

京都大学博士論文

空調システムのコミッショニング
に関する研究

平成 21 年 5 月

潘 嵩

目 次

序章 コミッショニングプロセスと本研究の位置づけ

第 1 部 CFD 連成解析を用いたアースチューブ併用自然換気システム性能の予測と検証

第 1 章 序説

- 1.1 研究の背景
- 1.2 研究の目的
- 1.3 既往の研究
- 1.4 第 1 部の構成

第 2 章 室内上下温度分布を考慮した自然換気解析と CFD との連成解析方法の開発

- 2.1 CFD 連成解析方法の概要
- 2.2 三つの解析ツールの概要
 - 2.2.1 対象アースチューブ併用自然換気システムの概要
 - 2.2.2 アースチューブの熱交換の解析式
 - 2.2.3 室内上下温度分布を考慮した自然換気解析
 - 2.2.4 CFD 解析モデル
- 2.3 CFD 連成解析モデルの検証
 - 2.3.1 検証ケースの設定と解析条件
 - 2.3.2 CFD 連成解析モデルの再現性検証
- 2.4 まとめ

第 3 章 企画フェーズの計画段階におけるシミュレーションによる性能予測

- 3.1 対象システムの企画フェーズの性能検証項目
- 3.2 シミュレーションによる対象システムの企画フェーズにおける性能検証
 - 3.2.1 自然換気解析の計算条件
 - 3.2.2 CFD 解析モデルおよび計算条件
 - 3.2.3 シミュレーション結果と考察
- 3.3 まとめ

第 4 章 運転フェーズの引渡し後段階における性能検証

- 4.1 運転フェーズの引渡し後段階の性能検証項目
- 4.2 冬期と夏期の測定ケース・測定項目・測定位置・測定機器
- 4.3 冬期実測による引渡し後段階の性能検証
 - 4.3.1 測定期間の気象状態

- 4.3.2 上下温度分布の確認
- 4.3.3 居住域温湿度の確認
- 4.3.4 自然換気量の確認
- 4.3.5 室内各所風速の確認
- 4.4 CFD 連成解析方法を用いて設計不具合の解決策の効果予測
- 4.5 夏期実測による引渡し後段階の性能検証
 - 4.5.1 測定期間の気象状態
 - 4.5.2 室内上下温度分布と居住域温度
 - 4.5.3 各開口の自然換気量及び気流方向
 - 4.5.4 室内各所風速の確認
 - 4.5.5 ア - スチュ - プの省エネルギー - 効果の検証
- 4.6 強制排気ファン施工ミスの影響
- 4.7 CFD 連成解析による各季節の各種外気条件でのシステム性能の予測検証
 - 4.7.1 自然換気量の予測
 - 4.7.2 室内各所風速の確認
- 4.8 まとめ

第1部のまとめ

第1部の付録 室内上下温度分布の有無の自然換気量と居住域温熱環境に及ぼす影響

第2部 パターン認識による空調システムの不具合検知・診断

第1章 序説

- 1.1 本研究の背景
- 1.2 既往の研究
- 1.3 本研究の目的
- 1.4 第2部の構成

第2章 パターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法

- 2.1 不具合検知・診断モデル作成用データの獲得
- 2.2 不具合検知・診断パラメータの導出
- 2.3 マハラノビス汎距離による不具合判定
- 2.4 まとめ

第3章 不具合検知・診断ベクトルの最適化方法

- 3.1 列挙法
- 3.2 変数選択法
- 3.3 判別率増分法

3.4 AIC の変化量によるモデル当てはめる手法

3.5 まとめ

第4章 最適化検知・診断ベクトルによる水蓄熱システムの不具合検知・診断

4.1 対象水蓄熱システムの計測データの概要

4.2 検知パラメータの設計

4.3 クラスタ分析によるパラメータの分類

4.4 検知パラメータの正規性の分析

4.5 最適検知パラメータの選出

4.6 最適検知パラメータの物理的意味の考察

4.7 オンライン不具合検知・診断

4.8 変数選択法

4.9 判別率増分法

4.10 AIC による最適化

4.11 4種の最適化方法の比較

4.12 まとめ

第5章 最適化検知・診断ベクトルによる VAV システムの不具合検知・診断

5.1 対象空調システムおよび計測システムの概要

5.2 予備不具合検知・診断パラメータの算出

5.3 最適不具合検知・診断ベクトル(ツール)の選出過程

5.4 対象 VAV システムの不具合検知・診断ツールの入出力

5.5 まとめ

第2部のまとめ

終章 総括

謝辞

序章 コミッショニングプロセスと本研究の位置づけ

1997年12月に京都で開催されたCOP3で採択された京都議定書は、日本に温室効果ガスの排出量を2008年から2012年の期間中に「1990年比で6%削減する」ことが義務付けられた。日本の温室効果ガスの約9割はエネルギー起源二酸化炭素により占められ、2005年4月に策定された「京都議定書目標達成計画」の中で、基準年(1990年)総排出量比で0.6%の水準にすることが求められる。日本では、二酸化炭素排出量の約3割が建築分野に起因し、その中で空調システムに関連する排出量が3~5割を占めており、なおかつ大幅に増大しつつある。京都議定書の目標を達成させ、地球環境保護に貢献するためには、空調システムの省エネルギーは非常に重要であり、喫緊の課題となっている。

日本では、第1次、2次石油ショックを受け、建築産業を含む各分野では省エネルギー対策を積極的に取り込んで来た実績がある。しかし、近年、建築産業に絡む社会問題が次々と露呈されてきたことは記憶に新しい。空調システムの場合、建築構造とは異なり、厳格な省エネ設計基準が無いので、コストダウンと工期短縮のために、低質な室内環境と多大なエネルギー消費となるシステムを設計し作ってしまっても、また仮に工事に不具合があっても表に現れない。言い換えると、空調システムの機能・性能の評価基準が依然として曖昧なままで、エネルギーの浪費となるシステムが多く作られていることが危惧される。

空調システムの性能を企画段階から運用段階までライフサイクルに亘って検証し、省エネルギー性を含むオーナーの要求を合致させるために、1980年代以来、欧米諸国をはじめ、コミッショニング過程(Commissioning Process)の重要性が認識され、その指針が作成されてきた。日本では中原が米国の動向に追いつく1987年頃に最初の概念紹介を行い学会でも警告を發している。1997年より空気調和衛生工学会の研究委員会をベースに指針策定活動を開始し、2004年に指針^[1]が發行された。

図1は中原^[2]による、建築物のコミッショニングプロセス(性能検証過程)であり、空気調和・衛生工学会などで定義する新築工事の当初性能検証過程のフェーズと段階、それぞれの主要な区切り事象とCx主要手続きを記し、下段にこの典型的な全性能検証過程に対して部分性能検証過程、既設建物に適用する復性能検証過程(レトロコミッショニング)などの位置づけを示す。この図において定常運転段階を除く新築工事の全フェーズ、全段階を実施するのが完全な形の当初性能検証過程(Initial Commissioning Process)である。

空調システムのコミッショニング作業において、各フェーズにおける実施プロセスを明確にし、実施手段(ツール、特にシミュレーション手法)を整備することは重要である。本研究は、アースチューブ併用自然換気システムならびに水蓄熱及び可変風量空調システムを対象にして性能検証プロセスに展開することを視野においた、コミッショニングツールの開発に関するものである。

本論文は2部から構成されている。第1部では、アースチューブ併用自然換気システムという、近年注目される建築物の床下ピットを活用した自然エネルギーを利用する先進的なシステムを対象として、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析とCFD(Computational Fluid Dynamics)との連成解析手法を開発し、実システムの企画/設計段階および引渡し後段階において実測とミュレーションによる性能予測を行い、CFD 連成解析法を企画フェーズと施工フェーズに用いることの有用性を示した。第2部は、運用段階の空調システムの不具合検知・診断ツールの開発に関する研究であり、パターン認識による不具合検知・診断ツールを開発して、水蓄熱システム及び可変風量空調システムに適用し、不具合検知・診断のケーススタディを行った。図1の分類に当てはめると、第1部は当初性能検証過程であり、第2部は既設建物のレトロコミッショニング過程となる。また、第1部と第2部の関連内容は、それぞれIEA-ANNEX47の国際研究ならびに(社)空気調和・衛生工学会 コミッショニング委員会コミッショニングツール小委員会研究の一環、そしてIEA-ANNEX25の国際研究の一環である。

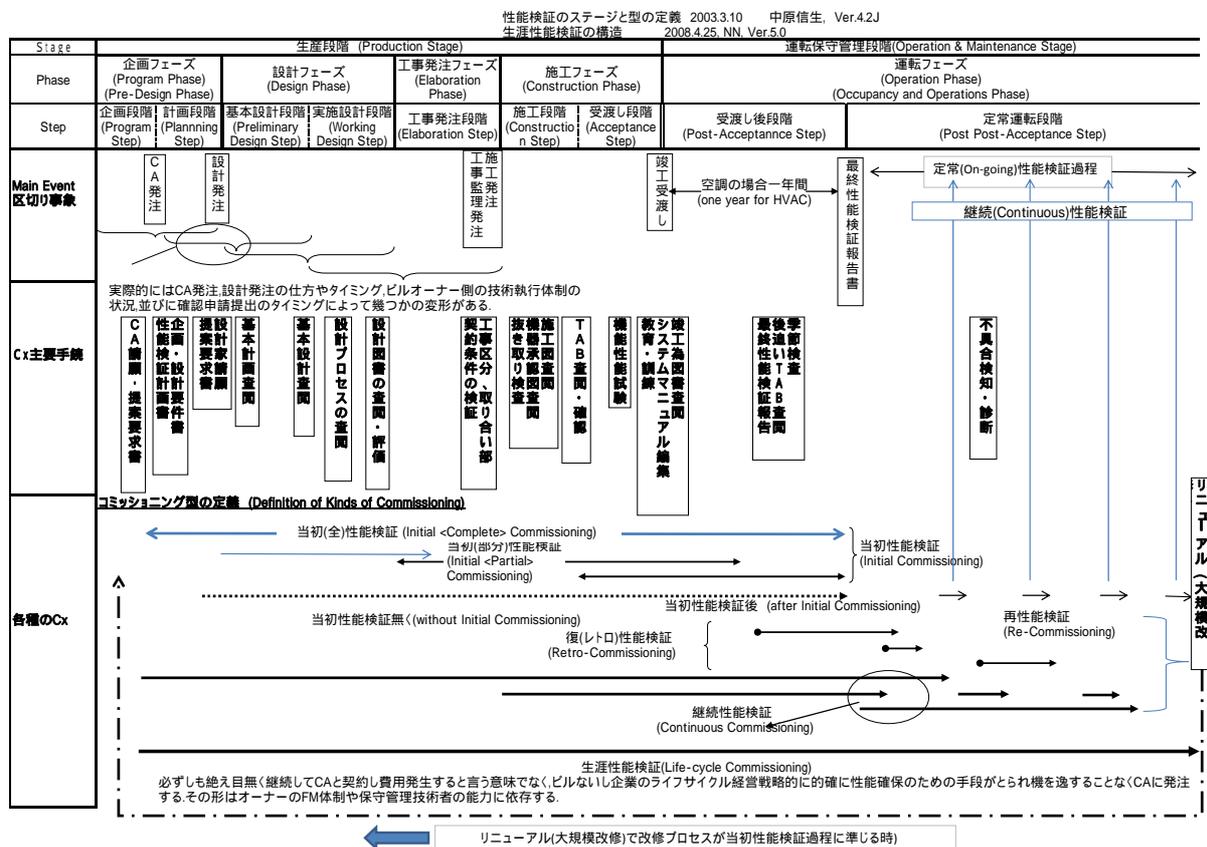


図1 建築物のコミッショニングプロセス(性能検証過程) [中原作成]

参考文献

- [1]空気調和・衛生工学会 コミッショニング委員会：建築設備の性能検証過程指針、2004.3
- [2]中原信生：コジェネレーション、pp.67-76、VOL23、No17、2008.7

第 1 部

CFD 連成解析を用いたアースチューブ併用

自然換気システム性能の予測と検証

第1章 序説

1.1 研究の背景

新設の建築設備システムのコミッショニングを行う場合は、企画フェーズから、設計フェーズ、施工フェーズそして運転フェーズに渡る継続性能検証を行うべきであり、各種システムの各フェーズにおいてどのように検証を行うべきかを示す必要がある。また、各種システムに対して、必要なコミッショニング支援用シミュレーションツールの開発も急務である。

空気調和・衛生工学会 コミッショニング委員会によって、コミッショニングは以下のように定義される。

「コミッショニングとは、環境・エネルギー並びに使い易さの観点から使用者の求める対象システムの要求性能を取りまとめ、設計・施工・引渡しの過程を通して、その性能実現のための性能検証関連者の判断・行為に対する助言・査閲・確認を行い、必要かつ十分な文書化を行い、機能性能試験を実施して、受け渡されるシステムの適正な運転保守が可能な状態であることを検証することである」

定義で示されている「環境・エネルギー」とは、第一に室内環境の衛生・健康・快適性の保持をいい、第二にエネルギーおよび排出物質を最小限にして省エネルギーと地域・地球環境保全に貢献することを意味し、「使い易さ」とは保守性の確保と長寿命化への貢献を意味する。

本研究では、コミッショニングの詳細内容を、上記の定義の環境保持と省エネルギーの目標を共有しながら、以下のように展開している。

(1) 設計レビューである企画/設計フェーズのコミッショニング

企画/設計フェーズでは、オーナーの要求が不明確であったり曖昧な場合が多く、その上に経験不足や設計の未熟さが加え、設計者の提出する企画設計案は問題点の残る場合が少なくない。それゆえ、企画/設計フェーズのコミッショニングは設計提案をレビューし、問題点を発注者に申告することによって設計者に助言し、設計の見直しを求めることである。なお、企画/設計フェーズの技術的なコミッショニングツールとしては、各種のチェックリストのほか、シミュレーション手法が主流になる。

