

信頼性の評価手法と基本特性

コージェネレーションシステムを用いた空調システムの信頼性評価法に関する研究 その1
RELIABILITY EVALUATION METHOD AND FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS
Reliability evaluation method for air-conditioning systems with co-generation system Part 1

渡邊 均*, 林 正博*, 羽山広文**

Hitoshi WATANABE, Masahiro HAYASHI and Hirofumi HAYAMA

Co-generation systems (CGS) are currently increasing more and more because of its high efficiency of energy and those systems are also introduced in air-conditioning systems for telecommunication sites. Reliability evaluation method for simple air-conditioning systems had been investigated. The previous method is not applicable for air-conditioning systems with CGS, because of the system complexity. This paper reports on the following studies that established new reliability evaluation method and investigated the reliability characteristics of air-conditioning systems.

- 1) A calculating method of the reliability of air-conditioning system taking into account the probability that room temperature will exceed allowed temperature after a shutdown in air-conditioning units is presented.
- 2) Some configurations of air-conditioning systems with CGS are analyzed by this method, the reliability characteristics of the systems are investigated.
- 3) Evaluation errors of this method are considered.

Keyword: Air-conditioning, Reliability, redundancy design, Unavailability

空気調和、信頼性、冗長設計、不稼働率

1. まえがき

通信網は現代社会の重要なインフラストラクチャーである。その停止は、社会生活の混乱の原因ともなるので、従来よりさまざまな高信頼化策が取られてきた。一般に、製品やサービスの信頼性は、企画、設計、製造、運用、廃棄に至る一連のライフサイクルフェーズを通して管理されるべきものである¹⁾が、その信頼性は、企画・設計段階で8割方は決まってしまうと言われている。この観点から、我が国の通信網においては信頼性設計基準が整備され、それに従って通信網の設計・建設が行なわれてきた^{2),3),4)}。この基準は、通信網の機能を通信サービスをお客様に提供することと捉え、その機能に対する要求信頼性を明らかにした上で、その要求を、交換機や伝送装置といった通信網を構成する要素の目標信頼性へと具体的に配分することで、各要素の信頼性設計に対する指針を与えるものである。

ところで、通信機室の空調システムも通信網の構成要素の一つであり、通信機器の動作環境を良好に保つ働きをしている。この空調システムも、通信サービスの信頼性を良好に保つとの観点から、通信網の他の構成要素と同様な考えで信頼性設計がなされる⁵⁾。

システム信頼性設計は、予備装置の有無などをさまざまに変更したシステムの信頼性を事前に評価し、それら代替案の中で、信頼性の面でもコストの面でも妥当な方式を選定するというプロセスで行われる。従って、

空調システムの信頼性設計を行なうには、空調機台数や空調機1台毎の冷却能力、空調機への電力供給系における予備発電機の設置有無などシステム構成上の可変要因をさまざまに変化させたときに、信頼性を評価する手法が必要である。ところが、空調システムの特徴として、その装置自体の故障は直ちには通信機器の動作へ影響せず、一定時間後室温が許容値を突破して初めて、通信機器の動作へ支障が出ることが上げられる。そのため、この特徴を考慮した信頼性評価手法が必要である。この点、文献6)には、空調システム停止後の室温上昇に要する時間を考慮した信頼性評価手法が述べられている。

近年、発電コストの低減を目的に、ガスを燃料として発電機を動作させ、それより得られる電力と排熱を通信機や空調システムのエネルギー源として利用するコージェネレーションシステム（以下「CGS」という）の導入が進んでいる。CGS導入時の空調システムに対しても信頼性設計が必要であるが、従来の研究⁶⁾のみでは、以下の点で不十分であった。第一に、CGSシステムの場合、信頼性評価の対象とするシステムの構成が、文献6)が対象とするものより格段に複雑であり、かつ今後の変更可能性も大きい。設計のためには、さまざまな構成のシステムを統一的に扱う、より一般的な解析手法が必要となる。第二に、CGSを用いた空調システムは、電力で稼動するタイプの空調機（以下「PAC」（パッケージ型空調機：Packaged Air Conditioner）という）と排熱を供給されて稼

* NTT サービスインテグレーション基盤研究所 博士(工学)

NTT Service Integration Laboratories, Dr. Eng.

** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

動するタイプの空調機（以下「AHU」という）の2種類を利用するが、これら異なる空調機の予備台数や、電力予備（例えば商用電力と予備発電機）と排熱予備（例えば、ガスタンクによるガスの備蓄）の有無などがシステム信頼性に及ぼす影響は複雑であり、信頼性設計を能率的に行なうためには、前記の各要因がシステム信頼性に及ぼす影響に関する知見を蓄積しておく必要がある。

そこで本論文は、上記第一の課題に対しては、文献6)の手法をさらに一般化し、今後のシステム構成の変更にも対処し得るような解析法を確立したものである。また第二の課題に対しては、システム構成とシステム信頼性の関係を明らかにすべく、幾つかのシステム構成についてその信頼性特性を検討したものである。尚、実際の空調システムの信頼性は、設置される建物の熱特性や気候条件などに依存するので、最終的にはこれらの条件を特定した下でシステム設計がなされなければならないが、本論文はより広い条件の下での一般的な信頼性特性を検討したものである。

2. 対象とするシステム

一般に高発熱の機器が大量に設置される通信機械室では、室内の発熱密度が高く、室内の冷却には、二重床吹出し空調方式を用いることが多い⁷⁾。この方式は、二重床内をチャンバーに利用していることから、一部の空調機が停止した場合でも、空調給気が滞ることなく、空調システムの信頼性を確保するのに適している。本論文では、二重床吹出し空調システムを対象に検討を進める。

