

電話網の最適震後復旧予測のためのニューラルネットワーク

NEURAL NETWORKS FOR DETERMINING OPTIMUM POST-EARTHQUAKE
RESTORATION PROCESS OF TELEPHONE SYSTEM

野田 茂* 宮下仁志**

by Shigeru NODA and Hitoshi MIYASHITA

An effective procedure is presented for optimization of post-earthquake restoration process of telephone service. A mean field approximation annealing and alternative routing system with trunk reservation policy are combined to optimize the restoration process. A neural network of decision-making is modeled and formulated to minimize the likelihood of functional loss until repairs are completed. Functional optimization is considered a better measure than structural optimization. Statistical examples are presented to demonstrate the procedure proposed. Results show that the repair sequencing of damaged equipment and the restoration route can be effectively determined and that the neural system may be a very useful tool for determining restoration process.

1. 序論

現代都市は、さまざまな構造物や施設、交通・情報網や水道・電気・ガスの供給系などが相互に連結して、一つのシステムを構成している。都市災害の現代的特質は、このような市民生活に不可欠なライフラインに加えられた物理的・人為的損傷として捉えることができる。このようなことは、過去の災害事例を見れば、明らかである。

我が国の防災対策は、災害の発生を未然に防ぐ災害予防対策、災害が発生した場合に被害の拡大を防ぐ災害応急対策と災害からの早期復旧を図る災害復旧対策を、主な柱としている。災害情報の伝達という観点からも、被災した情報メディアの復旧は特に重要であろう。

電話通信システムの被害の多くは、加入者に近いところの電話機の破損、屋内線や引込み線の断線や電柱の傾斜などが主なものである。なお、多くの洞道配線においては、特に、軟弱な地盤での液化化現象などの地盤変状による被害が発生する。

1984年11月16日11時50分頃、世田谷電話局前の洞道内で発生した通信ケーブル火災は、高度な情報システムが災害にいかにか脆弱であるかを露呈した事件であった。17時間にわたって燃え続け、総計104条のケーブルが被害を受けた。その結果、一般加入電話約8万9千回線、専用・特定通信回線約3千回線などが、不通になった。このケーブル火災により、金融機関のオンラインやVAN業者、不動産の取扱業や出前をする飲食業などの一般事業所においても、大きな損害を被った。前者では約45億円の、後者では約86億円の被害額に達した¹⁾。

このような事例を見ると、災害時の電話機能においては、緊急情報連絡の確保がいかにか重要であるかが理解できる。もし、大都市に大規模な地震が発生し、電話通信システムに被害が生じるならば、その社会的影響は比較にならないほど大きい。コンピュータと通信が融合して、複雑な情報システムを形成している高度情報化社会は、一旦異常が発生すると、極めて脆弱なのである。その脆弱性に対し、システムのリスク分析

*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)

** 三菱電機(株)関西支社 情報通信システムエンジニアリング部(〒553 大阪市福島区福島3-14-24)

とリスク軽減法、安全対策や利潤と費用の分析などが、その復旧過程の研究をも含めて、行われるようになってきた²⁾³⁾。

災害時における情報システムの役割は、平常時における対策と訓練(第0期)、地震発生後における避難準備と避難誘導(第1期)、救援活動(第2期)と調査・復旧(最終期)に分類される。最終期の調査・復旧は、都市機能の早期復旧を図るためのものである。ここでは、1)被害状況の把握と将来へのデータの記録、2)本復旧のための情報疎通ルートの確保、3)公衆通信網の復旧手順の確立や復旧時の暫定的通信網の確保が図られる。本研究では、この最終期を対象として、被災した電話通信システムを速やかに復旧できるような方法を提案することを目的としている。

著者ら⁴⁾は、情報伝達手段としての電話の重要性に鑑み、被災電話網の最適復旧方策について検討してきた。復旧班が被災設備をいかに早く復旧すればよいか、また被災道路をどのように移動すればよいかという問題に対し、文献4)では、巡回セールスマン問題(組合せ的最適化問題)に対応させて、確定的な手法のHopfieldモデルによって、準最適解を求めた。しかし、この方法は、最適解が初期値に依存しており、効率化計算にはなっていない。また、電話のトラヒック面での考察が不十分であり、構造的だけでなく、機能的立場からの復旧の定式化がなされていない。

そこで、本研究では、1)電話網にトラヒック制御方策を導入して、通話機能の評価を行い、2)復旧の評価関数として、被災時と平常時における交換局と各交換所間の対地ルートの回線数や呼種別呼損率の変化量と復旧時間ならびに復旧完了時間などを考え、3)被災道路における復旧班の移動拘束条件を設ける。さらに、効率的な最適化計算を行うために、統計熱力学とのアナロジーを利用した平均場近似法を用いるとともに、極小解にトラップしないように、エネルギーに依存したクーリングスケジュールを伴うニューラルネットワークを構成する。そのため、2.(1)では巡回セールスマン問題の設定を、2.(2)では平均場近似アニーリング法を復旧予測に応用するための基本的な手順を説明する。3.では、震災復旧の最適化を行うために導入した評価関数を提示し、現場を反映した新たな試みを行う。

2. 平均場近似アニーリング法による巡回セールスマン問題の求解

(1) 巡回セールスマン問題

組合せ的最適化問題の例としては巡回セールスマン問題がある。今、平面上に m 個の都市 (A_1, A_2, \dots, A_m) が散在していて、セールスマンがこれらの都市を1回だけ通りながら、最初に出発した都市へ戻るルートを考えてみる。そのとき、都市を巡回するルートの長さとか、回るのに要する時間とか、あるいはそのときの費用などが求められる。このような量が最小となるようなルートを探し出す問題が、巡回セールスマン問題である。

ここでは、巡回セールスマン問題を解くために、Hopfield and Tank⁵⁾および文献6)に従い、3.のトラヒック解析に必要な基本的考え方のみを述べる。

今、 $\eta(i)$ を i 番目に訪れる都市とし、2つの都市 $\eta(i)$ と $\eta(i+1)$ 間の距離を $d(\eta(i), \eta(i+1))$ (あるいは $d(\eta(i+1), \eta(i))$) のように書き表す。すると、訪れる都市の順序は、 $\eta(1), \eta(2), \dots, \eta(m), \eta(1)$ となる。ただし、 η の中の変数は $\text{mod } m$ を意味する。つまり、 $m+1$ は 1 、 0 は m に等しいと考える。さらに、 0 と 1 の値をとる m^2 個の変数 $x(X, i)$ ($X = A_1, A_2, \dots, A_m$; $i = 1, 2, \dots, m$) を考え、 $\eta(i)$ から、

$$x(X, i) = \begin{cases} 1, & \eta(i) = X \text{ のとき} \\ 0, & \text{その他のとき} \end{cases} \quad (1)$$

を定義すると、ルート長 $L(\eta)$ の2倍は、次式のように、予め与えられた都市間距離 $d(X, Y)$ を係数とする x の2次式として得られる。

$$2L(\eta) = \sum_i \sum_X \sum_Y d(X, Y) x(X, i) \{x(Y, i+1) + x(Y, i-1)\} \quad (2)$$

式(2)の評価関数を最小にする x を探せばよいことになる。その際、解が意味のあるルートを与えるためには、 x のとる値に、ある制約が必要になる。1つは、同時に2都市を訪問できずかつ同じ都市を2度訪問しないという条件である。他は、各都市を全て1度ずつ訪れるという条件である。これらの拘束条件をペナルティとし、正の十分大きな定数 $(A, B$ と $C)$ を導入すると、次式の拡張された評価関数が得られる。

$$F(x) = A \sum_i \sum_X \sum_{Y(\neq X)} x(X, i) x(Y, i) + B \sum_X \sum_i \sum_{j(\neq i)} x(X, i) x(X, j)$$

$$+C\left(\sum_X \sum_i x(X,i) - m\right)^2 + \sum_i \sum_X \sum_Y d(X,Y)x(X,i)\{x(Y,i+1) + x(Y,i-1)\} \quad (3)$$

次に、式(3)のHopfield型の評価関数⁵⁾を多重1次形式に変換する。問題がニューラルネットで実現されるためには、式(3)が力学系のエネルギーに対応するように、多重1次形式に変換できなければならない⁶⁾。