(2) 機能・性能試験を含む運転フェーズのコミッショニング

運転フェーズでは、施工したシステムは設計通りの性能が実現できるか否かを確認し最適化することがコミッショニングの目的であり、そのために機能性能試験を行う。このフェーズのコミッショニングには実測とシミュレーションとを適用する。まず、システムの室内熱環境及びエネルギー性能を実測し、設計性能を満たしているか否かをチェックし、問題点の有無を確認する。そして、問題点が見つかった場合、その対策を提案し、シミュレーションによってその対策の効果を推定する。これをオーナーと設計者に提出して問題点の解決を図る。更に、シミュレーションによって、実測では把握できなかった異なる運用条件下のシステム性能の予測と最適運転方策の効果の検証と提案をすることに活用できる。

1.2 研究の目的

自然換気は省エネルギー効果が期待でき、さらに心理的・生理的にも快適感を与えることのできる換気方式である。また、外気をアースチューブによって予冷/予熱してから室内に導入することで自然換気システムの室内温熱環境が改善されるため、近年、アースチューブ併用自然換気システムの応用が注目されている。しかし、既往の研究では、この種のシステムを対象として温熱環境、省エネルギー性能評価を目的としたコミッショニングを実施した報告は見られない。このようなシステムに対してコミッショニングを行うには、以下のような問題点がある。

- (1) 本来発注者がシステムの性能を要求すべきであるが、新しいシステムに対する知識は発注者にはなく、また設計者にも技術の蓄積が無いために性能を細部に至るまで明確には規定できない。
- (2) システムの性能を満たすために、各フェーズで実施すべき検証項目が明確に示されないことが多い。
- (3) 検証手法とその役割が確立していない。検証手法は実測とシミュレーションの2通り挙げられるが、実測とシミュレーション、それぞれの検証項目の詳細が明確にならないことが多い。
- (4) 検証用のシミュレーションツールが不足している。とくに自然換気空間が大空間である場合は、室内の上下温度分布を考慮した自然換気解析が不可欠であると思われるが、既往のツールにはこの種のものが無く、設計提案の各自然換気開口の風量と室内温熱環境の予測値が正しいか否かの検証が十分にできていない。

そこで本研究では、以下のように、アースチューブ併用自然換気システムの各フェーズで実施すべき検証方法を提案し、そのためのコミッショニング支援ツールを開発することを目的とする。

- (1) コミッショニングの定義を基礎として、アースチューブ併用自然換気システムの特徴を考慮した上で、性能要求と企画と運転フェーズの検証項目を明確にする。
- (2) 企画フェーズと運転フェーズにおいて、実測とシミュレーションによる検証項目を考察して提案する。

- (3) 室内の上下温度分布を考慮した自然換気解析と CFD を連成させた解析法を提案し、その予測精度を検証する。また、これを実システムの企画フェーズと運転フェーズに応用することによって、それがコミッショニング支援ツールとして有効であることを示す。

1.3 既往の研究

IEA/ECBCS(Energy Conservation in Buildings and Community Systems、建築物とコミュニティーシステムにおける省エネルギー研究開発計画)の研究分科会であり、2001年から2004年に活動が行われた Annex40(Commissioning of Building HVAC System for Improved Energy Performance、省エネルギー化のためのビル空調設備のコミッショニング)において、コミッショニングに関する国際共同研究が行われた^{[1]-[3]}。この研究分科会の目的は、1) 国際的な観点からのコミッショニングプロセスの定義；2) 既往の空調システムの機能試験のためのコミッショニングツールとガイドラインの作成；3) コミッショニングを支援するツールの開発；4) コミッショニングの実施事例に関するデータベースの構築、である。特に、IT 技術を応用して効率よく安価に性能検証を行う手法やツールに関する研究開発が精力的に行われた。

また、Annex40 に引き続き、2005 年に Annex47(Cost-effective Commissioning for Existing and Low Energy Buildings、低エネルギービルにおける費用効果の高いコミッショニング)が立ち上げられ、現在、研究の最終段階に至っている。この研究分科会では、1) コミッショニングの情報フローに関する研究；2) ビルの運用を改善し、運転法を最適化するコミッショニング手法やツールの開発；3) より高度なシステムや低エネルギービルの性能検証に対応可能なコミッショニング手法やツールの開発；4) 費用便益と省エネルギーの持続性に関する研究、が主に行われている。

アースチューブと自然換気システムに関する予測や分析は以前から研究されてきたが、アースチューブ併用自然換気システムを対象として、いかにコミッショニングを適用するのかという研究は今まで行われなかった。以下に、本研究に関連する既往研究をレビューする。

(1) 自然換気システムに関する既往研究

建物の換気解析法については、室内の熱的計算を行わずに、室温を予条件として圧力バランスに基づいて解を求める静的な簡易解析法がある^[4]。簡易換気解析法を多数室に拡張した換気回路網に基づいて、多数室の換気解析ソフトが多く開発されたが、その中で代表的なものは、IEA の Annex23 で開発された COMIS^[5]、建築研究所で開発された Ventsim^[6]等が挙げられる。これらの換気解析ツールでは、各室をネットワーク上の1つの節点として扱い、室温設定値と外気温との差または隣合い室間の温度差により自然換気量を計算するが、熱的計算に基づく室温計算は行われていない。

しかし、自然換気量は室内外温度差に影響され、逆に室温は換気量に影響されるため、正確な自然換気量を求めるには、熱・換気の連成解析を行う必要がある。Yoshida ら^[7]は熱と換気の連成解析ツールを開発し、自然換気の制御方法がオフィスビルの空調負荷への影響を分析した。また、TRNSYS^[8]、EnergyPlus^[9]と COMIS の連成解析ツールが開発された。

熱・換気解析ツール NETS^[10]は熱・換気回路網に基づいて開発されたものであり、室内空

間の熱・気流の性状を大まかに把握できる場合に、室内と室外空間を適当に分割して分割空間の間の熱、気流移動を同時に算出できる。しかし、NETS の換気計算は、流体の熱、運動方程式と連続方程式に基づく CFD とは異なり、本質的に全圧計算であるため、気流・温度分布の予測には概算であり厳密性に欠ける。

上述した換気計算ツールは、各室を 1 つの節点として扱っているため、室内上下温度分布がある場合には何を節点の気温として与えるかが問題となっている。よって、室内上下温度分布を考慮できる換気解析ツールが望まれる。Li^[11]は、室内空気の垂直温度分布を考慮した自然換気解析に関する研究を行った。その結果、対象室を高さ方向により複数の空間に分割し、複数室解析モデルと CFD の計算値を比較した結果、複数室解析モデルは垂直温度分布を実験や経験により予め与えないと妥当な結果が得られないと指摘した。

一方、Y. Ji^[12]が CFD モデルを用いて、接続する 2 つの空間の自然換気開口の圧力境界条件を指定して、室内上下温度分布と自然置換換気量を計算した結果を実測値と比較した結果、上下温度分布の存在する場合に自然換気解析に有効に利用できることを示している。

戸河里^[13]は大空間に形成される上下温度分布を簡易に予測するために、ブロックモデルを作成し、室内側表面温度が実験で与えられた場合につき、その有効性を示した。室内側表面温度は未知であるので、これを含めた予測手法として、周壁の熱系とブロックモデルを連成させる非定常計算モデルを提示し、実験値との比較により、十分な予測精度を有することを示した。しかし、ブロックモデルに使われる熱移動係数と表面熱伝達率はそれぞれ実験と熱流の測定値から推定して与えたものであり、一般的な予測手法として、これらの数値を決めるのは困難であるという課題を残している。

Beausoleil^[14]は、建物シミュレーションシステム ESP-r をプラットフォームとして、室内気流のモデリングと室内気流が内表面の熱伝達に与える影響を精確に取り扱うために、CFD 技術を全建物シミュレーション(熱と気流ネットワーク)に取り入れた統合モデリング法を開発した。熱と気流ネットワークにより CFD に境界条件を渡し、CFD により内表面对流伝熱を計算して、直接あるいは対流係数により熱と気流ネットワーク計算へ境界条件を渡している。なお、各内表面に隣接する気流の性質(強制、自然、混合、完全乱流、弱い乱流)を決めるために、28 種の対流係数相関関係に基づいて適対流アルゴリズムを考案した。しかし、この計算方法を用いて様々な対流方式の対流係数相関関係を決定するための実験的な作業は数多く残されている。

本研究の目的は、アースチューブ併用自然換気システムの性能検証を行う際に、一定の計算精度を持ち、尚且つ簡易に利用できるシミュレーション方法の開発である。そこで、自然換気解析を CFD と連成する解析法を考案した。自然換気解析は圧力バランスに基づく静的な解析法を用いるが、CFD は市販のソフトが利用される。二種の解析ツールはともに広く使われ、よい計算精度が認められているので、それらの連成による計算結果も一定の計算精度を持つことが期待できる。

(2) アースチューブに関する既往研究

木村ら^[15]、A. Trombe ら^[16]はアースチューブの熱交換性能について、実測と数値解析手法により評価を行い、各種の性能パラメータがアースチューブシステムに及ぼす影響を明ら

かにした。M. Santamoreis ら^[17]、M. Bojic^[18]らは、空調用取り入れ外気負荷低減を導入目的とするアースチューブシステムを対象とする研究を行い、省エネルギー効果について検討した。Son ら^[19]は、展示館に対する外気取入れを大規模な床下空間を用いて行い、外気の持つ冷熱と温熱を年間サイクルで蓄熱して展示館床下より吹出し、強制換気の自然冷暖房システムの数値シミュレーションと実測による暖冷房効果を検証し、土壌蓄熱熱回収システムが有効であることを示した。鄭^[20]は温室における太陽エネルギー土中蓄熱システムの中のアースチューブの二次元数値解析モデルを開発し、システムの設計及び運転パラメータなどについて研究を行った。

また、石原ら^[21]は日本の代表的な地域のアースチューブ出口温度の推定式を作成し、埋設深さ 2m、長さ 20m、管径 0.2m、風量 100CMH 28 に維持するための必要本数に対する算出手法も提案している。

銚井ら^[22]は、アースチューブ性能の影響因子を無次元化し設計図表を作成し、無次元特性値と図表を用いることによってアースチューブの出口温度や取得熱量の予測を可能にした。また、G. Mihalakakou ら^[23]はチューブ長さ、管径、風量に関する三つの回帰係数近似式を提案し、アースチューブの出口温度や取得熱量を予測できるようにした。

尹^[24]が複数管型アースチューブシステムの性能予測と近接配管による配管の相互的熱影響を詳細に検討するために、3次元熱伝導微分方程式に基づく解析ツールを開発した。解析モデルの妥当性を検討した結果、チューブの出口温度の実測値と計算値の差は冬期と夏期においてそれぞれ平均約 0.7、0.6 であり、また、アースチューブの熱交換量の実測値と計算値の誤差は約 2%であることを示した。そのため、本研究では、アースチューブの熱交換特性や室への吹出温度の計算は尹が開発した解析ツールを利用することとする。

以上、自然換気およびアースチューブに関する既往研究をレビューしたが、今までに両者を併用したシステムに関する研究は見られない。そこで、本研究では、新たにアースチューブ併用自然換気システムについて、アースチューブ内表面の摩擦抵抗がシステムの自然換気性能に及ぼす影響、アースチューブの加熱/冷却効果が室内温熱環境に及ぼす影響、室内上下温度分布が浮力自然換気駆動力に及ぼす影響を連成させて解く自然換気解析ツールを開発し、さらに CFD と連成させる解析法を提案する。

1.4 第1部の構成

第1部は、アースチューブ併用自然換気システムのコミッショニングを行うために、各フェーズにおける検証項目の明確化及び実測とシミュレーションによる検証方法の提案に関する研究成果を纏めたものである。以下に、第1部の構成を示す。

本章は序説であり、アースチューブ併用自然換気システムについて、自然換気解析とアースチューブの熱交換解析の既往研究の成果を整理し、本研究の目的、位置づけ及び第1部の論文構成について述べる。

第2章では、本研究で提案するアースチューブの熱交換解析、室内の上下温度分布を考慮した自然換気及びCFDによる室内温度分布の予測の三つを連成する解析法について述べた上で、特に自然換気のCFD連成解析部分について詳細に述べる。

第3章では、企画フェーズにおいて、自然換気解析とCFDの連成解析法を応用して某体育館のアースチューブ併用自然換気システムの自然換気量および居住域の温度、気流環境を予測した結果に基づいて、システムの性能検証を実施したことを示している。

第4章では、運用フェーズにおいて、実測及び自然換気解析とCFDの連成解析法を応用して某体育館のアースチューブ併用自然換気システムの自然換気量および居住域の温度、気流環境を予測した結果に基づいて、システムの性能検証を実施したことを示している。