システム構成の一例を図1に示す。システムは、AHU及びPACと呼ばれる2種類の空調機と、これらが稼動するためのエネルギーを供給する部分とからなる。ここで、AHUとPACは、稼動するためのエネルギー種類が異なり、AHUは冷水の供給を受けて稼動し、PACは電力により稼動する。AHUに冷水を供給する部分は、都市ガスを受ける「燃料部分」、ガスを燃料に発電とともに排熱を供給する「発電機（以降「GE」という）部分」、排熱を冷水に変換する「冷凍機（以降「REF」という）部分」の系列より成る。また、PACへの電力供給は、通常時は商用電力とGEからの電力が、適当な配分比率の下に供給される。また、商用電力停止時には必要に応じてGEとは別に設けられた予備発電機（以降「GT」という）から電力供給を受けたり、あるいは、GE停止時には通常よりも多くの電力を商用電力から受電したりなどする。また、本論文の対

象外であるが、GEからの電力はPACだけでなく、通信機へも供給される。

各部における動作と予備装置の役割は以下による。

- 1) 燃料部分：通常時は都市ガスを配管により受けている。都市ガス停止時に備えて、LPガス（LPG）を保持しておくケースがある。これらは、GEの燃料として供給される。LPガスの保持量は、全GEの所要量に対して何時間分かを単位として表現される。
- 2) GE部分：GEは、燃料部分より供給されるガスを燃料に発電を行なう。電力は、PAC及び通信機に供給され、発電の際に生じる排熱はREF部分に供給される。ここで、発電機1個ずつの発電能力や発電機数は、コストと信頼性などの考慮の下に決定されるが、必ずしも、PAC及び通信機の必要とする電力をGEのみで全て供給するように設定されるとは限らない。GEが停止したときに備えて、バーナが設置されることもある。バーナには発電能力はないが、REFへの熱供給を行なうことができる。
- 3) REF部分：REFは、発電機から供給される排熱を利用して、冷水を発生させる。発生した冷水はAHU部分へ供給される。REFの台数は一般には複数である。
- 4) AHU部分：REF部分から供給される冷水を受けて、AHUは通信機室の冷却を行なう。AHUも一般に複数台設置される。AHU1台当たりの冷却能力は決まっており、故障により停止するAHU数が多くなるほど冷却能力は低下し、室温が許容値を超えるまでの時間は短くなる。
- 5) 電力部分：通常時は商用電力を受電し、PACに供給する。商用電力の容量は全てのPACを稼動させるのに必要な量をまかなえる。商用電力が停止したときは、GTが稼動する。ここで前述のように、GEからもPACへの電力供給がなされるので、GTの設置の有無やその発電能力の決定は、熱源系の発電機部分と総合した検討の下に行なう必要がある。
- 6) PAC部分：電力によって動作する点を除き、AHU部分と同様である。

3. 解析方法

3.1 従来の手法

空調システムを構成する要素（都市ガス（以下「TG(B)」という）、GE、

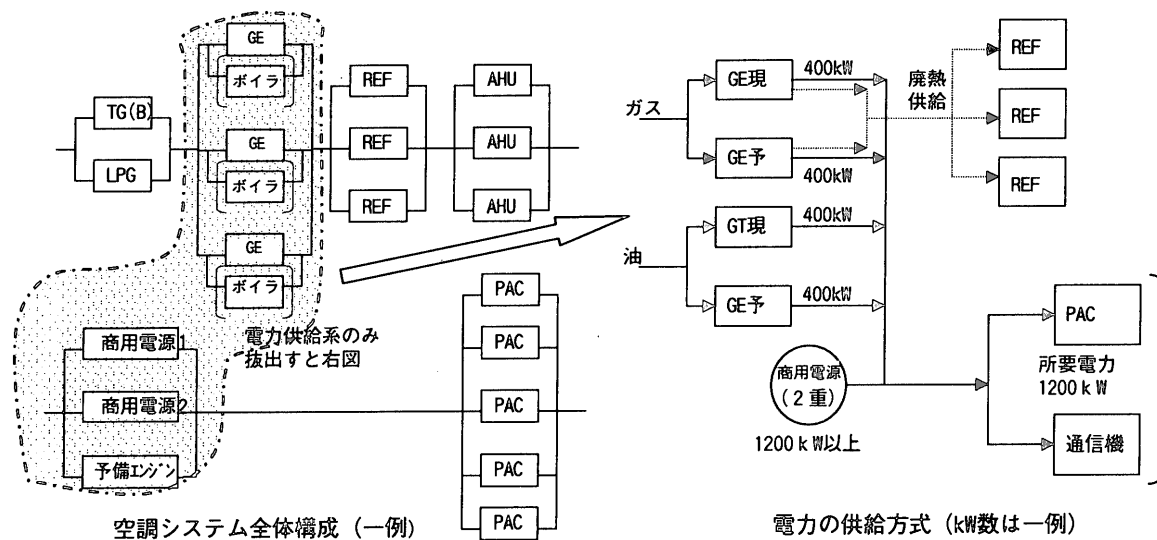


図1 解析対象システム (一例)

AHU等)それぞれの故障時間分布と修理時間分布を指数分布とすると、システム全体の故障・修理の過程はマルコフ過程となる。すなわち、システムは有限個の状態に記述され、それら状態間で一定の遷移率で遷移が繰り返される。ここで、各状態毎に稼働している空調機の本数は決まっているので、仮にその状態が引き続いたとしたときの、室温が許容値を超過するまでの時間も定まる。そこで、各状態に遷移してから時間(確率分布)と室温が許容値を超過するまでの時間(状態毎に一定。以降「許容時間」という)とを比較し、状態が許容時間を超えて長引いている部分のみをシステム不稼働状態としてこれらを積算することでシステム信頼性評価を行っている(図2)。システム信頼性の具体的な尺度としては、システム不稼働率 U_s と、システムダウン発生頻度 F_s を求めている。具体的には、以下の式で求められる。

$$U_s = \sum_i \lambda_i \int_{T_i}^{\infty} g_i(t) dt \quad (1)$$

$$F_s = \sum_i \lambda_i \int_0^{T_i} (t - T_i) g_i(t) dt \quad (2)$$

ここで、 i はマルコフ過程の状態番号を表し、 λ_i は状態 i への遷移が発生する頻度、 $g_i(t)$ は状態 i への遷移が発生した時点を中心として他の状態への遷移が時刻 t に発生する確率密度、 T_i は状態 i における許容時間である。また、 \sum は全ての状態 i について和を取ることを意味する。従来⁹⁾は、限られた構成のシステムに対して、上記の式を具体的に書き下し、信頼性評価を行っていた。

