

## 災害時における通話機能の感度分析

SENSITIVITY ANALYSIS OF FUNCTIONAL LOSS IN A TELECOMMUNICATION SYSTEM  
AS A RESULT OF AN EARTHQUAKE

野田 茂\* 藤田章弘\*\*

By Shigeru NODA and Akihiro FUJITA

Communication systems are of critical importance for earthquake disaster prevention and lifeline systems. This paper conducts sensitivity analysis in two parts to evaluate the structural and functional importance of telephone system in the event of an earthquake disaster. In the first part, the routing and switching functions of a physically damaged telephone network are simulated. The study aims to detect the weakest link in terms of traffic-handling to realize the aforementioned goal. In the second part, blocking in circuit-switched routing policies with alternative routing and truck reservation is analyzed. This demonstrates that the actual performance must be checked and system malfunctions emphasized.

## 1. 緒言

1989年10月17日午後5時4分(日本時間18日午前9時4分)はロマプリータ地震(マグニチュードM7.1)の発生時である。その頃は、ちょうど、名古屋工業大学で土木学会第44回年次学術講演会が開催中であった。講演会の参加者は、テレビやラジオによる地震報道に注意し、サンフランシスコ市での火災やベイブリッジの桁の落下を知った。人々は、情報が世界を駆け巡るその速さと量に驚き、逆に災害報道の事実疑念をもったに違いない。当初は誤報もあったが、次第に色々なことがわかってきた。

ロマプリータ地震では、近年の大都市では1) 大小の地震が多発する地震の巣の中にあるあるいはそれに近い都市で、かつ2) 都市の急速な膨張によって、災害に対する数多くの弱点を抱えている都市である、ということを知らしめた。地震の教訓をもとに様々な地震対策を進めても、それでも大被害は避けられない。それは、以前とは比較にならないほど複雑化した都市機能のためである。つまり、機能性と危険性は表裏の関係にあるのである。

我々は過密都市を襲う地震の怖さを改めて考えざるを得ない。1971年2月9日のサンフェルナンド地震(M6.5)と1978年6月12日の宮城県沖地震(M7.4)は、都市型震災として、日米両国で初めて大きな注目を集めた地震である。水道、電気、ガス、電話や各種の交通網の障害が生活機能を麻痺させたことは記憶に新しい。しかし、この種の2次的な災害は強い地震によってのみ起きるだけではない。小さな事故・災害であっても、被害を広域に拡散させることがある。

1984年11月16日午前11時50分ごろ、東京都世田谷区太子堂4丁目の世田谷電話局前の洞道内で発生した地下通信ケーブル火災は、都内で発生する火災の中でも、とりたてて注目するほどの大火ではなかった。しかし、その小さな火災は、やがて約9万3千回線の電話・通信を麻痺させ、オンライン網を切断して、被

\* 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

\*\* 鳥取大学大学院生 工学研究科社会開発システム工学専攻 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

害を全国に拡散させたのである。高度情報化社会を支えているのは細くてもろいケーブルであった。この通信途絶災害は現代社会を存分に翻弄したのである。

ケーブル火災事故を教訓に、事前対策、事後応急対策と経済的損失対策が検討され、その一部は実施された<sup>1),2)</sup>。しかし、対策の中心は事前対策であり、情報化社会のバルネラビリティが軽減されたとは言えない。電話などの公衆電話通信においては、個々の施設の耐震性の向上を図るだけではなく、システムとして統一的・総合的な防災対策を講じる必要がある。

事後応急対策は、事故・災害後の適切な応急対策によって、通信障害のインパクトを小さくしようとするものである。地震後の機能停止はある程度はやむを得ないが、なるべく早く復旧させなければならない。このようなことから、第一著者は、これまで、いかに早く復旧するかを戦術に関する研究を実施してきた<sup>3),4)</sup>。復旧対策は、オフライン復旧ではなく、オンライン復旧でなくてはならない。すなわち、災害が起こった後に、確実な被害情報（実際の被害地点や程度など）を計算機に入力し、どのような手順でどこから復旧するのが最適かを計算し、その結果に基づいて復旧を行うのである。

世田谷のケーブル火災では物理的被害が顕著だったのに対し、ロマプリータ地震による電話の物理的被害は小さかった<sup>5)</sup>。通信局舎・鉄塔、局内設備や局外設備の被害はほとんどなく、通信網全体に重大な影響を及ぼさなかった。大規模な通信の途絶は、停電のために電話交換機が作動しなかったり、冷却水のトラブルや燃料タンクの破損によって、非常用発電機が停止したために生じた。しかし、主な問題は、通信施設の物理的被害よりも、むしろ災害後に電話に殺到する「異常輻輳」という機能的被害であった。

異常輻輳により、一時は市内電話も市外電話も混乱した。市内電話のトラヒック状況は次のようである。地震直後から呼が殺到し、ピーク時には100万/分であった。地震当日の午後5時から7時間における呼の総数は2000万、18日は8000万、19日は6800万、20日は5200万、21日は4800万、22日は日曜日のために1800万と少なくなったが、翌週の23~25日は4730~5450万であった。これらの起呼は、平日の最閑日の2000万に比べると、3~4倍である。市内電話よりも深刻だったのは市外電話である。AT&T社の地震直前の通話量は1800万呼だったのに対し、地震をきっかけとして一挙に4000万になり、地震後1日間では1億4470万呼にもなったのである。このため、地震直後から、湾岸地区への着呼は70%、同地区からの発呼は30%に規制された。1983年日本海中部地震の例（東京23区から秋田への通話は平常時の59倍、三多摩地区からは96倍）に比べて、呼数の平常時に対する倍率（通常の4倍とか8倍）が絶対的に少ないということで、特徴的である。なお、上記データは文献5)によることをことわっておく。

ロマプリータ地震の例からも明らかのように、構造的被害はなくても、輻輳という機能的障害は多分にある。しかし、ライフライン地震工学の分野においては、これまで、通信経路の連結性が失われることによる通信途絶に注目した地震時信頼性解析<sup>6)</sup>や、連結性の支障あるいは回線数を機能性の尺度として、地震後の機能低下を扱ったり、復旧期間中の機能回復の状況と復旧戦略を関連づける研究<sup>4)</sup>が主に実施されてきている。既往の研究では、システムの連結性のみに着目した機能支障を主に取り扱っており、通信トラヒック工学に固有な特性が反映されていない。上述したように、我国における異常時のトラヒック状況は、米国に比べて、深刻である。従って、呼量と交換機の交換能力の関係を考慮しながら、通信施設の直接被害がトラヒックに対する機能支障に及ぼす影響や機能支障の回復度を検討しておく必要があるものと考えられる。

以上のことから、本研究では、まず、呼量と交換機の概念を電話網に取り入れ、世田谷のケーブル火災のような伝送路の物理的な被災シミュレーションに対し、平常時と異常時における呼量・損失呼や溢れ呼の相違点を検討するために、感度分析を実施する。次に、回線留保方式による迂回中継システムを適用し、呼種別呼損率を制御するモデルを解析する。本研究では、伝送路や交換機の具体的な通信網構成を考慮しているので、パラメトリックスタディにより、迂回中継システムが呼損率に及ぼす影響を定量的に調べることが可能である。本方法をT支社管内の市内電話網に適用し、ロマプリータ地震で見られた異常輻輳という機能支障がどのようにすれば抑えられるか、数値計算によって分析する。

## 2. 電話網の機能損失量の算定

交換線群のトラヒック特性を解析するには、1) モデルの設定、2) 同時接続数などの状態の定義、3) 平衡状態の存在確認、4) 状態推移図の作成、5) 状態方程式の誘導、6) 状態方程式の解と7) 呼損率などの目的量の

計算というステップを踏まなければならない。そこで、本章では、まず、通信網の構成要素や通信トラヒック理論について述べた後、被災時における機能損失量を算定するためのシミュレーション法を提示する。

