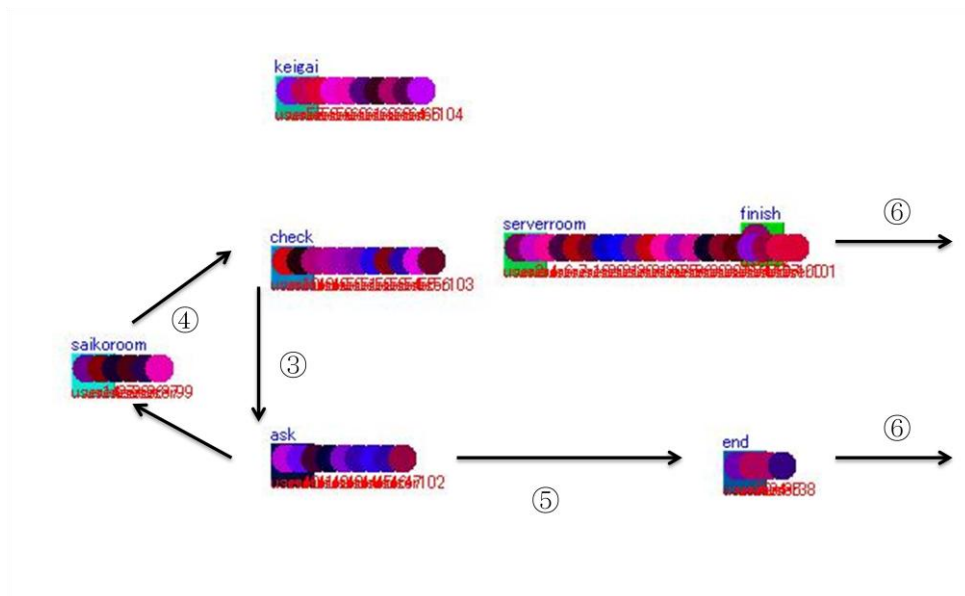


図 3.6 シミュレーション時の移動経路の例 B

3.5 シミュレーションの実行

待ち行列モデルにおけるパラメータを、

- ・ 通話時間 $1/\mu$: 平均 120 秒の指数分布
- ・ サーバ数 c : 20

とする。

計測時間は 12 時間とし、開始から 15 分後(シミュレータ時間で 90 分後)に災害が発生、及び通信要求が急激に高まるものとする。

また、総務省の調査[16]で 1 通信当たりの平均通信時間が 2 分 18 秒ということがわかっており、図 2.1,2.2 から、災害時の通話時間は通常と同じか短いくらいというアンケート結果もあるため、ここでの通話時間は平均 120 秒の指数分布を取るという仮定をたてた。

ここからパラメータ、再呼確率 α 、再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたときの入力トラヒックを測定した。

それぞれのシミュレーションに対して 3 回計算を行い、それらの平均値を取った。

3.5.1 再呼確率 α を変化させたとき

ここでは再呼間隔 $1/\gamma$ が平均 60 秒の指数分布のとき、再呼確率 α を 10%から 80%まで 10%毎に変化させたときのシミュレーションを行う。そのときの入力トラヒックの結果及び、再呼待ち人数を下に示す。

3.5.2 再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたとき

ここでは再呼確率 α が 0.7 のとき、再呼間隔 $1/\gamma$ を平均 30 秒から 120 秒まで変化させたときのシミュレーションを行う。そのときの入力トラヒックの結果及び、再呼待ち人数を下に示す。