3.2 提案の手法

従来、限られた構成のシステムのみを対象にしていたのを、一般的な構成のシステムを解析可能とすること、及び計算量を削減することを目的として、以下のように変更した。

3.2.1 一般的システム解析のための手法

式(1)、(2)における、①ある状態 i への遷移が発生する頻度 λ_i 、②その状態における許容時間 T_i 、③許容時間 T_i が与えられた下での、状態 i に許容時間を超えてとどまり続ける確率及び、許容時間を超えて状態 i にとどまる時間(式中の積分)が求められればシステム不稼働率とシステムダウン発生頻度が求められる。

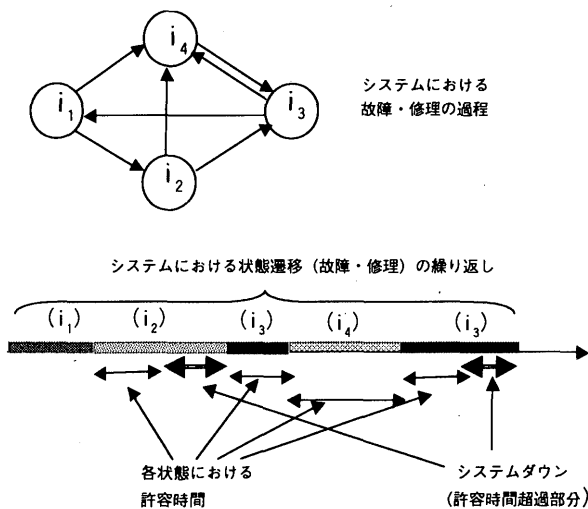


図2 状態の繰り返しと許容時間超過部分

(1) サブシステムへの分割

解析対象となるシステムを、挙動が独立なサブシステムに分割して、まずそれらのサブシステムのマルコフ過程(以降「サブマルコフ過程」という)を作成する。空調システムは、前述のように「燃料部分」、「電力部分」等の各部分に分かれるので、概ねこれらの単位が「サブマルコフ過程」となるが、本手法で想定する分割は、分割後のサブシステムが以下の2条件のうちのいずれかを満たすものとする。

条件1: 着目サブシステムの状態は、AHUまたはPACのいずれか一方の稼働数にのみ影響する。かつ、着目サブシステムの状態の中には、他のサブシステムの要素に故障がないとした場合でも、AHU(またはPAC)の全数停止を引き起こす状態と、全く停止しない状態の両方を含む。

条件2: 着目サブシステムの状態は、AHU及びPAC双方の稼働数に影響する。かつ、着目サブシステムの状態の中には、他のサブシステムの要素に故障がないとした場合でも、AHU及びPAC双方の全数停止を引き起こす状態と、全く停止しない状態の両方を含む。

条件1を満たすサブシステムをタイプ1のサブシステム、条件2を満たすサブシステムをタイプ2のサブシステムという。サブシステムにこのような条件を課すのは、サブシステムの状態と許容時間との対応を明確にし、解析を行いやすくするためである。図3にサブシステムへの分割の例を示す。

(2) λ_i 及び許容時間を超えてとどまり続ける確率等

ここで、サブマルコフ過程は、状態間の遷移率を行列形式で書き表す(生成行列)形式で与えられているものとする(すなわち、行列 A の (i, j) 要素 a_{ij} にて、状態 j から状態 i への遷移率を表す)。このように、各サブマルコフ過程の生成行列が与えられたとの前提で、システム全体の λ_i 等は以下となる。

まず、システム全体としてみた場合のある状態($j_1, j_2, \dots, j_k, \dots, j_m$)の定常状態確率は、サブマルコフ過程の定常状態確率の積になることより、 $P_{j_1} \cdot P_{j_2} \cdot \dots \cdot P_{j_k} \cdot \dots \cdot P_{j_m}$ である(ここで、 P_{j_k} は第 k サブシステムの状態 j_k のサブシステムとしての定常確率)。このようにして、システム全体を一つのマルコフ過程と考えた時の、各状態の定常確率が求められる。次に、着目する状態 i への遷移の起る頻度 λ_i は、それに遷移可能な全ての状態の状態確率に、着目状態への遷移率を掛けたものの

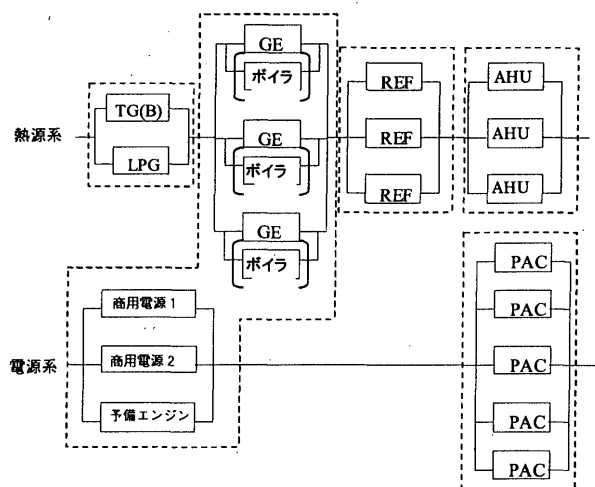


図3 サブシステムへの分割の例

和である。また、着目状態から他の何れかの状態への遷移までの時間分布は指数分布であり、着目状態から他のあらゆる状態への遷移率の単純和をもとに求められる。従って、 T_i が与えられれば、これらから式(1)、(2)の積分は求められる。かくして、上記の①と③は解決する。