### (1) トラヒックモデル

ここでは、文献7)~9)を参照し、後の解析に必要なトラヒックモデルについて説明する。

#### a) 呼量の物理的意味

電話の接続要求は呼と称し、呼の継続時間は保留時間と呼ばれる。トラヒック量とは、ある時間内における通信回線の延べ保留時間を意味する。すなわち、時間  $(t, t + \tau)$  における呼の総保留時間  $T(t, \tau)$  がトラヒック量である。ある時刻  $t$  における接続中の呼数は同時接続数  $N(t)$  で表せる。すると、次の関係が成立する。

$$T(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} N(x) dx \quad (1)$$

上記のトラヒック量は、観測時間によって変わり、長時間観測すればいくらでも大きくなる。そこで、観測時間  $(t, t + \tau)$  内のトラヒック量  $T(t, \tau)$  を単位時間あたりに換算して、

$$a(t, \tau) = \frac{1}{\tau} T(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} N(x) dx \quad (2)$$

を定義する。これを時間  $(t, t + \tau)$  の呼量と呼ぶ。時刻  $t$  の呼量は、観測時間を十分短くとれば、

$$\begin{aligned} a(t) &= \lim_{\tau \rightarrow 0} a(t, \tau) \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} N(x) dx \\ &= N(t) \end{aligned} \quad (3)$$

となり、同時接続数  $N(t)$  と一致する。

呼量の単位としてはアランを用いる。一般に、呼量は、時間  $t$  の関数であるが、一般に一定値と考えることが多いので、以後  $a$  で表す。例えば、1時間当たり3つの呼があって、それぞれの保留時間が5分、10分と15分であれば、総延べ保留時間は30分となるから、呼量は30分/60分=0.5アランとなる。

呼量は次の性質を有する：1) 単位時間当たりの呼の発生数を  $c$ 、平均保留時間を  $h$  とすれば、呼量  $a$  は  $a = ch$  (上記の例で言えば、 $c = 3/60(1/分)$ 、 $h = 30/3(分)$  となり、 $a = 0.5$  アランとなる) で与えられる。2) 呼量は、平均保留時間当たりに発生する呼数に等しい。3) 1回線が運ぶ呼量は、その回線が使用中の確率(時間的な割合)に等しい。4) ある回線群が運ぶ呼量は、使用中の回線数(同時接続数)の平均値に等しい。

さらに、呼について議論するには、呼の生起と終了(あるいは保留時間)に関する確率モデルが必要なことは言うまでもない。

#### b) 電話網

通信網は、通信端末装置、伝送路と交換機で構成されている。ここで扱う通信網は電話網であるので、端末は電話機である。伝送路は有線と無線に大別されるが、ここでは有線伝送路を対象とする。さらに、通信伝送路は、市内伝送用、市外伝送用と国際伝送用よりなる。本研究では、加入区域内の通信網である市内電話網を取り扱う。市内伝送路は、電話局(あるいは交換所)から加入者宅までの加入者ケーブルと局間中継用の中継ケーブルからなる。中心部では洞道や管路内を通した地下ケーブルが多いが、末端部では地上に立上げ、加入者ケーブルは架空ケーブルとして各加入者宅に配線される。加入者線まで含めて市内電話網をモデル化すると、複雑になる。そのため、以下の解析では、局と交換所間の局間中継網を取り扱う。

図1は、数値計算の対象とした市内電話網を示したものである。図中、交換機のある交換局(T支社)はノード5で、無人の交換所はノード1~4と6~16で示す。リンクで表す伝送路には番号を付けている。図より、ノード間は1つ以上のリンクで連結されていることがわかる。

図1の電話網には対地回線方式が導入されている。交換局と交換所あるいは交換所間のリンクには複数の中継ケーブルが含まれている。各中継ケーブルに対し、交換局から連結可能な中継交換所は異なる。すなわち、対地回線方式とは、伝送路を構成するリンクに、交換局からの接続先である交換所に対し、異なるケー

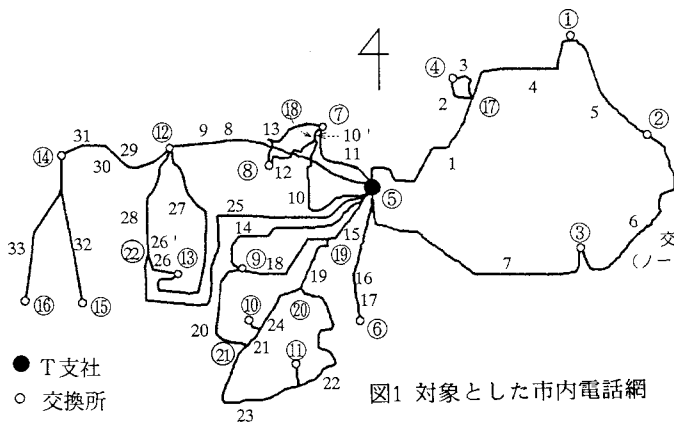


図1 対象とした市内電話網

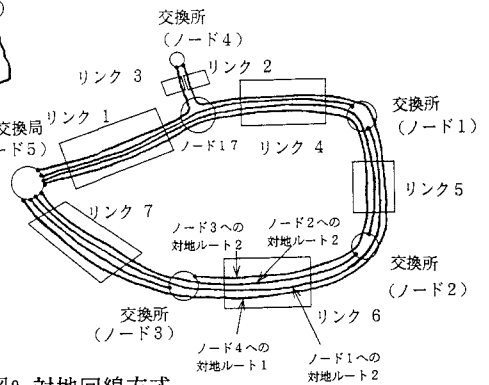


図2 対地回線方式

ブルを設置する方式である。交換局5からの対地交換所(ノード)は15あり、交換局と各交換所間には複数(2あるいは3)の対地ルートがある。図1において、交換局よりも東側に位置する各交換所の対地ルートを具体的に図示すれば、図2のようになる。これより、例えば、リンク1には、交換局と4つの交換所(1, 2, 3と4)を接続する中継ケーブルが混在していることがわかる。このリンク1の回線が切断されても、リンク7を経由する南回りの対地ルートが健全であれば、各交換所への電話の伝送は可能である。

各リンクには、両端の接続ノード番号、回線総数と対地回線数を与えておく。発信接続と着信接続のためには2対の回線が必要である。そのため、ここでは回線数をペアで取り扱う。なお、トラヒック解析も含めて、通信回線網のモデルやパラメーターの詳細を記すにはかなりのページ数が必要なため、ここではこれらを割愛する。

対地回線数は、交換局から接続されている単一のあるいは複数の対地ルートの末端に位置する対地交換所のノード番号に対して、割り当てて。例えば、リンク6には、交換局5からノード1への対地ルート2、ノード2への対地ルート2、ノード3への対地ルート2とノード4への対地ルート1に対する対地中継回線が混在している。それぞれの対地回線数は115, 21, 40と64であり、リンク6の回線総数はそれらの合計である240となる。なお、対地ノード14~16において、対地ルートを構成しているノード間の回線数は同一ではない。例えば、対地ノード16の対地ルートは3つあり、その対地ルート1はリンク9(回線数8)と29(回線数10)で、対地ルート2はリンク8と30(回線数はともに11)で、対地ルート3はリンク25, 28(ともに、回線数は19)と31(回線数25)でノード14に至り、ノード14とノード16間がリンク33(回線数46)で接続されている。このような場合、対地ルートを構成している直列リンクの最小回線数がトラヒック解析で用いられることになる。従って、対地ルート1は8回線、対地ルート2は11回線、対地ルート3は19回線となる。このような対地回線方式は、通信回線を大群化して、能率向上を図るために導入したものである。

大群化効果によれば、呼損率(後述)を一定とすると、回線数が多くなるほど、能率が大きくなり、経済的となる。すなわち、物理的には、多くの呼源に対して出線を共用させれば、各呼源からの接続要求がぶつかり合う確率が小さくなる<sup>8)</sup>。さらに、同時接続数の分散は平均値に対して相対的に小さくなる。その結果、大群化すればするほど、多くの呼の処理が可能となる。ここでは、このような回線の大量化を、交換所の14~16に導入している。