第3章 待ち行列モデルの構築

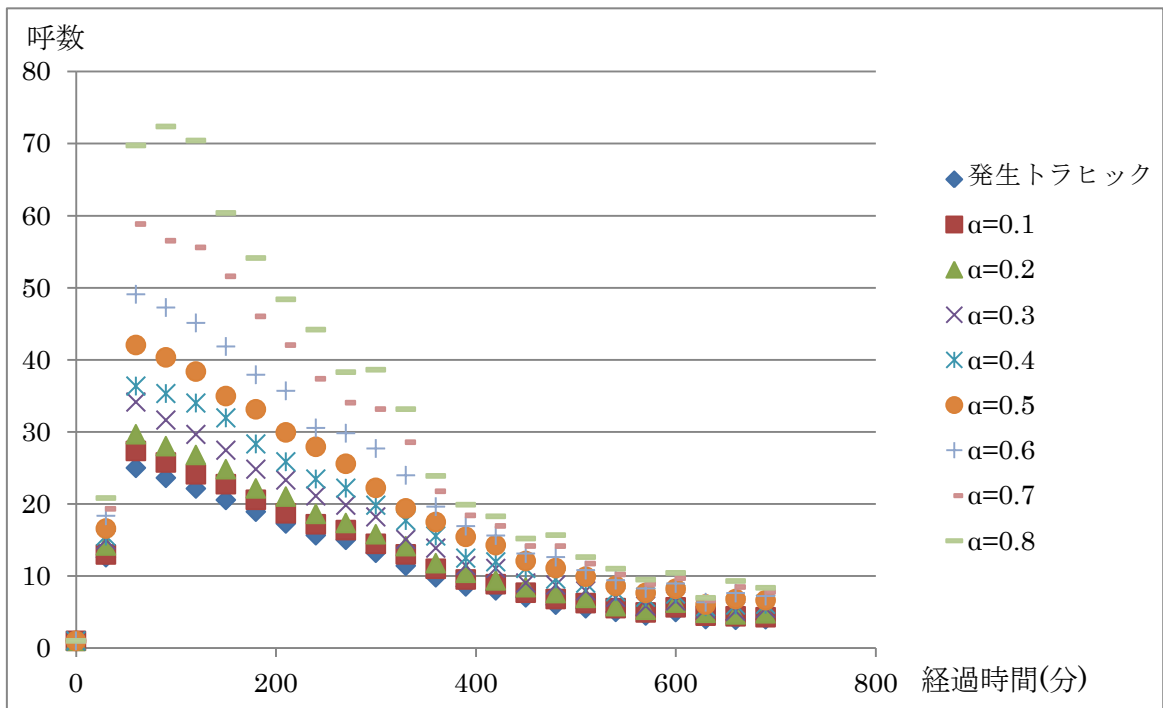


図 3.7 再呼確率 α を変化させたときの入力トラヒック

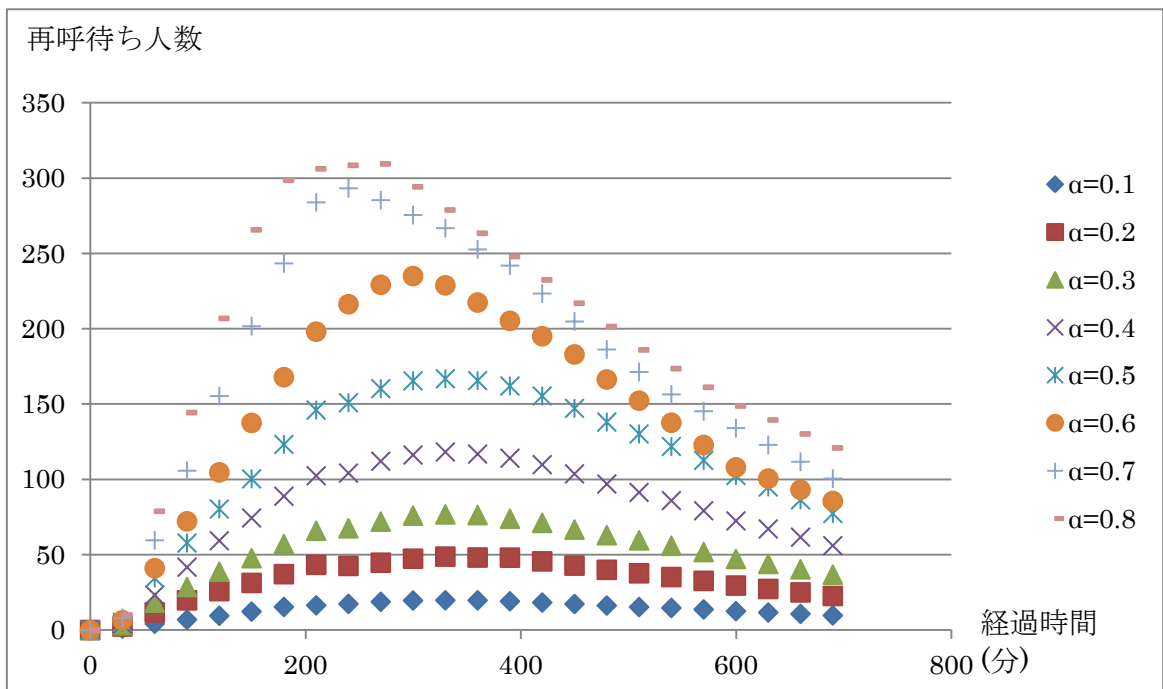


図 3.8 再呼確率 α を変化させたときの再呼待ち人数の推移

第3章 待ち行列モデルの構築

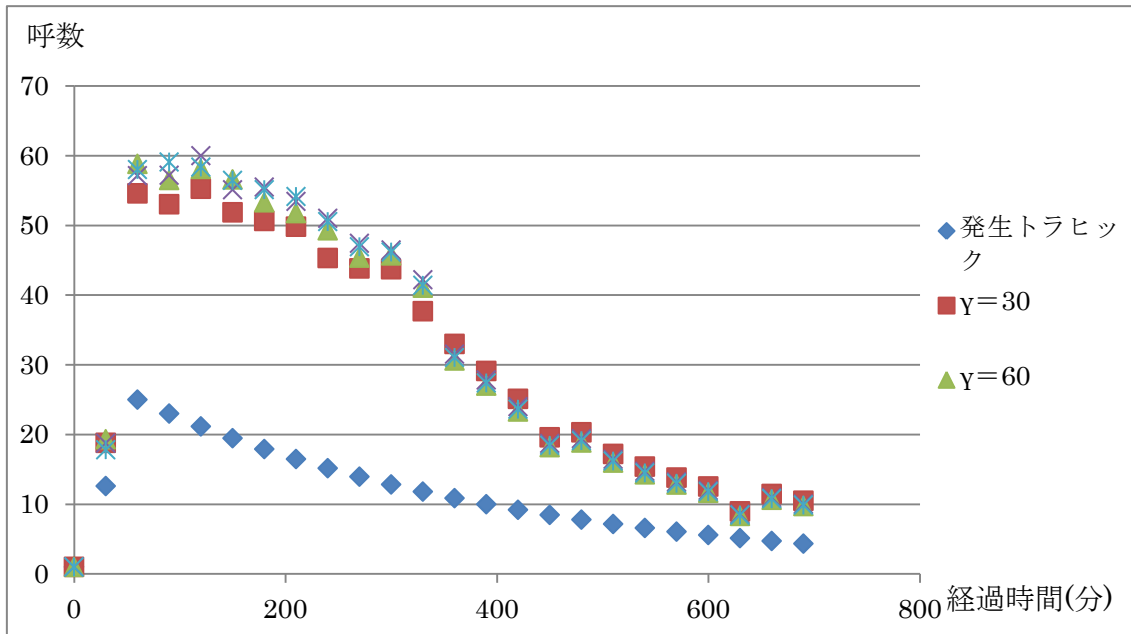


図 3.9 再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたときの入力トラヒック

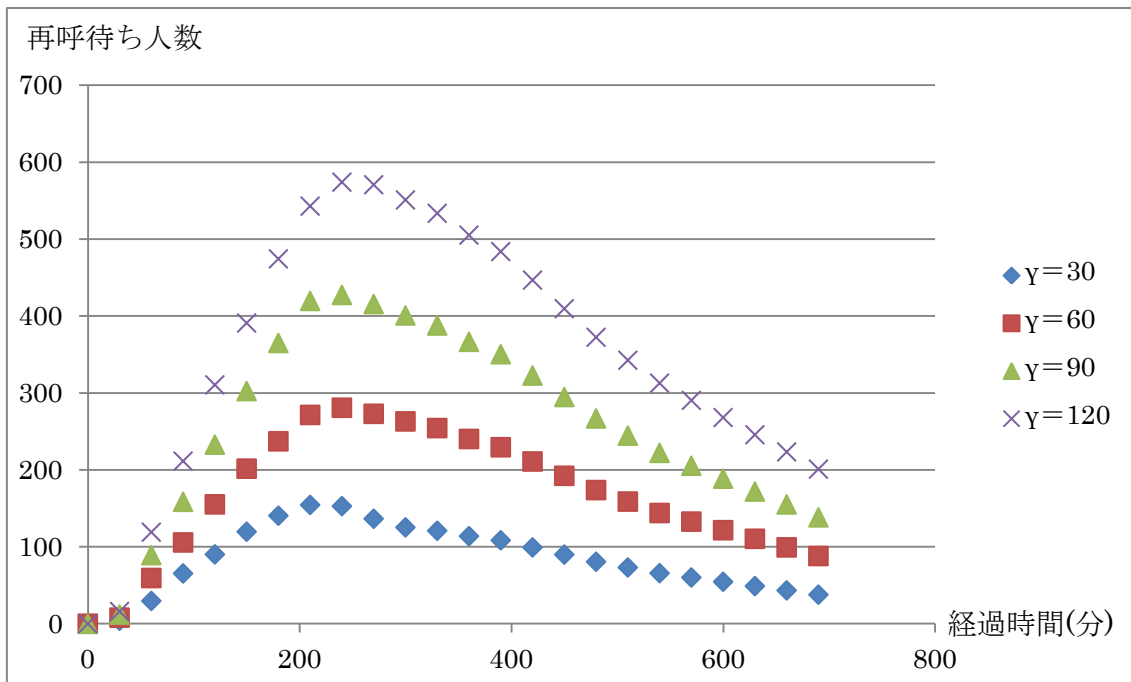


図 3.10 再呼間隔 $1/\gamma$ を変化させたときの再呼待ち室の人数の推移

3.6 考察