(3) 許容時間 T_i

状態*i*における許容時間は、その状態において稼動している AHU 数と PAC 数に応じて決まる。そこで、解析の前提として、許容時間は稼動 AHU 数と稼動 PAC 数の対に対応づけられて、予め与えられているものとする。

このときに、着目するシステム状態 i と T_i との対応が分かれば、式(1)、(2)の計算が可能になる訳であるが、ここで、状態 i はサブシステムの状態の組 $(j_1, j_2, \dots, j_p, \dots, j_m)$ なので、直ちに上記データの許容時間と対応しない。これについては、図4に示すようなテーブルを、各サブシステム毎に保持することで解決する。すなわち、各サブシステムにおける各状態のもとで稼動する空調機数（例えば「冷凍機部分」について言えば、REF が n 個のみ稼動している状態で、その REF から供給される冷水の容量にて稼動する AHU 数）を予めテーブルとしてサブシステム毎に準備しておく。そして、 T_i が必要になったときに、これらテーブルからまず各サブシステムの状態に対応する稼動 AHU 数を求め、それらの最小値としてシステムとしての稼動 AHU 数（PAC 数も同様）を求める。そして、それを予め与えられているデータから、許容時間 T_i に結び付ける。この対応を表すテーブルは、サブシステムのタイプ毎に異なる。

(4) 計算機での実行に際して

上記一連の手順を計算機で実行させるべく関数化（「基本解析関数」）した。本関数では、入力として「各サブシステムの生成行列」、「各サブシステムの定常状態確率」、「稼動 AHU 数、稼動 PAC 数」から T_i への対応、「各サブシステムにおける状態と稼動 AHU (PAC) 数との対応テーブル」を与えることにより、システム不稼動率とシステムダウン発生頻度を求めるものである。ここで、各サブシステムの定常状態確率を引数としているのは、数値計算プログラムへのインプリメンテーションを容易にするためである。すなわち、定常状態確率は、理論的には生成行列から連立方程式等の手法により導出可能であるが、信頼性モデルの場合、状態遷移のパラメータの大きさが極端に異なることが多く、精度のよい解析が難しいことも多いからである。定常状態確率は、近似的な手法等に

より、別途求めて置くことで対処する。この基本解析関数が本手法の核となるものである。「各サブシステムの生成行列」、「各サブシステムにおける状態と稼動 AHU (PAC) 数との対応テーブル」さえ与えれば任意の構成のシステムが解析可能である。従って、解析の必要性に応じて、サブシステムのモデル化において考慮すべき要因の取捨選択を行うなど、柔軟な対処が可能となる。

3.2.2 計算量削減のための手法

計算量削減のために、サブシステムの内、幾つかを故障しないと仮定して信頼性評価した結果を信頼性の上限近似値、幾つかを空調能力の劣化が段階的ではなく一挙に0になるシステムに置き換えてできるシステムの解析結果を信頼性の下限近似値とし、これらを適宜狭めていく近似方法をとる。すなわち、全体で N 個あるサブシステムの内、 k 個を故障しないとして解析した結果 (S_1) 、同じ k 個を空調能力の劣化が段階的でないとして解析した結果 (S_2) 及び真の信頼性 S^* との間には、 $S_1 > S^* > S_2$ の関係があることを利用して、順次 k 個のサブシステムの選択の仕方を変えていくことによって、近似の幅を狭めていくものである。

ここで、空調能力の劣化を段階的でないものに置き換えるとは、以下のようなことを言う。例えば、冷凍機部分では、一般に複数個の冷凍機があり、状態は故障冷凍機数で分類されこれに応じて空調能力の劣化程度も段階的である。ここで、冷凍機部分において冷凍機数が一台のみ故障しただけで、空調能力がすべて失われるとしてシステムの信頼性を解析すれば、その結果は実際の信頼性よりも悪い結果を与える。

上記手順を基本解析関数を利用して実行するためには、サブシステムが故障しないとすることは、単に基本解析関数の引数に含ませないことであり、段階的に劣化しなくなるとは、該当サブシステムの生成行列と対応テーブルを修正したもので基本解析関数をコールすればよい。

4. 具体的システムへの応用

本手法を現実のシステムに適用するためには、基本解析関数をコールするための引数、すなわち、サブシステム毎の生成行列、サブシステムの状態と稼動 AHU 数または PAC 数との対応を示すテーブル（以下、単に「対応テーブル」という）、サブシステム毎の定常状態確率及び、稼動 AHU 数と稼動 PAC 数の対に対応づけられた許容時間データが与えられれば良い。これらのうち、前3者は、サブシステム毎に個別にモデル化して別途作成しておき、それを引数とし、基本解析関数をコールするというのが本手法の考え方である。

サブシステム毎の生成行列については、多くの場合、システム信頼性解析でよく使われるモデルが利用できる。例えば、REF 部分、AHU 部分、PAC 部分は、現用機数を M 、予備機数を N とすれば、 $M+N$ 予備方式であって、その生成行列等は良く知られている。しかし、本システムの中心的部分である電源部分については、改めてモデル化が必要である。

4.1 電源部分のモデル化

本部分はタイプ2のサブシステムである（図4参照）。GE 部分と商用電力及び GT とが、共同して PAC へ電力を供給することを解析に盛り込む必要がある。本サブシステムにおいては、予備 GE と GT は、常時は稼動しておらず、現用 GE の故障数や電力の不足などの、予め決められた起動契機が到来したときに、起動されるとするのが一般的である。しかしながら、このように一般的なモデルは煩雑になりすぎるので、ここでは、下記のように起動契機を制限することで、システムの挙動を近似し、モデ