参考文献

- [1] IEA/ECBCS/Annex25: Final Report: Building Operation and Fault Diagnosis Source Book, 1996
- [2] IEA/ECBCS/Annex34: Final Report: Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance, 2001
- [3] IEA/ECBCS/Annex40 Final Report: Commissioning Tools for Improved Energy Performance, 2004
- [4] 石原正雄：建築換気設計，朝倉書店，1969.3
- [5] Anne Haas, Andreas Weber, Viktor Dorer, Werner Keilholz, Roger Pelletret : COMIS v3.1 simulation environment for Multizone Air Flow and Pollutant Transport Modelling, Energy and Buildings 34(2002) pp873-882
- [6] 内海康雄：換気 - 通風・気密性，空気調和・衛生工学，第 71 巻, 第 1-6 号, 2005
- [7] Yoshida Harunori: Analysis of natural ventilation effect for an office building considering moisture absorption by materials, Advances in Building technology, Volume 2, 2002, pp1199-1206
- [8] Hensen J L M : Modelling Coupled Heat and Airflow; Ping Pong Versus, Proceedings of 16th AIVC Conferece, 1995,(1)pp253 ~ 262
- [9] Joe Huang, Fred Winkelman and Fred Buhl: Linking the COMIS Multi-Zone Airflow Model with the EnergyPlus Building Energy Simulation Program, Proceeding of Building Simulation'99, 1999
- [10] 奥山博康：熱・換気回路網計算プログラム NETS，日本建築学会・熱環境小委員会・伝熱 WG シンポジウム資料，1998
- [11] Yuguo Li : Integrating Thermal Stratification in Natural and Hybrid Ventilation Analysis, IEA ECBCS Annex35 Technical Report,2002
- [12] Y.Ji, M.J.Cook, V.Hanby: CFD Modelling of Natural Displacement Ventilation in an Enclosure Connected to an atrium, Building and Environment 42(2007) , pp1158-1172
- [13] 戸河里敏，荒井良延，三浦克弘：大空間の空調・熱環境計画手法の研究(その 1) 大空間の上下温度分布予測モデル，日本建築学会計画系論文報告集，第 427 号，pp.9～19，1991 年 9 月；(その 2) 大空間の上下温度分布予測のための非定常計算モデル，日本建築学会計画系論文報告集，第 435 号，pp.11～21，1992 年 5 月
- [14] Beausoleil-Morrison I, Clarke J A, Denev J, and Macdonald I A, Melikov A, Stankov P: Further Developments in the Conflation of CFD and Building Simulation, Proceeding of Building Simulation'2001
- [15] 木村建一ほか：アースチューブの涼房効果に関する研究、その 1～その 6、日本建築学会大会学術講演梗概集、1983 年～1985 年
- [16] A Trome: Air-earth exchanger study in real site experimentation and Simulation, Energy and Buildings, pp.155-16221, 1994
- [17] M.Santamouris: On the Performance of building coupled with earth to air heat exchangers, solar energy, Vol.54, No.6, pp.375-380, 1995
- [18] M.Bojic:Numerical simulation,Technical and economic evaluation of air to earth heat exchanger coupled to a building,Energy.Vol.22,No.12,pp,1151-1158,1997
- [19]W Son, H.Tanaka, H.Nagai, M.Okumiya, N.Nakahara:An Analysis of the Fresh Air Load Reduction System by Using Underground Double Floor Space for Air Conditioning, IBPSA

Conference,1999, Kyoto.

[20] 鄭明傑：温室効果における太陽エネルギーの土中蓄熱の最適化に関する研究,名古屋大学博士論文、1983年

[21] 石原修、張晴原：アースチューブの設計出口温度と冷却エネルギー量の検討-第2報。アースチューブによる室内熱環境の改善に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第477号、11-18,1995年11月

[22] 銚井修一ほか：アースチューブの冷却効果に関する研究、日本建築大会学術講演梗概集、1995年～1997年

[23] G.Mihalakokou et al:Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications,Solar Energy,Vol.55,No.3,pp.163-173,1995

[24] 尹奎英：複数管型アースチューブに関する研究～近接配管を有する複数管型チューブの設計方法～,博士論文,2006.2

第2章 室内上下温度分布を考慮した自然換気解析と

CFD との連成解析方法の開発

自然換気システムにおいては、自然換気量は室内外温度差に影響され、逆に室温も換気量に影響されるため、自然換気量を算出するには熱・換気の連成解析を行う必要がある。一般的な自然換気解析法は、室内発熱量と自然換気による熱収支計算により平均室温を求め、さらにそれを用いた自然換気解析と熱収支計算を繰返し計算して、自然換気量と平均室温を同時に求めている。特に、室内上下温度分布が存在する場合には、これが浮力換気の駆動力に及ぼす影響を換気解析に導入しなければならない。また、アースチューブ内表面の摩擦抵抗が自然換気駆動力に及ぼす影響、アースチューブの加熱/冷却が室内温熱環境に及ぼす影響も考慮する必要がある。そこで、本研究では、アースチューブの土壌・空気熱交換計算、チューブ内の摩擦抵抗、室内上下温度分布を考慮する自然換気解析及び CFD による室内上下温度分布計算の三つの解析を連成解析する方法(以後、CFD 連成解析方法)を提案し、上述の自然換気解析ツールを開発した。本章では、この CFD 連成解析法およびアースチューブの土壌空気熱交換計算及び開発したチューブ内表面摩擦抵抗と室内上下温度分布を考慮した自然換気解析ツール、 $k-\varepsilon$ モデルに基づく CFD 解析ツールのアルゴリズムを説明し、ある実アースチューブ併用自然換気システムを対象として、システム特徴値の実測値とシミュレーション結果の比較により本方法が高い計算精度を持つことを示した。なお、第1部の付録に、本解析法と一般的な平均室温による熱バランス法との比較結果の詳細を示した。

2.1 CFD 連成解析方法の概要

これまでに自然換気の解析では、室内温度分布を無視して熱バランス法より得た代表室温を設計室温として自然換気量を計算するのが一般的であった。しかし、大空間や換気量の少ない場合などで著しい室内上下温度分布が存在する場合には、従来の解析法では無視できない計算誤差が生じることがある。よって、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析と CFD の連成解析を行い、室内温度分布と自然換気量を同時に求めることが必要である。

図 2-1 は本方法の計算フローを示す。1、2、3 はそれぞれ部屋の自然換気量、上下温度分布、アースチューブ出口温度の収束判断基準である。連成解析法は以下のように三つのシミュレーションツールを組合せて構成される。

(1)アースチューブ内の土壌 - 空気熱交換計算

チューブ長さ、サイズ、チューブ埋設深さ、土壌温度、土壌の熱交換率などのパラメータを与条件とし、アースチューブの入口温度(=外気温)、チューブ内空気流速(初回計算には、適当な仮定値)を入力とし、空気-土壌熱交換計算によってアースチューブの出口空気温度を求める。この出力を自然換気解析の入力データとする。

(2)自然換気解析による各自然換気開口の自然換気量および隙間風量の算出

室内上下温度分布の現在値(初回計算には、任意の仮定値)及び(1)で求められたアースチューブの出口空気温度を入力データとし、外気温・風向・風速、部屋の自然換気開口の面積、個数、高さなどのパラメータを与条件として、各自然換気開口の風量と隙間風量およびそれぞれの気流の流れ方向を求める。これらを(3)の室内上下温度分布の CFD 解析の入力データとする。

(3)CFD による室内上下空気温度分布計算

(2)で計算した各自然換気開口の風量と隙間風量を用いて、室の形状、各外表面の境界条件、メッシュ形状・分割率、各開口の形状、設置位置、各自然換気開口と隙間風の流入温度、乱流エネルギーとその損失率、外気温、日射など気象条件、室内発熱量と発生位置、乱流解析モデル、差分スキーム、収束判定基準などのパラメータを与条件とし、CFD によって室内の上下空気温度分布を算出する。これを室内上下温度分布を考慮した自然換気解析ツールの入力データとする。

(4)三つの解析ツールの繰返し計算

図 2-1 で示されるように、本解析法は、室内上下温度分布と各自然換気開口の風量と隙間風量を同時に求めるために、二つのループの収束計算を行う必要がある。内ループ計算では、アースチューブ内空気流量を用いて算出したアースチューブ出口温度を利用して、自然換気解析と CFD の繰返し計算を行い、各自然換気開口の自然換気量と隙間風量および室内上下温度分布の計算値を収束させる。外ループ計算では、内ループの収束計算で求めたアースチューブ内の空気流量を土壌-空気熱交換計算ツールに入力し再計算を行い、アースチューブ出口温度の修正値を出力し、これを用いて再び内ループの収束計算を行う。この二つのループの収束計算における、自然換気量の差異 G 、室内上下温度分布の差異 T 、アースチューブ出口温度の差異 To の各相対誤差が共に収束判断基準(本計算では三つの収束判断基準を全て 3%に設定)を満足したときに計算を終了させ、各自然換気開口の風量および隙間風量、室内上下温度分布、アースチューブ出口温度を結果として出力する。

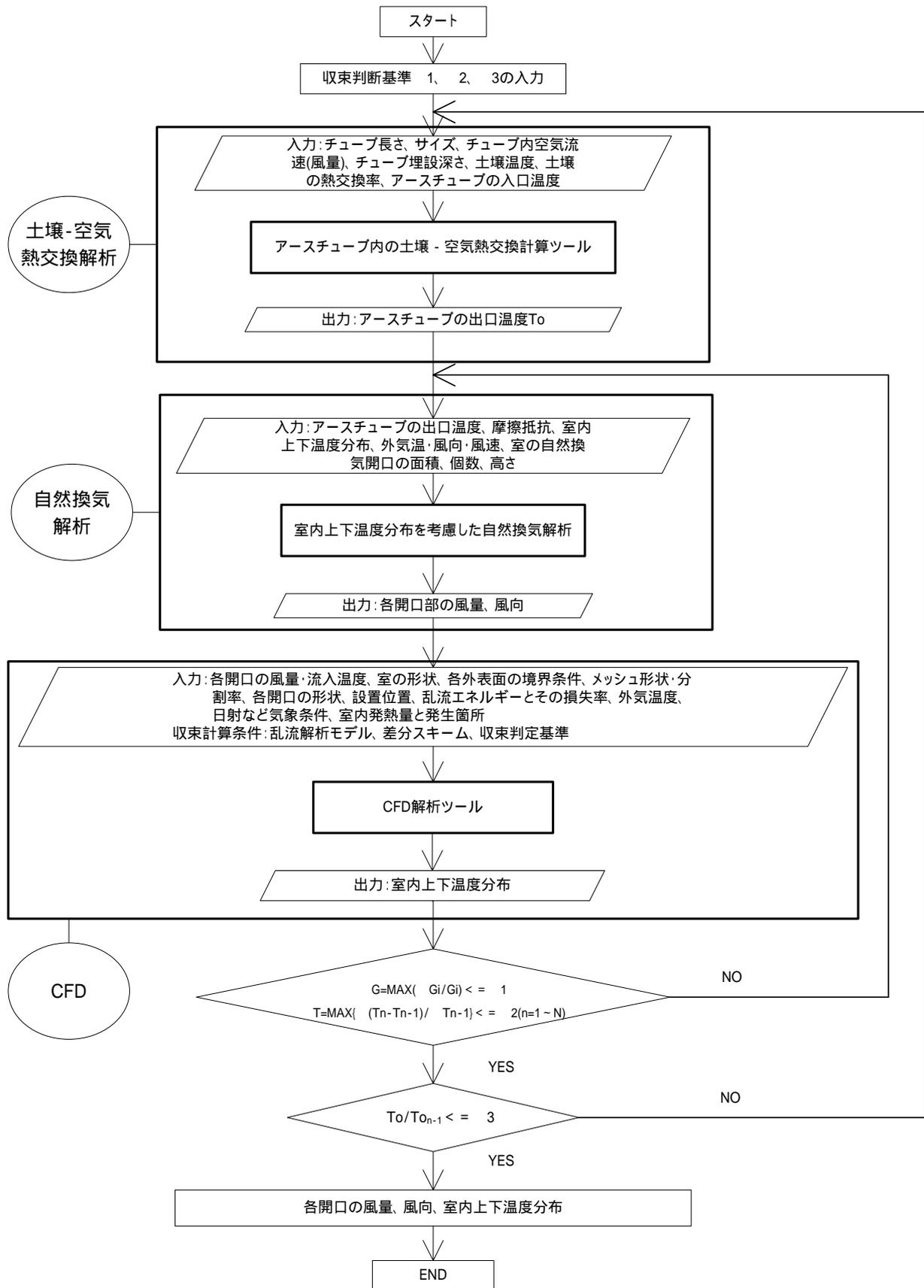


図 2-1 三つの解析ツールの連成解析法のフローチャート

2.2 三つの解析ツールの概要

某実アースチューブ併用自然換気システムのシミュレーションモデルの構築を対象として三つの解析ツールにおける計算式の概要を説明する。

2.2.1 対象アースチューブ併用自然換気システムの概要

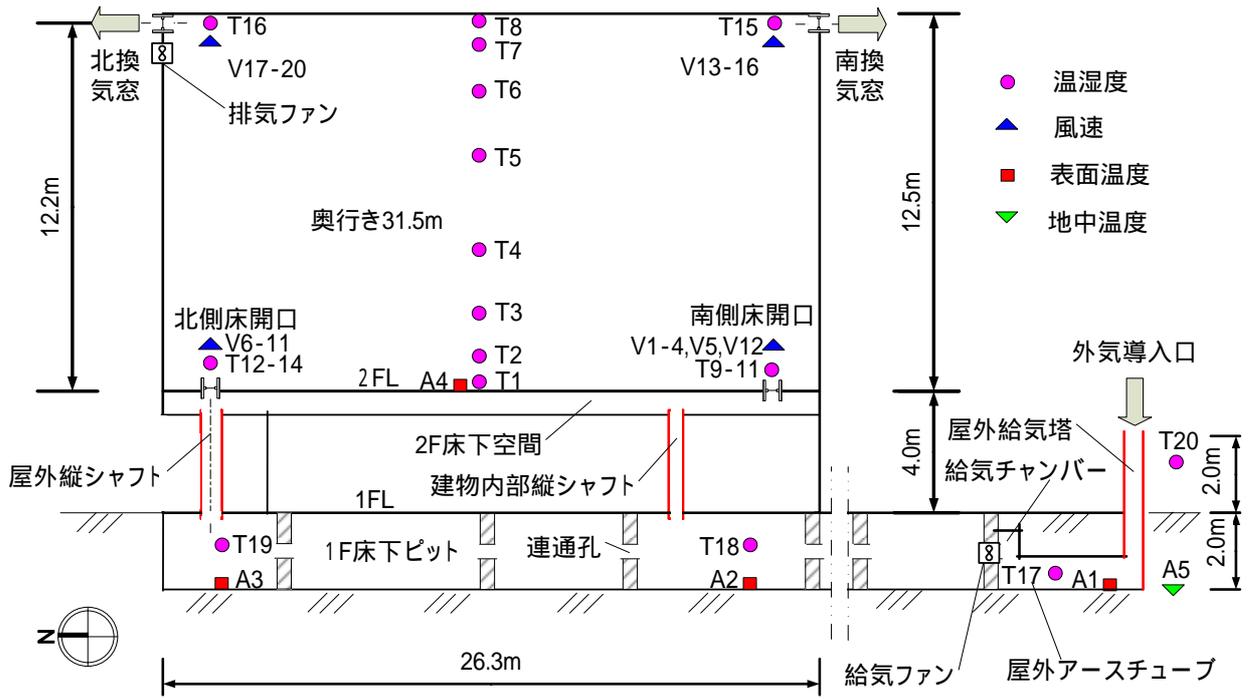
対象建物の概要を表 2-1 に、アースチューブ併用自然 / 強制換気システムの概要を表 2-2 に示す。図 2-2 に対象アースチューブ併用自然換気システムの見取り図を示す。対象建物は屋内運動場であり、南・北外壁の天井付近に設置された回転式換気窓及び 13 個の床面開口からなる自然換気システムが設計され、外気は、屋外給気塔から取り入れ、屋外地下アースチューブと 1F 床下ピットの南側縦シャフト入口までの部分、1F 床下ピットの南側縦シャフト入口から北側屋外縦シャフトの入口までの部分、北側屋外縦シャフトと屋内運動場の北側床下空間、建物内部の南側縦シャフトと屋内運動場の南床下空間を經由して、図 2-3 に示す 7 個の南側床面開口及び 6 個の北側床面開口から室内に供給されている。また、1F 床下ピットの入口に 2 台の給気ファンが設置され、これと北外壁の天井付近に設置された 2 台の強制排気ファンによって強制換気も行われる。なお、各床面開口を閉めることで換気しない(自然室温)運用状態も実現できる。