以上の結果から再呼確率は70%のとき、東日本大震災時のNTTdocomoの入力トラヒック(図1.1)に最も近いことがわかった。

再呼間隔を変化させたところ、再呼待ち室の人数も変化した。入力トラヒックに関しては大きな変化が見られないことが分かった。

よって次の通信時間制限のシミュレーションを行うに当たって、発生トラヒックはそのままに、再呼確率は70%と仮定を立てるものとする。

第 4 章 通信時間制限の検証

4.1 検証モデルの作成

さきに紹介した通信時間制限の有効性を検証するために、待ち行列モデルに通信時間制限の機能を考慮したモデルを図4.1に示す。

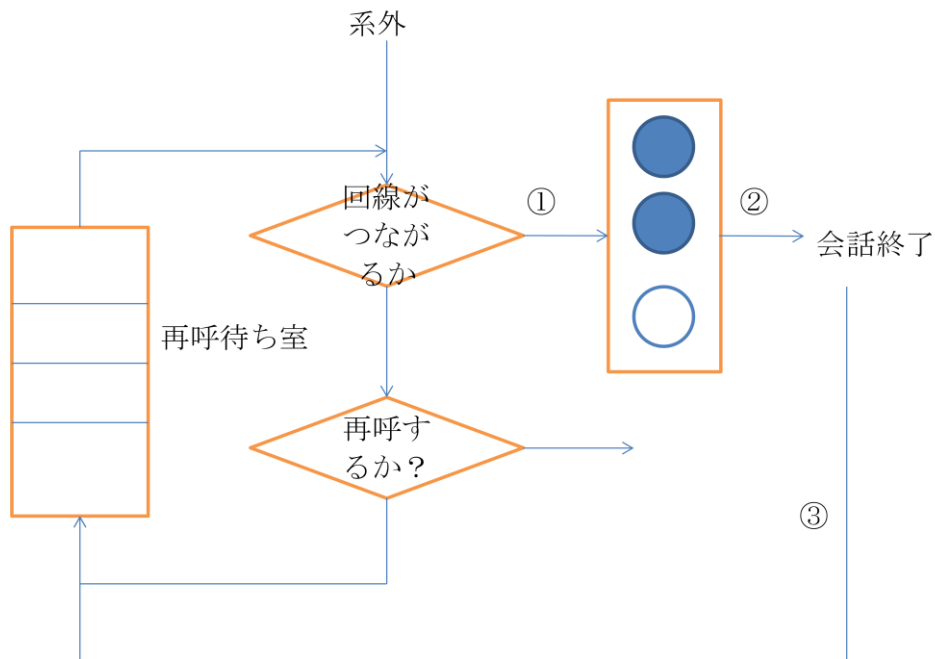


図4.1 通信時間制限のモデル化

図4.1において、

- ①通信時間のリミットを設定
 - ②通話を開始し、制限時間になったら強制的に通話停止
 - ③通話し足りない場合「再呼待ち室」へ戻り、もう一度通話を試みる。
- という順路をたどるとする。