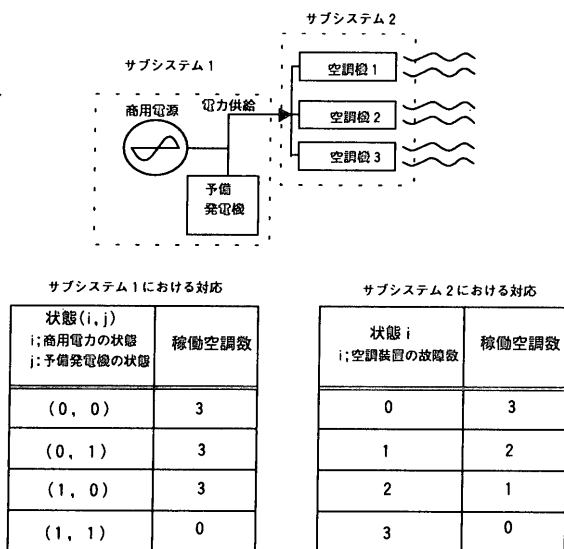


図4 サブシステム状態から稼動空調機数への対応付け

ル化した。

4.2 システム構成と動作及び近似モデル

システムは、商用電力受電またはGTによる発電を行う「電力部分」と「GE部分」より成る。電力部分は、常時は1系統の商用電力で電力を受電し、通信機器とPACに電力を供給する。ここで、商用電力は高信頼化のために2系統から受電する方式も考えられるが、信頼性上は2系統まとめて考えた場合の故障率と修理時間をもつユニットとして扱えば足りるのでこのように仮定する。商用電力停止時には、k台の予備発電機(GT)の内幾つかが起動する。GTは、起動失敗確率を有する。一方、GE部分は、現用M台、予備N台よりなり、補助ボイラは、各発電機に個別に予備として設置される。GEは排熱と電力を供給するが、補助ボイラは排熱を供給するだけである。補助ボイラは故障しないとする。GEとGTは、起動失敗確率を有する。両部分は電力を融通しあっており、合計した電力供給が所要量(PT)を下回ると、通信機器及びPACは全面ダウンする。各部の電力供給能力は、商用電力については無限、GT1台当たりの発電能力をPGT、GE1台当たりの発電能力をPGEとする。

ここで、発電機(GE及びGT)の起動の契機は、GTは商用電力が停止したとき起動し、予備GEは現用GEに故障が起ったとき、それを補完するように起動するとともに、現用GEに故障がなくても、商用電力とGTがともにダウンして、電力の不足が起ったときには、起動すると考えるのが自然である。しかし、ここでは近似的に、以下のように限定する。すなわち、予備GEは、現用GEのダウンを補完するようにのみ起動するものとする。この近似は安全側である。この近似の結果、「電力部分」と「GE部分」の挙動は独立となる。

この仮定の下で、GE部分の状態遷移図のみ取り出すと図5のようになる。ここで、図5において、λはGE故障率、μは修理率、pは起動失敗確率、νは起動失敗した場合の再起動に要する平均時間の逆数である。また、状態番号(i, j, k)の意味は、iは稼働中のGE数、jは起動失敗後再起動中のGE数、kは修理中のGE数を表す。

4.3 定常状態確率

前述のように、今回の検討では、定常確率は連立方程式に依らず別途解析的な方法などで求めることとしているが、GE部分については、それも難しい。これについては、信頼性の解析においては特定の状態の確率のみが1に極めて近く、他は非常に小さいという特殊性を考慮し、連立一次方程式の数値解法として良く知られている反復法を利用した。具体的には、以下の近似的な計算方法で解くこととした。

定常状態確率 p_1, p_2, \dots, p_n (n は状態数)に関する平衡方程式が、以下で与えられているとする。

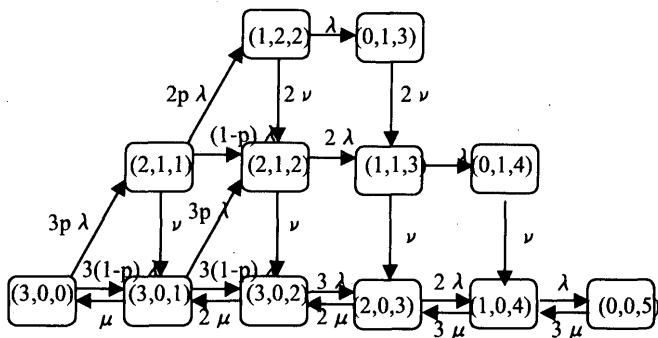


図5 GE部分の状態遷移図(例: M=3, N=2のとき)

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1 \tag{3-0}$$

$$a_{11}p_1 + a_{12}p_2 + \dots + a_{1n}p_n = 0 \tag{3-1}$$

$$a_{21}p_1 + a_{22}p_2 + \dots + a_{2n}p_n = 0 \tag{3-2}$$

...

$$a_{n1}p_1 + a_{n2}p_2 + \dots + a_{nn}p_n = 0 \tag{3-n}$$

ここで、係数 a_{ij} は、状態jから状態iへの遷移率を表す。(3-0)は正規化条件である。まず、 $p_1=1, p_2=\dots=p_n=0$ とし、 q_2 を式(3-2)に基づき、以下の式により求める。

$$q_2 = (a_{21}p_1 + a_{22}p_2 + \dots + a_{2n}p_n) / d_2 \tag{4}$$

$$\text{但しここで、} d_2 = a_{12} + a_{22} + \dots + a_{n2} \tag{5}$$

ここで、改めて新しい $p_i (i=1, \dots, n)$ を、 $p_1=1, p_2=q_2, p_i=q_i (i=3, \dots, n)$ において、式(4)と同様にして、今度は式(3-3)に基づいて q_3 を求め、それをもとに新しい p_i を求める。これを式(3-n)まで繰り返すことで、反復法の1ラウンドとする。この一連の操作を適当な回数繰り返して結果が収束したら、最後に正規化条件を用いて、 $p_1+p_2+\dots+p_n=1$ となるように、各 p_i を決定する。この手順で定常確率を求めたところ、上記繰り返し回数は2ラウンド程度で十分良好な精度の解を求めることが出来た。

