

# 定性モデルを利用したビル空調システムの異常診断

株式会社 山武

潮崎 淳一  
Junichi Shiozaki

山武ビルシステム株式会社

宮坂 房千加  
Fusachika Miyasaka

## キーワード

空調, 異常診断, 定性モデル

ビル空調システムに起こるさまざまな種類の異常の診断を定性モデルを利用して総合的に行う方法を開発した。あらかじめ用意した個々の機器の定性モデルを組み合わせることによって、容易に大規模空調の診断システムが構築できることが特徴である。作成した診断ツールを VAV 空調システムに適用した実験結果についても報告する。

( \* 脚注 : VAV は Variable Air Volume の略。 )

Abnormality diagnosis of building air conditioning systems using quantitative modeling  
A comprehensive method of diagnosing the various types of abnormalities that arise in building air conditioning systems was developed using quantitative modeling. It can easily build large-scale air conditioning diagnosis systems by combining already-prepared quantitative models of individual equipment units. We also report on the results of tests in which the developed diagnosis tools were applied to a VAV air conditioning system.

## 1. はじめに

最近のビルは広範囲な省エネルギー手法の適用により設計・建設されるが、いかに高度な手法が用いられようとも、運転管理が適切に行われなければ、実際のエネルギーの節約にはつながらない。

ビル空調システムの最適な運転状態を維持するためには、そこで起こるさまざまな異常に対して適切に対処する必要がある(注:ここでビル空調システムとは、熱源機側と空調機側の両方を含むシステム全体のこと)。すなわち、起こった異常を早期に検出し、その原因を診断し、それを取り除くための適切な対応措置を取る必要がある。このような作業は今のところオペレータ、あるいはメンテナンス担当者が行っている。しかしながら、ビルの測定ポイントは数千点以上にもなるため、全体に対する精密な監視ができずに異常が放置され、そのために無駄なエネルギーを消費したり、機器の寿命が早くきたり、あるいは快適性の劣

化を招いている場合もある。このような、従来はオペレータやメンテナンス担当者が実施していた異常を検知してから正常状態に回復するまでの作業をできるだけ自動化し、それらの人をサポートすることがビル空調の異常検知・診断システムの目的である。

ビル空調システムのような大規模システムに起こるさまざまな故障を総合的に診断するための実用的な手法としては 1980 年代から人工知能の分野で開発されてきたエキスパートシステムを利用した方法がある。これは、対象分野のエキスパートの知識を「もし～ならば、～である」というルールで知識ベースとして貯えておき、それを利用して推論することにより、エキスパートの代行を計算機に行わせる方法である。

ビルの診断のためにエキスパートシステム技術を適用しようとするとき、それぞれのビル空調のための診断ルールを作成する必要がある。ところが、ビル空調には数千ポイントの測定点があり、これらの測定点を使った診断ルールは

その何倍もの数になるため、作成するための工数も大きなものになってしまう。

このエキスパートによる診断ルール作成の手間を削減させるための方法の一つは定性モデルを用いることである。エキスパートが診断ルールを作成するのに使っている知識の多くは、定性的な因果関係の知識である。定性的な知識とは、たとえば次のような知識である。

- 1) コップに水を入れれば水のレベルは増える。
- 2) コップに穴が空いて漏れれば水のレベルは減少する。水を10ml入れれば2センチ増えるというような定量的な知識までは必要ない。この定性的な知識を持っていれば、水のレベルが減ったときにはその原因の一つがコップに穴が空いたことであることが推論できるはずである。

診断対象の個々の機器の定性的な知識(定性モデル)を組み合わせることで全体のモデルを作成することで、エキスパートによる診断ルール作成の手間を大幅に削減することができる。定性モデルを使った診断法には複数<sup>1)2)</sup>があるが、我々は符号付有向グラフを用いた診断法<sup>2)</sup>を選択した。この手法は複雑な化学プラントの診断のために開発された手法であり、特にモデルが直観的で、誰にでも作りやすいことが特徴である。

我々は、符号付有向グラフによる診断法<sup>2)</sup>を利用したビル空調診断用のツールを作成し、それを使って実際のビルの空調データに対して診断を試みたので、その内容について報告する。

## 2. 符号付有向グラフによる異常診断法

### 2.1 符号付有向グラフと基本的診断法

符号付有向グラフは、有向グラフとその枝に付いた符号で構成される。有向グラフの点は状態変数を表わす。枝は始点と終点の状態変数の間に因果関係があることを表わす。“+”の枝(実線の矢印)は始点の状態変数が増加(減少)すれば、終点もその影響を受けて増加(減少)することを表わす。“-”の枝(破線の矢印)は、始点の状態変数が増加(減少)すれば、終点はその影響を受けて減少(増加)することを表わす。

