

解説

ネットワークシステムにおける
信頼性技術†

石川 宏††

1. ま え が き

我が国の電話網は、電電公社発足当時 155 万加入に過ぎなかったものが、爾来 30 年あまりにわたる発展の結果 4,500 万の加入者を擁する巨大なネットワークに成長した。この結果、電気通信は企業活動のみならず一般の社会生活にとっても不可欠な存在となり、これにともない通信ネットワークシステムの信頼性に対する要求は、従来にも増して高まってきている。

また、電気通信設備のデジタル化の進展、専用線サービスや公衆網を用いた各種新サービスの利用増加、電気通信事業の自由化など、通信ネットワークシステムをとりまく状況は急激に変化しており、その信頼性に対する考え方が改めて注目されている。

本稿では、このように近年その社会的重要性をますます高めつつある通信ネットワークシステムの中で、とりわけ大規模複合システムの代表である公衆網の信頼性技術について述べる。その中で、利用者の実感に即し、網設計に反映しやすい形で信頼性目標値の規定法、及び通信ネットワークの各部分における具体的な信頼性対策を紹介し、通信ネットワークの信頼性技術の特徴が種々の信頼性対策の適切な組み合わせによる信頼性向上の点にあることを明らかにする。

2. 通信ネットワークの信頼性

2.1 通信ネットワークの特性

通信ネットワークを信頼性の観点からほかのシステムと比較した場合、次のような特性がある。

① 巨大なシステムである

通信ネットワークは、非常に多くの利用者インタフェースを擁し (NTT の電話網は約 4500 万加入)、それらの間の通信を媒介する多数の設備 (伝送設備、交

換設備、線路・土木設備、電力設備など) からなる巨大なシステムである。したがって、故障する要素も非常に多い。

② 社会活動に密着している

通信サービスの障害は、国民生活に混乱を与え、経済活動に多くの支障をきたす。特に、多数の利用者が同時に障害し、地域が情報的に孤立することの影響は甚大である。

③ 障害モードが多様である

電力やガスを供給するネットワークでは、センターエンドの一方にサービスが提供されるのに対し、通信ネットワーク (公衆網) においては、基本的に不特定多数の相手との間のエンド・エンドのサービスが提供されること、また、サービスの可否がトラヒック処理特性による確率的要素にかかわることから、利用者から見て多様な障害モードがある。すなわち、全対地と通信できない/一部の対地と通信できない、あるいは、一度り障してもかけ直せば通信可能/ある確率で通信可能/通信不能、といったさまざまな障害モードがある。

2.2 通信ネットワークの障害要因

公衆網では、多数の利用者により設備共用している部分があることから、故障による設備量の減少はもちろんである。トラヒックの増加によっても障害が発生し得る。具体的には、次のような障害要因がある。

① 設備の故障

ハードウェアの故障だけでなく、ソフトウェアのバグ、オペレーションによるものも含む。

② 自然災害

地震、台風など、設備の大規模な損壊を招く場合がある。

③ 異常トラヒック

チケット予約などの企画型呼、災害発生時の見舞い呼などにより、特定の利用者や地域へ呼が殺到すること、交換機に過負荷がかかり、一般の呼までかかってくる場合がある。

† Reliability Technology in Network Systems by Hiroshi ISHIKAWA (Network Technology Department, Network Systems Development Center, Nippon Telegraph and Telephone Corporation).

†† 日本電信電話(株)ネットワークシステム開発センタ
通信網技術部

2.3 通信ネットワークの基本的な構成

通信ネットワークは、基本的に、離れた場所に情報を伝達するための回線の通り道である「伝送路」と、所望の通信相手への回線を選択するための「交換機」の組み合わせにより実現されている。論理的にどの交換機相互間や交換機 - 端末間に回線があるのかを示すのが図-1(a)の交換網、物理的に回線がどの伝送路、伝送端局装置に收容されているのかを示すのが図-1(b)の伝送路網である。

また、通信ネットワークは、利用者への障害の現れ方の違いから、図-2のように「加入者系」と「中継系」に区分される。

加入者系は、加入者線と加入者線交換機からなり、これらは、利用者が通信を行う場合に必ず使用される設備である。したがって、これらの設備が故障すると、利用者は通信途絶となり得る（特に加入者線交換機や大束の加入者線が全断となると地域的な通信途絶を招く場合がある）。