呼量  $a_k$  は各リンク  $k$  の回線総数  $s_k$  から計算できる。ただし、呼損率  $B$  を1%にして、平常時呼量は次式を満たすように求める。この式はアランの損失確率式の  $B$  式である。

$$B = \frac{a_k^{s_k}}{s_k!} / \sum_{j=0}^{s_k} \frac{a_k^j}{j!} \quad (4)$$

これより、対地ルート  $i$  の回線数  $s_i$  を与えれば、呼損率  $B$  の関数として、対地ルート  $i$  の呼量  $a_i$  は式(4)か

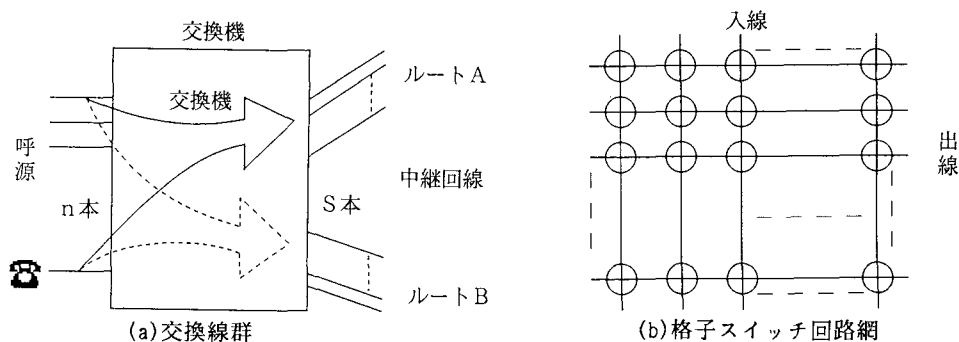


図3 交換機の構成

ら計算できることになる。すなわち、各交換所と交換局間の対地ルートの平常時呼量は、呼損率に応じて、式(4)から得られる。

### c) 交換機

図3(a)には、交換局の交換機、それに接続された中継回線とそのトラヒック入力源である呼源を示す。これは、 $n$  本の入線(呼源)と出線数  $s$  の電話交換システムである。入線と出線よりなる接続システムは交換線群と呼ばれる。交換機はどんなに混んでいても、加えられた呼を完全に所望のルートに接続してくれるものと仮定してもよい。このようにどの入線からでも空き出線に接続できるものが完全線群、そうでないものが不完全線群である。出線または交換線群の内部が塞がっていて接続できないトラヒックの混雑状態が輻輳である。交換線群のうち、輻輳のために呼の接続が行えないとき、直ちに接続を断念する方式は即時式、接続の順番がくる(空き出線が生じる)まで待たせる方式は待時式と言う。即時式で拒絶された呼は損失呼、損失呼の割合は呼損率と呼ばれる。本研究では、以下の解析のフェーズ1で即時式完全線群モデルを、フェーズ2で即時式不完全線群モデルを取り扱う。

交換機の役割としては、ルーティング、スイッチングや通信サービスの実行と通信網の管理などが挙げられる。ルーティングとは、ダイヤル情報に基づいて、発信局から着信局に至る中継ルートを選択する機能である。スイッチングとは、選択された中継ルートの中から1回線を選択し、接続する機能である。

ルート選択に関する制御、すなわち通信網制御とは、発信局から着信局に至る接続ルートが複数本選択できるとき、それらをどのような順序や方法で選択すべきかという問題である。ルート選択方式は、固定中継方式、ランダム中継方式、迂回中継方式と適応型中継方式に分類される。本研究では迂回中継方式を採用する。この方式では、発信局と着信局の組に対して予め複数呼の接続ルートすなわち対地ルートを定めておき、所定の順序で選択を行う。選択の順序は、例えば、最も経済的なルートを優先的に選択し、そのルートの回線が全話中ならば、次の順位のルートを選ぶというように決める。

交換機を特徴づける最も重要な役割はスイッチングである。交換機はスイッチ回路網と制御回路よりなる。多数のスイッチを組み合わせるネットワークを構成し、多数の入線と多数の出線の間を任意に切換接続する装置がスイッチ回路網である。図3(b)は現在最も広く使用されている格子スイッチである。これを用いれば、複数の加入者線を少なくとも2本以上の出線に分配接続することができる。スイッチ容量は普通 $8 \times 8$ 程度の容量が最適である。しかし、これでは多数端子の加入者線を収容できないので、この格子スイッチはリンク接続回路網として実現すればよい。本研究では、図3(b)のスイッチ回路網を構成して、回路交換方式をとる。

### (2) 回線留保方式による迂回中継システム

多元トラヒックとは、同一の設備を共有する2種以上の異なる呼である。多元トラヒックモデルは、1) 到着間隔や保留時間の異なる呼の混在する場合、2) 即時呼と待時呼が混在する場合や3) 情報の伝送速度の異なる呼が混在する場合などに現れる。本研究では、このうち、1)のトラヒックについて解析する。

2つの呼の呼損率に差があれば、それは通信サービスの不均衡につながる。サービス上の不均衡を是正するため、本研究では回線留保方式を用いる。これは、優先呼のサービスを保証するために、ある呼を接続する際、それより優先権の高い呼の生起に備えて、何本かの空き回線を留保しておくシステムである。

図4は、交換所Aから交換局Cへの中継接続を示した迂回中継システムである。Bは中継交換所である。最初に、回線数  $s_1$  の斜めルート(A → C)を選択し、空き回線があれば、これに呼量  $a_1$  が加わる。しかし、

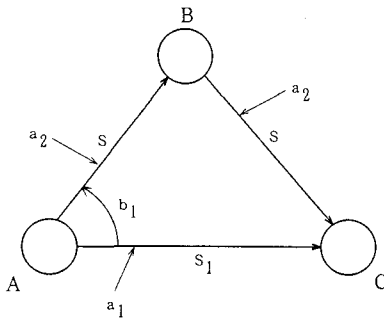


図4 迂回中継システム

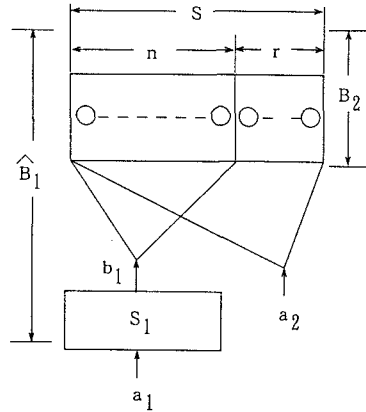


図5 回線留保システムのトラヒックモデル

斜めルートが全話中のとき、この回線群から溢れた呼量  $b_1$  は回線数  $s$  の迂回ルート ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ) で運ばれる。迂回ルートには固有の呼量  $a_2$  が存在する。

溢れ呼は迂回ルートで運ばれるために、迂回ルート固有の呼量  $a_2$  に比較して、サービスがよくなりすぎる。このようなサービスの不均衡を是正するため、迂回ルート  $s$  回線の中の  $r$  回線を迂回ルートに加わる呼  $a_2$  専用に留保し、サービスを改善する。ここでは、 $a_2$  を優先呼、 $b_1$  を普通呼とする。  $r = s - n$  とし、斜めルートと迂回ルートの同時接続数 (系内呼数) を、それぞれ、 $i (0 \leq i \leq s_1)$  と  $j (0 \leq j \leq s)$  とすれば、呼の接続条件は次のようになる<sup>9)~11)</sup>。この場合、即時式2元回線留保システムのトラヒックモデルは図5のようになる。