このときの③において、短い時間での通話に満足したかどうかを判断する関数を使用するため、調査実験を行う。

4.2 調査実験

4.2.1 調査の目的

通信時間制限を用いると仮定し、限られた時間内で通話を行うとき、どの程度の時間があれば緊急時に必要な分の情報のやり取りが出来るかを確かめる。そこから時間と満足度の関数を導き出すことで通信時間制限の検証シミュレーションへと活用する。

4.2.2 調査の方法

実験方法としては、測定者にはあらかじめ通話時間を伝えておき、その時間だけ実際に災害時に話すような内容の通話をしてもらおう。その時間内で災害時に必要な情報伝達(例として、現在地、状況、今後の予定など)を十分に行えたかどうかを満足度として測定する。

5秒から始め、5秒ごとに通話時間を増やしていき、それぞれの通話時間での満足度を調べた。

4.2.3 調査結果

調査結果は図 4.2 のようになる。10秒以下では必要な情報伝達はほとんどできず、15秒からは少しずつ十分な情報伝達ができるようになってきた。60秒では最低限の情報のやり取りは可能であることが調査結果から分かった。

さきにも述べたとおり、離散的な数字を主に扱う SOARS において複雑な確率分布の設定は困難であるため、この結果を数式化はせず、測定した満足度をそのまま図 4.1.の③において通話終了から再呼待ち室へと戻る離散的な確率変数として使用する。

例えば通信時間制限の制限時間を 30 秒としたとき、満足度は 0.4 とし、0.6 の確率でもう一度電話をかけ直すという条件と設定した。

第4章 通信時間制限の検証

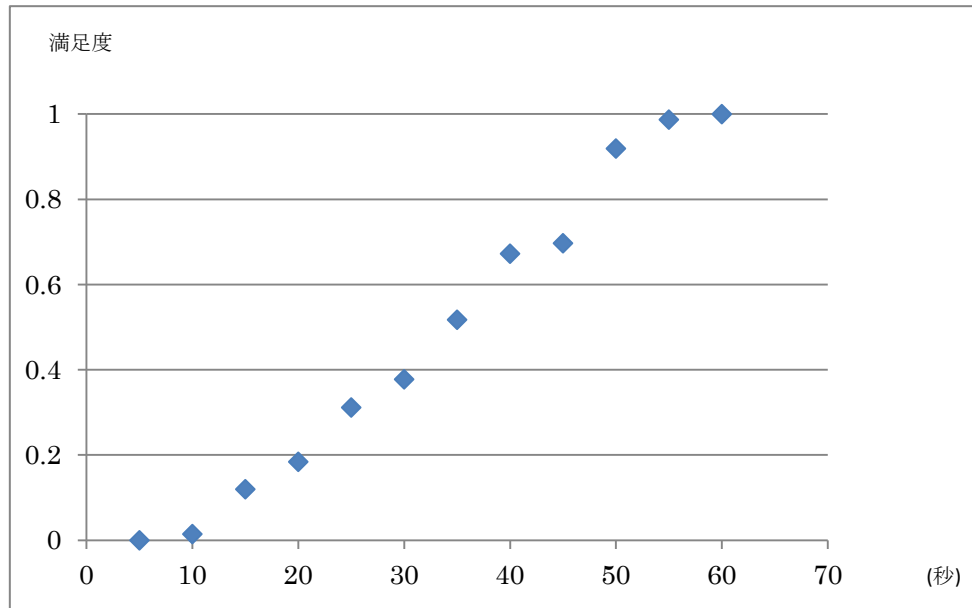


図 4.2 通信時間制限を用いた際の満足度

4.3 通信時間制限モデルの構築

4.2 で調べた満足度関数をもとにシミュレーションモデルを構築する。全体の流れとしては以下のようなになる。

1. 系外から通話したい呼を移動させてくる。このとき、それぞれに通話したい希望時間を設定する。
2. サーバに空きがあればサーバに移動する。
3. サーバにある呼は通話希望時間か、通話制限時間だけ経過した後、サービスを完了する。
4. 通話を完了した呼は、通話希望時間分だけ話せた場合系外へと戻る。希望時間分だけ話せなかった場合、満足度関数をもとに再呼するかどうか判断する。
5. 再呼する場合、そのとき通話した時間分だけ希望時間を減らし、再呼待ち室へと移動する。
6. サーバにある呼数が一定値を超えたとき、再呼確率に従い再呼の判断をする
7. 再呼すると判断された場合、再呼待ち室へ移動して再呼間隔だけ経過した後、再びサーバへの移動を試みる