表 2-1 対象建物の概要

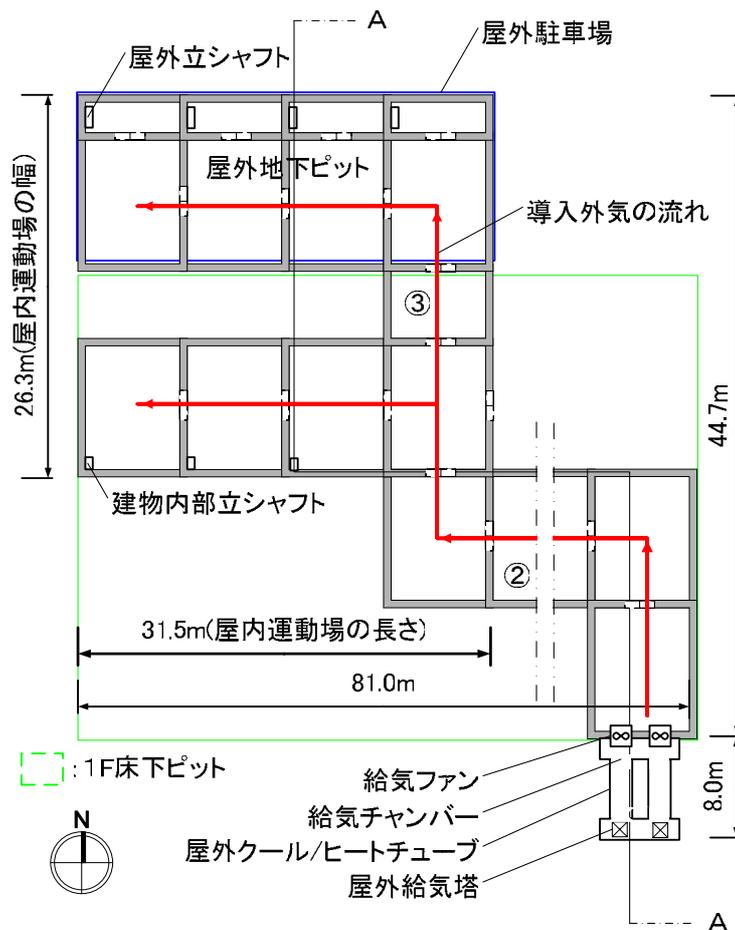
所在地	富山市	用途	屋内運動場
床面積	840 [m ²]	天井高	12.5 [m]

表 2-2 アースチューブ併用自然/強制換気システムの概要

南・北換気窓高さ [m] , 回転角度	12.2 , 45 °
南・北換気窓面積 [m ²]	6.76 , 12.79
床面開口の総有効面積 [m ²]	1.43
アースチューブ+1F 床下ピットの総長さ [m]	130.0
アースチューブ , 1F 床下ピットの断面積 [m ²]	2.25 , 14.4
建物内部北縦シャフトの断面積 [m ²], 高さ [m]	1.47 , 4.0
屋外の南立てシャフトの断面積 [m ²], 高さ [m]	1.84 , 4.0
屋外給気塔の高さ [m] , 開口面積 [m ²]	4.0 , 2.25
1F 床下ピット連通孔の断面積 [m ²]	0.28 × 3
給気ファンの定格風量 [m ³] , 定格電力 [W]	3,600 , 198
強制排気ファン定格風量 [m ³] , 定格電力 [W]	5,800 , 390



(a) A-A 断面イメージ図



(b) 1F床下ピットの平面図

図 2-2 対象アースチューブ併用自然換気システムの見取り図

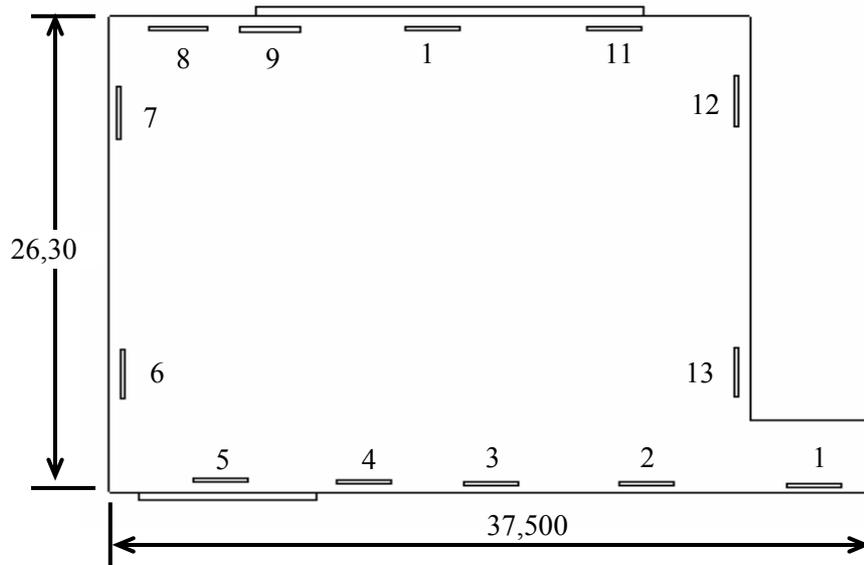


図 2-3 各床面開口の配置図

2.2.2 アースチューブの熱交換の解析式

本研究で用いるアースチューブの土壌-空気熱交換解析ツールの基本的な計算式^[12]を以下の通りである。図 2-4 に本ツールの境界条件を示す。図 2-5 に本ツールの計算フローチャートを示す。

土壌における 3 次元熱伝導微分方程式

$$c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial z^2} \right) \quad (2-1)$$

境界条件：

$$\theta_s |_{y=0} = \theta_{y1}, \quad \theta_s |_{y=15m} = \theta_{y0}, \quad \theta_s |_{x=5m} = \theta_{x2}, \quad -\frac{\lambda_s \partial \theta_s}{\partial y} |_{y=0} = \alpha_{y0} (\theta_{y1} - \theta_o)$$

単位長さのアースチューブ内空気の熱伝達方程式

$$c_a \rho_a \partial x \partial y \frac{\partial \theta_a}{\partial t} = -c_a \rho_a \nu \partial x \partial y \frac{\partial \theta_a}{\partial z} + \alpha (\theta_b - \theta_a) \partial x \partial y \quad (2-2)$$

ここに、

c : 比熱 [kJ/m・K] ρ : 密度 [kg/m³] α : 管内表面熱伝達係数 [W/m²・K]
 ν : 管内風速 [m/s] D : 管径 [m] t : 時間 [h] λ : 熱伝導率 [W/m・K]
 θ_o : 外気温度 [] θ_{s1} : 地表面温度 [] θ_{s2} : 土壌温度(冬期 4、夏期 26) []
 θ_{s0} : 地中温度(温度不変層の温度) [] θ_a : チューブ内空気温度 []
 θ_b : チューブ内表面温度 []

なお、本研究の計算では、土壌の熱伝導率を 1.39 W/m・K、土壌の熱容量を 2009 kJ/m³・K、地表面総合熱伝達係数を 23.3 W/m²・K、室内床面の総合熱伝達係数を 9.0 W/m²・K とした。

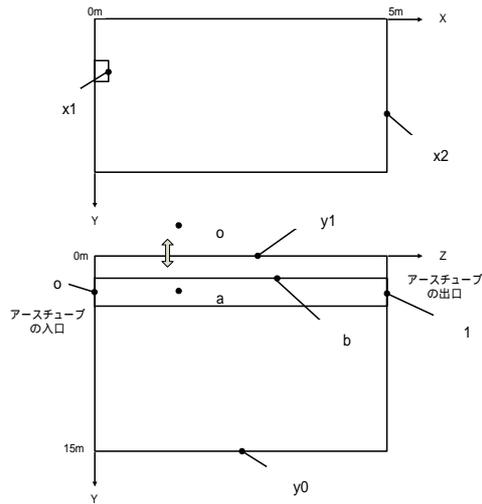


図 2-4 アースチューブの土壌-熱交換解析の境界条件

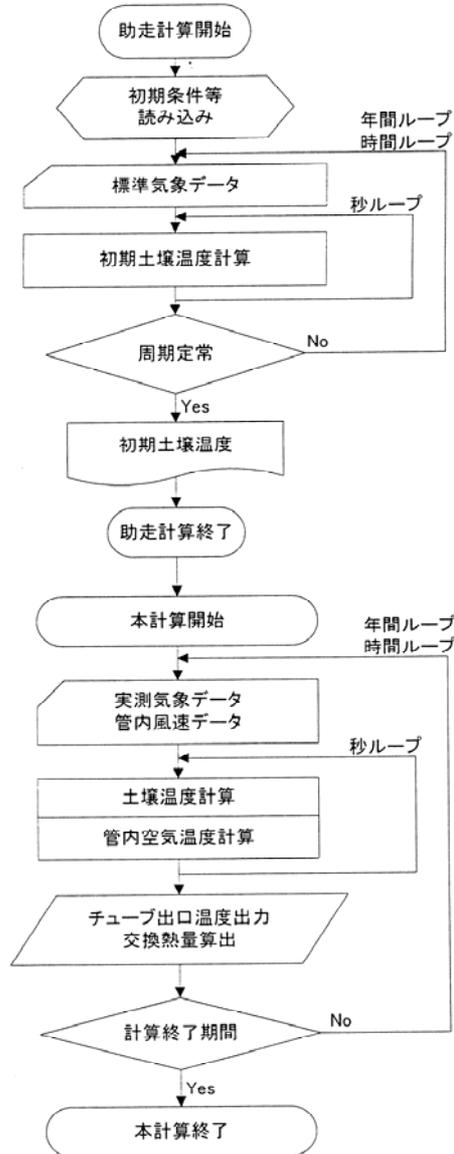


図 2-5 アースチューブの土壌-熱交換解析ツールの計算フローチャート

2.2.3 室内上下温度分布を考慮した自然換気解析

(1)室内上下温度分布を考慮する浮力換気の駆動力

図 2-6 に示す室内上下温度差に起因する浮力換気の駆動力の解析式を以下に誘導する。一般に、二つの開口がある室の浮力換気の駆動力 ΔP_g は式(2-4)で計算される。

$$P_g = (P_o - x) + (P_i' - P_o')$$
 (2-4)

図 2-6 における開口、付近の外気温は同じと考えられ、開口の高さの外気圧力は、 $P_o' = P_o - \rho_o H$ で表示される。室内空気は上下温度差がない場合には、開口の高さの室内空気圧力は $P_i' = x - \rho_i H$ で表示される。これらを式(2-4)に代入して、室内上下温度差無しの場合の浮力換気の駆動力の計算式(2-5)が得られる。

$$P_g = \rho_o H - \rho_i H$$
 (2-5)

しかし、室内上下温度差がある場合には、室内各所の空気の圧力が高さによって変動するだけでなく、空気の密度も高さによって変化するので、高さ dh の微小空気層の密度差による浮力換気の駆動力は $d \rho_{ih}$ とすれば、これを室の高さに亘って積分することで、室内上下温度分布のある場合の浮力換気の駆動力の計算式(2-6)が得られる。

$$\rho_i H = \int_1^H \rho_{ih} dh$$
 (2-6)

式(2-6)を式(2-5)に代入すると、室内上下温度分布を考慮した場合の浮力換気の駆動力 P_g は、式(2-7)となる。

$$P_g = \rho_o H - \int_1^H \rho_{ih} dh$$
 (2-7)