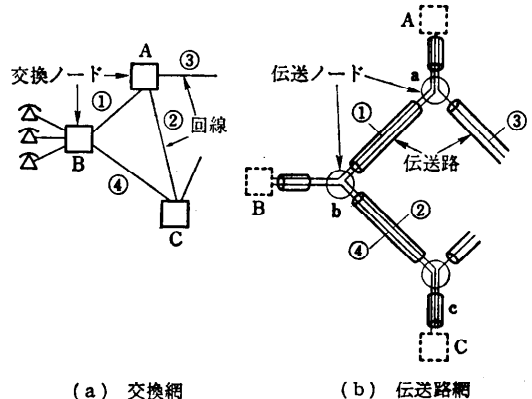
加入者線交換機相互間を結ぶ中継系は、中継線交換機、中継伝送路などからなる。その交換網は一般に図-3のような階層構成になっており、各交換機とそれが帰属する上位交換機との間、及び最上位の中継線交換機相互間が「基幹回線」によって結ばれている。また、基幹回線により結ばれていない交換機相互間でも、トラヒック交流が大きい場合には「斜め回線」が設けられる。中継系の故障は、対地 - 対地間通信途絶、自局外通信途絶を招き得るが、後述する信頼性対策により対地 - 対地間に複数の回線経路がある場合には、利用者から網のスループットの低下（かかりにくさ）としてみえるのが一般的である。また、中継線交換機は傘下に多数の加入者線交換機をもつこと、中継伝送路は通常多くの基幹回線や斜め回線を收容していることから、中継系の故障の影響は広い範囲にわたることになる。

3. 信頼性目標値の規定法

通信ネットワークの信頼性目標値は、前章で述べた通信ネットワークの特性やそれに基づく利用者の要求条件を十分考慮するとともに、網設計に反映しやすい形で規定される必要がある。以下に、NTT がデジタル通信網を構築していくにあたって規定している信頼性目標値の考え方について述べる。

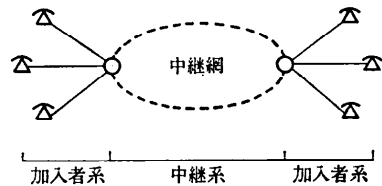
3.1 信頼性の尺度

信頼性の尺度としては、一般に、システムが故障す



(a) 交換網 (b) 伝送路網
 (図(b)における A, B, C 及び①, ②, ③は、図(a)の交換ノード及び回線にそれぞれ対応)

図-1 交換網と伝送路網



- △ : 端末機
- : 加入者線
- : 加入者線交換機

図-2 加入者系と中継系

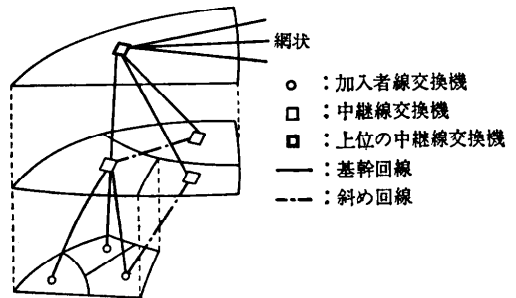


図-3 中継系の階層構成

る頻度を表す「故障率」(その逆数が MTBF)、故障が回復するまでの時間を表す「平均修復時間」(MTTR)、システムが故障状態にある確率を表す「不稼働率」がよく用いられる。これらの尺度の間には、次の関係がある。

$$(\text{不稼働率}) = (\text{故障率}) \times (\text{平均修復時間})$$

通信網の信頼性規定においては、

- ① 利用者が通信ネットワークを利用したいときに

利用できない確率として捕らえることができる。

② システム設計の観点から、故障率や修復時間の異なる各種設備を総合的に評価するのに適している。ことから、基本的に不稼働率を用いている。

3.2 加入者系の信頼性規定法

加入者系の設備には、宅内引き込み線や交換機の加入者回路のように利用者と1対1に対応する部分や、大束の加入者線や交換機の共通制御装置のように多くの利用者に対応する部分がある。後者の故障により多数の利用者が同時に障した場合の社会的影響は、非常に大きい。したがって加入者系においては、「大規模な故障ほど起こりにくくするよう、「故障規模別不稼働率規定」を行っている。