第 4 章 通信時間制限の検証

- 8. 再呼しないと判断された場合、呼損として処理する
- 9. サービスが完了するか、呼損した呼は再び系外へ戻る

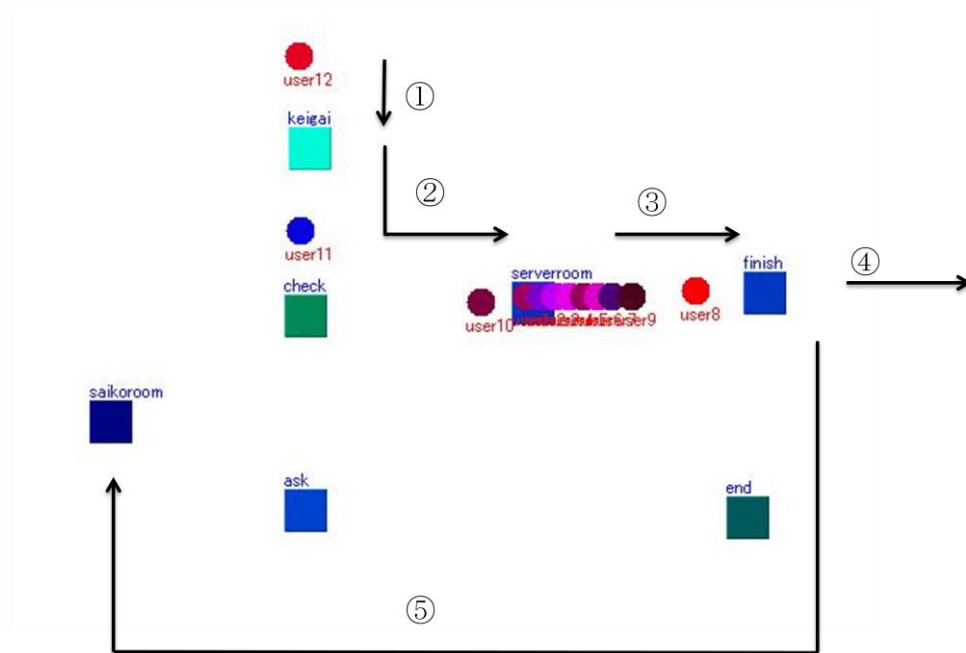


図 4.3 通信時間制限の移動経路 A

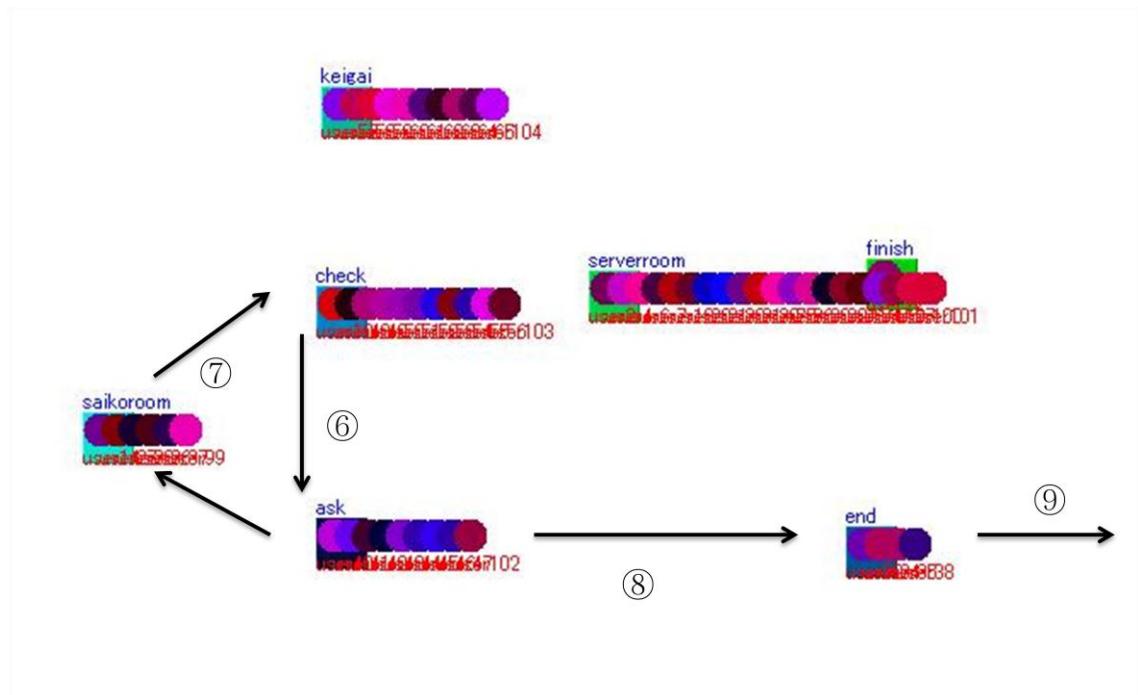


図 4.4 通信時間制限の移動経路 B

4.4 通信時間制限シミュレーションの実行

通常時と同じだけの呼損率を目指すために通信制限時間を設定すると、通話時間が数秒となる。再呼について考えず呼損率の数値だけを良くするならそれでいいが、実際には数秒しか話せないとなると何度もかけ直すことが予想され、数秒の制限時間というのは実現性に欠ける。

そこで再呼を考慮したモデルにおいて、制限時間を10秒ごとに設定し、それぞれにおける入力トラヒック、再呼待ち人数を確認するものとする。

待ち行列モデルにおけるパラメータを、

- ・再呼間隔 $1/\gamma$: 平均 60 秒の指数分布
- ・再呼確率 α : 0.7
- ・サーバ数 c : 20

とする。

計測時間は12時間とし、開始から15分後(シミュレータ時間で90分後)に災害が発生、及び通信要求が急激に高まるものとする。

総務省の調査(図 2.4,2.6)から、安否確認に必要な時間、通信時間制限で許容できる時間は1分~2分が最も多かったが、調査実験の結果から必要最低限の情報やり取りであれば60秒あれば可能であると判断し、通信制限を10秒から60秒まで10秒単位で変化させたときの入力トラヒックと再呼待ち人数を確認する。