式(3)の右辺第1項、第2項と第4項はべき乗の項を含まない。そこで、第3項に着目し、

$$1 = (1 - \delta_{XY}\delta_{ij}) + \delta_{XY}\delta_{ij} \quad (4)$$

を第3項に代入し、 $x(X,i)^2 = x(X,i)$ に注意すると、第3項は、

$$\left(\sum_X \sum_i x(X,i) - m\right)^2 = \sum_{X,Y} \sum_{i,j} (1 - \delta_{XY}\delta_{ij})x(X,i)x(Y,j) + (1 - 2m)\sum_{X,i} x(X,i) + m^2 \quad (5)$$

のように、多重1次形式となる。ここで、 δ_{pq} はクロネッカーのデルタ記号である。

式(5)を式(3)に代入し、式変形を行うと、次式のような2次関数の多重1次形式が得られる。

$$F(x) = \sum_{X,i} \sum_{Y,j} a_{X_i Y_j} x(X,i)x(Y,j) + \sum_{X,i} b_{X_i} x(X,i) + c \quad (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} a_{X_i Y_j} &= A(1 - \delta_{XY})\delta_{ij} + B\delta_{XY}(1 - \delta_{ij}) + C(1 - \delta_{XY}\delta_{ij}) + d(X,Y)(\delta_{i,j-1} + \delta_{i,j+1}) \\ b_{X_i} &= C(1 - 2m) \\ c &= Cm^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(6)に見られるように、組合せ的最適化問題は、0と1の値をとる離散変数 x の多項式の最小値探索問題に帰着させることができる。この変数 x が連続な実数値 ($0 \leq x \leq 1$) をとりえるものと考えたと、式(6)の $F(x)$ から、エネルギー関数 $E(x)$ が求められる。 $F(x)$ と $E(x)$ は同じ形をしているが、変数の定義域が異なるため、数学的意味は違う。この $E(x)$ は、実は、ニューラルネットのエネルギーに相当する。

問題は、エネルギー関数 $E(x)$ の最小値(一般には極小値)を求めることになる。最小値探索のための力学系は、評価関数が2次である場合、ニューラルネットによってシミュレートできるのである。その詳細は文献4)を参照されたい。

(2) 平均場近似アニーリング法による求解

組合せ的最適化問題に対するニューラルネットワーク的アプローチとしては、確定論的方法と確率論的方法がある。前者の代表的なモデルがHopfieldモデル⁵⁾である。アニーリングと呼ばれる物理的な焼きなましの過程を経ると、その系のエネルギーは最小になる。この現象を計算機上でシミュレートすることで、組合せ的最適化問題を解くのがシミュレーテッドアニーリング(SA)法である。SAのある特殊なタイプは、確率的な挙動をするニューロン素子を用いて、ネットワークを実現することができる。SA法を用いたボルツマンマシンは確率論的方法の代表である。

本研究では、従来よく用いられている手法の欠点、すなわち1)解が初期値などのパラメーターに依存するため、十分満足できる解が求まらないことが多い、2)解が極小値(極大値)に捕らわれる、および3)膨大な計算時間がかかるという欠点⁷⁾を克服するために、統計熱力学での平均場近似⁸⁾を導入して、確率論的方法であるSA法の確定的な近似化を行う。

SA法における系の大きな挙動は、ボルツマン分布(ギブス分布)

$$p_T(x) = \exp\left\{-\frac{E(x)}{T}\right\} / \sum_{x \in S} \exp\left\{-\frac{E(x)}{T}\right\} \quad (S \text{は式(1)を満たす集合})$$

でのニューロン状態 $x(X,i)$ の平均値で把握できる。ただし、 T は温度パラメーターで、繰り返し回数 k に依存して、高温から低温に除去に変化させる。エネルギー関数の $E(x)$ は、式(6)と同様に、状態 $x(X,i)$ の2次形式なので、このままでは解析的に平均操作ができない。

そこで、Peterson and Anderson⁹⁾やAmit¹⁰⁾の考え方を踏襲し、SA法でのボルツマン分布に従うニューロン状態 $x(X,i)$ の平均値 $m(X,i)$ ($0 \leq m(X,i) \leq 1$) は、平均場近似法を用いて、解析的に近似計算する。今、ニューロンの入出力特性として、 $x = \frac{1}{2}\left\{1 + \tanh\left(\frac{x}{b}\right)\right\}$ (b はゲイン)型のシグモイド関数を考える。文献9)と

10) を参考にすると、以下に示す式 ($T(X, i)$ は温度 (式 (11))) が得られる。

$$m(X, i) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{-\partial E(x(X, i))/T(X, i)}{\partial x(X, i)} \right) \right\} \quad (8)$$

ニューラルネットワークのエネルギー関数 $E(x)$ は、 i 番目と j 番のニューロンを結ぶシナプスの重み $a_{X_i Y_j}$ と、 i 番目のニューロンへの外部入力 b_{X_i} により、式 (6) のように表せる。従って、 $m(X, i)$ は、式 (6) と式 (8) より、

$$m(X, i) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left\{ \left(-2 \sum_{Y_j} a_{X_i Y_j} x(Y, j) - b_{X_i} \right) / T(X, i) \right\} \right\} \quad (9)$$

のように求められる。ただし、この平均場近似法においては、状態の $x(X, i)$ が式 (6) の $F(x)$ における $x(X, i)$ (0 と 1 の離散値) と異なる値をとる。すなわち、ニューロンの状態は、0 以上かつ 1 以下の連続値を仮定していることに注意されたい。

一つのニューロンに注目した場合、そのニューロンが受ける作用は、他のニューロンの状態に依存して、様々な値を確率的にとるはずである。しかし、式 (9) の平均場近似法では、それを平均的に定める平均場がそのニューロンに作用していると近似する特徴をもつ。これは、要素間の相互作用を、要素と平均場との間接的な相互作用で近似するという、統計物理・熱力学的モデルで使用されている考え方⁸⁾と同じである。

式 (9) を解析的に解く際、すなわち反復計算において、温度 T は、徐々に冷却させて 0 に近づけていくアニーリングの処理を導入することにより、制御する。このような操作により、最終的なニューロンの状態 $x(X, i)$ は最適解に近い 2 値状態 (0 あるいは 1) に収束していく。このように、クーリングスケジュールと平均場近似を用いた手法が、平均場近似アニーリング法である。

ここで問題になるのは、温度の低減化方法すなわちクーリングスケジュールを、どのように決めるかである。この場合、初期の繰返しでは、高温状態にすることにより、極小値から脱出する確率を大きくする。繰返しの最後では、低温化することにより、最小値の状態から逃避する確率を小さくする。従来よく適用されているクーリングスケジュール、すなわち $T(k) \propto 1 / \ln(1+k)$ あるいは $T(k) \propto 1 / (1+k)$ (ただし、 k は繰返し数) では、最小値に収束するまでに、膨大な繰返しを必要とする。

上記の収束性を改善するために、ここでは、Matsuba¹¹⁾が提案した方法、すなわちランジェバン型微分方程式に基づき、確率的ダイナミックプログラミング法を用いたクーリングスケジュールを用いる。これによれば、最適温度は、最小値に至るまでの経過時間を最小にように求められる。その結果は、エネルギー関数 $E(x)$ に依存させた式 (式 (10)) で表せる。

$$T \propto 1 / \int \frac{1}{\frac{\partial E(x)}{\partial x} dx} \quad (10)$$

式 (6) に示す多重 1 次形式のエネルギーに対して式 (10) を計算すれば、最適温度の $T(X, i)$ は次式のように誘導できる。

$$T(X, i) = T_0 \left\{ 2 \sum_{Y_j} a_{X_i Y_j} x(Y, j) + b_{X_i} \right\} / b^2 \left\{ \frac{\tanh \frac{y(X, i)}{b}}{1 - \tanh^2 \frac{y(X, i)}{b}} + \frac{y(X, i)}{b} \right\} \quad (11)$$

ただし、 T_0 は初期温度である。また、ニューロンの入出力の関係は、前述したように、次式を満たさなければならぬ。

$$x(X, i) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \frac{y(X, i)}{b} \right\} \quad (12)$$