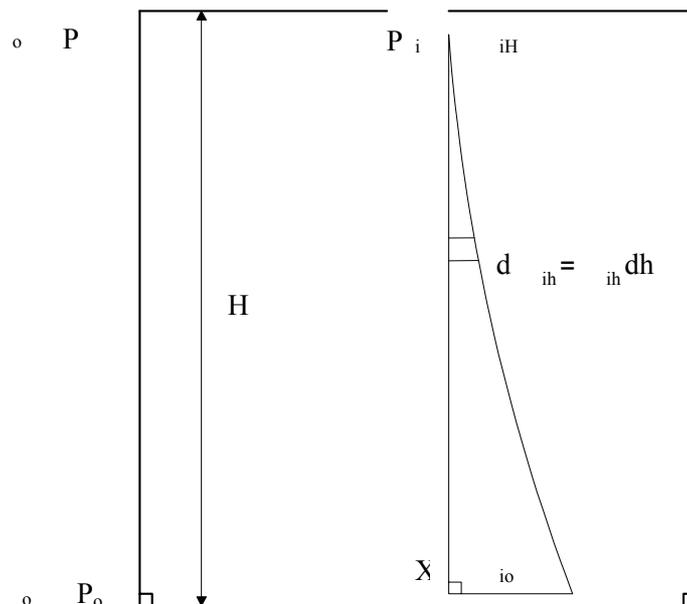


図 2-6 上下温度分布による浮力換気の駆動力の計算モデル

(2) 外気導入経路の摩擦抵抗 P_m

外気導入経路の摩擦抵抗は、直管部の摩擦抵抗及び局部摩擦抵抗の2つの部分からなる^[5]。

$$\Delta P_{m1} = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{V^2}{2} \gamma_m \quad (2-8)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{C}{R_e} & , R_e < 4 \times 10^3 \\ 0.055 \left[1 + \left(2000 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{R_e} \right)^{1/3} \right] & , R_e = 4 \times 10^3 \sim 10^7 \end{cases} \quad (2-9)$$

$$\Delta P_{m2} = \xi \frac{V^2}{2} \gamma \quad (2-10)$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} \quad (2-11)$$

(3) 室内上下温度分布を考慮した対象システムの自然換気解析式

対象アースチューブ併用自然換気システムの換気経路は、屋外給気塔、屋外チューブ、1F 地下ピット、1F 給気シャフト、2F 床下ピット、屋内運動場等の六つの空間を含む。
 ~ の各空間の流入・出風量が等しいため、~ を1つの室と仮定して室1と名付け、これと直列する屋内運動場(室2とする)との2室の換気解析を行うこととする。図 2-7 に対象システムの詳細な自然換気解析のモデルを示す。

また、室2に対して、開口2と開口1は直列しているため、次の式^[4]より二つの開口を一つの開口に直列合成し、解析対象は室2のみとなる。

$$\left(\frac{1}{\alpha A} \right)^2 = \left(\frac{1}{\alpha_1 A_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_2 A_2} \right)^2 \frac{T_1}{T_0} \quad (2-12)$$

外気導入経路の摩擦損失およびアースチューブ内温度変化を考慮した開口1(給気塔の外気取り入れ口)の風量 G_1 は式(2-18)より計算される。

$$G_1 = \alpha A \sqrt{2 \gamma_{0\text{塔}} |\Delta P_1|} \quad (2-13)$$

$$\Delta P_1 = \{x_2 - (P_1 - \Delta P_m)\} + \gamma_0 H_1 - \gamma_1 H_1 \quad (2-14)$$

$$P_1 = C_1 \frac{\gamma_0}{2} v_1^2 \quad (2-15)$$

室内上下温度分布を考慮した開口3、4の風量 G_3 、 G_4 は以下の式によって計算される。

$$G_3 = \alpha_3 A_3 \sqrt{2 \gamma_{2\text{上}} \gamma_0 |\Delta P_3|} \quad (2-16)$$

$$\Delta P_3 = (x_2 - P_3) + \gamma_0 H - \int_1^H \gamma_{ih} g dh \quad (2-17)$$

$$P_3 = C_3 \frac{\gamma_0}{2} v_3^2 \quad (2-18)$$

$$G_4 = \alpha_4 A_4 \sqrt{2 \gamma_{2\text{上}} \gamma_0 |\Delta P_4|} \quad (2-19)$$

$$\Delta P_4 = (x_2 - P_4) + \gamma_0 H - \int_1^H \gamma_{ih} g dh \quad (2-20)$$

$$P_4 = C_4 \frac{\gamma_0}{2} v_4^2 \quad (2-21)$$

また、隙間 5(2F 窓隙間)、6(1F 外扉隙間)、7(1F 内扉隙間)の隙間風量は以下の式によって計算される。

$$G_{5,6,7} = aL(\Delta P_{5,6,7})^{1/n} \quad (2-22)$$

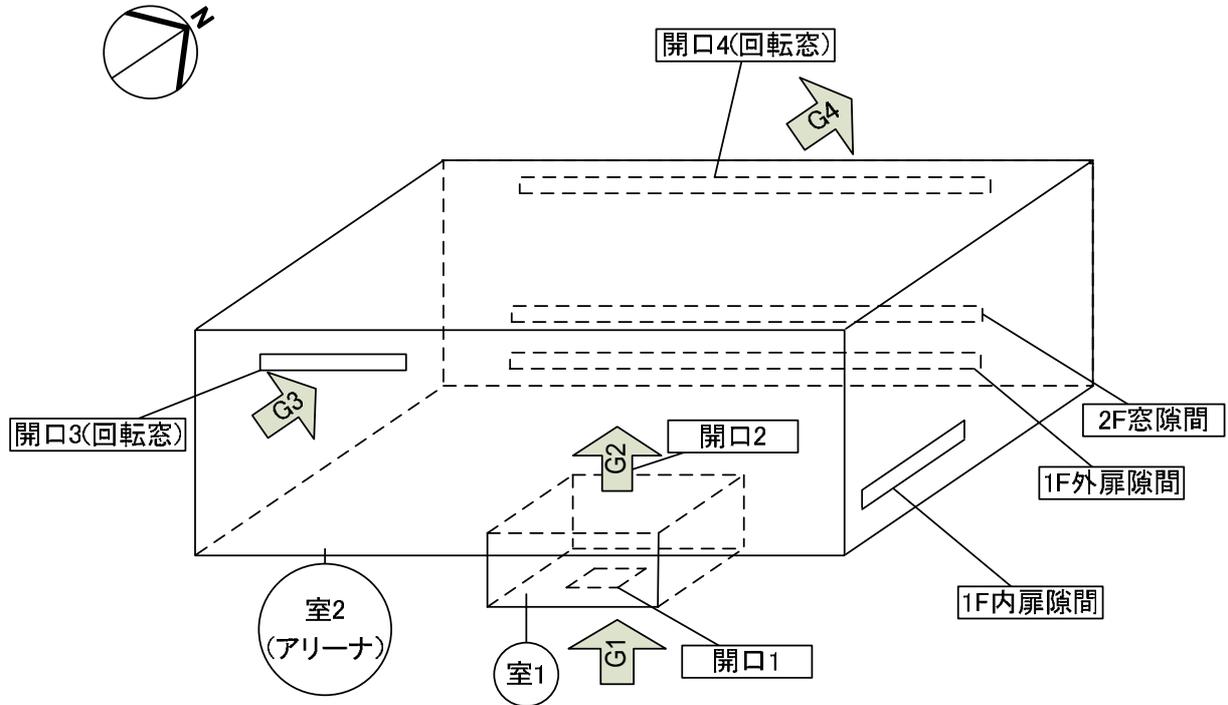


図2-7 対象システムの自然換気解析モデル

2.2.4 CFD 解析モデル

本研究の CFD 解析には、比較的粗い分割で解が得られる標準 $k-\varepsilon$ モデルに基づく三次元数値流体解析プログラムを用いた。標準 $k-\varepsilon$ モデルは以下の式で示される。

$$\frac{D\langle u_i \rangle}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\langle p \rangle + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (v + v_i) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - g_i \beta \Delta \langle \theta \rangle \quad (2-23)$$

$$\frac{D\langle \theta \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha + \frac{v_i}{\sigma_\theta} \right) \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} \quad (2-24)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = D_k + P_k + G_k - \bar{\varepsilon} + D \quad (2-25)$$

$$\frac{D\bar{\varepsilon}}{Dt} = D_\varepsilon + \frac{\bar{\varepsilon}}{k} \left\{ C_{\varepsilon_1} f_1 P_k + C_{\varepsilon_3} f_1 G_k - C_{\varepsilon_2} f_2 \bar{\varepsilon} \right\} + E \quad (2-26)$$

ここで、

$$v_i = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j}, \quad D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (2-27)$$

$$P_k = -\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}, \quad G_k = -\langle u'_i \theta' \rangle g_i \beta \quad (2-28)$$

$$D = -2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2, \quad E = \nu v_i (1 - f_\mu) \left(\frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial y^2} \right)^2, \quad \frac{D}{D_t} = \frac{\partial}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial}{\partial x_j}, \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon + 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2-29)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_\theta = 0.9, \quad C_{\varepsilon_1} = C_{\varepsilon_3} = 1.45, \quad C_{\varepsilon_2} = 1.90, \quad C_\mu = 0.09, \quad f_\mu = \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-y^+}{26.5}\right) \right\}^2, \quad f_1 = 1.0,$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_i^2), \quad Re_i \text{ は乱流レイノルズ数}, \quad Re_i = \frac{k^2}{\varepsilon \nu}$$

ここに、

$\frac{D}{Dt}$: 全微分、 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}$ u_i : x_i 方向の風速成分 ρ : 空気の密度 β : 体積膨張率

x_i : 空間座標の 3 成分 (一般に、 $i=1$: 主流方向 x 、 $i=2$: 横方向 y 、 $i=3$: 鉛直方向 z)

k : 乱流エネルギー、 $k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle$ ε : k の散逸 α : 温度拡散係数 (または温度伝導率)

ν : 動粘性係数 ν_i : 渦動粘性係数 (標準 $k-\varepsilon$ モデルの場合、 $\nu_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.09$)

g_i : 重力の加速度 ($i=1$: 0.0、 $i=2$: 0.0、 $i=3$: -9.8)

$-\langle u'_i u'_j \rangle$: レイノルズ応力 $-\langle u'_i \theta' \rangle$: 乱流熱流束

標準 $k-\varepsilon$ モデルの場合には、以下のことを注意する必要がある。

- (1) $f_\mu = f_1 = f_2 = 1.0$ とし、式(2-25)、(2-26)の $\bar{\varepsilon}$ を ε とし、それぞれの付加項 D および E を除けばよい。
- (2) $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon_1} = 1.44$, $C_{\varepsilon_2} = 1.92$ を使うのが一般的である。
- (3) ε 方程式の浮力生産項の取り扱いについては、ウイオレの提案した方法によることが多い。即ち、 $G_k > 0$ のとき、 $C_{\varepsilon_1} = C_{\varepsilon_3}$ 、 $G_k \leq 0$ (安定) のとき、 $C_{\varepsilon_3} = 0$ 。

なお、本研究では、CFD 解析の収束性に関わる主な解析条件については、Mesh 数 = 57(x)×30(y)×20(z) (ほぼ等間隔)、連立 1 次方程式の収束判定定数を 0.01 とし、圧力修正量の収束判定条件を 1.0E-4 とした。

2.3 CFD 連成解析モデルの検証

2.3.1 検証ケースの設定と解析条件

対象システムの CFD 連成解析モデルの再現性を検証するためのデータを 2008 年 2 月 4 日 17:16 (CASE-1、自然換気) 及び 2008 年 8 月 14 日 11:29 (CASE-2、自然換気) の実測データとする。なお、対象室の CFD 連成解析モデルを図 2-8 に示す。2 ケースの対象建物の外部条件を表 2-3 に示す。2 ケースの CFD の解析条件を表 2-4 ~ 表 2-6 に示す。

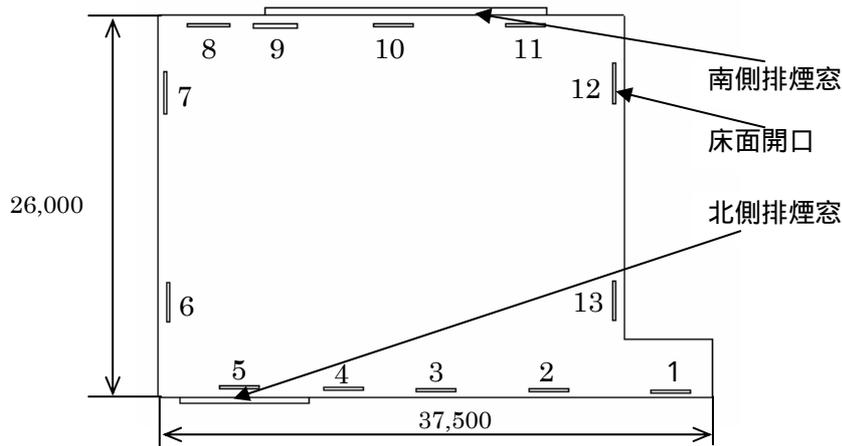


図 2-8 屋内運動場の CFD 換気解析モデルの平面図

表 2-3 室外条件

CASE	1(2月4日 17:16)	2(8月14日 11:29)
外気温 []	2.4	33.2
室外主風向・風速[m/s]	南・2.1	西北西・1.5

表 2-4 各壁面の計算条件

	北外壁	内壁	窓	床	屋根
熱貫流率 [W/m ² ・K]	0.13	3.8	1.7	3.0	0.4
外表面温度[] 2月 4日 17:16	2.4	4.1	2.4	8.3	2.4
8月 14日 11:29	33.2	31.5	33.2	32.3	45.0

表 2-5 内部発熱量及び日射量

人体発熱量 [W]	照明発熱量 [W]	日射量 [W]
0	21,000	0

表 2-6 各開口の個数・寸法・気流の流れ方向等の計算条件

	有効面積	個数	設置高さ[m]	気流の流れ方向
床面開口	1,960×56	13	2FL+0	上向吹出
東扉隙間	0.04m ²	1	2FL+1.0	水平吹出
北外扉・窓隙間	0.4m ²	1	2FL+3.0	水平吹出
南壁面換気窓	10,906×43.8	1	2FL+11,880	水平吹出/吸込
北壁面換気窓	6,875×43.8	3	2FL+11880	水平吹出/吸込
排気ファン	714×714	2		

2.3.2 CFD 連成解析モデルの再現性検証

表 2-7 と表 2-9 に CASE-1、CASE-2 の各自然換気開口及び隙間の自然換気量の実測値と CFD 解析値の比較を示す。図 2-9 と表 2-8 及び図 2-10 と表 2-10 にそれぞれ CASE-1、CASE-2 の室内上下温度分布の CFD 解析値と実測値の比較を示す。これらにより、以下のことがわかる。