それぞれのシミュレーションに対して3回計算を行い、それらの平均値を取った。

結果は図 4.3,4.4 のようになり、比較するために3章で導出したときのグラフを limit なしとして同時に載せた。

第4章 通信時間制限の検証

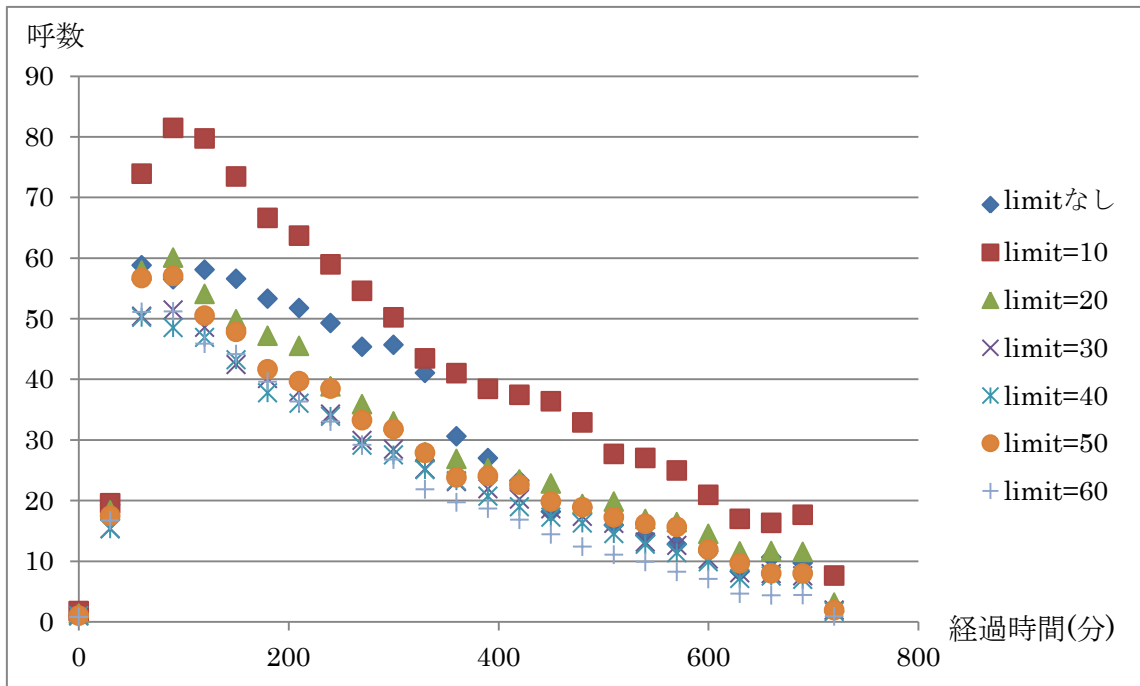


図 4.5 通信時間制限を設けたときの入力トラヒック

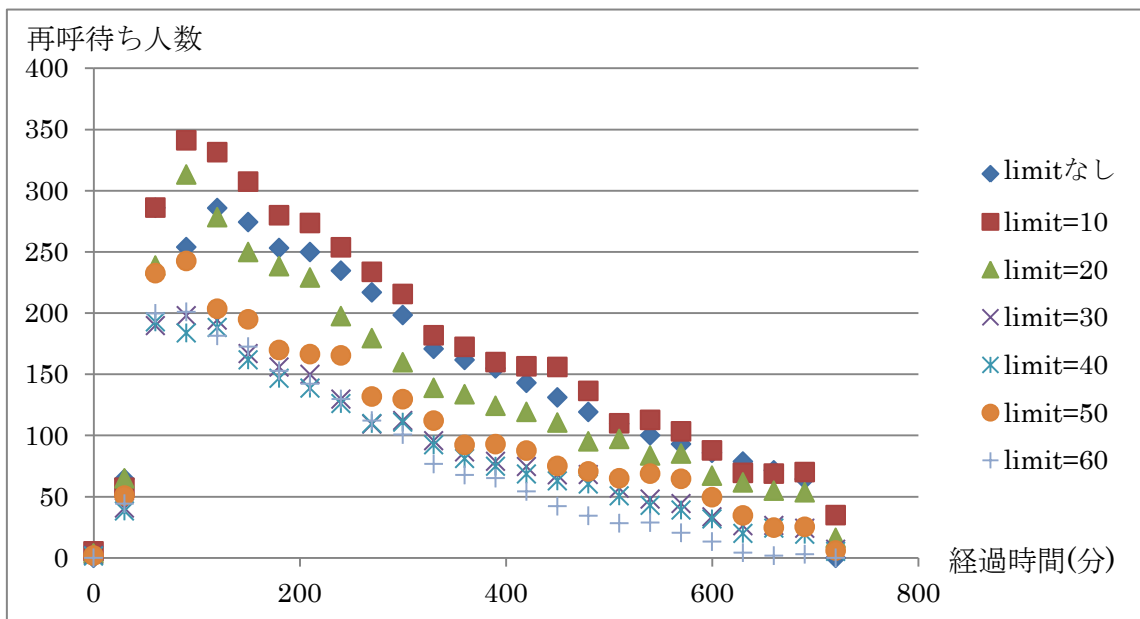


図 4.6 通信時間制限を設けたときの再呼待ち人数

4.5 考察

図 4.7,4.8 から、入力トラヒックのピーク時の倍率は、通信時間制限を使わないときはピークが通常時の 58.8 倍だったのに対し、通信時間制限を設けたときの方は 50.2 倍へと抑えられることが分かった。しかし、10 秒、20 秒と制限時間をあまりにも短くしてしまうと再呼確率が高くなってしまうため逆効果になると思われる。

再呼待ち人数においても同様であり、通信時間制限を設けたときには再呼待ち人数は抑えられるが、制限時間が短いとき、結局通信希望時間を満たすために何度もかけ直すことになり、再呼待ち人数が多くなってしまう。

このことから、通信時間制限は輻輳対策において有効であると考えられるが、その制限時間の設定を誤るとむしろ再呼応答が増えてしまう。そのため制限時間の設定方法が重要になる。