一般に、最適解は、与えられたエネルギー関数に大きく依存する。しかし、一般に適用されている方法では、エネルギー関数に依らず、繰返し数 k のみで温度を制御している。そのため、登るべきエネルギー関数の障壁が高い場合、最小値が求まらないことがある。一方、Matsuba による方法は、エネルギー障壁を見ながら、温度を変化させている。従って、この方法では、エネルギー関数にあまり依存せず、すなわち問題によらず、短時間で最小値を求めることが可能である。

結局、平均場近似アニーリング法による巡回セールスマン問題のアルゴリズムは、1) 各ニューロンの初期状態と初期温度の設定、2) 収束判定条件を満たせば、計算の終了、3) 温度 T の変更、4) 平均場近似による各ニューロン状態の更新と 5) ステップ 2) への移行という、反復的繰返し法によって実行する。なお、各ニューロンの状態更新は非同期的に行う。

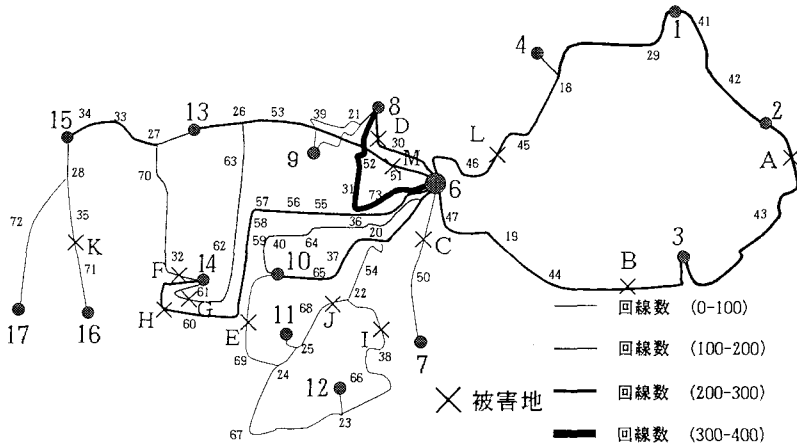


図1 対象とした電話網と被災設備位置

3. 電話網の機能復旧予測の最適化

(1) 電話網

ここで取り扱う電話網は、1局で加入区域が構成されている単局地の通信網を対象とした市内電話網である。加入区域とは、電話加入申込みの最小単位となる区域を意味する。単局地市内電話網は、加入者を収容する市内交換機1局と複数の交換機よりなる。交換局は回線網の中心に位置する。本電話網においては、加入者の分布が離れたところに局部的に固まっている。そのため、そこに交換機の出先とも言うべき交換装置を置き、トラヒックの集束を行って、交換局に接続することを考える。交換所は、この目的のために、単にトラヒックの集束機能だけを持つスイッチング装置である集線装置を有する。

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。ノードの6は交換局に、他のノード(1~4, 7~17)は交換所(記号●で示す)に相当する。各ノード間は回線数の異なる(図中の線の太さが異なる)中継線路設備で、電話機または端末設備と交換局および交換所間は加入者線路設備で結ばれている。図中の×印は線路設備(A~M)の被災位置を示したものである。図中の数字(18~73)は、仮想ノード、すなわち異なる回線数の架空・地中線路の接続ノードあるいは分岐ノードを意味する。なお、ここでは、電話網のうち、3つのノード(番号5, 48と49)を計算の対象外とした。

電話網は、通信端末機、伝送路と交換機より構成されている。もちろん、電話網の端末は音響信号を電気信号に変換する電話機である。伝送路は、電話機で変換された電気信号を伝達する装置である。ここで扱う線路設備は有線伝送路であり、架空線路と地下線路よりなる。交換機は、1)スイッチング、2)通信網の制御や管理と3)各種通信サービスの実行という役割を果たしている。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。選択された中継ルートの中から1回線を選択し、接続する機能がスイッチングである。

交換機は、スイッチ系(スイッチ回路網、監視回路とスイッチ駆動回路)と制御系(信号送受回路、中心制御回路と情報翻訳回路)よりなる¹²⁾。スイッチ回路網は、加入者線と中継回線を結びつけるために、多数の入線と多数の出線の間を任意に交換接続する、いわゆるスイッチング機能を果たす装置である。制御回路は、スイッチング回路網の開閉制御だけでなく、ルーティング、各種サービスや通信網管理も実行する。この管理機能では、トラヒック測定や異常時における通信網制御法の再構成などのトラヒック疎通に必要な制御を行うことができる。

ここでは即時式完全線群のトラヒックシステムを取り扱う。完全線群とは、交換機が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交換機を言う。すなわち、空出線が存在するとき、どの入線からでも空出線への接続ができる。従って、交換機を完全線群で近似すれば、各ルート間のトラヒックの相互干渉は全くなくなる。一方、即時式とは、出線または交換線群の内部が塞がっていて、呼の接続ができない状態(輻輳)になったとき、その呼が直ちに接続を断念する方式を言う。

(2) 回線留保方式による迂回中継システムのトラヒックモデル

電話網内の中継接続ルートは必ずしも1通りではない。一般には、何通りかのルートの中から、輻輳状態に応じて最も都合のよいルートを選択しながら、接続を行う。このようなルート選択方式としては、固定中継方式、ランダム中継方式、迂回中継方式や適応型中継方式が考えられている¹²⁾。

固定中継方式とは、発信局(交換所)と着信局(交換所)の組に対して、中継ルートを予め1通りに定めて

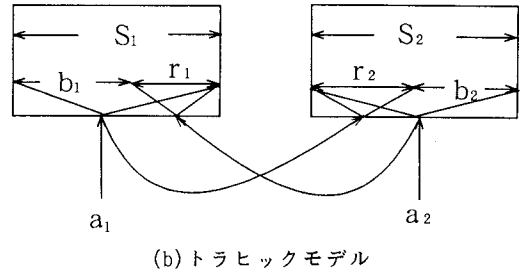
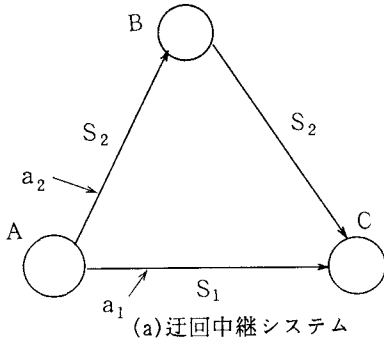


図2 回線留保方式による迂回中継システム

おく方式である。従って、ルート選択の自由度は基本的にはない。ただし、多ルート化が実施されている場合には、故障の検出と同時に、予備ルートへの切替えがなされるであろう。迂回中継方式とは、発信局（交換所）と着信局（交換所）の組に対して、予め複数個の接続ルートを定めておき、所定の順序でルート選択を行う方式である。

本研究で対象とした電話網（図1）は、交換局6から各交換所 $i(i=1\sim 4, 7\sim 17)$ までの2ルート化（ノード7のみ1ルート化）が施されている。ルート選択の順序は、基本的に、途中に中継交換機の介在する数が少ない最も経済的なルート（ルート1）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（ルート2）を選ぶというように定める。

一般に、交換線群におけるトラヒックの混雑状態は輻輳と呼ばれる。前述したように、本研究では即時式交換線群を採用するため、輻輳のために呼の接続が行えないときには直ちに呼が拒絶される。この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。ここでは、この呼損率を、機能評価の指標として導入する。

今、図2(a)のように、交換所 $A \rightarrow$ 交換局 C 間の第1ルートの呼が回線全塞りにであったとき、溢れ呼は $A \rightarrow$ 中継交換所 $B \rightarrow C$ の第2ルートで運ばれる。このとき、 $A \rightarrow C$ は斜めルート、 $A \rightarrow B \rightarrow C$ は迂回ルートとなる。しかし、逆に、 $A \rightarrow B \rightarrow C$ が斜めルート、 $A \rightarrow C$ が迂回ルートになる可能性もある。一般に、迂回ルートは即時式で利用され、他の呼も重畳される。そのため、この方式は高能率で使用できる。

a) 呼種別呼損率の算定

呼とは電話の接続要求、保留時間とは呼の接続時間、トラヒック量とは時間 $(t, t+\tau)$ における呼の総保留時間 $T(t, \tau)$ を意味する。ある時刻 t における接続中の呼数 $N(t)$ が同時接続数である。単位時間当たりのトラヒック量 $T(t, \tau)/\tau$ が時間 $(t, t+\tau)$ の呼量 $a(t, \tau)$ であり、 $\tau \rightarrow 0$ のときの極限值 $\lim_{\tau \rightarrow 0} a(t, \tau)$ が時刻 t の呼量 $a(t)$ である。時刻 t における呼量は同時接続数と一致する。