5. 解析例と特性

個々のケースにおける空調システムの信頼性は、建物の熱特性や現地の気候等に依存する。システム設計には、最終的にこれらの要因が盛り込まなければならない。ここでは、これら個別的な条件の評価には言及しないこととし、空調装置停止後の許容時間の存在やGEと商用電力双方からの電力供給など、CGSを用いた空調システムとしての特徴からくる信頼性特性をまず明らかにすることを目的として、幾つかの解析例を示す。

信頼性設計における信頼性評価の役割は、(a)システム構成(例えば、装置予備数)を変えたときの信頼性比較という直接的なもの他に、(b)故障率等の信頼性パラメータが不明確な状況における判断の一助とするための各パラメータの影響分析、(c)その存在自体不明確な信頼性要因(例えば、ある種の潜在故障)を信頼性モデルに盛込んで解析・評価することによる信頼性メカニズムの検討等が上げられる。これらの観点から、以下解析例を説明する。

5.1 空調機数の影響

空調機台数はシステム構成上の重要な要因である。空調機台数を変化

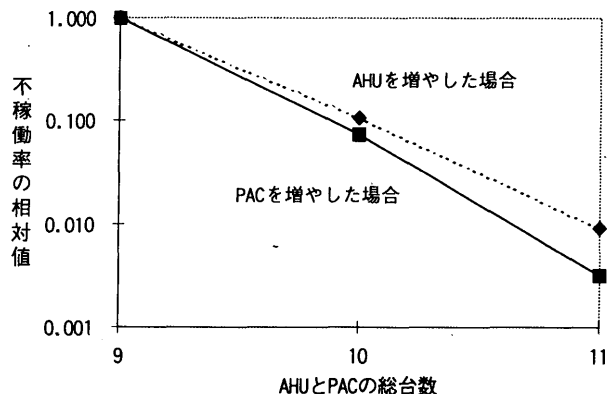


図6 AHUとPAC台数の変化とシステム不稼働率

させた場合のシステム不稼働率の例を図6に示す。ここでは、AHUとPACの1台当たりの冷却能力は等しいとしている。また、AHUの故障率は、PACの10倍としている。当然、AHUまたはPACの数を増加させれば不稼働率は低下するが、同じ台数だけ増加させた場合の効果は異なる。例えば、AHU数4、PAC数5から、AHU数を1増加させた場合の不稼働率は元の10.6%になるのに対し、PACを1増加させると7.4%になる。これは、空調機の子備を設ける場合、信頼性の高い種類を増加させた方が効果が大きいことを意味している。

5.2 発電容量の影響

GEは多くの場合複数台設置されると考えられる。そこで、GE全体の総発電容量は同一とし、GE数を変化させた場合のシステム不稼働率の例を図7に示す。GE数の変化に対して、システム不稼働率の変化は単調ではない。この理由は、GEを1台から2台にすると、その内どちらかが故障する確率が高くなり、その場合、発電容量が半分になるので稼働AHU数が半数になり、十分な冷水を供給できず信頼性が低下する一方で、3台にした場合、3台の内2台以上故障する確率は低いので、AHU数が3分の2以上稼働している確率は高く、この場合には予備AHU数分程度の故障で済んでいるからである。このように、発電機容量を分割して供給する際の信頼性への影響は、定性的には推定することが難しく、本例のような詳細な数値解析が必要となる。

GE数の変化がシステム不稼働率へ及ぼす影響の大きさは、商用電力の故障率によって異なる。図8に図7の場合と同じ条件で、商用電力の故障率のみを変化させたときのシステム不稼働率を、GE数2と3について評価した例を示す。これより、商用電力の故障率が非常に高いかまたは非常に低い場合には、GE数を2にするか3にするかで、システム不稼働率の変化はそれほど大きくないが、商用電力の故障率が両者の中間程度の場合には、システム不稼働率に大きな変化が見られる。このように、発電機の数と容量は、システム信頼性に相当の影響を与える要因と

して、設計上配慮されるべき項目である。

5.3 潜在的危険性の評価

システム信頼性においては、当初モデルに盛込んでいなかった要因が大きな影響度を持つことがよくある。例えば、2重化システムにおける予備機において故障が潜在化し、切り替えの必要が生じたときに初めて故障が明らかになる⁹⁾などである。この例では、故障の潜在化を防ぐために適当な周期での点検が必要である。そのために点検機能の開発が必要になったりもする。しかしながら、そもそも潜在故障の存在がシステム全体に及ぼす影響の定量的な評価を行なわなくては、このような点検機能の設置判断は行なえない。このような場合の検討アプローチは、信頼性モデルの中に、上記の要因(潜在故障)を盛込んで解析し、その影響がシステム全体の信頼性に対して無視しうるかどうかを見ることである。本論文が対象とするシステムにおいては、上記のような信頼性要因としては、発電機エンジンの起動失敗が上げられる。GE、GTともに内燃機関による発電機であるが、起動時に順調に起動しないケースがある。このような確率が、システム全体に対して大きな影響を及ぼすかどうかを明らかにすることは、起動失敗に対する対処の必要性を明らかにする上で大きな意味を持つ。

図9に評価結果の一例を示す。本図では、GEの起動失敗確率を変化させたときのシステム不稼働率を、各ケースとも起動失敗確率が0のときのシステム不稼働率で正規化したものを示している。ケース1では起動失敗確率がシステム不稼働率に与える影響は極めて小さい。そもそも、起動失敗確率が影響するのは、第一に電源部分の不稼働率であり、電源部分の不稼働率はさらにシステム全体の不稼働率の一部であるという関係がある。このため、電源部分に十分な冗長構成が施されており、それ以外の部分よりも高信頼性の場合には、起動失敗確率がシステム不稼働率に与える影響は極めて小さくなる。そこで、REF、AHU、PACの故障率を1/100倍にして評価したものがケース2である。この場合には、