これは、デジタル化によって装置が大規模集約化されても、その不稼働率を改善することにより、従来のように小規模装置を多数設置した場合と比べて、故障によって社会に与える迷惑（社会的迷惑量と呼ぶ）の期待値が増大しないようにするという考え方に基いている。具体的には、故障規模（同時障利用者数） x の故障による社会的迷惑量を $L(x)$ 、故障規模 x に対する不稼働率を $f(x)$ とし、エリア内で発生する社会的迷惑量の期待値 ($L(x)$ と $f(x)$ の積和) を一定とするよう $f(x)$ を定める。図-4のように、利用者数 $2x$ のエリアに規模 x の装置（ここでは加入者線交換機）を2個設置する場合と規模 $2x$ の装置を1個設置する場合を考えると、前者における社会的迷惑量の期待値 E_0 は、

$$E_0 = f(x)L(x) + f(x)L(x) = 2f(x)L(x)$$

後者における期待値 E_0 は、

$$E_0 = f(2x)L(2x)$$

と表される。 E_0 と E_0 を等しいとおき、両辺を $2x$ で割ると、次式となる。

$$f(x)(L(x)/x) = f(2x)(L(2x)/2x)$$

この式を常に成り立たせる $f(x)$ は、

$$f(x) = kx/L(x) \quad (k \text{ は定数})$$

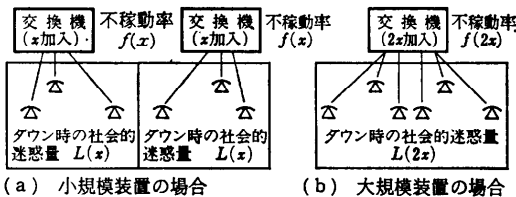


図-4 装置規模と社会的迷惑量

となる。この $f(x)$ が図-4の例のように装置規模 $1:2$ のときのみならず、一般に $1:n$ の場合にも適用できることは、上記の導出過程から明らかであろう。

$L(x)$ をこれまでの調査などから定めることにより、加入者系の不稼働率規定は図-5 のようになる。

3.3 中継系の信頼性規定法

中継系の障害に対して利用者が品質として感じるのは、設備がどのように故障しているかではなく、網の疎通能力がどのくらい低下しているかである。たとえば、ある設備が故障しても疎通能力が低下しなければ利用者への影響はない。

したがって中継系においては、網の疎通能力の低下が社会に与える影響に基づいて、故障を表-1 のようにクラス分けし、「疎通能力別不稼働率規定」を行っている。疎通能力の尺度としては、疎通率（＝故障時に運ばれる呼量/正常時に運ばれる呼量）を用いる。

図-6 に加入者線交換機相互間の規定例を示す。

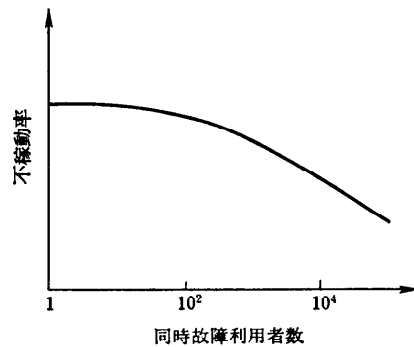


図-5 加入者系の不稼働率規定

表-1 疎通能力による故障の分類

クラス	社会に与える影響	疎通率
クラス1	<ul style="list-style-type: none"> 最繁時に発生すると社会活動の効率が一部低下するが、社会的影響はほとんどない トラヒック規制はかからない 	80~100% 未満
クラス2	<ul style="list-style-type: none"> 社会活動の効率が低下する トラヒック規制がかかる 	60~80% 未満
クラス3	<ul style="list-style-type: none"> 社会的統制機能は維持できる 社会活動の効率が大幅に低下する 	10~60% 未満
クラス4	<ul style="list-style-type: none"> 通信途絶またはそれと同様な状況となる 社会的統制機能の維持が困難となり、社会的混乱が発生する 	10% 未満