4.6 通信時間制限の実用化

通信時間制限を実際に使うとなった場合、第 2 章で述べたように通話を始めるときに制限時間の通知が行われる。しかし、この音声を出すという機能を交換機側で行おうとすると、ただでさえ交換機の容量が足りないため、交換機側にその機能を設けることは現実的ではない。

そこで例えばスマートフォンの電話の機能として、交換機の混雑状況から制限時間を話者に通知、リミットの直前に音声やバイブレーションで話者に通達するというような機能をアプリケーションとして電話端末の方で実装するなどの対策が求められる。

第 5 章 結論

5.1 まとめ

本研究では地震などの大規模災害時に起きる携帯電話の輻輳問題について、現状の対策である発信規制とともに、他の方法として通信時間制限の紹介をした。

また、災害時における呼量モデルを仮定し、再呼を考慮に入れた待ち行列モデルに適用した際のシミュレーションを行い、パラメータを変化させたときの入力トラヒックの変動を確認した。そのほか、輻輳対策の一つである通信時間制限の検証モデルの作成を行い、その有効性を示したが、同時に通信制限時間の設定方法を適切に行わないと輻輳対策として逆効果であることもわかった。

5.2 通信確保手法の提案

地震発生当日の通信実態としては、電話利用者の95%が安否確認を目的としており、その74%が家族へ向けた安否確認であった。また、利用者の60%が直接相手の声を聞きたいというアンケート結果があったため、電話の輻輳状態を調べ、通信確保手法の検証を行うという目的のもと進めていた。しかし、直接音声で会話するという条件さえ外せば、災害時における通信確保手法は電話の他にたくさんある。

事業者が行っているサービス内容としては災害用伝言サービスや、ボイスメールなどがある。しかしこれらの災害用のサービスツールは利用者への認知度は高いものの実際に利用している人は10%にとどまり、満足度においても利用者の96%が何らかの不満を抱いていることが分かっている。

また、社会的ネットワークをインターネット上で構築するサービスとしてソーシャルネットワークサービス（Social Network Service : SNS）が世界中で多くの人に利用されており、これらも災害時の通信手法として利用できる。代表的なSNSとしてはTwitterやFacebookなどがあげられる。それらの利用者は、東日本大震災の発生当日においても平日と全く変わらない通信が可能であったことが分かった。

第5章 結論

これらのように電話やメール以外にも災害時に利用できる通信手法はいくつかあるため、これからの災害時の輻輳対策として、電話の利用は最低限とし他の通信手法へと誘導をかけるなどの方法があげられる。前章の通信時間制限で述べたような災害時用アプリケーションを作った場合、他のサービスを紹介するなどの機能を設け利用できるユーザにはそちらを利用してもらい、電話の輻輳を軽減するなどの効果が期待できる。今回は東日本大震災時の電話の使用状況についてのみ調べたが、ボイスメールや災害時伝言サービス、SNSなどの利用状況も調べ、それらをすべて考慮して通信手法の誘導及び輻輳の軽減が提案できる。

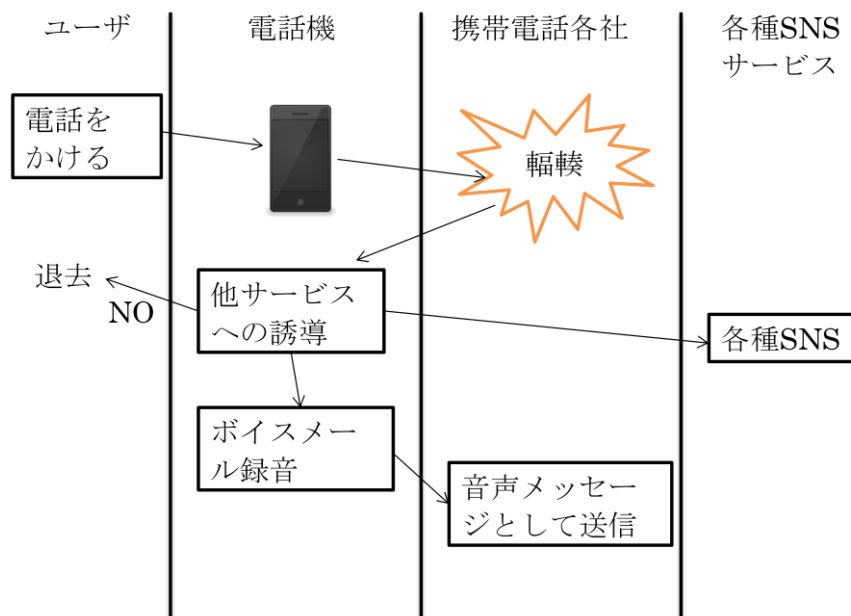


図 5.1 他サービスへの誘導例

5.3 今後の課題

- ・時間経過によるパラメータの変化

再呼モデルのシミュレーションでは再呼確率や再呼間隔を常に一定の確率分布のまま測定させたが、この値においても時間帯ごとに変化させる必要があると思われる。災害の発生直後は事態の把握が困難なため、再呼確率は高く再呼間隔は短く、時間が経つにつれ再呼確率は低く再呼間隔は長くというように推移していくと考えられる。その変化のタイミングや変化量に関しては定量的な評価、設定が困難であったため、今回は一定のままシミュレーションを行ったが、より正確な計測を行うために、それらの評価手法を考えるべきであると思われる。