- 1) 斜めルート ( $s_1$ ) に加わる呼 ( $a_1$ ) は、 $i < s_1$  ならばサービスされ、 $i = s_1$  ならば普通呼 ( $b_1$ ) として迂回ルート ( $s$ ) へ迂回する。
- 2) 迂回ルートに加わる呼は、優先呼 ( $a_2$ ) として  $j < s$  ならばサービスされ、 $j = s$  ならば呼損となる。普通呼 ( $b_1$ ) は  $j < n$  ならばサービスされ、 $j \geq n$  ならば呼損となる。迂回ルートに対して、 $r (= s - n)$  回線が留保されることになる。

このシステムの状態は、斜めルートと迂回ルートに存在する呼数 ( $i, j$ ) によって表すことができる。平衡状態における状態 ( $i, j$ ) の確率を、 $P_{i,j}$  とする。平衡状態方程式は、 $rate-out = rate-in$  の関係から得られる。斜めルートと迂回ルートの呼の生起率を  $\lambda_1, \lambda_2$  とし、呼はポアソン過程に従って生起するとする。また、保留時間は同一の平均値  $\frac{1}{\mu}$  の指数分布に従うものと仮定する。このとき、呼量は  $a_i = \lambda_i / \mu$  となる。

以上より、本研究では、状態推移図を作成し、次式の状態方程式を導いた。ただし、状態空間 ( $0 \leq i \leq s_1, 0 \leq j \leq s$ ) 以外の  $P_{i,j}$  は0とする。なお、文献10)にも状態方程式が示されているが、式(5)の  $a_i$  が  $\lambda_i$  となっている。これは、単純なミスを犯しているのではないかと考えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 (a_1 + a_2 + i + j)P_{i,j} &= a_1 P_{i-1,j} + a_2 P_{i,j-1} + (i+1)P_{i+1,j} + (j+1)P_{i,j+1} \\
 &\quad (0 \leq i < s_1, 0 \leq j < s) \\
 (s_1 + j + a_1 + a_2)P_{s_1,j} &= a_1 P_{s_1-1,j} + (a_1 + a_2)P_{s_1,j-1} + (j+1)P_{s_1,j+1} \\
 &\quad (i = s_1, 0 \leq j < n) \\
 (s_1 + j + a_2)P_{s_1,j} &= a_1 P_{s_1-1,j} + \{a_1 I_{(j=n)} + a_2\} P_{s_1,j-1} + (j+1)P_{s_1,j+1} \\
 &\quad (i = s_1, n \leq j < s) \\
 (i + s + a_1)P_{i,s} &= a_1 P_{i-1,s} + a_2 P_{i,s-1} + (i+1)P_{i+1,s} \\
 &\quad (0 \leq i < s_1, j = s) \\
 (s_1 + s)P_{s_1,s} &= a_1 P_{s_1-1,s} + \{a_1 I_{(n=s)} + a_2\} P_{s_1,s-1} \\
 &\quad (i = s_1, j = s)
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、

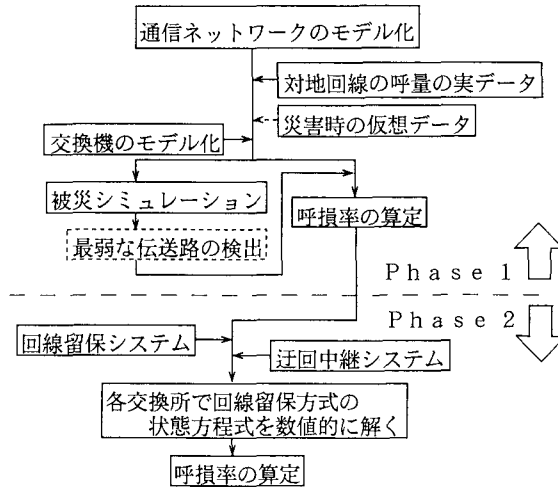


図6 通話機能の感度分析のためのフロー

$$I_{(L)} = \begin{cases} 1; & L \text{ が真のとき} \\ 0; & L \text{ が偽のとき} \end{cases}$$

上式は  $P_{i,j}$  に関する連立方程式である。本研究では、その係数行列をLU分解し、クラウト法を用いて、数値的に解くため、科学用サブルーチンライブラリーSSIIのLAXサブルーチンを用いる。

$P_{i,j}$  が求まると、斜めおよび迂回ルートを含めた総合呼損率  $\widehat{B}_1$  と迂回ルートに対する呼種別呼損率  $B_2$  は、それぞれ、次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \widehat{B}_1 &= \sum_{j=n}^s P_{s_1,j} \\ B_2 &= \sum_{i=0}^{s_1} P_{i,s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$a_1$  に対する総合呼損率と  $a_2$  に対する呼損率を算出することにより、それらが迂回中継システムに及ぼす影響や、呼量と呼損率の関係を定量的に分析することができる。なお、文献11)と12)には呼種別呼損率の近似式が示されている。しかし、ここでは、状態方程式の数値解法による厳密解析によって、呼種別呼損率を求める。

### (3) 被災時の機能損失量の感度分析

本研究では、2つのフェーズを踏むことにより、電話網の機能損失に関する定量的な分析を試みる。図6は、本研究で提案する通話機能シミュレーションのフローチャートを示したものである。

フェーズ1では、伝送路に被災パターンを想定し、平常時の通話機能と比べて、被災時機能の低下に及ぼす最弱な伝送路を検出する。このことから、電話網全体の通話機能に対する感度分析を実施することができる。すなわち、フェーズ1では、通信施設の物理的被害が通話機能(呼量や損失呼)に与える影響を調べることができる。一方、フェーズ2では、電話網の物理的被害はないが、平常時呼量よりも多数の呼量が発生すると考える。これより、異常輻輳という機能的被害が電話網全体の通話機能に及ぼす影響を定量的に検討することができる。ここでは、呼量や留保回線数をパラメーターとし、回線留保方式による迂回中継システムが電話網の呼損率に及ぼす影響を定量的に分析する。

以上からわかるように、フェーズ1は緒言で述べた世田谷のケーブル火災の、フェーズ2はロマプリータ地震のときの災害事例を勘案して分析するために導入するものである。

解析の対象とする電話網は、2.(1)b)で述べたように、図1のようである。各交換所での発呼は、対地ルートにより、交換機のあるノード5を必ず経由し、任意の交換所に着呼すると言う特徴を有する。ノード5以外のノードには、スイッチング機能を有する交換機が設置されていない。交換機は、一般に、多段構成のリンク接続回路網よりなる。しかし、ここでは、機能的な面からも一般性を失うことがないと考え、図3(b)に

示す単一の格子スイッチ回路網によって、交換機をモデル化する。ここでは、スイッチ回路網を複雑にする  
と問題の本質を見失う恐れがあると考え、最も単純な格子スイッチを想定した。この場合、入線数と出線数  
は同一と考え、それらを交換局から交換所までの計 35 の対地ルートの回線総数(1882)で表す。スイッチ回  
路網は普通 8×8 程度の容量のものが多く、これを組み合わせてリンク接続回路が構成される。従って、本研  
究で考えたスイッチ回路網はハード的に存在しないことを予めことわっておく。

以下には、フェーズ 1 とフェーズ 2 の分析手順を具体的に示す。

#### a) 被災電話網の交換能力を考慮したときの呼の計算

通話機能を検討するために、発呼および着呼は、各交換所において、また対地ルートに拘らず、独立、一  
様かつランダムに発生すると仮定する。すなわち、呼の発信交換所と着信交換所の位置およびルーティング  
とスイッチングの機能は互いに独立であり、その発生確率は電話網のどのノード位置においても等しく一  
様でランダムであるとする。このようなランダムな呼の生起は現実的ではないが、ここでは数値分析を試みる。

各交換所から交換機を有する交換局のノード 5 までは、図 2 の如く、2 つまたは 3 つの対地ルートで構成  
されている。各対地ルートの回線数は異なる。ここでは、上記の仮定により、モンテカルロ法を用いて、接  
続ルートや着信交換所を決める。