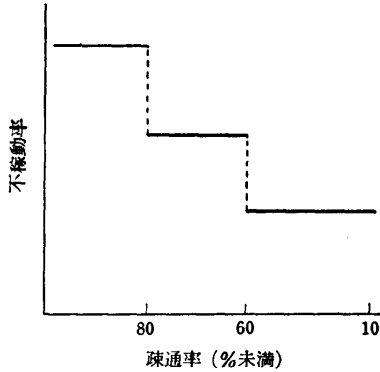


図-6 中継系の不稼働率規定

4. 具体的な信頼性対策

通信ネットワークにおいて所定の信頼性を実現するための個々の手段を紹介する。

4.1 装置の信頼性対策

装置単体の信頼性を向上させる方法には、次の二つがある。

① 装置の故障発生率の低減

故障発生率自体を小さくする方法には、高信頼度部品の使用や、回路構成法の工夫、電子回路の高集積化による部品個数の削減などがある。

② 冗長設計

冗長設計とは、装置の中に予備をつくりつけておくことで2重化構成とN+1構成がある。2重化構成は交換機の中央制御装置や通話路などに、N+1構成は交換機の主記憶装置などに用いられている。また、局舎電源装置は、図-7のように蓄電池と自家発電用エンジンにより、2重にバックアップされている。

4.2 網的手法による信頼性対策

装置の信頼性向上はコストとの兼ね合いでおのずと限界がある。一層の信頼性を得るため、面的な広がりをもつという通信ネットワークの特徴を利用し、網的な規模で機能の代替や危険分散を行うのが、網的手法による信頼性対策である。

中継系の伝送路網における対策には、伝送路の2ルート化、多ルート化、伝送関門局分散、交換網における対策には、ユニット分散、交換局分散、斜め回線の設定などがある。また、伝送路網、交換網の双方に関わる対策として、2重帰属がある。

さらに、従来網的手法による信頼性対策を打ちにくい領域であった加入者系において最近検討されている対策や、異常トラヒックによる輻輳への対策も紹介

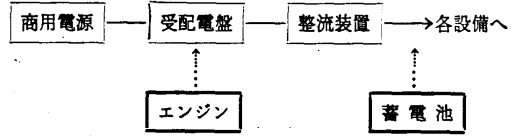


図-7 局舎電源

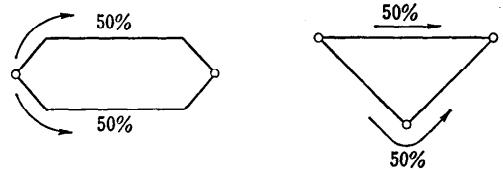


図-8 伝送路の2ルート化

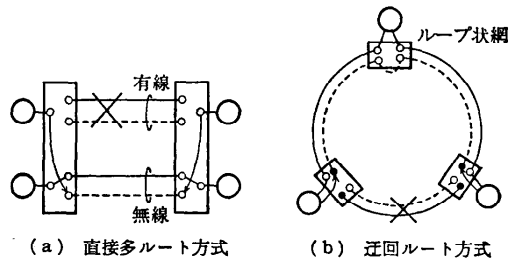


図-9 伝送路の多ルート化

する。

① 伝送路の2ルート化

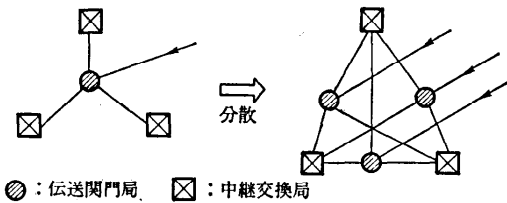
伝送路の2ルート化とは、図-8に示すように2地点間に2個のルートを作り、平常時は各ルートに50%ずつトラヒックを疎通させるように伝送路を設備しておき、危険分散をはかるものである。

② 伝送路の多ルート化

伝送路の多ルート化とは、一つの伝送路が故障したときにこのルートに収容されているすべて（またはある割合）の回線を切替スイッチによりほかのルートの予備伝送路に切り替えて救済できるように、複数個のルートによって構成される伝送路構成をいい、図-9に示すように直接多ルート方式と迂回ルート方式がある。