本研究では、優先呼のサービスを保証するために、ある呼を接続するとき、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（留保回線方式）を対象にする¹³⁾。このようなシステムにおける呼種別呼損率は、数値解法によって厳密解も得られるが、実用的観点から、近似的に計算する。

ここで採用する回線留保方式による迂回中継システムを図2(b)に示す。このシステムでは、交換所 A から交換局 C までの2つのルート（ルート1とルート2）の一方が他方のルートの迂回ルートになりえる。つまり、回線数 S_1 のルート1にランダム呼量 a_1 が加わり、回線数 S_2 のルートには固有のランダム呼量 a_2 が存在する。 S_1 回線群には専用の r_1 回線が、 S_2 回線群には r_2 回線が留保されている。 S_1 回線群からの溢れ呼はルート2に、 S_2 回線群の溢れ呼はルート1に迂回する。ここでは、ルート1を斜めルート、ルート2を迂回ルートとしている。本システムでは、迂回ルートから斜めルートへの逆迂回を考える。

今、交換所（ノード） i において、回線数 S_{1i} （専用回線 b_{1i} ）のルート1に呼量 a_{1i} が、回線数 S_{2i} （専用回線 b_{2i} ）のルート2に呼量 a_{2i} が加わるとする。上記のような回線留保方式のトラヒックモデルにおける呼損率の近似解は、文献14)を参照すれば、評価できる。ルート1の a_{1i} に対する呼種別呼損率 B_{1i} とルート2の a_{2i} に対する呼種別呼損率 B_{2i} は、式(13)で求められる。

$$\left. \begin{aligned}
 B_{1i} &= P_{S_{1i}, S_{2i}} \frac{S_{2i}!}{a_{2i}^{S_{2i}}} \sum_{k=S_{2i}-b_{2i}}^{S_{2i}} \frac{a_{2i}^k}{k!} \\
 B_{2i} &= P_{S_{1i}, S_{2i}} \frac{S_{1i}!}{a_{1i}^{S_{1i}}} \sum_{k=S_{1i}-b_{1i}}^{S_{1i}} \frac{a_{1i}^k}{k!}
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、

$$P_{S_{1i}, S_{2i}}^{-1} = \frac{a_{1i} S_{2i}!}{A_i a_{2i}^{S_{2i}}} \sum_{j=S_{2i}-b_{2i}}^{S_{2i}} \frac{a_{2i}^j}{j! E(S_{1i} + j, A_i)} + \frac{a_{2i} S_{1i}!}{A_i a_{1i}^{S_{1i}}} \sum_{j=S_{1i}-b_{1i}}^{S_{1i}} \frac{a_{1i}^j}{j! E(S_{2i} + j, A_i)} \quad (14)$$

ただし、 $A_i = a_{1i} + a_{2i}$ 、 $E(S, a)$ はアーラン B 式で、次式で計算できる。

$$E(S, a) = \frac{a^S}{S!} / \sum_{j=0}^S \frac{a^j}{j!} \quad (15)$$

b) 対地ルートの呼量と専用回線数の算定

式 (13) より、交換局と交換所間の対地ルート別の呼種別呼損率が得られる。その際、解析に当たっては、各ノード i の対地ルート k ($k = 1, 2$) に対する呼量 a_{ki} 、回線数 S_{ki} と専用回線数 b_{ki} (あるいは留保回線数 $r_{ki} = S_{ki} - b_{ki}$) が必要である。

図 1 において、各交換所間あるいは交換局と交換所間は、仮想ノードも介して、77 のノード間リンクによって構成されている。これらリンクは架空線路あるいは地下線路よりなり、それらの回線数は異なる。対地ルートは複数の直列リンクよりなる。そのため、対地ルートの回線数 S_{ki} は、これら直列リンクの最小回線数で評価できる。

回線の平均同時接続数はその回線群の運ぶ呼量に等しい。そのため、ここでは、トラヒックシミュレーションによって、呼量を評価する。まず、各交換所の発呼数は、交換局までの対地ルートの回線数に乱数を割り当てると、決められる。このとき、出線の空きの有無が決まる。そのため、呼の生起回線に対しては、着呼となるべき交換所のノード番号と交換局からその交換所までの対地ルートを、同様に、乱数の発生によって確定することができる。その際、出線空き回線に対して、回線を割り当てなければならない。その結果、各交換所 i から交換局までの対地ルート k ($k = 1, 2$) の同時接続数つまり呼量 a_{ki} と損失呼が得られる。

上記の呼量 a_{ki} と回線数 S_{ki} ($i = 1 \sim 4, 7 \sim 17$; $k = 1, 2$) に対し、対地ルートごとの専用回線数 b_{ki} は、式 (13) によって算出する。すなわち、平常時の呼種別呼損率 B_{ki} を 1% に設定すれば、式 (13) を満たす b_{ki} の値が得られる。ただし、 b_{ki} が S_{ki} よりも大きくなるときには、全回線数 S_{ki} を専用回線数 b_{ki} とみなし、留保回線数 r_{ki} を考えない。

問題を単純化するため、以下の解析においては、1) 各交換所の被災時呼量が増大しても、平常時と同様に処理できる、2) 対地ルート上に複数の被災箇所があると、それらが全て復旧するまで、使用回線数を 0 とする、という仮定を設ける。地震後の輻輳の第一の原因は、呼量は何十倍にも、何百倍にも増大することである。しかし、時々刻々変化する各回線のトラヒック状況を評価するのは困難なため、また問題を複雑にすると、本質を見失う恐れがあるため、1) の仮定は 1 次近似的には妥当であろう。何故ならば、回線留保方式による迂回中継システムを適用することにより、呼量の増大をある程度回避することができるようになるためである。さらに、数値計算の結果、移動時間や復旧時間の最小化の問題に比べれば、呼量の増大はほとんど問題に影響を及ぼさないことがわかったためである。なお、2) の仮定は現実的と考えられる。

(3) 機能評価のための損失量

既往の研究 (例えば文献 4)) に比べて、本研究のユニークな点は、被災電話網の機能復旧予測に力点を置いていることである。その際、最適な復旧を行うために、最小化すべき目的関数としては、1) 復旧班の移動時間と復旧時間の総和である総復旧時間や、2) トラヒック解析から得られる復旧期間中の機能損失量の累積値を考える。

復旧開始時点をとし、復旧班の移動時間と被災設備の復旧時間からなる経過時間を横軸にとる。縦軸には、復旧過程に伴う被災電話網の機能と平常時のその差すなわち機能損失量 (サービスの低下量) をプロットする。累積機能損失量を評価するには、完全復旧時点までにおける機能損失量を求めなければならない。そこで、下記の 1) ~ 3) のように、変数の定義をしておく。

- 1) 平常時において、ノード i におけるルート 1 の回線数は S_{1i} 、ルート 2 の回線数は S_{2i} である。ルート 1 の呼種別呼損率は B_{1i} 、ルート 2 の呼種別呼損率は B_{2i} で表す。
- 2) ルート 1 の被災を想定して、ルート 1 の回線数は S'_{1i} 、ルート 2 の回線数は S'_{2i} で表す。ルート 1 の呼種別呼損率は B'_{1i} 、ルート 2 の呼種別呼損率は B'_{2i} で表す。
- 3) ルート 2 の被災に対し、ルート 1 の回線数は S''_{1i} 、ルート 2 の回線数は S''_{2i} で表す。ルート 1 の呼種別呼損率は B''_{1i} 、ルート 2 の呼種別呼損率は B''_{2i} で表す。