それぞれの点は、対応する状態変数が正常状態より大きいか、正常状態と同じか、正常状態より小さいかに応じて、“+”、“0”、“-”のどれかの符号を取る。これらの符号の組を“パターン”と呼ぶ。

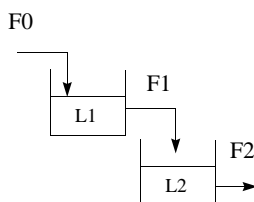


図.1 タンクシステム



図.2 タンクシステムの符号付有向グラフ

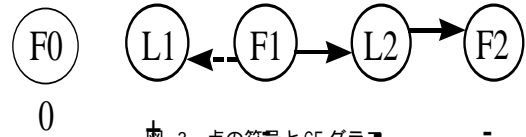


図.3 点の符号とCEグラフ

タンクシステム図.1に対する符号付有向グラフは図.2のようになる。たとえば、F0からF1への実線の矢印はF0が増加すれば、F1も増加することを表わしている。ここで、F1の部分の配管が詰まった故障を考える。F1の配管が詰まればその影響でL1は増加し、L2とF2は減るだろう。図.3のグラフは図.2にそのときの点の符号を加え、異常の伝播に関係のなかった枝を除いたものである。このグラフは因果グラフと呼ばれ、F1に起こった異常がどのように伝播したかを読み取ることができる。図.2から図.3のような部分グラフを取り出すことができれば、その最も上流の点を異常の原因と考えることで異常診断が可能となる。ここでの説明はすべての点の状態(“+”、“0”、“-”)が既知の場合について行ったが、実際には測定されていない変数の符号はわからない。そのような場合についても、異常の原因を推定するアルゴリズムが伊里ら<sup>3)</sup>によって提案されている。

### 2.2 3段階符号と5段階符号

前節では点の状態を“+”、“0”、“-”の3種類の符号で表わした。現実のデータを診断する場合には、しきい値の設定による誤診をできるだけ防ぐため、それぞれの測定点に対して、図.4のようなしきい値を決めておき、測定値がどの範囲に入ったかによって、5段階の符号(“+”、“+?”、“0”、“-?”、“-”)を与えて診断する。“+?”は“+”または“0”のどちらかであることを表わし、“-?”は“-”または“0”のどちらかであることを表わす。この5段階符号を使う場合の診断アルゴリズムは潮崎ら<sup>2)</sup>により提案されている。

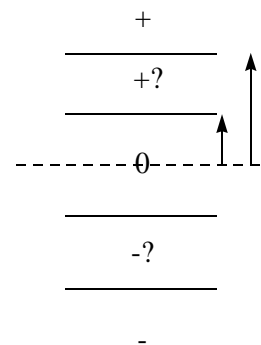


図.4 5段階符号としきい値

### 3. 定性モデルを利用した異常診断ツール

定性モデルとして符号付有向グラフを用いた診断アルゴリズムを実際のビル現場で利用するためのツール化を行った。診断ツールは二つの部分から成る。リアルタイム診断ツールとエンジニアリングツールである。

#### 1) リアルタイム異常診断ツール

- ・定周期データ収集機能  
データを定周期で収集し、データベースへ格納する。
- ・しきい値自動計算機能  
症状検出のためのしきい値を標準偏差と平均値より自動計算する。(図.5)

#### ・原因診断機能

症状から異常の原因を推論。原因の候補を画面に出力(図.6)。結果をデータベースに蓄積する。

#### ・解析機能

入力した任意の症状に対して診断を行い、結果を表示する。過去の任意時点のデータを表示する。

#### 2) エンジニアリングツール

- ・アイコンを画面上でつなぎあわせることによって簡単に定性モデルを作成できる。(図.7)



図.5 しきい値自動計算の設定



図.6 異常原因の候補の画面表示

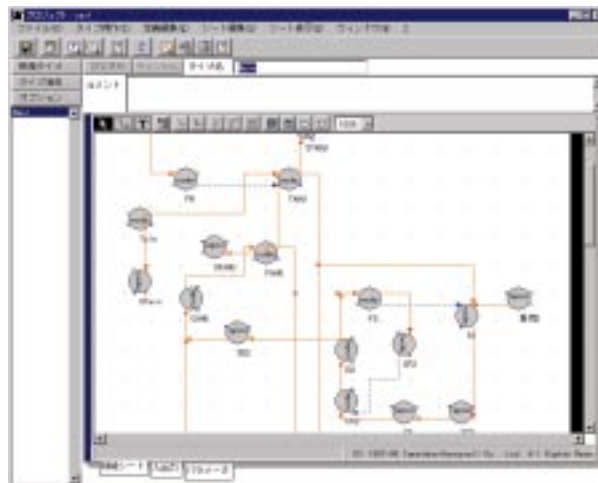


図.7 符号付き有向グラフ作成ツール

#### 4. VAV 空調システムの診断実験

図.8はTビルのVAV空調システムである。今回の実験はVAVユニットが9個つけられている大きな部屋で行った。VAV空調システムの符号付有向グラフ(点の数83個,枝の数129,センサの数28,事前登録した原因の数164)を図.9に示す。それぞれの点の意味とそれらの点に事前登