まず、各交換所ごとに、発信接続をする。それには、各交換所の各対地ルートの各回線に対して  $[0, 1]$  の一  
様乱数を発生させ、0.5 以上ならば発信接続がされたものと見なす。0.5 以下の乱数値を有する回線は、通話要求  
のない空き回線となる。次に、発信接続回線に対して、着信交換所を決める。ノード 5 を除くノード 1~4 と  
ノード 6~16 は、いずれも、等しい確率で、着信交換所となりえる。すなわち、通話要求が発生した回線に  
対しては、再び、1~4 と 6~16 の数よりなる一様乱数を割り当て、着信交換所を決定する。なお、発信交換  
所は着信交換所となりえることに注意されたい。これより、交換機に対する入線と出線の同時接続数が計算  
できる。その結果、同時接続数は対地ルートの回線数を超過することがある。その呼は、輻輳のために呼の  
接続が行えないとき、直ちに接続を拒絶された呼、すなわち損失呼となる。通信回線で処理されたトラヒッ  
ク量から、各交換所ごとの呼量も得られる。

上述のシミュレーションは、1) 発信局から着信局に至る中継ルートを選択するルーティングと 2) 選択され  
た中継ルートの中から 1 回線を選択し、接続するスイッチングの機能を果たす交換機の役割を果たしている。  
すなわち、図 3(b) の交換機のスイッチ回路網の特性を活かすことにより、多数の入線と多数の出線の間を任  
意に切換接続することができる。

以上の平常時通話機能のシミュレーションアルゴリズムは、被災電話網の機能評価にもそのまま適用でき  
る。ただし、交換所と交換局の被害は考えず、伝送路のみに被害が発生すると仮定する。単一または複数の  
伝送路の被害を想定すると、そのリンクを含む対地ルートの回線は機能しないことになる。その結果、被災  
電話網に対し、ランダムなルーティングとスイッチング機能を実施すれば、被災時の呼量や損失呼が計算で  
きるようになる。

#### b) 回線留保迂回中継システムの導入による通話機能の向上

発信局から着信局に至る接続ルートが複数本選択できるとき、それらをどのような順序や方法で選択する  
かが問題となる。2.(3)a) で述べた機能評価シミュレーションは、このようなことを考慮してない。そのため、  
交換線群には損失呼が生じる。まず、最初に第 1 対地ルート上の回線を選択し、空き回線があればこれ  
に接続するが、もしこの回線が全話中のときには迂回回線経由で接続すれば、どうなるだろうか。迂回中継  
回線(迂回ルート)に加えらる呼は、直通回線(斜めルート)を溢れた呼である。

ここでは、2.(2) で述べた迂回中継システムを各交換所に導入し、各ノードごとの呼損率を算出する。図 4  
には、交換所 A から交換局 C までの斜めルートと迂回ルートを示している。同図において、中継交換所は迂  
回ルートにあるが、斜めルートには存在しない。しかし、本研究で対象とした電話網は複数の対地ルートを  
有しているため、交換所間の対地ルート上には、交換局を介して、単一のあるいは複数の中継交換所が存在  
する。そこで、各対地ノードの対地ルート 1 を斜めルート、対地ルート 2 を迂回ルートと考える。

式(5)は、単一の交換所について、斜めルートの接続数  $i$  と迂回ルートの接続数  $j$  に対する状態方程式を示  
すものである。この状態方程式は、図 1 における 15 の交換所の対地ルートの回線数ごとの組み合わせに対し  
て、誘導できる。このような手続で呼種別呼損率を得るためには、大規模な連立方程式を数値的に解いて、



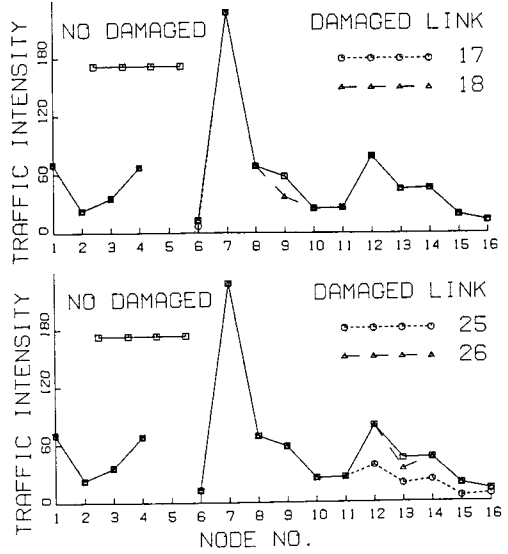
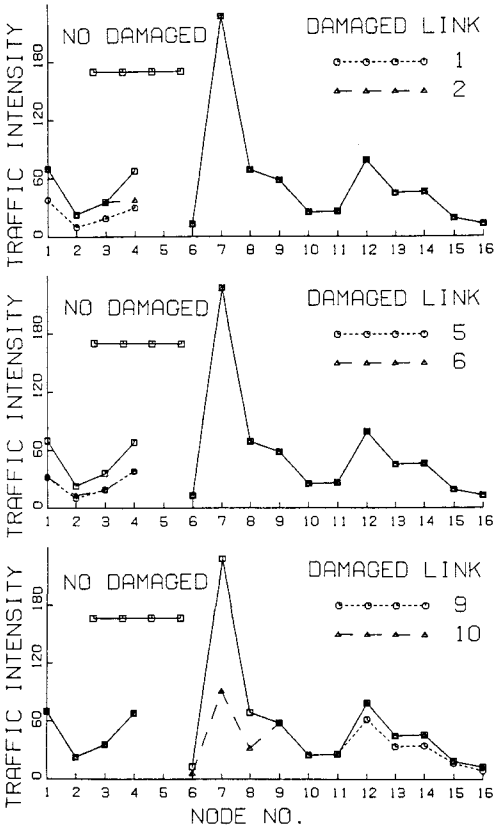


図7 平常時および1リンク被災時のノード別呼量

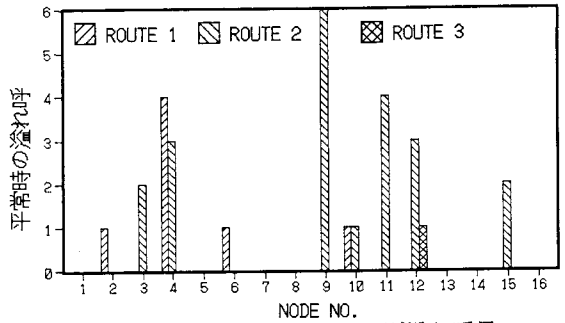


図8 平常時におけるルート別溢れ呼量

厳密解を求める必要がある。

ここでは、対地ルート上の呼量  $a$  や迂回ルートの留保回線数  $r$  をパラメーターとし、迂回中継システムが対象ネットワークの呼損率に及ぼす影響を定量的に分析する。呼量については、平常時呼量、その5倍、10倍と100倍の呼量を考える。1983年の日本海中部地震時の三多摩地区から秋田への通話呼量は、平常時の96倍であった。また、電話局の担当者によれば、30倍の呼量は異常なことではないらしい。このようなことを考えて、ここでは4つの呼量を設定した。一方、留保回線数  $r$  としては、迂回ルートの回線数  $s$  の0.2、0.5と0.9倍の回線数を仮定する。

### 3. 通話機能の感度分析の結果

#### (1) 被災伝送路が呼量に及ぼす影響

2.(3)a) で述べたシミュレーション法により、平常時の呼量と溢れ呼量を求めると、図7と図8のようになる。平常時呼量(図7の実線)は、スイッチ回路網における入線と出線の接続状況に依存するが、各交換所の回線数にはほぼ比例している。これは、ルーティングとスイッチングの機能の独立性・一様性を仮定して求めたからにはほかならない。なお、 $m$  回線からなる通信回線で運び得るトラヒックは最大  $m$  アーランで、それ以上は運べない。このことは図7の平常時呼量に反映している。

図8は、各交換所の対地ルートごとの損失呼を示したものである。なお、交換機において、各交換所の発信接続・着信接続には、対地ルート1→対地ルート2(→対地ルート3)→対地ルート1→対地ルート2(→対地