なお、対地ルートが無被害のとき、回線数が S_{1i} と S_{2i} になることは言うまでもない。

ここでは、交換局と各交換所間の連結性を前提にした上で、次の機能損失量を考える。

$$\sum_{i \in NR} \left\{ (S_{1i} - S'_{1i}) + (S_{2i} - S''_{2i}) \right\} \quad (16a)$$

$$\sum_{i \in NR} \sum_{k=1}^{T(i)} \left\{ (B'_{ki} - B_{ki}) + (B''_{ki} - B_{ki}) \right\} \quad (16b)$$

$$\sum_{i \in NR} \sum_{k=1}^{T(i)} \left\{ (B'_{ki} - B_{ki}) S_{ki} + (B''_{ki} - B_{ki}) S_{ki} \right\} \quad (16c)$$

$$\sum_{i \in NR} \sum_{k=1}^{T(i)} \left\{ (B'_{ki} - B_{ki})^2 + (B''_{ki} - B_{ki})^2 \right\} \quad (16d)$$

$$\sum_{i \in NR} \sum_{k=1}^{T(i)} \left\{ (B'_{ki} - B_{ki})^2 S_{ki} + (B''_{ki} - B_{ki})^2 S_{ki} \right\} \quad (16e)$$

$$\sum_{i \in NR} \left\{ (B'_{1i} B'_{2i} - B_{1i} B_{2i}) + (B''_{1i} B''_{2i} - B_{1i} B_{2i}) \right\} \quad (16f)$$

$$\sum_{i \in NR} \left\{ (B'_{1i} B'_{2i} - B_{1i} B_{2i}) S_{1i} + (B''_{1i} B''_{2i} - B_{1i} B_{2i}) S_{2i} \right\} \quad (16g)$$

ただし、交換所のノード番号の集合は $NR = \{1 \sim 4, 7 \sim 17\}$ であり、 $T(i)$ はノード i の対地ルート数を意味する。 $T(i)$ は、ノード7で1、他ノードで2の値となる。

平常時の電話網に対し、式(16a)では被災回線総数を、式(16b)、(16d)と(16f)では被災に伴って増大した呼種別呼損率の変化量(線形だけでなく、重要度を考えて非線形形式も導入した)を、式(16c)、(16e)と(16g)では回線数で重み付けられた呼種別呼損率の変化量を用いている。なお、 B'_{ki} と B''_{ki} は、被災電話網に対して、式(13)から求める。

(4) 復旧予測のための最適化条件

復旧過程を本質的に捉えるために、本研究では復旧班を1班に限定し、数値分析を行う。復旧班は交換局のノード6から派遣される。そして、順次図1の被災設備を復旧していき、全被災設備の復旧は完了する。巡回セールスマン問題のように、復旧班が最終的に出発地の交換局に戻らなければならないという拘束を課す必要はない。そのため、式(3)に代わる評価関数を改めて考案しなければならない。被災設備数が N だと、本問題では $(N-1)!/2$ ではなく、 $N!$ 通りの復旧ルートを取り扱うことになる。

拡張された評価関数を設定する前に、復旧時間を定義する。また、多重1次形式の評価関数が構築できるように、式(16)の機能損失量の数式表現を変える。その結果より、総復旧時間および累積機能損失量に基づく拡張された評価関数を提案する。

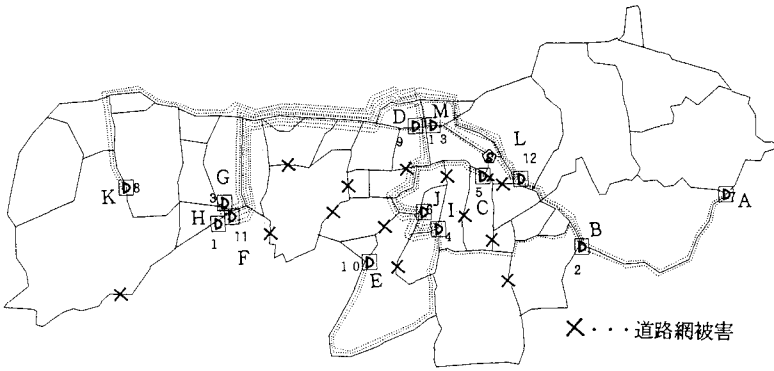
a) 復旧時間

電話担当者によれば、架空線路と地下線路では復旧作業が異なるため、復旧時間も相違する。地下ケーブルは、(1)故障ケーブルと同種類のケーブル、あるいは(2)他の工事で使用予定のケーブルを使って復旧する。復旧作業は、1)当該マンホールの水替、2)ガスの封入、3)ケーブルの布設、4)ケーブルの心線対照、6)ケーブルの切替と7)ケーブルの撤去の手順よりなる。(2)の作業は(1)に比べて、心線対照に要する時間が約半分になるし、心線対照しながら、ケーブルの切替ができる。一方、架空ケーブルでは、1)ケーブル架渉、2)ケーブルの切替と3)ケーブルの撤去という復旧措置が行われる。

標準的な復旧時間は、1,000回線(対)地下ケーブルで18時間(1班8人)、100回線(対)架空ケーブルで3時間(4~6人)である。前述したように、図1に示すノード間のリンクの回線数は異なる。被災設備 X のリンクの回線数を S_X とすれば、そのリンクの復旧時間 $R(X)$ は aS_X で表せる。ただし、 a は、地下ケーブルで0.018、架空ケーブルで0.03の値をとる。

復旧班は、図3の被災道路の状況により、交換局から最早到着被災設備地点まで、あるいは被災設備地点間を移動する。復旧班が最短時間で移動できるように、ここでは、ウォーシャルフロイド法を用いて、最短ルート探索を実施する。なお、電話網の復旧期間中、道路の復旧は完了しないものとする。平常時のOD交通量とノード間の走行時間としては、現地踏査あるいは既往の測定データを用いる。異常時のデータは少ないため、また問題が複雑になるため、被災時と平常時の交通データを同一と仮定する。これより、交換局 X と被災設備 Y あるいは被災設備 X と被災設備 Y 間の移動時間 $M(X, Y)$ は容易に評価することができる。

以上の結果、交換局 X から被災設備 Y あるいは被災設備 X から被災設備 Y に移動するときの復旧時間 $\bar{T}(X, Y)$ は、



H → B → G → I → C → J → A → K → D → E → F → L → M

図3 被災道路網と復旧パターン1による復旧班の移動ルート

$$\bar{T}(X, Y) = M(X, Y) + R(Y) \quad (17)$$

で評価される。今、 i 番目に訪れる被災設備を $\eta(i)$ とすると、復旧開始時点から復旧完了までの総復旧時間は、

$$\sum_{i=1}^N \bar{T}(\eta(i-1), \eta(i)) \quad (18)$$

となる。ただし $\eta(0)$ は、復旧班の移動開始地点である交換局を示す。

b) 機能回復量

被災設備 X が交換所 i のルート k ($k=1, 2$) にあるとする。そのときの平常時からの機能損失量は、式 (16) に示した 7 つの評価関数 ($\{ \}$ 中の式) により、それぞれ、求められる。ここではこの機能損失量を $\Delta(i, k, X)$ で表す。これを用いて、被災設備 Y を j 番目に復旧したときの機能回復量は定義される。

交換所 i から交換局までのルート k における被災設備数 N_1 は、式 (19) の定義から、式 (20) で表せる。

$$\alpha(i, k, X) = \begin{cases} 1 & : \text{被災設備 } X \text{ により、ノード } i \text{ のルート } k \text{ の通信ケーブルが切断しているとき} \\ 0 & : \text{その他のとき} \end{cases} \quad (19)$$

$$N_1(i, k) = \sum_X \alpha(i, k, X) \quad (20)$$

上式の総和は、全ての被災設備 (N 箇所) について考えることを意味する。一方、復旧班が被災設備 Y を j 番目に訪れるまでに、ノード i のルート k にある $N_1(i, k)$ の被災設備の回復数 N_2 は、

$$N_2(i, k, j) = \sum_X \sum_{l=1}^{j-1} \alpha(i, k, X) \delta_{x(X, l), 1} \quad (21)$$