1) 表 2-8 及び表 2-10 により、CASE-1、CASE-2 の室内上下温度分布の各測定点の実測値と計算値の誤差は、夏期の 2FL+12m の空気温度を除いて 0.7 以下であり、CFD 連成解析値はほ

ば実測値に相当することがわかる。

2)表2-7により、CASE-1の場合には、南換気窓の流入風量、北換気窓の流出風量、隙間及び床面開口からの流入風量の計算値と実測値の相対誤差は、それぞれ-2.9%、-6.4%、35.8%、-2.0%であり、隙間風量の計算値と実測値の相対誤差がやや大きいとその絶対誤差は589CMHしかなく、各開口の自然換気量の計算値はほぼ実測値に相当する。また、表2-8により、CASE-2の場合には、南換気窓の流出風量、北換気窓の流入風量、隙間及び床面開口からの流入風量の計算値と実測値の誤差は、それぞれ-10.8%、-8.4%、-40.3%、16.9%であり、隙間風量を除いて、各開口の自然換気量の計算値はほぼ実測値に相当する。

以上により、作成した対象室の自然換気解析モデル及びCFD解析モデルは、隙間風量を除いて対象アースチューブ併用自然換気システムの各自然換気開口の自然換気量及び室内上下温度分布をほぼ同時に再現できると言えよう。なお、隙間風量は隙間の位置や開口面積などが把握しにくいいため、正確に予測することが困難であり、隙間風量も実測できなく、屋内体育館の各自然換気開口のトータル流入と流出風量の差により算出したものである。そのため、計算値と実測値の確実な比較はできない。

表2-7 2008年2月4日17:16の各開口の自然換気量のCFD連成解析計算値と測定値の比較

	CASE-1 実測	CASE-1 計算	誤差
南換気窓流入/出風量 [CMH]	11,538	11,206	-2.9%
南換気窓流入/出空気温度 []	2.6	2.6	0.0(絶対)
北換気窓(+ファン隙間)流入/出風量 [CMH]	-14,671	-13,734	-6.4%
北換気窓(+ファン隙間)流入/出温度 []	5.5	6.2	0.7(絶対)
東扉隙間風量 [CMH]		789	
北外扉・窓隙間流入/出風量 [CMH]		1445	
隙間風合計値 [CMH]	1646	2,235	35.8%
床面開口の吹出風量の合計 [CMH]	1,487	1,457	-2.0%

注)：[-]は室外に流出することを示す。

表2-8 2008年2月4日17:16の室内上下温度分布のCFD連成解析値と実測値の比較 []

	FL+1.5m	FL+4m	FL+6m	FL+9m	FL+11m	FL+12m	FL+12.15m
CASE-1の実測値	5.9		5.9				9.0
CASE-1の計算値	5.8	5.9	5.9	6.0	6.2	6.4	9.2
誤差	-0.1		0.0				0.2

表2-9 2008年8月14日11:29の各開口の自然換気量のCFD連成解析計算値と測定値の比較

	CASE-2 実測	CASE-2 計算	誤差
南換気窓流入/出風量 [CMH]	-17,794	-15,870	-10.8%
南換気窓流入/出空気温度 []	33.4	33.4	0.0(絶対)
北換気窓(+ファン隙間)流入/出風量 [CMH]	15,696	14,383	-8.4%
北換気窓(+ファン隙間)流入/出温度 []	32.3	32.3	0.0(絶対)
東扉隙間風量 [CMH]		123	
北外扉・窓隙間流入/出風量 [CMH]		886	
隙間風合計値 [CMH]	1,689.4	1,009	-40.3%
床面開口の吹出風量の合計 [CMH]	408.6	478	16.9%

注)：[-]は室外に流出することを示す。

表2-10 2008年8月14日11:29の室内上下温度分布のCFD連成解析値と実測値の比較 []

	FL+1.5m	FL+4m	FL+6m	FL+9m	FL+11m	FL+12m	FL+12.45m
CASE-2の実測値	32.4	32.4	32.3	32.5	32.8	35.5	39.2
CASE-2の計算値	32.9	32.9	32.9	33.0	33.4	33.7	40.2
誤差	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	1.8	1.0

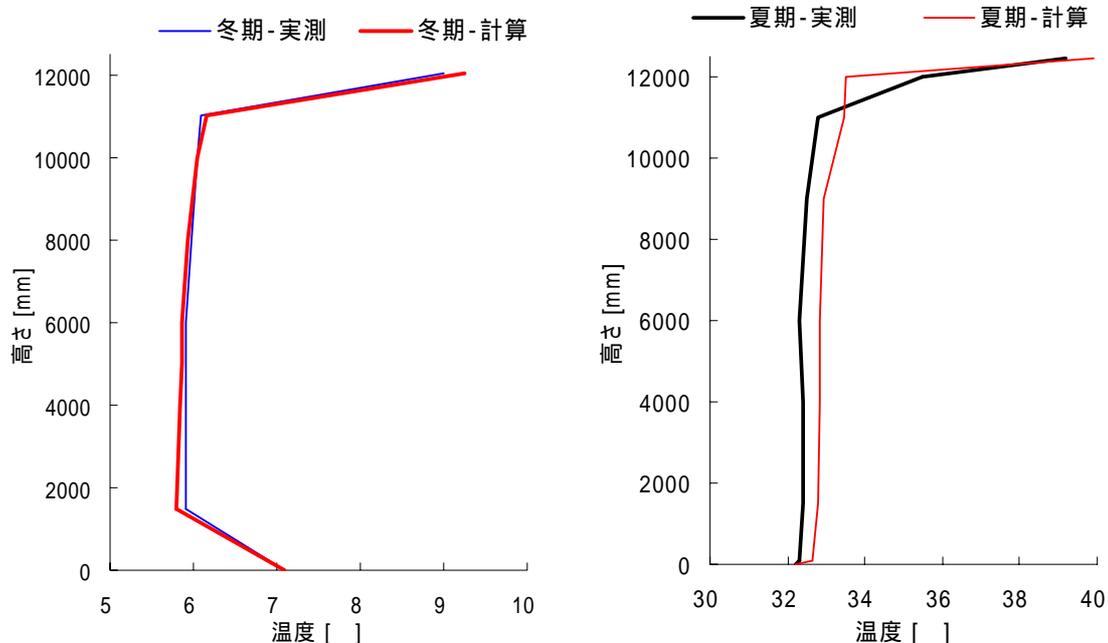


図2-9 CASE-1(2/4 17:16)の上下温度分布の再現性

図2-10 CASE-2(8/14 11:29)の上下温度分布の再現性

2.4 室内温度分布の自然換気量に与える影響

本研究では、新たに開発した CFD 連成解析法を用いて自然換気量と室内上下温度分布を同時に求めている。一方、一般的な自然換気解析法は、室内発熱量と自然換気による熱収支の熱バランスの計算による平均室温の計算とこれを用いた自然換気解析を繰返し計算して、自然換気量と平均室温を同時に求めている。二種類の計算法の詳細は後述の第 1 部の付録を参考されたい。

比較検討ケースは、表 2-11 に示す自然換気と CFD の連成解析により冬期・夏期・中間期の設計外気温かつ無風状態の自然換気量を予測検討したケースとする。

二つの計算方法より得た 3 ケースの室内上下温度分布または平均室温の計算結果の比較を図 2-11~13 に示す。これらにより、以下のことが分かった。

(1)室内の熱負荷バランス計算と自然換気解析の繰返し計算法と比べて、開発した CFD 連成解析法はより精確にシステムの自然換気量を予測することができる。

(2)室内の熱負荷バランス計算と自然換気解析の繰返し計算により得られる室内代表温度は、室内上下温度分布を考慮した CFD 連成解析法の居住域空気温度より高くなる。

表 2-11 比較検討ケース

CASE	外気温 [°C]	室外主風向・風速 [m/s]
CASE-1(冬期、設計外気温かつ無風時)	-1.2	
CASE-2(夏期、設計外気温かつ無風時)	34.9	
CASE-3(中間期、設計外気温かつ無風時)	27.8	

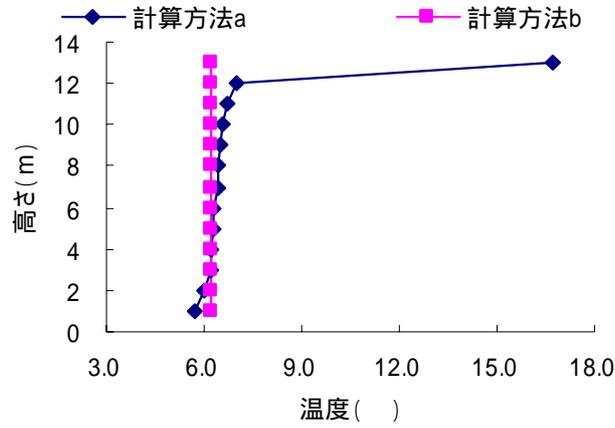


図 2-11 冬期の室内上下温度分布比較

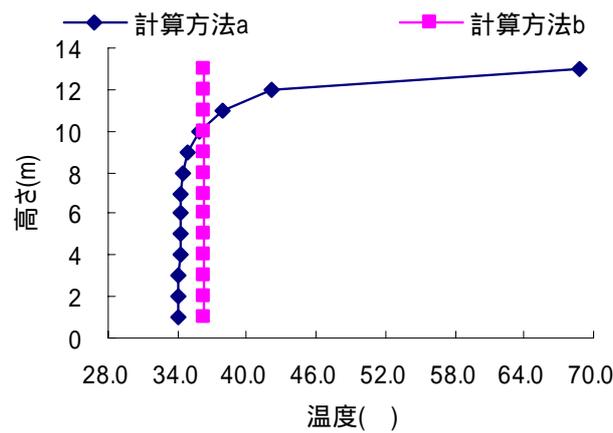


図 2-12 夏期の室内上下温度分布比較

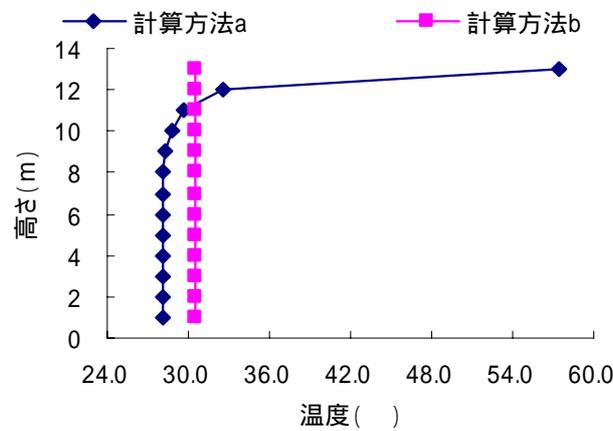


図 2-13 中間期の室内上下温度分布の比較

2.5 まとめ

アースチューブ併用自然換気システムの企画段階の性能検証を行うためには、シミュレーションにより自然換気量と室内温熱環境を予測検証する必要がある。自然換気量は室内外温度差に影響され、また室温も換気量に影響されるために、室内の熱バランス計算を行わない従来の自然換気方法は適用できない。また、体育館など室内の上下温度分布が明らかに存在する場合に、これが浮力換気の駆動力に及ぼす影響を換気解析に導入しなければならない。更に、アースチューブ内表面の摩擦抵抗が自然換気駆動力に及ぼす影響、アースチューブの加熱/冷却が室内温熱環境に及ぼす影響も考慮する必要がある。本章では、アースチューブの土壌・空気熱交換計算、チューブ内の摩擦抵抗、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析及びCFDによる室内上下温度分布計算の三つの解析を連成解析する方法を提案し、上述の自然換気解析ツールを開発した。このCFD連成解析法による計算値と実測値を比較することで、開発したCFD連成解析法の再現性を検証した。以下に本章の概要をまとめる。

(1)アースチューブの土壌・空気熱交換計算、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析及びCFDによる室内上下温度分布計算など三つの解析ツールの連成解析法を提案し、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析ツールを開発した。

(2)ある実アースチューブ併用自然換気システムを対象として、システムの特徴点の実測値とシミュレーション結果の比較により、作成した自然換気解析モデル及びCFD解析モデルは高い予測精度を持つことを示した。

(3)本解析法と室内の熱負荷バランス計算と自然換気解析の繰返し計算法と比べて、開発したCFD連成解析法はより精確にシステムの自然換気量を予測することができる。また、室内の熱負荷バランス計算と自然換気解析の繰返し計算により得られる室内代表温度は、室内上下温度分布を考慮したCFD連成解析法の居住域空気温度より高くなる。

記号

V_o : 開口高さ h [m] の風速 [m/s]

V_{ob} : 気象台観測高さ h_{ob} [m] の風速 [m/s]

k : 立地条件の補正值 (0.9 ~ 1.2)、ここに、1.0 とする。

ΔP_{m1} : 外気導入経路の直管部摩擦抵抗 [Pa]

ΔP_{m2} : 外気導入経路の局部摩擦抵抗 [Pa]

ΔP_m : 外気導入経路の摩擦抵抗 [Pa]

 : 外気導入経路の直管部摩擦抵抗係数 [-]

l : 外気導入経路の直管部の長さ [m]

d : 外気導入経路の各部の相当直径 [m]

V : 外気導入経路の各部の平均風速 [m/s]

γ_m : 外気導入経路内空気の平均密度 [kg /m³]

ε : 外気導入経路の各部の絶対粗さ [m]

Re : レイノルズ数 [-]

ξ : 局部抵抗係数 [-]

C : 定数 [-]。円形管の場合 64、直角二等辺三角形管の場合 52、正三角形管の場合 53、正方形管の場合 57、断面縦横比が 3.5 の長方形管の場合 71、内外径比が 1 に近い同心環状流路の場合 96 である。

$G_1 \sim G_4$: 開口 1 ~ 4 の通過風量 [kg/s]

$c_1 \sim c_4$: 開口 1 ~ 4 の風量係数 [-]