ルート3)…のように、各対地ルート別の回線の順序で、ルート選択を行う方式をとった。複数ルート(図中には3ルートまで示す)によって交換局ノード5と接続しているとき、そのルートごとに、平常時においても、損失呼が生じていることがわかる。伝送路が被災していても、通話要求の相手加入者までの回線が使用中か、もしくは交換機内で着信交換所に至る出線に接続されない(回線が全塞がりだと)、通話要求は断たれ、損失呼が発生することになる。

災害すなわち広域に亘って障害が同時に多数発生するような場合を想定し、災害後に生き残った電話網の機能について検討する。ここでは、特に、リンク被災を考える。このような方法によって機能面で最弱な伝送路を検出することは、さらに複数のリンクが被災したときの確認を行う際に有用である。すなわち、単純な被災状況を考え、それが基本的である程、得られた結果は電話網の特性の一面を表すと考えられる。

図7より、33リンクのうち代表的な1リンク(1, 2, 5, 6, 9, 10, 17, 18, 25と26)が被災したとき、平常時呼量に対して、ノードごとの被災時呼量がどのように変化するかがわかる。被災リンクが存在すると、ノード別の呼量は平常時呼量よりも低下しているが、その低下量は被災リンクによって異なる。被災リンク1, 5と6は、電話網の東側に位置しており、ループ(リンク1, 4, 5, 6と7よりなる)を形成している。交換局と各交換所間の2ルート化も施されているので、ループの信頼性は高くなる。被災リンク1と5が呼量の低下に及ぼす影響はほぼ同一である。仮想ノード17と交換所4間はリンク2と3で構成されている。そのため、ループを形成するリンク1, 5と6の重要度が高いのに対し、被災リンク2の重要度は低い。

多数の加入者を含む交換局5を除いた電話網において、交換所7の加入者数は他の交換所に比べて多い。そのため、交換所7の回線数486は多くなっている。リンク10の回線数は402と多いため、このリンクが被災し、回線が全断の事態になれば、呼量の低下はかなり大きくなると考えられる。リンク9の回線数は102と比較的多い。リンク9が被災すると、交換局と交換所12は、対地ルート2が不使用となるものの、他の2つのルートが確保されるために、接続できる。このような理由のため、被災リンク9が呼量の低下に及ぼす影響は少ない。

交換局から交換所6と9までは2ルート化されており、そのうち1つのルート上にリンク17とリンク18がある。これらの回線数は17と48である。このため、リンク17と18が被災しても、電話網全体に及ぼす通話機能の損失量は少ないので、平常時呼量と被災時呼量は極端に違わない。リンク26は、仮想ノード22と交換所26間の伝送路であり、交換所13にのみ影響を及ぼす。従って、被災リンク26は、電話網全体に悪影響を及ぼさない。リンク25は、交換局から5つの交換所(12~16)に至る中継リンクとなっている。そのため、リンク25の被災により、電話網の西側に位置する交換所の呼量低下が著しくなる。

図9は、被災リンク番号を横軸にとり、各被災リンクに対し、各ノードの平常時呼量と被災時呼量の差を計算し、全ノードにおける呼量の差の総和を縦軸に示したものである。同図より、電話網全体の通話機能の低下に強く影響を及ぼす被災リンクを特定化することが可能である。

被災リンク10に対する呼量の低下が著しい。次に呼量の差が大きくなるのは、リンク11が被災したときである。これは、伝送路の中で、リンク10の回線数(402)が最も多く、次いで270回線のリンク11となっているからである。複数の被災リンク(1, 4, 5, 6と7)に対する呼量の差は同程度である。これらのリンクは、240~256回線と、回線数に極端な差もなく、ネットワークの東側のノード(1, 2と3)を介して、ループを形

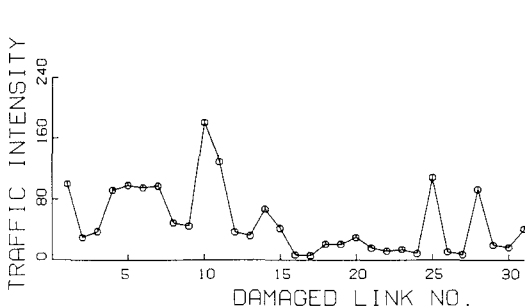


図9 平常時呼量と1リンク被災時呼量の差

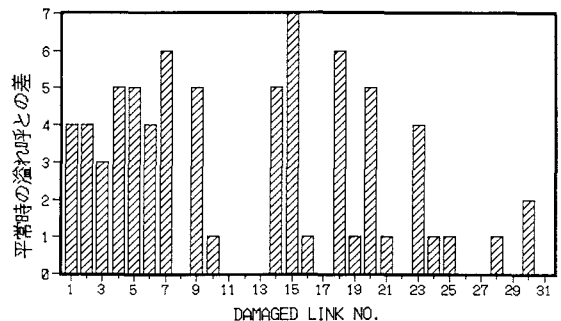


図10 1リンク被災時と平常時の溢れ呼の差

成している。このようなことから、いずれのリンクが被災しても、ほぼ同一の呼量の差が得られるのである。リンク 25 と 28 の被災による呼量の低下は大きい。これは、245 と 220 の回線数を有しており、しかも西側のノード (12~16) への中枢接続回線となっているためである。従って、以上述べたリンク (1, 4~7, 10, 11, 25 と 28) の物理的被害は、電話網全体の通話機能の低下に悪影響を及ぼす。一方、16, 17, 21~24, 26 や 27 のリンクが被災しても、呼量の低下はそれほど大きくない。これは、これらリンクの回線数が少ないということもあるが、ノード 6, 10, 11 や 13 の交換所のみに影響するからである。

以上から、伝送路の物理的被害に伴う通話機能の損失は、電話網の形状、対地ルート回線の構成および回線数に強く従属していることがわかる。

図 10 は、被災リンクを横軸にとり、被災時と平常時における電話網全体の損失呼の差を縦軸に示したものである。これより、10 リンク (8, 11~13, 17, 22, 26, 27, 29 と 31) の被災が発生しても、平常時と被災時における損失呼の変化は見られないことがわかる。一方、リンク 15、7 や 18 などが被災すると、平常時に比べて、電話網全体の損失呼は増大する。損失呼を発生し易いリンクの被災は、異常輻輳を引き起こす可能性がある。従って、図 10 の結果は、機能損失を抑えるために、電話網の回線数を変更する際に有用な資料となりえる。

次に、2 リンク被災時における通話機能について分析する。本来ならば、リンク数  $n$  の中から 2 つのリンクを選ぶ組み合わせ、すなわち  $nC_2$  通りの被災パターンについて検討しなければならない。 $n=33$  だと、528 通りの被災電話網が考えられ、これらについて分析を行うのは容易ではない。そこで、本研究では、平常時に対する被災時の呼量と損失呼の変化 (図 9 と図 10) を勘案して、その変化量の大きいリンクと小さいリンクを選び、被災リンクの組み合わせを考えた。被災電話網の被災リンクは、(1, 2)、(1, 7)、(1, 10)、(1, 14)、(1, 16)、(1, 25)、(2, 3)、(2, 6)、(2, 10)、(2, 16)、(2, 25)、(10, 6)、(10, 16)、(10, 25)、(16, 5)、(16, 20) と (25, 28) よりなる。

図 11 には、仮定の 2 リンク被災電話網に対する平常時呼量と被災時呼量の差を示す。同図より、被災リンク (1, 10)、(10, 6) と (10, 25) による呼量の変化の大きいことがわかる。これは、前述したように、多回線のリンク 10 に左右されるからである。なお、図 9 と図 11 から、ネットワークの冗長性により、平常時の呼量に比べて、2 リンク被災時呼量の変化は、2 つの単独リンクに対する被災時呼量の変化の和にはならない。被災リンクの組み合わせから、電話網全体の通話機能に支配的な伝送路か、あるいは並列の多重伝送路が同時に被災しているときに、呼量の低下が最も大きくなることがわかる。