③ 伝送関門局の分散

多数の中継交換局のある大都市において、そこに入りする伝送路が一つの関門局を經由している場合、その局の電源故障などによりエリア内の全交換局に発着する回線が使えなくなる。このため、伝送関門局を複数個設置し、危険分散をはかる(図-10)。たとえば、東京では、大手町、新宿、唐ヶ崎などに伝送関門局が設置されている。



●：伝送閉門局、□：中継交換局
 図-10 伝送閉門局の分散

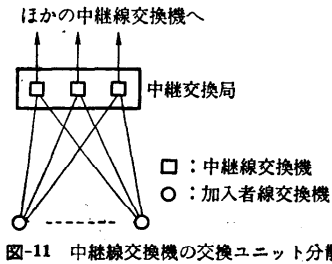


図-11 中継線交換機の交換ユニット分散

④ 中継線交換機の交換ユニット分散、交換局分散
 中継線交換機のシステムダウンにより、あるエリアの中継接続機能が失われることを防止するため、同一階梯の交換機を複数ユニットに分散することにより、危険分散をはかる (図-11)。

さらに、上位の中継線交換機においては故障の影響が広範囲にわたるため、地震などによる交換局の全断に備え、遠隔地に交換局を分散設置することにより、危険分散をはかる。

⑤ 斜め回線の設定と迂回

斜め回線は本来、経済性の観点からトラフィック交流の大きな交換機間に設けられる高使用率回線であり、斜め回線を溢れた呼は基幹回線へ迂回する。斜め回線の設定された対地へ向かう呼にとっては、選択可能な回線経路が増加するため、信頼性の観点からも危険分散の効果がある。

⑥ 加入者線交換機の中継線交換機への2重帰属

2重帰属とは、図-12 (a)のように、加入者線交換機から自エリアの中継線交換機と隣接エリアの中継線交換機へ異経路の伝送路により基幹回線を設けることにより、中継線交換機のシステムダウンや、中継交換局の局舎電源断、中断交換局～加入者線交換局間の伝送路設備の故障などに対して危険分散をはかるものである。隣接エリアの中継線交換機への回線は基幹回線であるので、隣接エリアとの通信にのみ用いられる斜め回線と異なり、すべての対地との通信に用いることができるという点に注意を要する。

2重帰属を行うと、図-12 (b)のように自エリア内

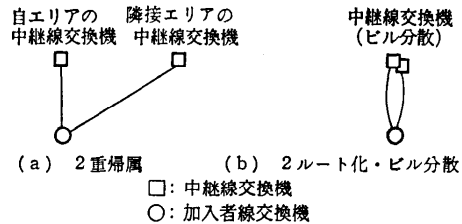


図-12 2重帰属と2ルート化・ビル分散

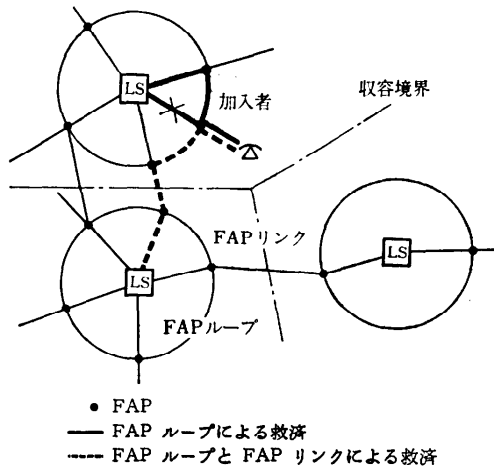


図-13 FAPを用いた加入者系網構成例

で中継交換設備、中継伝送設備を二つのビルに分散し、中継交換局～加入者線交換局間の伝送路を2ルート化した場合とほぼ同等の信頼性が得られる。加入者線交換局から隣接エリアの中継交換局への伝送路経路を設けることがそれほど困難でなければ、2重帰属のほうが図-12 (b)の構成よりも一般に経済的である。