- ・評価関数の正確な作成

通信時間制限の評価手法にも課題は残る。実験内容としては、測定者にはあらかじめ通話時間を伝えておき、その時間内で災害時に必要な情報伝達を十分に行えたかどうかを調べたものだったが、それはあくまで災害時だったらどのようなことをどのくらい話したいかというものを想像してもらったものなので、通常時に災害時と仮定して計測した満足度が実際の災害時の満足度と必ずしも一致するとは限らないし、災害時の通話時間の変化による満足度を実際に計測することは実質不可能である。また、災害時の周りの状況等によっても通話時間による満足度は変わるものと思われる。しかし、通信時間制限を実際に使用したときにどのくらいの制限時間なら満足するのか、不満の時に再呼が起こってしまう確率はどのくらいか、というのは通信時間制限の実用化において避けられない問題であるため、その仮定をより正確に推測する必要がある。

- ・シミュレーション環境の改善

本研究に使用した SOARS であるが、エージェントの数が極端に大きくなった時は、エラーによりシミュレーションが止まってしまい、それ以上の解析をすることが出来なかった。今回行ったシミュレーションでも、最初はより細かい精度で行おうとしていたが、精度を上げるほどエージェントの数が大きくなってしまい、シミュレータが動く程度まで精度を落とさざるを得なかった。また、シミュレーションを行えた場合でも一度のシミュレーション

第5章 結論

の結果を出すまでに数十分を要するものもあり、研究を行う上で好ましいものではなかった。

今回はシミュレータとして **SOARS** を使用したが、エージェントベースのシミュレータは **Platbox**[17]など他にもいくつかある。また、**SOARS** は離散的なシミュレーションを行うシミュレータであったため、確率分布を扱う際など少し複雑な設定をしなければならなかったが、**Visual SLAM**[18]などのように連続的なシミュレーションが可能なシミュレータも存在する。このようなシミュレータを用いることでより精確な解析が行えるようになると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の協力をいただきました。

学部4年生からの3年間、指導教員の相田仁教授にはミーティング発表時等に研究の方針についてご指導をいただき、研究を行うのに快適な環境を提供していただきました。心から御礼申し上げます。

千葉新吾技術専門職員には研究室の引っ越しを始め、日ごろの研究生活においていろいろとお世話になりました。深く感謝致します。

中山早百合秘書には就職活動でうまくいかなかったときに親身になって相談にのってくださいました。心より感謝致します。

また様々な面で支えていただいた相田研究室所属の先輩、後輩の方々のおかげで研究に取り組むことが出来ました。特に修士課程の2年間、同期として公私に渡って多くの相談に乗ってくれました、蟹江教佳氏に深く感謝致しております。

最後に、現在に至るまで支え、見守ってくれた家族に感謝いたします。

皆さま、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1]総務省 総合通信基盤局 “大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方について” http://www.jaipa.or.jp/event/isp_mtg/sendai/111111_soumu.pdf, 2011年11月
- [2]総務省 “東日本大震災における通信の被災状況、復旧等に関する取り組み状況”, http://www.bousai.go.jp/3oukyutaisaku/higashinihon_kentoukai/4/soumu.pdf, 2011年9月29日
- [3]武井務, “阪神・淡路大震災における通信サービスの状況”, 電子情報通信学会誌, vol.79, no.1, pp.2-6, 1996年1月
- [4] 総務省東北総合通信局, “災害時における情報通信システムの利用に関する検討会第一次報告書”, <http://www.ttb.go.jp/saigai/houkoku/index.html>
- [5] 総務省, “平成20年岩手・宮城内陸地震による被害等について【第3報】”, <http://www.soumu.go.jp/menu00/important/pdf/20080614140003.pdf>
- [6]秋永和計, “通信関係を考慮した災害輻輳の早期解消法の一考察”, 信学技法, pp.9-14, 2006年
- [7] 総務省, 総合通信基盤局, “東日本大震災発生後の通信状況に関するアンケート研究会資料 3-1”, http://www.soumu.go.jp/main_content/000136157.pdf, 2011年11月11日
- [8]NTT ドコモ “NTT ドコモの防災への取組み” 2007年6月
- [9]NTT ドコモ” 大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方に関する検討会（ネットワークインフラ WG）”, 2011年6月
- [10]岡田和則 “災害等における携帯電話の通信時間規制の検討” 電子情報通信学会技術研究報告.RCS, 無線通信システム pp.81-86, 2000年9月1日
- [11]K.Okada, “Limiting the holding time considering emergency calls in mobile cellular phone systems during disasters”, IEICE Trans. Communications, vol.E89-B, no.1, pp.57-65, 2006年1月.
- [12]岡田和則, “災害時の携帯電話の問題と対策”, 電子情報通信学会誌, vol.92, No.3, pp.179-184, 2009年

- [13] 総務省, “災害時の重要通信確保のための研究紹介” 重要通信の高度化の在り方に関する研究会(第2回)資料,
http://www.bousai.go.jp/3oukyutaisaku/higashinohon_kentoukai/4/soumu.pdf
- [14]高橋彰良, “再呼を考慮した情報通信システムのトラヒック特性”, 早稲田商学第405号, pp.61-92, 2005年
- [15]SOARS, “Spot Oriented Agent Role Simulator”, <http://www.soars.jp/>
- [16] 総務省総合通信基盤局, “通信量からみた我が国の通信利用状況, 平成23年度”, http://www.soumu.go.jp/main_content/000194105.pdf, 2013年1月9日
- [17] Platbox Project, <http://platbox.sfc.keio.ac.jp/>
- [18] 構造計画研究所, Visual SLAM,
http://www.kke.co.jp/product/catalogue/40index_msg.html
- [19]内藤浩一“再呼を考慮に入れた災害時における通信の解析”東京大学卒業論文, 2009年2月
- [20]足立恵理子“災害時におけるトラヒックモデルの検討”東京大学修士論文, 2012年3月

発表文献

渡邊圭寿,相田仁, “災害時における情報通信のモデル化”,電子情報通信学会,ネットワークシステム研究会, 2014年3月(予定)