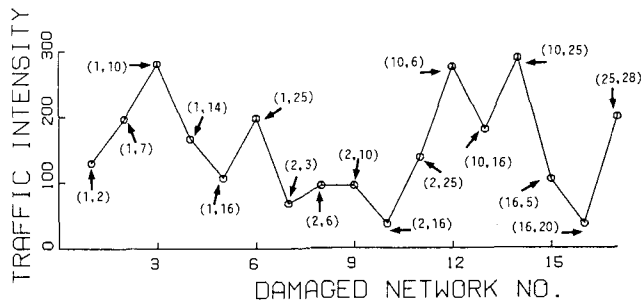
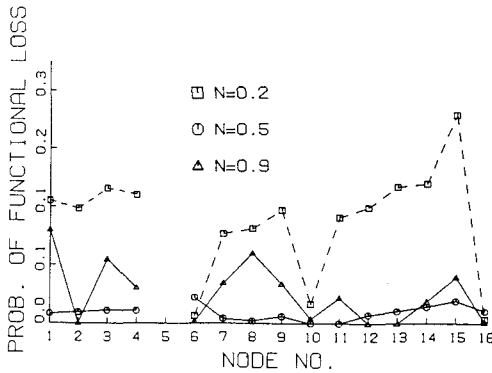


図11 平常時呼量と2リンク被災時呼量の差

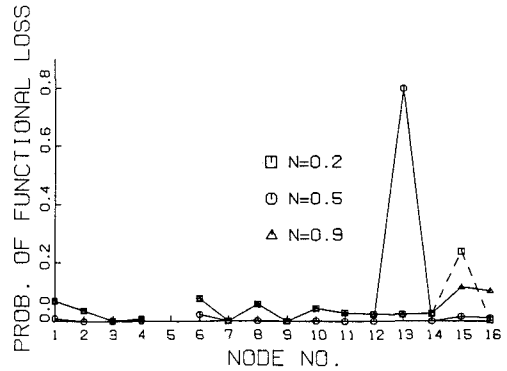
## (2) 迂回中継システムが呼損率に及ぼす影響

図 4 のような単純な迂回中継システムに回線留保方式を適用し、呼種別呼損率 ( $\widehat{B}_1$  と  $B_2$ ) をある規定値に等しく設計する場合を考える。このとき、迂回ルートの回線数  $s$  は、斜めルートの回線数  $s_1$  の増加に伴い、減少する。これは、斜めルートの回線数が増えると、斜めルートの呼の溢れが少なくなるためである。斜めルートの回線数が増すと、 $\widehat{B}_1$  は小さくなる。これに対応して、 $B_2$  は低下しなければならないので、留保回線数  $r$  は増加する。

文献 10) と 11) では、留保回線数  $r$  を適当に定めることによって、呼種別呼損率を規定値とし、斜めルートと迂回ルートの回線数よりなるシステムコストを最小化する最適設計を実施している。それによれば、1) 迂



(a) 斜めルートと呼損率



(b) 斜め・迂回両ルートの総合呼損率

図12 迂回ルートの留保回線数の比率が平常時の呼種別呼損率に及ぼす影響

回中継システムの中で、回線留保方式は部分迂回方式や専用回線前置方式よりも経済的に有利であり、2) システムコストを最小にする最適パラメーター、すなわち斜めルート回線数、迂回ルート回線数や留保回線数が存在する。これは図4のような単純なシステムの結果である。しかし、このような傾向は、一般に、本研究で対象とする複雑な電話網にも適合するものと考えられる。

図12は、平常時呼量に対し、迂回ルートでの留保回線数の比率  $N (=r/s)$  を0.2, 0.5 と0.9に変化させたときの呼種別呼損率 ( $\hat{B}_1$  と  $B_2$ ) である。図(a)には斜め・迂回両ルートを含めた総合呼損率  $\hat{B}_1$  を、図(b)には迂回ルートの呼  $a_2$  の呼損率  $B_2$  を示す。

図12より、 $N=0.2$ における各ノードの総合呼損率が一番大きく、 $N=0.5$ では小さくなっている。この傾向は、ノード(例えば、ノード2, 6, 12, 13と16)によって異なるが、おおむね成り立っている。 $N=0.9$ とは、斜めルートでの溢れ呼が迂回ルートで接続され、その接続回線数が迂回ルートの回線数の1割であることを意味する。 $N=0.9$ での呼損率が $N=0.5$ のそれよりも大きくなっているのは、次の理由によるものと考えられる。すなわち、 $N=0.9$ では迂回ルートでの溢れ呼を処理できず、そのため迂回ルートに損失呼が発生し、総合呼損率が $N=0.5$ のときよりも増えるからである。本例では、 $N=0.5$ すなわち迂回ルート回線の半分の回線を迂回ルートに加わる呼専用で留保すれば、サービスの不均衡を是正する上で効率的であることがわかる。もちろん、電話網全体のシステムコストから見て、最適な $N$ の値を推定することは容易ではない。しかし、本結果は、前述した例と同様に、最適な留保回線数が存在することを示唆している。

図12(b)において、 $N=0.5$ のときのノード13における迂回ルートの呼損率が大きくなっている。迂回ルートの回線数27に対し、迂回ルートに加わる呼において、優先呼( $a_2(13)$ )は迂回ルートの系内呼数 $j(13)=$ 迂回ルート回線数 $s(13)$ となっており、一方普通呼( $b_1(13)$ )は $j(13) \geq n(13)$ となっており、呼損する。ノード13の迂回ルートに加わる呼量とその回線数に比べて多いときは、迂回中継システムを導入しても、呼損率の低下に役立たないことを示している。

平常時の100倍の呼量が生じたときの、斜め・迂回ルートの総合呼損率と迂回ルートの呼損率を調べた結果、平常時(図12)に比べ、異常時の呼損率がかなり小さくなっていった。呼損率が小さいほど、システムに加わる呼量は出線の運ぶ呼量に近づく。そのため、迂回ルートの呼損率は、留保回線数比の影響をほとんど受けなかった。しかし、総合呼損率には、一部のノード(例えば2, 12と13など)で、 $N$ の違いが見られた。以上のことは、通信施設に物理的被害が発生せず、異常輻輳という機能的被害が生じて、迂回中継システムによる留保回線方式が通信トラヒック工学的に有用なことを示している。

留保回線数比 $N$ を0.2に固定し、呼量と呼損率の関係を調べたのが図13である。同図より、呼量が増加するにつれて、すなわち、平常時、平常時の5倍、10倍と100倍になるにつれて、呼損率は低下している。しかも、一部のノードを除くと、一般に、斜め・迂回ルートの総合呼損率は迂回ルートの呼損率よりも大きい。

平常時における呼損率に注目すると、1) ノード6と10における斜め・迂回ルートの総合呼損率は迂回ルートの呼損率よりも小さく、2) ノード15の呼損率が大きく、逆にノード16の呼損率は小さい。本研究で取り扱った電話網は、ネットワークの連結性の観点からは網状回線網を構成しているが、機能面から見ると、星