⑦ 加入者系における信頼性対策

加入者系は利用者と加入者線交換機をスター状ケーブル網で結ぶ単純な構成をしており、設備量も膨大なことから、網的手法による信頼性対策を打ちにくい領域である。しかしながら、最近、切替接続が簡易に行えること、空心線を有効利用して代替伝送路を確保することなどを主眼とした対策として、図-13 に示すようにスター状網の途中に切替点 (FAP, free access point) を設けるとともに、切替点相互を空心線を使ってループ状に結ぶような対策が検討され始めている。

⑧ トラフィック制御による異常輻輳対策

特定の対地や利用者に向かう過大なトラフィックが網に加わると、中継線交換機や着信交換機において無効処理時間 (結果的につながらない呼に対する処理時間) や共通リソースの無効保留 (つながらない呼によ

る保留)が増加し、ほかの平常レベルのトラヒックしか加わっていない対地や利用者に向かう呼も、処理待ち合わせ時間や共通リソースのブロック率の増大といった影響を受ける。そのため網の疎通能力が、伝送路などの設備の容量に比べて、相対的に著しく低下してしまう。

これを防止するため、着信側の交換機や中継線交換機で輻輳を検出し、そこへの接続規制制御を行うのが、トラヒック制御方式(TCS)である。TCSでは、網内での無効処理、無効保留を最小にするため、網の入口(加入者線交換機)で輻輳対地や利用者へ向かう呼を識別し、接続を規制している。その結果、図-14に示すように、網が本来もっている疎通能力が維持される。

たとえば、図-15のようにある利用者へ向かって呼が殺到し、着信側の交換機で輻輳が検出されると、その情報が輻輳制御装置に伝えられる。輻輳制御装置は、輻輳の度合いに応じてトラヒック規制の開始、強化、緩和、解除を決定するアルゴリズムを持っており、それによって決定された規制クラス(輻輳利用者へ向かう呼の何%を規制するか)と規制すべき電話番号を各加入者線交換機に伝え、規制が実施される。

4.3 災害対策

地震、洪水、火事などの災害によって通信ネット

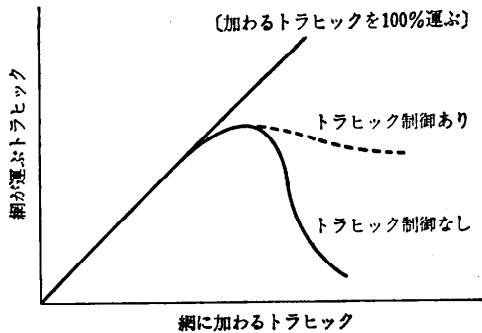


図-14 トラヒック制御による網の疎通能力の維持

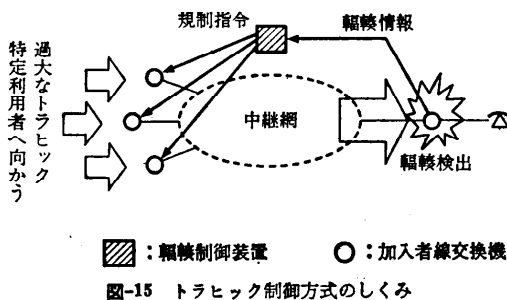


図-15 トラヒック制御方式のしくみ

ワークの設備が大きな被害を受けたときに、一刻も早く応急復旧を行い、本復旧までの間、極力通信の疎通を確保し、社会的影響を低減することが必要である。そのため、NTTの通信ネットワークにおいては、衛星通信車載局、可搬形交換機、移動電源車、孤立防止用無線機、移動無線車、応急復旧用ケーブルなどが全国各地に配備されている。それらの一部について以下に紹介する。

① 衛星通信車載局

衛星通信車載局は、通信衛星を経由して、被災地からの電話回線、テレビ中継回線などを設定するものである。使用周波数帯は準ミリ波帯である。

交換局や伝送路が被災した場合には、図-16のように臨時回線を設ける。これは、車載局～固定局間に回線設定する例であるが、車載局相互間、固定局相互間の回線設定も可能である。

② 移動無線車

火災などによる局部的地域孤立の救済には、TZ-403と呼ばれる可搬形無線機を搭載した移動無線車が用いられる(図-17)。

TZ-403は、400MHz帯の周波数を利用しており、最大24の電話回線を作成可能である。大束の加入者線の断による局部的孤立のほか、加入者線交換機～中継線交換機間伝送路の被災時の救済にも使用される。