録した異常原因を表.1に示す。

しきい値は,ある日の正常時データよりそれぞれの点の平均値と標準偏差を計算して,その値から決めた。

VAV空調システムに対して4種類の異なる異常を起こし,そのデータに対して符号付有向グラフによる異常診断を行った結果を表2に示す。表.2のそれぞれの症状において,書いていない点についてはすべて“0”であった。

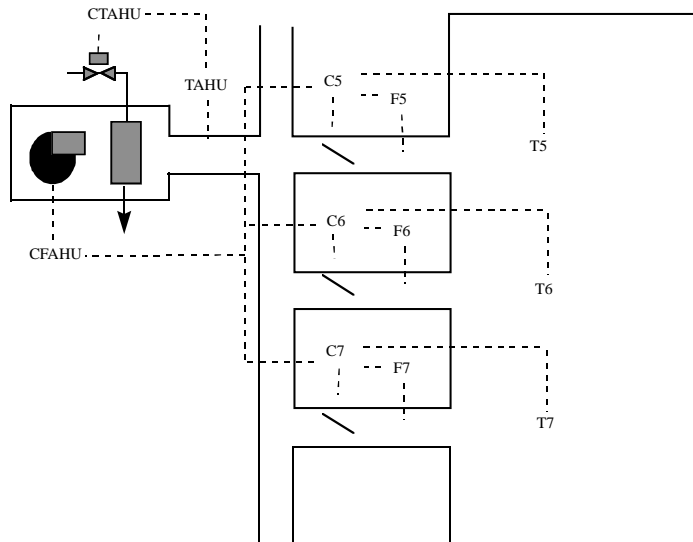


図.8 VAV空調システム

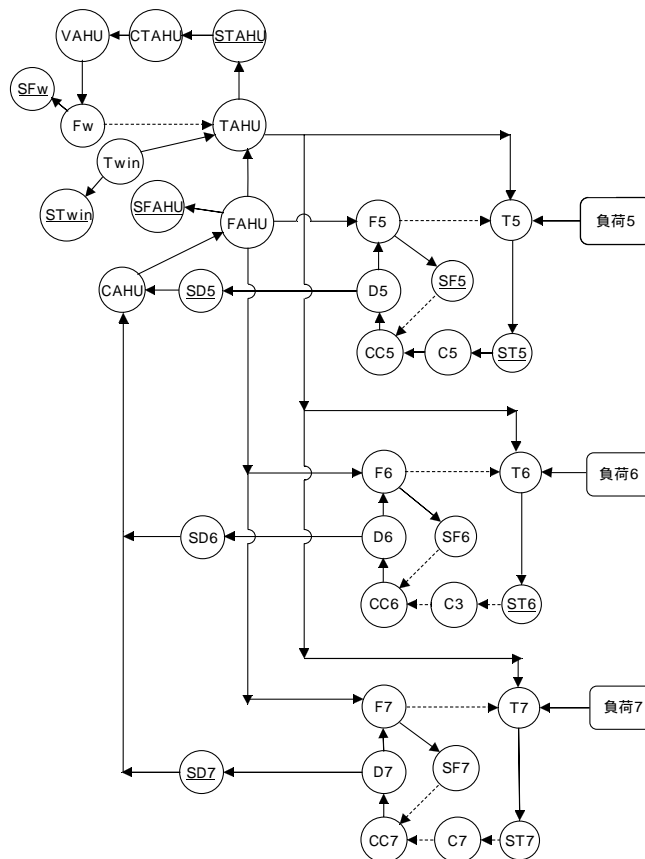


図.9 VAV空調系の符号付有向グラフ

表.1 グラフの点の名称と事前登録した原因

点の名称	意味	事前登録した原因
Fi	VAVユニットiの空気流量	なし
SFi	VAVユニットiの空気流量指示値	流量計の故障
Ti	温度i	なし
STi	温度iの指示値	温度計の故障
Ci	温度iのコントローラ出力	コントローラ故障
CCi	流量iのコントローラ出力	コントローラ故障
Di	ダンパi開度	ダンパ故障
SDi	ダンパi開度指示値	ダンパのセンサ故障
負荷i	負荷i	負荷
FAHU	AHU空気流量	ファン, インバータの故障
SFAHU	AHU空気流量指示値	流量計故障
CAHU	AHU空気流量コントローラ出力	コントローラ故障
TAHU	AHU出口空気温度	なし
STAHU	AHU出口空気温度指示値	センサ故障
CTAHU	AHU出口空気温度コントローラ出力	コントローラ故障
VAHU	冷水バルブ	バルブ故障
FW	冷水流量	流量の変動
SFW	冷水流量指示値	センサ故障
STWIN	冷水入り口温度指示値	センサ故障
TWIN	冷水入り口温度	温度変動