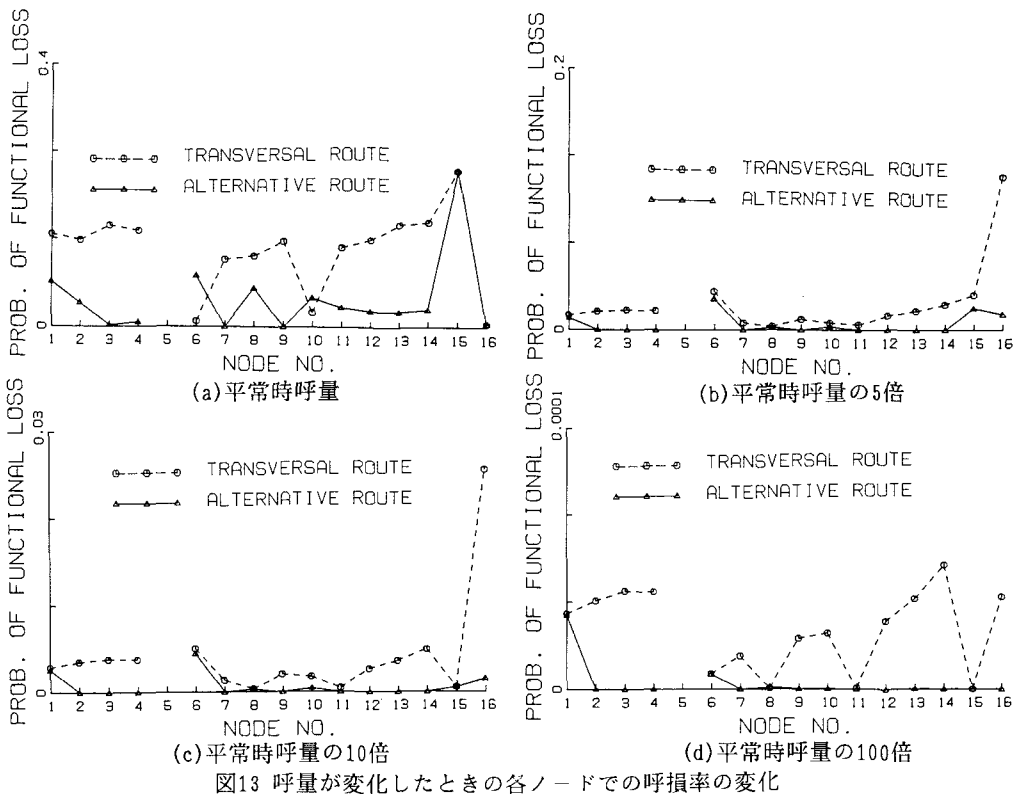


図13 呼量が変化したときの各ノードでの呼損率の変化

状回線網となっている。ノードの6、15や16の交換所はネットワークの末端に位置する。さらに、冗長性もなく、対地回線数が少なく、斜めルートの溢れ呼が迂回ルートに加わると、迂回ルートの呼損率は増加する。

迂回中継システムは、斜めルートと迂回ルートの呼損率の差を小さくして、サービスの不均衡を是正することに特徴がある。平常時の100倍の呼量が増加した場合、呼損率は小さくなっている。しかし、ノードごとの総合呼損率の差は大きく、しかも迂回ルートの呼損率との差が顕著である。一方、平常時の5倍の呼量に対する呼損率は平常時の呼損率の1/4程度であるが、斜め・迂回ルートによる呼種別の違いがあまり見られない。すなわち、平常時呼量の5倍程度の呼量が増加した場合、斜めルートと迂回ルートに対するサービスの不均衡が是正されていることになる。逆に言えば、異常な呼が生じるほど、呼損率は小さくなるものの、斜め・迂回ルート間の呼損率に差異が生じ、サービスの不均衡が発生する。

以上をまとめれば、次のようになる: 1) 回線数の多い伝送路の呼損率は、留保回線数に拘わらず、小さい。2) 呼量が増加するほど、呼損率は低下する。3) 回線数の少ない伝送路でも、呼量と迂回ルートの留保回線数の組み合わせにより、呼損率の低下するケースがある。4) 呼量が増加すると、迂回ルートに比べて、斜めルートの呼損率は大幅に低下する。5) 迂回ルートの留保回線数の増加によって、呼損率は必ずしも低下しない。6) ある留保回線数で呼損率は最小となり、迂回中継システムの最適解が存在する。

#### 4. 結言

21世紀の社会は、至る所に情報通信関連装置が配置され、それらが相互に複雑なネットワークを通して結び合わさった高度情報化社会となるであろう。便利さが増す反面、ネットワークのレベルダウンや途絶が起こりえることは、常に意識しておかなければならない。何故ならば、1984年11月16日の東京世田谷でのケーブル火災や1989年10月17日の米国サンフランシスコでのロマプリータ地震に見られるように、通信網は、通信施設の物理的被害や異常輻輳という機能的被害を受け易いからである。

災害時において都市機能が停止したとき、通信網は、円滑な復旧活動を行う上でも必要不可欠である。従っ

て、構造的および機能的観点からして、通信網を災害に強いシステムにしておくことは重要である。そこで、本研究では、交換機の交換能力を越えたときに起こる異常輻輳をできるだけ回避させるために、電話網に回線留保迂回中継システムを導入した。そして、通話機能の感度分析を実施することにより、迂回中継システムの有効性について検討した。

本研究の考え方および分析結果をまとめれば、次のようになる。

- 1) 市内電話網を考え、それをノード（交換局・交換所）とリンク（伝送路）によってモデル化した。交換局と交換所間には、伝送路の回線数に応じた対地ルートを設定した。対地ルートには、各リンクに着呼ノードの異なるケーブル回線を設置した。複数入線を複数出線に分配・接続する機能を持たせたスイッチング回路網は、交換局のみに設けた。
- 2) スwitchingとルーティング機能に関するランダムシミュレーションを実施し、平常時呼量と損失呼を求めた。次に、1リンクまたは複数リンクが物理的に被災したときの呼量を算出し、機能上から見た電話網の最弱な伝送路を検出した。その結果、ネットワークの冗長性や多重性により、被災リンクの位置が通話機能に及ぼす感度の異なることがわかった。
- 3) 2)の結果を受け、各交換所に回線留保迂回中継システムを導入し、異常輻輳に伴って発生する機能的被害を抑えることを考えた。これには、斜め・迂回ルートにおける同時接続回線数を状態量とする状態方程式を導き、呼種別呼損率の厳密解を数値的に求めることで評価した。呼量や留保回線数をパラメータとし、迂回中継システムが呼損率に及ぼす影響を定量的に分析した結果、本方式は機能損失を抑えるのに役立つことが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) (財) 未来工学研究所：情報化社会の Achilles 踵 —— 東京世田谷電話局における通信ケーブル火災の社会的・経済的影響 ——、昭和 61 年 8 月。
- 2) 山本千治：電気通信保全活動と改善計画、電気通信協会、昭和 60 年 3 月。
- 3) 野田茂：災害時における都市情報システムの保全研究、セキュリティ、第 15 巻、第 4 号、pp.12~17、平成 3 年 10 月。
- 4) 野田茂：道路網との相互関連性を考慮した電気通信システムの震後復旧過程、構造物の安全性および信頼性、Vol.2、JCROSSAR'91、pp.73~80、1991 年 11 月。
- 5) 東京都：いつか東京にも？ ロマプリータ地震東京都調査団報告、平成 2 年 2 月。
- 6) 例えば、中野雅弘：屋外通信設備の地震時挙動と耐震性に関する研究、京都大学提出博士論文、1990 年 10 月。
- 7) 秋山稔：通信網工学、コロナ社、昭和 59 年 7 月。
- 8) 秋丸春夫・ロバート B. クーパー：通信トラヒック工学、オーム社、昭和 60 年 2 月。
- 9) 秋丸春夫・川島幸之助：情報通信トラヒック —— 基礎と応用 ——、平成 2 年 8 月。
- 10) 小池剛・秋丸春夫・片山正昭：回線留保方式による回中継システムの最適設計、電子情報通信学会論文誌、Vol.J70-B、No.5、pp.1245~1248、1987 年 10 月。
- 11) 秋丸春夫・野田浩徳・奥田隆史：回線留保方式を適用した回中継システムの最適設計について、電子情報通信学会論文誌、Vol.J72-B-I、No.6、pp.463~467、1989 年 6 月。
- 12) Gall, F.L. and Bernussou, J.: Blocking probabilities for trunk reservation policy, IEEE Trans. on Communications, Vol.COM-35, No.3, pp.313~318, March 1987.

(1992 年 9 月 21 日受付)