で表せる。

次に、被災設備 Y に対し、ノード i のルート k が完全に回復したかどうか、すなわち交換所 i がルート k を介して交換局と連結しているかどうかを調べる。そのため、次式の連結性指標 β を定義する。

$$\begin{aligned} \beta(i, k, Y, j) &= \delta_{N_1(i, k), N_2(i, k, j)+1} \delta_{\alpha(i, k, Y), 1} \delta_{x(Y, j), 1} \\ &= \begin{cases} 1 & ; \text{被災設備 } Y \text{ によって、通信ケーブルが切断しているとき} \\ 0 & ; \text{その他のとき} \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

地震直後の機能損失量は、

$$W_0 = \sum_{i \in NR} \sum_{k=1}^{T(i)} \sum_X \Delta(i, k, X) \quad (23)$$

である。これより、被災設備 Y の復旧順位が j のときの機能回復量は、次式で与えられることになる。

$$P(Y, j) = W_0 - \sum_{i \in NR} \sum_{k=1}^{T(i)} \sum_X \Delta(i, k, X) \delta_{\beta(i, k, Y, j), 1} \quad (24)$$

c) 拡張された評価関数

まず、総復旧時間の最小化問題を考えると、次式の拡張された評価関数が得られる。

$$F(x) = A \sum_i \sum_X \sum_{Y(\neq X)} x(X, i)x(Y, i) + B \sum_X \sum_i \sum_{j(\neq i)} x(X, i)x(X, j) \\ + C \left(\sum_X \sum_i x(X, i) - N \right)^2 + \sum_i \sum_X \sum_Y \bar{T}(X, Y)x(X, i-1)x(Y, i) \quad (25)$$

上式において、 X, Y は復旧班の出発地である交換局 S (ノード6)と被災設備を、 i, j は復旧順位を意味する。本研究では、既往の巡回セールスマン問題とは異なり、1) 出発地が固定($i-1=0$ のとき、 $X=S$) して、2) 全被災設備の復旧が完了すれば、最終復旧地点から出発地の交換局に戻る必要がない。そのため、式(25)、特に右辺第4項は、式(2)と異なる表現になっていることに注意されたい。すなわち、復旧班は、交換局から出発して、被災設備(N 箇所)を訪れることになる。

式(25)は、多重1次形式で書けば、式(6)のように表せる。ただし、式(7)の a_{XiYj} は次式で評価しなければならない。また、 b_{Xi} と c の評価に当たっては、 m の代わりに、 N を用いる。

$$a_{XiYj} = A(1 - \delta_{XY})\delta_{ij} + B\delta_{XY}(1 - \delta_{ij}) + C(1 - \delta_{XY}\delta_{ij}) \\ + \bar{T}(X, Y)\delta_{i-1, j}(1 - \delta_{i, 0})(1 - \delta_{j, 1}) + \bar{T}(S, Y)\delta_{i, 0}\delta_{j, 1} \quad (26)$$

上式では、前述した2つの相違点を反映するように、右辺第4項と第5項を工夫している。

次に、電話網の被災に伴うサービスの低下をできる限り早く回復させる復旧戦略を考える。これには、復旧時間と機能損失量から、完全復旧に至る累積機能損失量を求め、それを評価関数として採用する。拡張された評価関数は次式のように表せる。ただし、右辺第4項は、2. で述べた巡回セールスマン問題と異なり、本研究の特色が反映されるように、総和をとる必要がある。この点については、次の多重1次形式の定式化に反映させる。

$$F(x) = A \sum_i \sum_X \sum_{Y(\neq X)} x(X, i)x(Y, i) + B \sum_X \sum_i \sum_{j(\neq i)} x(X, i)x(X, j) \\ + C \left(\sum_X \sum_i x(X, i) - N \right)^2 + \sum_i \sum_X \sum_Y \bar{T}(X, Y)P(Y, i)x(X, i-1)x(Y, i) \quad (27)$$

多重1次形式は式(6)と同一の表現になるが、式(7)の a_{XiYj} は次のように変更する。

$$a_{XiYj} = A(1 - \delta_{XY})\delta_{ij} + B\delta_{XY}(1 - \delta_{ij}) + C(1 - \delta_{XY}\delta_{ij}) \\ + \bar{T}(X, Y)P(Y, j)\delta_{i-1, j}(1 - \delta_{i, 0})(1 - \delta_{j, 1}) + \bar{T}(S, Y)P(X, 1)\delta_{i, 0}\delta_{j, 1} \quad (28)$$

4. 事例研究

本研究では、図4のフローに従って、被災電話網の機能復旧予測を行う。このためには、まず、2.と3.で述べたように、平常時および被災時における回線留保方式による迂回中継システムのトラヒック解析、ウォーシャルフロイド法による最短移動ルートの探索や復旧作業時間および復旧時間の算定を実施しなければならない。次に、平均場近似アニーリングとクーリングスケジュールの方法により、復旧過程の最適化を行う。このため、復旧班が巡回する被災設備の位置とその順番を割り当てるニューロンの状態を考える。その初期状態と初期温度の設定の基に、3.で示したような拡張された評価関数は最小化される。これには、温度の変更と平均場近似による各ニューロン状態の更新を、ニューラルネットワークが収束するまで繰り返す。

(1) 適用例 1

本研究では、図1の被災電話網と図3の被災道路網に、上記のアルゴリズムを適用する。ここでは、その前に、シミュレーテッドアニーリング法(SA法)⁶⁾との対比から、平均場近似アニーリング法の効果について検討する。本節では、図1に示した被災設備のうち、7つ(A, B, C, E, I, J, K)を選び、最適復旧問題を解く。ただし、評価関数としては式(25)を採用し、総復旧時間の最適化を図る。

まず、温度制御を行わない場合について、平均場近似法(MFA法)とシミュレーテッド法(S法)の結果を比較したのが、図5である。ここで、式(25)のラグランジュ乗数(A, B と C)は1,000にした。図5の縦軸はエネルギー $E(x)$ を、横軸は試行回数 k を示す。ただし、MFA法とS法のアルゴリズムの関係から、横

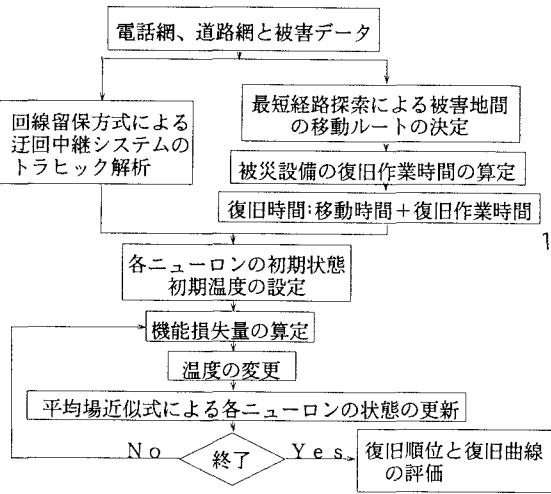


図4 電話網の機能復旧予測のための算定フロー

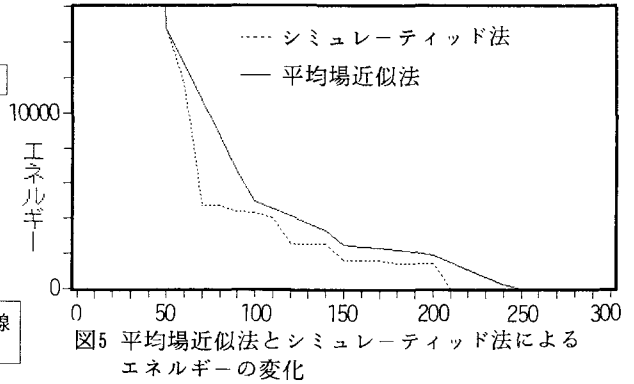


図5 平均場近似法とシミュレティッド法によるエネルギーの変化

軸は同一値を意味しないことに注意してもらいたい。

MFA法では245回で、S法では210回で、ほぼエネルギーが0になっている。MFA法の収束性、特に収束回数は、一見すると、S法よりも劣悪のようであるが、これは同一の試行回数で比較できないためである。試行回数とともに、S法のエネルギーは時間的に変動している。一方、MFA法は、初期値分布の状態に比較的左右されず、低いエネルギーレベルへ安定的に収束している。最終的に、総復旧時間は、MFA法で23.35時間、S法で23.79時間である。2つのアルゴリズムは、巡回ルートを形成しかつ極小解を脱出して、最小解に達しているものと考えられる。