 : 開口 1 と開口 2 の直列合成後の風量係数 [-]

$A_1 \sim A_4$: 開口 1 ~ 4 の開口部断面積 [m²]

A : 開口 1、2 の直列合成後の断面積 [m²]

γ_o : 外気の密度 [kg /m³]

γ_{1} : アースチューブ出口空気の密度 [kg /m³]

$\gamma_{2下}$: 室 2 の居住域の空気の密度 [kg /m³]

$\gamma_{2上}$: ΔP_1 が正圧のとき、 $\gamma_{2上} = \gamma_2$; ΔP_1 が負圧のとき、 $\gamma_{2上} = \gamma_o$ [kg /m³]

$\gamma_{2上カ}$: ΔP_3 が正圧のとき、 $\gamma_{2上カ} = \gamma_{2上}$; ΔP_3 が負圧のとき、 $\gamma_{2上カ} = \gamma_o$ [kg /m³]

H : 室 2 の床面から開口 3、4 までの高度差 [m]

H_1 : 給気塔入口から室 2 床面までの高度差 [m]

ρ_{ih} : 室 2 の床上高さ h における微小空気層の密度 [kg /m³]

$\Delta P_1 \sim \Delta P_4$: 開口 1 ~ 4 の内外空気圧力差 [Pa]

x_2 : 室 2 の床面圧力 (未知数) [Pa]

$P_1 \sim P_4$: 開口 1 ~ 4 の外風圧 [Pa]

$C_1 \sim C_4$: 開口 1 ~ 4 の風圧係数 [-]

$v_1 \sim v_4$: 開口 1 ~ 4 の入力風速 [m/s]

θ_o : 外気温度 []

θ_s : 各期間の空調温度設定値 (夏期 : 30 、冬季 : 20 、中間期 : 25) []

$\theta_{2下}$: 室 2 の居住域空気温度 []

T_0 : 外気の絶対温度 ($T_0 = \theta_0 + 273$) [K]

T_1 : 室 1 の開口 2 付近空気の絶対温度 ($T_1 = \theta_1 + 273$) [K]

g : 重力加速度 (= 9.807) [m/s^2]

Q : 仮想空調機負荷 [kW]

c_p : 居住域の空気の定圧比熱 [$J/(kg \cdot K)$]

G : 仮想空調機の給気量 { = 床上 2m までの居住域の体積 \times 換気回数 (=1) } [m^3/h]

$G_{5,6,7}$: 隙間 5,6,7 の隙間風量 [m^3/h]

a : 経験係数。 $a = 10$

L : 隙間の長さ [m]

$\Delta P_{5,6,7}$: 隙間両側の圧力差 [Pa]

n : 経験係数(一般に 1~2 の値となるが、今回は 1.5 とした。)

本章に関する既発表論文

査読付論文

- [1] Song Pan, Hanunori Yoshida, Mingjie Zheng: Coupled Analytical Tool of Ventilation Calculation and CFD in Annexation System of Cool/Heat Tube and Natural Ventilation, Building Simulation 2007, pp.1983-1990, Beijing, Sep.3-5, 2007

口頭発表論文

- [2] 鄭明傑, 潘嵩, 吉田治典: アースチューブ併用自然換気システムの性能検証 (第1報) CFD 連成解析による自然換気解析方法, 空気調和・衛生工学会平成19年度学術講演論文集, 仙台, pp.1909-1912, 2007.9

参考文献

- [1] 石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店, 1969.3
- [2] Anne Haas, Andreas Weber, Viktor Dorer, Werner Keilholz, Roger Pelletret: COMIS v3.1 simulation environment for Multizone Air Flow and Pollutant Transport Modelling, Energy and Buildings 34(2002) pp873-882
- [3] 内海康雄: 換気 - 通風・気密性, 空気調和・衛生工学, 第71巻, 第1-6号, 2005
- [4] Hensen J L M: Modelling Coupled Heat and Airflow; Ping Pong Versus, Proceedings of 16th AIVC Conferece, 1995,(1)pp253 ~ 262
- [5] Joe Huang, Fred Winkelman and Fred Buhl: Linking the COMIS Multi-Zone Airflow Model with the EnergyPlus Building Energy Simulation Program, Proceeding of Building Simulation'99, 1999
- [6] 江 億: 建築環境系統模擬分析方法 - DeST 第12章 建築通風系統的模擬分析, 中国建築工業出版社, 北京, 中国, 2006.1
- [7] 奥山博康: 熱・換気回路網計算プログラム NETS, 日本建築学会・熱環境小委員会・伝熱WG シンポジウム資料, 1998
- [8] Yuguo Li: Integrating Thermal Stratification in Natural and Hybrid Ventilation Analysis, IEA ECBCS Annex35 Technical Report,2002
- [9] Y.Ji, M.J.Cook, V.Hanby: CFD Modelling of Natural Displacement Ventilation in an Enclosure Connected to an atrium, Building and Environment 42(2007), pp1158-1172
- [10] 戸河里敏, 荒井良延, 三浦克弘: 大空間の空調・熱環境計画手法の研究(その1) 大空間の上下温度分布予測モデル, 日本建築学会計画系論文報告集, 第427号, pp.9~19, 1991年9月;(その2) 大空間の上下温度分布予測のための非定常計算モデル, 日本建築学会計画系論文報告集, 第435号, pp.11~21, 1992年5月
- [11] Beausoleil-Morrison I, Clarke J A, Denev J, and Macdonald I A, Melikov A, Stankov P: Further Developments in the Conflation of CFD and Building Simulation, Proceeding of Building Simulation'2001
- [12] 尹奎英: 複数管型アースチューブに関する研究~近接配管を有する複数管型チューブの設計方法~, 博士論文, 2006.2

第3章 企画フェーズの計画段階における シミュレーションによる性能予測

第2章では、アースチューブの土壌・空気熱交換計算、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析及びCFDによる室内上下温度分布計算の連成解析方法を提案し、室内上下温度分布を考慮した自然換気解析ツールを開発した。ある実アースチューブ併用自然換気システムを対象として対象システムの特徴点の実測値とシミュレーション結果の比較により、本方法が高い計算精度を持つことを示した。本章では、この解析法を某実アースチューブ併用自然換気システムの企画フェーズの性能検証に適用し、いくつかの知見が得られた。

3.1 対象システムの企画フェーズの性能検証項目

対象建物の概要、アースチューブ併用自然/強制換気システムの概要と見取り図はそれぞれ第2章の表2-1、表2-2、図2-2(a)、(b)に示した。

企画フェーズの計画段階の性能検証を実施する際に、以下に示すプロセスを実施する必要があると考える。

第一に、オーナーに要求されたシステムの機能/性能を検証するための性能検証項目を明確にする。

第二に、各性能検証項目に応じるシミュレーション方法を選ぶ。

第三に、適宜なシミュレーションツールを選定しその適用方法を確認する。

第四に、選んだ性能検証項目及びシミュレーション方法により計画段階の性能検証計画書を作成してオーナーに提出する。

第五に、計画段階の性能検証計画書に従ってシミュレーションによる性能検証作業を行い、その結果より計画段階の性能検証報告書及びシステム運用マニュアルを作成し、それぞれオーナー及びシステム運転制御管理者に提出する。

計画段階のコミショニングの目的は、企画設計されたシステムの機能/性能がオーナーの要求に満足できるかどうかを検証することであり、オーナーの要求に応じた性能検証項目の設定が重要である。本研究の対象システムに対して、オーナーは以下に示す機能/性能を期待した。

- (1)冬期、夏期、中間期の設計外気温かつ無風状態においても、自然換気量(または換気回数)の下限値を確保すると共に室内の温熱環境の改善も期待する。
- (2)アースチューブの導入により屋内体育館の居住域温熱環境への改善効果を検証する。
- (3)対象建物が屋内体育館なので、室外に風があっても室内における競技に利用される空間の風速がバドミントン等の特殊な競技種目に影響しないことを確保する。
- (4)屋内体育館の自然換気システムにアースチューブ併用の自然換気システムを導入し、取入れ外気がアースチューブにより予熱・予冷されることによる省エネルギー効果を期待する。

計画段階において、上述したオーナーの要求に対して、企画設計者が第2章の表2-1、表2-2、図2-2(a)～(b)に示されるようなアースチューブ併用自然換気システムの企画設計案を提案した。これがオーナーのシステム機能/性能への要求に満足できるか否かを検証するために、以下に示す性能検証項目を考案した。

(1)各種外気条件における自然換気量の検証

対象建物は公立小学校の体育館であり、空調設備を設置せず、自然換気システムが年間を通して利用される。富山の気象台データにより、対象建物所在地の冬期、夏期、中間期の最高(低)外気温度、主風向を確認し、各季節の設計外気温で無風時、並びに、夏期設計外気温で有風時(風速と風向は、対象建物所在地の夏期の平均室外風速・主風向とする)時の自然換気量が、必要換気量を満足するか否かをシミュレーションにより確認する。

(2)アースチューブの有無の比較

室外アースチューブや1F床下ピットなどの外気導入経路に摩擦抵抗が存在するため、アースチューブの無い場合よりも自然換気量が低減し、室内温熱環境の改善効果及び省エネルギー効果が得られない恐れがある。そのため、まず前期の4種の外気条件を用いてアースチューブが無いときのシミュレーションを行い、その計算結果をアースチューブが有るときの計算結果と比較することで、アースチューブ導入のメリット、デメリットを明らかにする。

(3)室内における競技利用空間各所の風速の検証

室外風速が大きくなるほど自然換気量が大きくなると考えられる。室外風速が対象システムの自然換気量及び室内における競技利用空間の各所風速に及ぼす影響を把握するために、夏期の設計外気温の条件下、南換気窓の正面に風がある場合(風速を対象建物所在地の夏季の平均風速(=2.5m/s)とする)のシミュレーションを行い、室内風速分布の計算結果により、室内における競技利用空間の風速が許容風速(<0.5m/s)以内であることを検証する。

(4)アースチューブの導入による室内温熱環境及び省エネルギー効果の検証

アースチューブの導入の省エネルギー効果を検証するために、上記の8ケースのシミュレーションより得た各ケースの居住域の空気温度および床面開口からの自然換気量の計算結果を用いて、式(3-1)より各ケースの仮想空調負荷(床上2mまでの居住域の空気温度を仮想空調

設定温度に維持するために必要な空調熱量)を比較/評価する。

$$Q = c_p \times \gamma_{2下} \times (\theta_{2下} - \theta_s) \times G / 3.6 \quad (3-1)$$

ここに、

Q : 仮想空調機負荷 [kW]

c_p : 居住域の空気の定圧比熱 [J/(kg · K)]

$\gamma_{2下}$: 室2の居住域の空気の密度 [kg /m³]

$\theta_{2下}$: 室2の居住域空気温度 []

θ_s : 各期間の空調温度設定値(夏期:30、冬季:20、中間期:25) []

G : 仮想空調機の給気量 { = 床上2mまでの居住域の体積 × 換気回数(=1) } [m³/h]

3.2 シミュレーションによる対象システムの企画フェーズにおける性能検証

企画フェーズの計画段階において、対象建物/自然換気システムがまだ建設されず実測により性能検証ができないため、シミュレーションにより企画設計案のシステム性能を予測し、性能検証を行なわねばならない。そのため、システムの性能を予測できる精度の良いシミュレーションツールの利用または開発が必要である。本章では、第2章にて再現性を検証したCFD連成解析ツールを計画段階の性能検証作業の支援ツールとして利用した。

3.2.1 自然換気解析の計算条件

対象システムの自然換気計算モデルは図3-1に示す。

表3-1、表3-2にそれぞれ各ケースの外気条件、床面開口吹出温度の設定値及び自然換気解析の共通計算条件を示す。表3-3にアースチューブ併用自然換気システムの概要を示す。

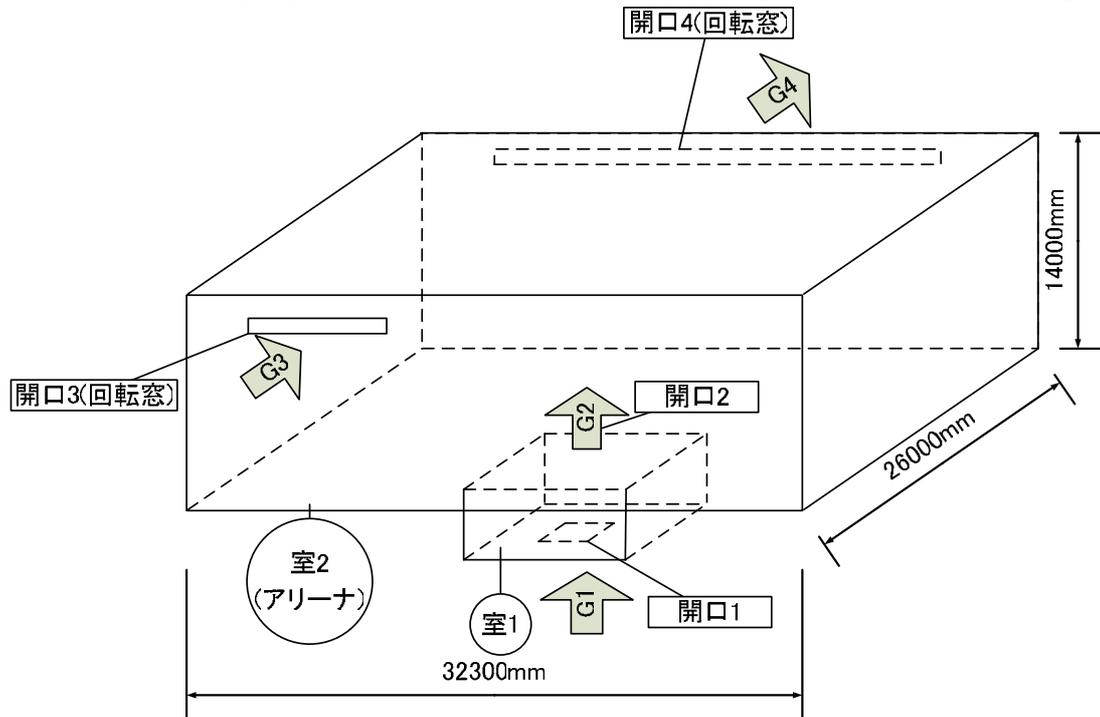


図3-1 企画段階の対象システムの自然換気計算モデル

表 3-1 各ケースの外気条件及び床面開口吹出温度の設定値

	季節	チューブの有無	外気温度 [°C]	外気風速 [m/s]	床面開口吹出温度 [°C]
CASE-1	夏(8月)	有	34.9	2.5	30.9
CASE-2	夏(8月)	有	34.9	0	30.9
CASE-3	冬(1月)	有	-1.2	0	0.8
CASE-4	中間期(4月)	有	27.8	0	26.8
CASE-5	夏(8月)	無	34.9	2.5	30.9
CASE-6	夏(8月)	無	34.9	0	30.9
CASE-7	冬(1月)	無	-1.2	0	0.8
CASE-8	中間期(4月)	無	27.8	0	26.8