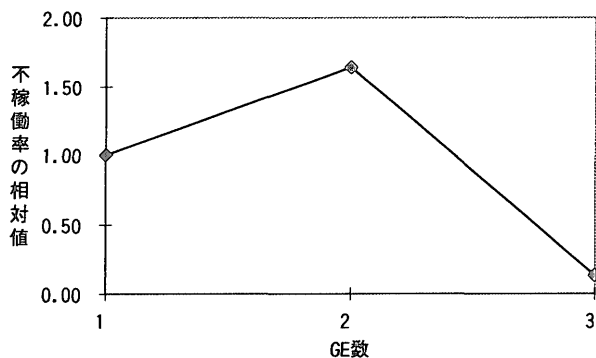


図7 発電機構成のシステム不稼働率への影響

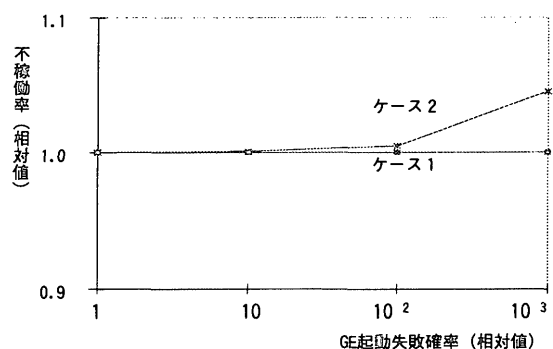


図9 GE 起動失敗確率のシステム不稼働率への影響

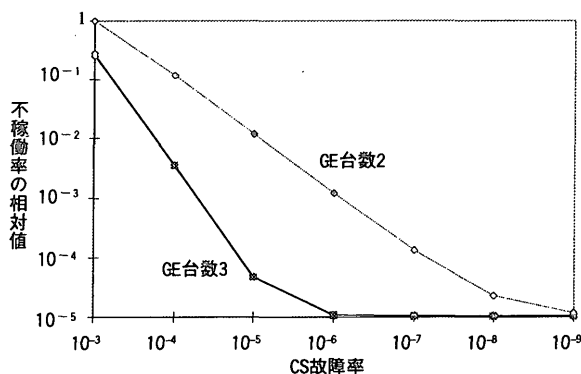


図8 CS故障率のシステム信頼性への影響

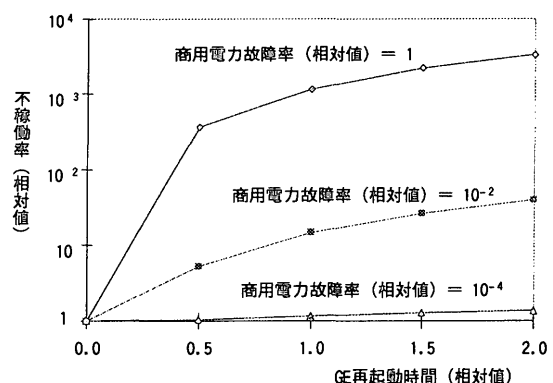


図10 商用電力故障率とGE再起動時間の影響

起動失敗確率によってシステム不稼働率が受ける影響はケース1よりは大きい、それでもまだ極めて小さいと言える。この原因として、起動失敗時の再起動時間を短く想定しているので、起動失敗しても、すぐに復旧することが考えられる。そこで、次に、商用電力の故障率を変化させるとともに、GEの再起動時間を変化させた場合のシステム不稼働率を評価した結果を図10に示す。この例に示すように、商用電力の故障率が高く再起動時間が長いほど、システム不稼働率への影響は大きくなる。このように、起動失敗確率がシステム不稼働率に与える影響は、システム各部の故障率等によって異なるので、起動失敗への対策も、まずこのような評価を行った上で、その必要性を判断すべきである。

6. 解析精度についての考察

本論文で提案した手法は、室温上昇過程をモデル化する際の誤差と、計算量の削減による誤差をもつ。その大きさが問題となるが、以下に示すように、現実の信頼性評価においては大きな問題とはならないと考えられる。

6.1 室温上昇過程のモデル化の持つ誤差

本解析手法は、システムの状態が遷移する度に、それまでの室温変化の履歴を次の2つの意味で無視してしまう方法となっている。第一は、それまでの室温上昇効果は無視している。例えば、AHUが1個停止している状態から2個停止している状態に遷移したとき、AHUが1個停止していたことによって既に起こっている室温の上昇を無視した解析を行っている。これは危険側の近似である。第二に、室温が限界に達してシステムダウンした後でも、状態が遷移し、空調能力に欠損のない状態になったら、その瞬間にシステムも回復するとみなして解析している。たとえ、空調能力が回復したとしても、通信システムの動作環境がいきなり回復はしない筈なので、これも危険側の近似となる。

ところで、これらの誤差は、文献6)に述べられた手法でも同様に存在する。これについては、文献6)は、簡単なシステムのシミュレーションにより、実用上問題のない精度が得られることを示している。本論文の手法は、文献6)の手法を一般化したものなので、評価対象システムが同じであれば、同じ誤差を与えるので実用上大きな問題を生じないと考えられるが、文献6)との違いは、評価対象としているシステムの複雑さである。本論文の方が、格段に複雑なシステムを対象としている。これによる誤差については、詳細な評価は今後の検討をまたなければならないが、定性的には以下のように考えられる。