この試行例では、S法よりもMFA法が最短時間(すなわち最も良い解)を与えた。S法は、初期状態によって結果が大きく変化するため、偶然に良い解を見出す場合がある。式(25)のエネルギー関数の設定においては、総復旧時間の最小化以外の拘束条件も反映させている。そのため、エネルギー値が最小となっても、総復旧時間が最短になるとは限らないのである。

図6には、ニューラルネットワークの収束過程を示す。同図には、図5より、3つの試行回数におけるニューロンの状態をプロットしている。縦軸方向を被災設備名に、横軸方向を巡回の順番に割り当てた。円の大きさは、各ニューロンの発火の度合(最小0、最大1)を表している。初期状態はランダムだが、中間状態では最適パターンに収束しつつあり、最終的には各行各列で一つずつのニューロンが発火していることがわかる。最終的に、MFA法の巡回ルートは交換局→被災設備I→A→B→C→J→E→Kであり、S法では交換局→B→A→I→K→C→E→Jとなる。

次に、エネルギーに基づく温度制御(式(11))を実施した場合、すなわちアニーリングの効果について分析する。ここではSA法を用いる。式(11)と(12)における θ の値を固定し、式(11)の T_0 を変化(80と100)させたときの収束状態の差違が図7である。総復旧時間は、温度を変化させないとき、繰返し回数210回で23.79時間(図5)に達したのに対し、 $T_0 = 80$ では520回で23.75時間(図7)となる。一方、 $T_0 = 100$ のとき、900回で23.52時間、1,000回で30.09時間の総復旧時間が得られる。 $T_0 = 50$ のときの総復旧時間は、210回で、23.79時間であり、温度制御を行わないときと同一の結果を与えた。 $T_0 = 100$ で、900回に比べ、1,000回で悪くなっているのは、数値計算(PC-9801RA使用)の誤差による。

図7より、試行回数200程度までのエネルギーの時系列変化は、温度制御の有無によらず、同じである。しかし、その後のエネルギーは、繰返し回数 k によって大きく変化している。温度は、ニューロンの確率的な振舞を与えるために、導入したものである。しかし、初期温度の与え方によっては収束過程が劣化することに注意しなければならない。

一方、式(11)のエネルギーに基づく温度制御により、平均場近似アニーリング法(MFAA法)を実施すると、 T_0 の値に拘らず、温度制御を考えないときの結果と同一になった。この場合には、確定的に良質な解を得ることが可能であった。このことは、繰返し計算の途中でゆらぎを与えた平均場の取り扱いが高性能な収束計算に向かないということを示唆しない。この例では、たまたま、クーリングスケジュールの感度が低く、平均場近似に大きく左右されている。SA法に比べて、MFAA法がロバストな推定を与え

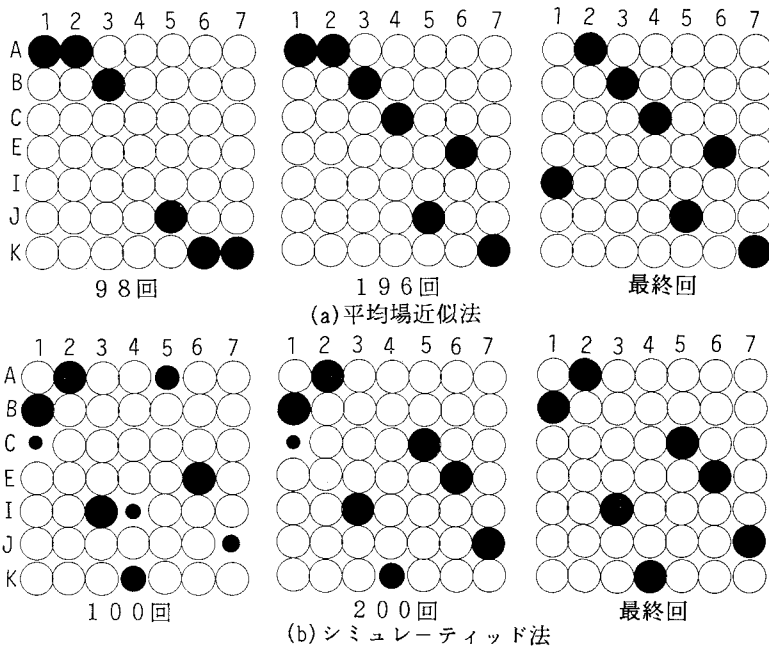


図6 ニューラルネットワークの状態変化

ており、有効な手法と言えることには大過ない。

(2) 適用例 2

式(13)により、図1の電話網に対する平常時の呼種別呼損率を求めると、図8のようになる。横軸は各交換所の番号、縦軸は交換局から横軸の交換所までの2つのルートに対する呼種別呼損率である。交換局から交換所7までのルート2は存在しないので、ルート2の呼種別呼損率は1となっている。図1のネットワークを勘察すると、交換所14や17では、平常時でも呼損する可能性の高いことがわかる。これは、ルート別の回線数、呼量と留保回線数の関係からも、明らかである。

次に、図1の被災電話網に対して、最適復旧予測を実施する。図4に従って、被災設備間の最短移動時間探索を行い、被災時における迂回中継システムの呼種別呼損率を求める。次に、式(25)または式(27)のニューロンの状態(被災設備と復旧順位の関係) $x(X, i)$ に対応させて、式(9)、(11)と(12)から、その最適解を得る。

電話網と道路網の想定被災パターンに対して、評価関数の違いが復旧曲線(累積機能損失量)に及ぼす影響を分析する。図9は、復旧に伴う式(16a)~(16g)の機能損失量の割合の時系列変化を示したものである。いずれの機能的評価関数を採用しても、復旧の完了時間は50時間弱である。この計算では、電話担当者の意見を参考にして、復旧班の交代を考えるものの、基本的には1日24時間の作業を続けることを想定している。図9より、評価関数の b, d と f に基づく累積機能損失量の変化はほぼ同じである。評価関数 c, e と g の復旧曲線を比較すれば、 c と e の復旧過程は同様であるが、 g とは異なる傾向となっている。また、 a, b と c の評価関数に基づく復旧過程は大いに異なる。 a は被災回線数を、 b は平常時からの呼種別呼損率の増大量を、 c は a と b の積和を復旧の目安としている。従って、これらの評価関数(式(16a), (16b)と(16c))の物理的な相違が、そのまま、復旧曲線の違いになって現れている。

本研究では、式(16)のように、7つの機能評価関数を考えた。しかし、図9の b, d と f の比較からわかるように、呼損率という機能性の影響はあまり顕著でない。これは、被災時と平常時の呼損率の変化が小さいため、式(16b), (16d)と(16f)の相違となって現れないためである。呼損率よりも、回線数のオーダーの方が大きい。そのため、呼損率と回線数を同時に評価関数(式(16c), (16e)と(16g))に含めると、 c, e と g の復旧曲線はかなり異なってくるようになる。なお、呼損率が小さいのは、回線留保方式による迂回中継システムの効果による。

復旧順位に従って復旧パターンを分類すると、3つのパターンが考えられる。5つの評価関数(a, b, d, f と g)から求まる復旧パターンは1、評価関数 c による復旧パターンは2、評価関数 e による復旧パターンは3となる。復旧パターン1における被災設備の復旧順位は $H \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow C \rightarrow J \rightarrow A \rightarrow K \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow L \rightarrow M$ 、復旧パターン2では $K \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow C \rightarrow J \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow L \rightarrow M$ 、復旧パター