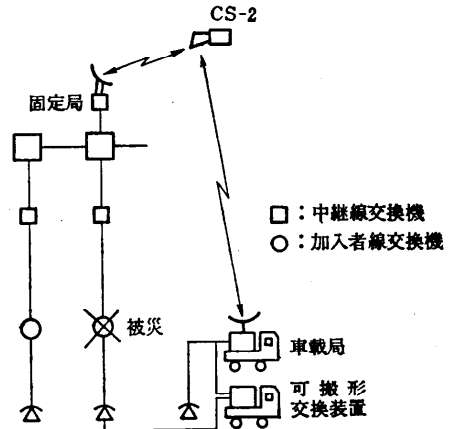


図-16 衛星通信車載局の使用例

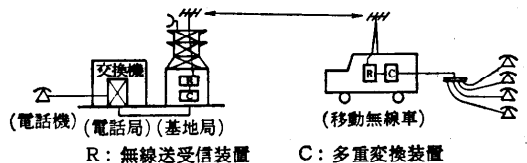


図-17 移動無線車の使用例

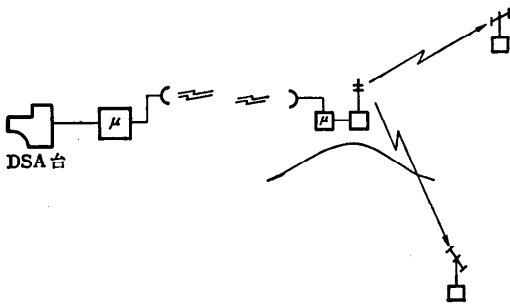


図-18 孤立防止用無線機

③ 孤立防止用無線機

災害時に市町村などの完全孤立を防止するため、60 MHz 帯を用いた TZ-60 という可搬形無線機が、全国の市町村などに配備されている。これは、図-18 のように、無線中継所を介して電話交換台との通信を確保するものである。

5. 信頼性設計の簡易な例

本章では、中継系ネットワークの簡易な例を用いて、所定の信頼性を満足するよう個々の信頼性対策がどのように組み合わせられるかを示す。なお、グラフ中に示す各装置の不稼働率や目標値の大きさは説明のためのものであり、それらの相対的關係は実態を表しているわけではない。

中継系の疎通能力別不稼働率規定 (3. 参照) では疎通能力の尺度として疎通率を用いているが、網設計上は疎通率を回線残存率に換算しておいた方が便利である。本章の例では表-2 のような疎通率と回線残存率の關係を仮定する。

まず、図-19 の三つの網モデルを設定する。モデル1は2地点にそれぞれ1ユニットの交換機があり、その間の回線を1ルートの伝送路に収容したモデルである。モデル2では、交換機の2ユニット分散、伝送路の2ルート化がなされている (各交換機や伝送路に回線を均等分散)。モデル3ではさらに、双方のルートに50%の予備伝送路を設けておき、一方のルートの故障時には収容されている回線の半数が切替スイッチにより救済されるようにしている。

各モデルにおいて、各装置の不稼働率を積み上げることにより2地点間の回線残存率別不稼働率を求めると、図-20 のようになる (ここでは、装置の部分故障は考えず全断のみを考えている)。