システムが複雑になることによって増加する誤差は、上記第一の誤差で

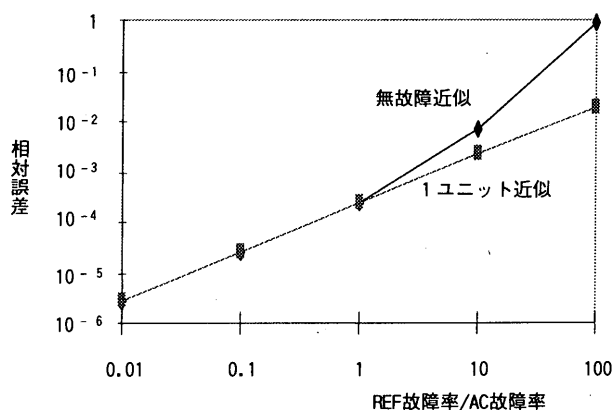


図11 近似の結果

ある。第二の誤差については、空調能力回復以降の室温の低下に関することなので、室温が平常に回復する以前に新たに故障が発生しない限り、システム構成には関係ない事柄である。そして、通常はシステムを構成する要素の故障率は小さいので、室温が平常に回復する以前に新たに故障が発生する確率は非常に小さく、その結果として第二の誤差はシステムの複雑さには殆ど依存しないと考えられる。次に第一の誤差については、以下のように考えられる。室温が限界温度に到達する状態は、必ず空調能力が欠損している状態であるが、これはさらに、空調能力が欠損している他の状態を経由して到達する状態(タイプ1の状態)と、空調能力が欠損していない他の状態から直接遷移できる状態(タイプ2の状態)とに分類できる。もしシステムダウンを引き起こす状態がタイプ2の状態のみならば、第一の誤差はない。また、タイプ1の状態があるとしても、その状態に至る確率がタイプ2の状態にシステムダウンする確率よりも非常に小さいならば、結果として第二の誤差も小さくなる。現実的には、このような事象は少なく、実用上問題となる誤差は生じないと考えられるが、詳細な評価は今後の課題である。

6.2 評価の高速化のための近似誤差について

本解析では、計算量の増加を防ぐため、あるサブシステムに故障がないと仮定した解析結果(以降「無故障近似」という)を危険側近似、そのサブシステムにおいて空調能力に影響するような故障が起こった場合には空調能力の部分的低下は考えず一律に空調能力が完全に失われるとの仮定で解析した結果(以降「1ユニット化近似」という)を安全側近似とし、両者で挟み撃ちにする方法を提案している。無故障近似、1ユニット化近似ともに、着目サブシステムの信頼性が他のサブシステムの信頼性と比較して非常に良い時には、精度が良くなる。例えば、以下のような場合である。

例: 着目サブシステムが $n+k$ 予備の場合を考える。 $(k+1)$ ユニット以上の故障は空調能力低下が起こる。このとき、無故障近似とは $(k+1)$ ユニット以上の故障の確率を0とすることと同じであり、1ユニット化近似では $(k+1)$ ユニット以上の故障のときは、空調能力が完全に失われると見なすのと同じである。これより、誤差の小さい条件は、無故障近似の危険側誤差が小さい条件として、 $(k+1)$ ユニット以上故障の確率が、他のサブシステムにおける故障(あらゆる程度の空調能力低下を含む)確率と比較して小さいこと、1ユニット化近似の安全側誤差が小さい条件として、 $(k+1)$ ユニット以上故障の確率が、他のサブシステムにおける空調能力が0になる故障の確率と比較して小さいことである。第一の条件は単にサブシステムとしての信頼性が他より良いというのとほぼ同じであり、第二の条件も、現実には妥当であることが多い。一例として、REFの故障率とAHUの故障率が、同じ、1:10、1:100のときについて、二つの近似法で近似した結果について図11に示す。また、この場合、計算後の誤差評価が行えるので、現実の問題は生じない。

7. むすび

CGSを利用した空調システムの信頼性評価法を検討し、システム信頼性特性を考察した。得られた主な結果は以下である。

- 1) 空調システムの機能停止後、室温が許容値を超過するまでの時間を考慮した、新しい信頼性評価手法を確立した。本論文で確立した手法は、従来得られていた手法6)に改良を加えて、一般的な構成のシステム評価にも対応可能としたものである。

- 2) 本手法の具体的な特徴は、サブシステムの状態遷移を入力として信頼性評価を行える点、計算量の削減を図るべく、信頼性の上限及び下限近似値を求めて狭み撃ち近似を行う点である。
- 3) また、本手法の近似誤差に関して、定性的な考察を行った。
- 4) さらに、冗長構成など、システムの各種要因を変化させて信頼性評価を行い、CGSシステムに共通する信頼性特性として、空調機数はシステム信頼性を決定付ける大きな要因であること、GEとGTの設置数及び発電能力と信頼性の関係は複雑で定性的には把握しづらく定量的な解析が必須であること、発電機の起動失敗がシステム信頼性に及ぼす影響は商用電力の信頼性がかなり悪い時にのみ大きな要因となることなどを明らかにした。

本論文で検討した信頼性特性は、空調システムが設置される建物の特性や気象条件を考慮する以前の共通的なものである。本論文で示した解析手法に空調システム設置場所の個別な条件を当てはめて解析することにより、高信頼性な空調システムの設計に路を開くものと考えている。

謝辞

最後に本論文をまとめるにあたり有益な助言を頂いたNTTサービスインテグレーション基盤研究所横井忠寛プロジェクトマネージャー、吉野秀明グループリーダーに深謝いたします。

参考文献

- 1) 益田昭彦, 高久清: 実務家のための信頼性テキスト, 日科技連出版社, 1989
- 2) 高木堅志, 飯田真史: 信頼性設計法の現状と今後の動向, NTT技術ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.11-13, 1993
- 3) S.Nojo and H.Watanabe: Incorporating Reliability Specification in the design of Telecommunication Networks, IEEE Com.Mag., June 1993, pp.40-43, 1993
- 4) 岩崎昇三, 田崎一郎: NTT通信網を理解していただくために, 電気通信協会, 1987
- 5) 葉原耕平編: 情報通信技術ハンドブック, オーム社, 1987
- 6) 羽山広文, 大島一夫, 高草木明, 松島修: 空調停止後の室温変化を考慮した空調設備の信頼性評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第507号, pp.71-78, 1998.5
- 7) 羽山広文, 中里秀明, 木下学, 倉淵隆: 強制空冷機器を収容した電算機室の高効率空調方式に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第494号, pp.29-36, 1997.4
- 8) 渡辺 均: 定期点検に伴う誤操作を考慮した2重化システムの不稼働率評価, 信学論 (A), Vol.J71-A, No.3, pp.816-824, 1988

(2002年8月6日原稿受理, 2002年11月12日採用決定)