表2 . VAV 空調システムの診断結果

実験1 .VAV6ダンパ故障( VAV-6のダンパ開度を最大風量で固定させた)

症状:( T2, T6, F2, F6, FAHU, D6 ) = ( -, -, +?, +, +?, +? )  
 原因の候補: + FAHU, + CAHU, + SD6, + D6, + CC6, + C6  
 評価: 真の原因は '+ D6'(VAV-6ダンパ故障)である。  
 真の原因を含む原因の候補の事前登録164個に対してその3.6%である6個まで絞り込むことができた。

実験2 .VAV6ダンパ故障( VAV-6のダンパ開度を強制的に最小風量で固定させた)

症状:( T2, T6, T7, F6, FW, D6, D7 ) = ( -, +, +?, -, -, -, +? )  
 原因の候補: - D6, - CC6, - C6  
 評価: 真の原因は '- D6'(VAV-6ダンパ故障)である。  
 事前登録164個に対してその1.8%である3個まで絞り込むことができた。

実験3 送風機の故障(送風機の風量を強制的に減少させた)

症状:( T2, T7, T8, T9, TAHU, F3, F7, F8, F9, FAHU, FW, D3, D5, D6, D7, D8 )  
 = ( -, +?, +?, +, +?, -, -, -, -, -, +?, +?, +?, +? +? )  
 原因の候補: - FAHU, - CAHU  
 評価: 真の原因は '- FAHU'(送風機の故障)である。  
 事前登録164個に対してその1.2%である2個まで絞り込むことができた。

実験4 .冷水バルブの故障(冷水バルブを強制的に閉じた)

症状( T4, T5, T7, TAHU, F4, F6, F7, F8, F9, FAHU, FW, D7 )  
 = ( +?, +?, +?, +, +?, +, +?, +, +, +, -, +? )  
 出力された候補: - FW, - VAHU, - CAHU  
 評価: 真の原因は '- VAHU'(冷水バルブ故障)である。  
 事前登録164個に対してその1.8%である3個まで絞り込むことができた。

これらの実験でわかるように,それぞれの時点で現れる症状はかなりあいまいな符号(+?, -?)を多く含んでおり,人間が原因を見つけるとしてもむずかしい場合が多い。このような場合,ここで提案したようなアルゴリズムで原因を特定することによって,従来の人間による原因の特定に費やしていた工数を減らすことができる。

また,ポイントの数が多すぎて対応できず,異常な症状があっても放置しておくしかなかった空調系にこのような手法を適用すれば,潜在するはずだった故障を発見することによって,省エネルギー性や快適性の向上につながるものと考えられる。

5. 終わりに

ビル空調システム全体の異常診断を定性モデルを利用して総合的に行う方法を開発した。あらかじめ用意した個々の機器の定性モデルを組み合わせることによって,簡単に大規模空調の診断システムが構築できる。VAV空調システムに人工的に起こした異常の診断を行った結果,実用的

な精度で診断が可能であることが分かった。この論文には入れなかったが、蓄熱空調システムの実データの診断にも適用し、良好な診断結果を得ている<sup>4)</sup>。

今後はビルの多様な条件の下で安定的に正確な診断ができるようなシステムにしていく予定である。

## 5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、快くデータを提供して下さった東京電力(株)の柳原隆司氏、鈴木孝佳氏に感謝する。

## 参考文献

- 1) 宮坂, 石川, 東, 三原, 薦田: 確率的定性推論を利用した空調システム不具合検知法, その1 定性シミュレーション, 空気調和衛生工学会 学術講演論文集 pp.1097-1100 (1994)
- 2) 潮崎, 松山, 田野, 大島: 符号付有向グラフを用いた化学プロセスの異常診断法, 化学工学論文集, Vol.10, pp.233-239 (1984).
- 3) 伊里, 松山, 青木, 大島, 松: An Algorithm for Diagnosis of System Failures in the Chemical Process, Computers and Chem. Eng., vol.3, pp.485-493 (1981).
- 4) 蓄熱式空調システムの異常診断・適正制御の研究 平成8年度研究報告書。空気調和・衛生工学会, 蓄熱最適化委員会 (1997)。

## 著者所属

研究開発本部 潮崎 淳一

研究開発部 宮坂 房千加