モデル1では、どの装置が故障しても2地点間の回

表-2 疎通率と回線残存率の対応關係

疎通率 (%)	100	80	60	10
回線残存率 (%)	100	70	50	10

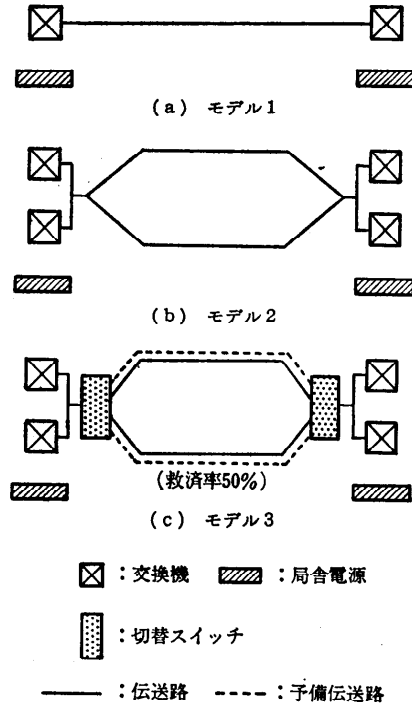


図-19 中継系の網モデル

線残存率は0%となるので、系の不稼働率は図-20 (a)のように横一線のグラフで表される (これは、回線残存率がx%未滿となる確率がxの値によらず回線残存率0%となる確率に等しいという意味である)。図-20 (a)からモデル1の不稼働率は回線残存率50%未滿で目標値を上回ることがわかる。

モデル2では、一つの交換機や伝送路の故障時に50%の回線が残存する。交換機や伝送路の2重故障の確率は小さいので、図-20 (b)のように回線残存率50%未滿では交換機、伝送路の不稼働率がなくなり、目標値が満足される。しかし、分散によりモデル1よりも装置数が多くなり、どれか一つの装置が故障する確率が大きくなっているため、回線残存率50%~70%未滿で不稼働率が目標値を上回っている。

モデル3では、伝送路1ルートの故障時、そこに収容されている現用回線 (全体の50%)の半数が切替スイッチによって救済されるので、回線残存率は75%である。したがってこのモデルの不稼働率は図-20 (c)

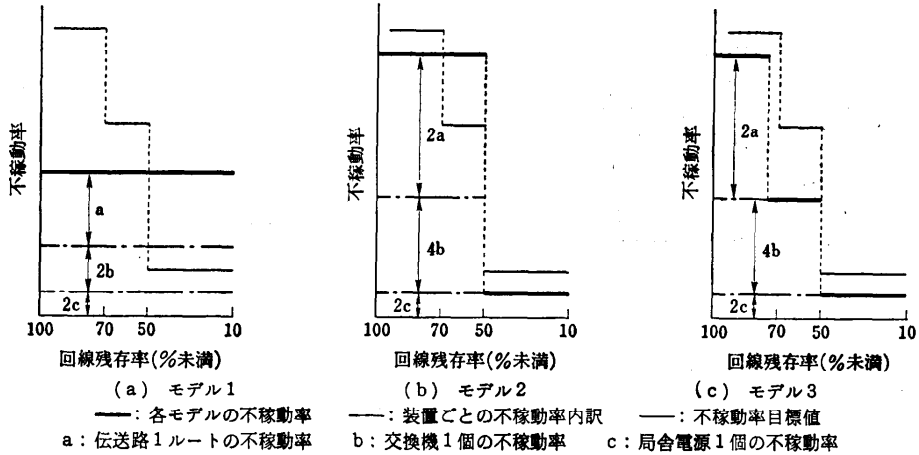


図-20 回線残存率別不稼働率

のようになり、目標値が満たされる。なお、切替スイッチの故障時には切り替えが不能になるだけで、現用回線に影響はないとする。また、切替スイッチと伝送路の同時故障は確率が小さいため考慮していない。

実際の通信ネットワークは、上記の例よりも複雑な構成をしているが、やはり各種の信頼性対策の組み合わせにより目標とする信頼性レベルを実現するように設計されている。

6. あとがき

以上、通信ネットワーク（公衆網）の信頼性技術について概観し、その特徴が、装置の信頼性対策のみならずさまざまな網的信頼性対策の組み合わせにより信頼性向上をはかっている点にあることを述べた。

信頼性（安定品質）は、接続品質、伝送品質と並んで通信ネットワークにおける基本的な品質の一つであり、Plan→Do→Seeの品質ループの循環により、適正な水準を維持すべきものである。したがって、本稿で信頼性技術として紹介した信頼性目標値の規定(Plan)、網の信頼性設計(Do)に引き続き、実際の通信ネットワークにおいて信頼性目標値が満足されているか、また、それが利用者の要求条件に合っているかを常に検証し(See)、信頼性技術にフィードバックしていくことが重要である。

本稿で紹介した通信ネットワークの信頼性規定法の考え方や各信頼性対策が、ほかのネットワークシステムの信頼性技術の参考になれば幸いである。

(昭和62年4月13日受付)