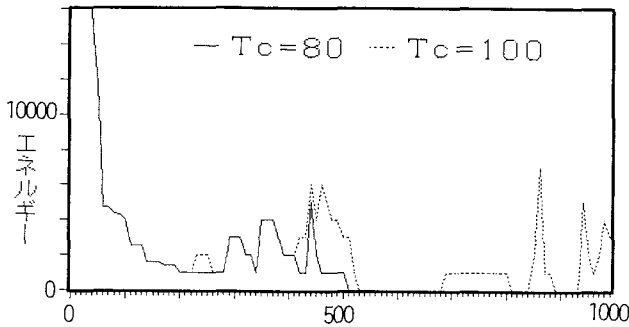


図7 クーリングスケジュールにおける温度パラメーターがSA法のエネルギー変化に及ぼす影響

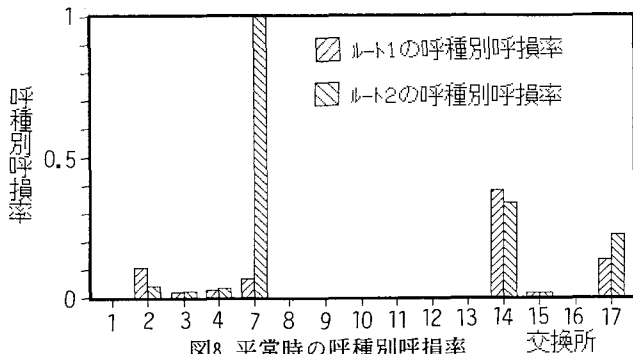


図8 平常時の呼種別呼損率

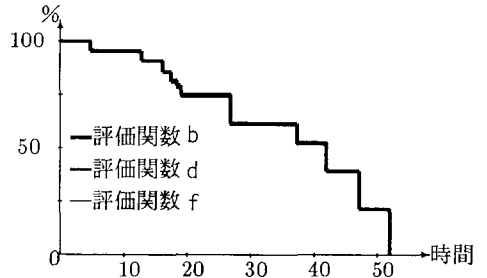
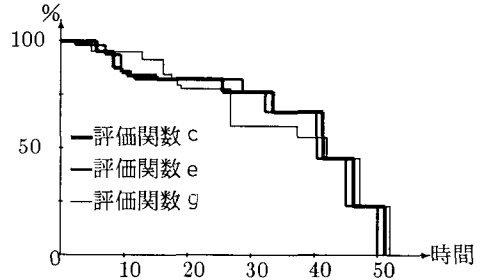
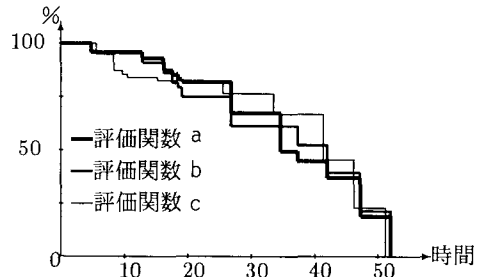


図9 評価関数の違いが復旧曲線に及ぼす影響

ン3では $J \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow K \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow L \rightarrow M$ となった。

呼損率のみで表せる3つの評価関数 (b, d と f) による違いは見られない。しかし、回線数も加味した評価関数 (c, e と g) を考えると、復旧班の移動ルートは3つのパターンを生じる。評価関数 a と b (式 (16a) と (16b)) において、復旧曲線の違いは顕著であるが、同じ復旧パターン1を示していることは興味深い。なお、総復旧時間の最小化問題 (式 (25)) を考えたとき、復旧パターンは1となった。

復旧パターン1に対する復旧班の移動ルートは図3のようになる。復旧班は、被災道路の状況を勘案しながら、被災設備へ順次移動している。3つの復旧パターンによる移動ルートは、パターン3の一部の道路を除いて、ほぼ同じであった。これは、使用道路が限定されているからにはほかならない。復旧班の移動ルート上に被災設備があっても、その復旧は後回しになっている。これは、移動時間に比べて、被災設備の復旧作業時間の長いことが一つの原因である。総復旧時間の最小化問題を考えたときも、復旧パターンが1となり、復旧班の移動ルート上に被災設備があっても、その復旧が後回しになっているのは、やはり、移動の拘束条件が強く影響しているものと考えられる。いずれにしても、図3が数的に最適な評価を与えている復旧順位であることには間違いはない。

5. 結論

本研究では、被災した電話網に対し、構造上および機能上の評価関数を設定し、ニューラルネットワークを用いて、被災設備の効率的な復旧手順や方針を決定する方法を提案した。その際、迂回中継システムによる回線留保方式の導入により、電話網の機能損失量を評価した。ニューラルネットワークによる最適化計算には、平均場近似法とノイズを付加するクーリングスケジュールを用いた。

本方法を現実的な電話網に適用した結果、1) 本アルゴリズムは被災電話網の機能復旧予測にかなり有効であること、および2) 各種の評価関数が復旧過程に及ぼす影響を容易に調べることができ、最適な復旧方策を

提示できることがわかった。

本研究の考え方や結果の特色を示せば、次のようになる。

- 1) 被災電話網は、交換局と各交換所を対地ルートで結び、迂回中継システムの内線留保方式の交換線群でモデル化した。対地ルートの呼種別呼損率を近似的に評価したことにより、機能復旧の最適化計算ができるようになった。
- 2) 被災道路での復旧班の移動拘束の下で、回線数、呼種別呼損率と復旧時間(復旧班の移動時間と復旧時間の和)を指標とした評価関数を設定した。拡張された評価関数(エネルギー)に基づいたクーリングスケジュールと平均場近似法を用いると、最適復旧順位は容易にかつ高速に求まった。
- 3) 対象とした被災電話網に本アルゴリズムを適用したところ、1) 評価関数の違いは復旧完了時間にあまり影響を与えないこと、2) 復旧班の移動ルートはあまり変わらないが、3つの復旧順位が得られることおよび3) 回線数や復旧時間だけではなく、被災電話網の機能損失量は復旧計画の重要な指標となりえることが明らかになった。

電話通信システムの震災の復旧最適解を事前に予測し、復旧計画を策定しておくことの重要性は、今さら、指摘するまでもない。しかれば、何を根拠として策定するかとなれば、1) 本論文に代表されるモデルを用いた理論予測の結果を用いるか、または2) 経験と専門的知識をもつ専門家の社会的(社会工学的)判断に委ねられる。いずれの研究を用いるにせよ、両者の研究成果は貴重な情報となり、計画策定には不可欠となる。本研究では、理論解析により、システム復旧に対して重要となる影響因子(すなわち、システムの各機能の損失量)を明確に抽出した。本研究で用いた精巧な手法とともに、このような結果は事業主体に貴重な情報を提供できるものと考えられる

参考文献

- 1) (財) 未来工学研究所：情報化社会のアキレス腱—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) 片山恒男・叶耀先・亀田弘行・リチャード・K・アイスナー・米澤啓明・トーマス・M・モア：セッションI-3 災害時の中枢機能と情報、横浜都市防災会議・論文集、pp.57～87、1989年7月、セッションI-3 討論、横浜都市防災会議・最終報告、pp.47～60、平成元年11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、No.63、pp.12～17、1991年10月。
- 4) 野田 茂・小川理宏：ニューラルネットワークを用いた被災電話網の最適復旧過程の評価、第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.275～292、1991年11月。
- 5) Hopfield, J.J. and Tank, D.W.: "Neural" computation of decisions in optimization problems, *Biological Cybernetics*, Vol.52, pp.141～152, 1985.
- 6) (社) 日本工業技術振興協会ニューロコンピュータ研究部会編：ニューロコンピューティングの基礎理論、海文堂出版(株)、1990年12月。
- 7) 須貝康雄・平田 廣則：組合せ最適化アルゴリズムとその応用、計測と制御、Vol.29、No.12、pp.18～25、1990年12月。
- 8) 深尾 毅：分散システム論—熱力学的システム論—、(株) 昭晃堂、昭和62年7月。
- 9) Peterson, C. and Anderson, J.A.: A mean field theory learning algorithm for neural networks, *Complex Systems*, Vol.1, pp.995～1019, 1987.
- 10) Amit, D.J.: *Modeling Brain Function*, Cambridge University Press, 1989.
- 11) Matsuba, I.: Optimal simulated-annealing method based on stochastic-dynamic programming, *Physical Review A*, Vol.39, No.2, pp.2635～2642, March 1989.
- 12) 秋山 稔：通信網工学、コロナ社、昭和59年7月。
- 13) 秋丸春夫・川島幸之助：情報通信トラヒック—基礎と応用—、オーム社、平成2年8月。
- 14) 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)