表 3-2 各ケースの自然換気解析の共通計算条件

	床面開口	南換気窓	北換気窓
高さ [m]	-1.5	13.55	13.55
CASE-1 の入力風速 [m/s]	1.18	2.71	2.71
面積 A [m ²]	2.25	6.48	15.12
風圧係数	0.5	0.8	-0.55
開口形状	防虫網	回転窓 80°	回転窓 80°
流量係数 α	0.33	0.5	0.5
$\alpha \cdot A$	0.73	3.24	7.56

表 3-3 アースチューブ併用自然換気システムの概要

南・北換気窓高さ [m] , 回転角度	12.2 , 45 °
南・北換気窓面積 [m ²]	6.76 , 12.79
床面開口の総有効面積 [m ²]	1.43
アースチューブ+1F床下ピットの総長さ [m]	130.0
アースチューブ, 1F床下ピットの断面積 [m ²]	2.25 , 14.4
建物内部北縦シャフトの断面積 [m ²], 高さ [m]	1.47 , 4.0
屋外の南立てシャフトの断面積 [m ²], 高さ [m]	1.84 , 4.0
屋外給気塔の高さ [m], 開口面積 [m ²]	4.0 , 2.25
1F床下ピット連通孔の断面積 [m ²]	0.28 × 3

3.2.2 CFD 解析モデルおよび計算条件

計画段階の性能検証は、システムが設計温度で無風状態の性能を予測/評価することによって行うため、シミュレーションは、負荷の変動に伴う動的計算ではなく、静的計算となる。

対象建物の各自然換気開口の CFD 解析モデルを表 3-4 に示す。各ケースの室外気温は、対象建物所在地の空調設計用外気条件²⁾を参考して、それぞれ 34.9、-1.2、27.8 と設定した。また、アースチューブの出口空気温度は、既往の研究成果²⁾を参考して、アースチューブの出入り口空気温度差を夏期 4、冬期-2、中間期 1 と設定した。内部発熱量及び壁面負荷の計算条件を表 3-5、表 3-6 に示す。また、対象室の常閉窓は北壁面にあるため、日射の影響が小さいため、これを無視した。CFD 解析には、比較的粗い分割で解が得られる⁷⁾標準 k-ε モデルに基づく三次元数値流体解析プログラムを用いた。なお、CFD 解析の収束性に

関わる主な解析条件については、Mesh 数 = 57(x)×30(y)×20(z)(ほぼ等間隔)、連立 1 次方程式の収束判定定数を 0.01 とし、圧力修正量の収束判定条件を 1.0E-4 とした。

表 3-4 対象室の各自然換気開口の概要

	面積 [mm]	個数	高さ[mm]	α
床面開口(南)	4,400×105	4	0	0.33
床面開口(北)	23,000×105	1	0	0.33
上部開口(南)	3,600×450	2	13,100	0.5
上部開口(北)	3,600×450	1	13,100	0.5
	2,400×450	4	13,100	0.5
CASE-1 外表面風圧 [Pa]		0.4	3.36	-2.31

表 3-5 内部発熱量及び発熱体の設定高さ

項 目	人体	照明
発熱量 [W]	3,160(40 人)	8,398
発熱体の高さ [m]	0.5 ~ 1.0	13.5 ~ 14.0

表 3-6 各壁面の熱貫流量の計算条件

	外壁	内壁	窓	床	屋根
熱貫流率 [$W/m^2 \cdot K$]	0.13	3.8	1.7	3.0	0.4
外表面温度[] 夏期	34.9	31.5	34.9	31.5	45.0
冬期	-1.2	9.4	-1.2	9.4	-1.2
中間期	27.8	27.8	27.8	27.8	35.0

3.2.3 シミュレーション結果と考察

アースチューブ有りの 4 ケース(CASE-1 ~ 4)の自然換気量の計算結果を表 3-7 ~ 表 3-10 に示す。アースチューブの有無のシステム性能の比較を表 3-11 に、室内上下温度分布の計算結果を図 3-1 ~ 図 3-4 に示す。図 3-5 ~ 図 3-8 に、各ケースの中央断面の風速分布を示す。

また、クールチューブの導入の省エネルギー効果を考察するために、各季節の空調設定温度(夏期: 30、冬期: 20、中間期: 25)を想定し、床上 2m までの居住域の空気温度をこれらの設定温度に維持するために必要な空調機熱量を仮想空調機負荷と定義し、式(3-1)により計算する。表 3-11 の中で、各ケースの仮想空調機負荷も示した。

以上の計算結果により下記のことになった。

(1)各自然換気開口の自然換気量

1)外気導入経路の摩擦抵抗は、屋外給気口と 2F 天井換気窓の間の圧力差の 55%以下であり、アースチューブ無しの場合より自然換気量が低減されるものの、必要な自然換気量が得られる。

2)体育館の換気窓の正面に風がある場合(CASE-1)には、自然換気は、主に風力に依存し、室上部の南側換気窓からの風力換気、及び床面開口から空気の流入と、室上部の北換気窓よ

りの流出に依存する。見掛け上の換気量は、 $35,933\text{m}^3/\text{h}$ となっているが、CFDの室内流速分布の計算結果(図3-5)を見ると、流入空気の多くは天井に付着しながら流出しており、つまり居住域の自然換気への貢献は少ないことがわかる。

3) 室外が無風の場合には、自然換気は、床面開口のみから流入し、室上部の南北換気窓より流出する。自然換気の駆動力は浮力のみとなり、自然換気量は室内上下温度差及び室内外温度差によって異なる。無風の場合でも、夏期、冬期、中間期の自然換気量は、それぞれ $1,846$ 、 $5,187$ 、 $1,077\text{m}^3/\text{h}$ となり、在室者数に必要な換気量($40\text{人}\times 25\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{人} = 1,000\text{m}^3/\text{h}$)以上の換気量が得られ、換気回数は $0.09\sim 0.44$ 回/h となる。ただし、在室者数が 600 人の場合に必要な自然換気量は満足できない。そのため、対象自然換気システムに強制換気ファンを追加することをオーナーに提案した。

(2) アースチューブ有無の比較

1) 体育館の換気窓の正面に風があるときには、床面開口からの自然換気量はアースチューブ無しの場合の 60% しかないが、総自然換気量に占める割合が少なく室内温熱環境にあまり影響しないため、両者の室内上下温度分布の差異は僅かである。

2) 室外が無風のときには、アースチューブの有無が夏期(CASE-2)と冬期(CASE-3)の室内上下温度分布に大きな影響を与えるが、中間期の室内上下温度分布にほぼ影響を与えない。これは、夏期、冬期の場合には外気温度とアースチューブの温度差が大きく、アースチューブの有無が床面開口の吹出温度に及ぼす影響が大きく、従って自然換気量にも大きな影響を与えるからである。これに対して、中間期の場合には、床面開口の吹出温度が外気温より 1 しか低下しないため、自然換気量及び室内上下温度分布に及ぼす影響は共に少ない。

3) アースチューブの導入により、各ケースの居住域の温熱環境がそれぞれ 0.8 、 2.0 、 1.8 、 0.2 と改善される。

(3) 室内における競技利用空間各所の風速

図3-5～図3-8により、各CASEの室内風速分布は、共にほぼ 0.2m/s 以下であり、卓球などの風速制限のある室内競技項目にほぼ影響を及ぼさないことを確認できる。

(4) アースチューブの導入による室内温熱改善効果と省エネルギー効果の検証

1) 夏期に体育館の換気窓の正面に風があるときには、床面開口からの自然換気量が総自然換気量の約 8% しかなく、室内の温熱環境にはほぼ影響を与えない。そのため、床上 1.5m の居住域の温度は 33.5 となっており、外気温の 34.9 より僅か 1.4 しか低くない。

2) アースチューブの導入により、居住域の仮想空調機負荷が $7\sim 36\%$ 削減される。

表 3-7 CASE-1 夏期に南風有りの場合の自然換気解析結果

換気回路圧力差[Pa]	2.24	摩擦抵抗 ΔP_m [Pa]	0.67
	床面開口	南換気窓	北換気窓
内外圧力差 ΔP [Pa]	-1.24	-4.67	1.0
風量 [m ³ /h]	2,641	33,292	35,933
開口 2 風速 [m/s]	0.17		
流入流出	流入	流入	流出
空気温度 []	33.5	35.4	35.4

表 3-8 CASE-2 夏期に無風の場合の自然換気解析結果

換気回路圧力差[Pa]	0.61	摩擦抵抗 ΔP_m [Pa]	0.33
	床面開口	南換気窓	北換気窓
内外圧力差 ΔP [Pa]	-0.61	0.0011	0.0011
風量 [m ³ /h]	1,846	554	1,292
開口 2 風速 [m/s]	0.12		
流入流出	流入	流出	流出
空気温度 []	31.6	46.4	46.4

表 3-9 CASE-3 冬期に無風の場合の自然換気解析結果

換気回路圧力差[Pa]	5.42	摩擦抵抗 ΔP_m [Pa]	2.89
	床面開口	南換気窓	北換気窓
内外圧力差 ΔP [Pa]	-5.41	0.01	0.01
風量 [m ³ /h]	5,187	1,556	3,631
開口 2 風速 [m/s]	0.34		
流入流出	流入	流出	流出
空気温度 []	6.7	11.3	11.3

表 3-10 CASE-4 中間期に無風の場合の自然換気解析結果

換気回路圧力差[Pa]	0.22	摩擦抵抗 ΔP_m [Pa]	0.12
	床面開口	南換気窓	北換気窓
内外圧力差 ΔP [Pa]	-0.22	0.0004	0.0004
風量 [m ³ /h]	1,077	323	754
開口 2 風速 [m/s]	0.07		
流入流出	流入	流出	流出
空気温度 []	27.7	35.6	35.6

表 3-11 アースチューブの有無のシステム性能の比較

自然換気量[m ³ /h]	CASE-1	2,641	1,846	5,187	1,077
	CASE-5	4,377	4,140	6,749	1,666
居住域温度[]	CASE-2	33.5	31.6	6.7	27.7
	CASE-6	34.3	33.6	4.9	27.9
上部空間温度[]	CASE-3	35.4	46.4	11.3	35.6
	CASE-7	35.5	44.1	8.8	35.6
仮想空調機負荷[kW]	CASE-4	3.025	1.980	-7.517	1.500
	CASE-8	3.465	3.080	-8.534	1.612
空調負荷削減率[%]		13	36	12	7

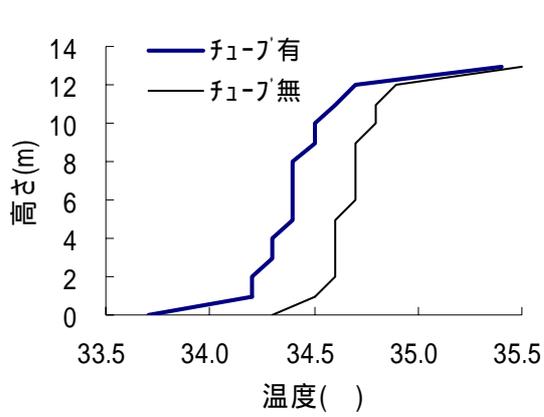


図 3-1 夏期風有時の上下温度分布

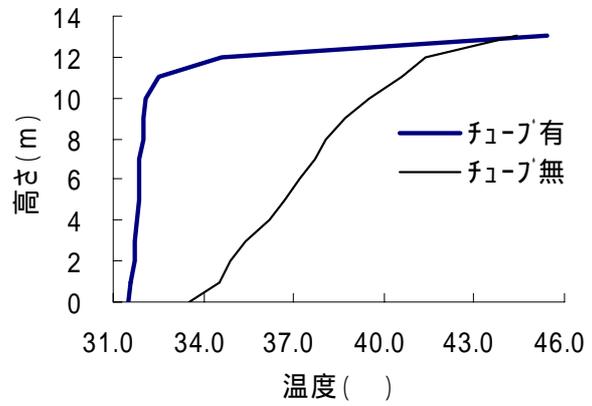


図 3-2 夏期無風時の上下温度分布

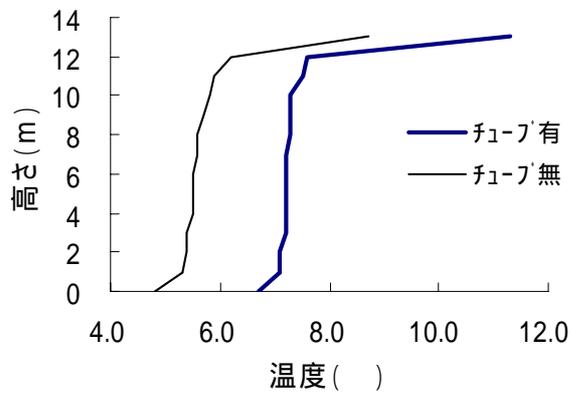


図 3-3 冬期無風時の上下温度分布

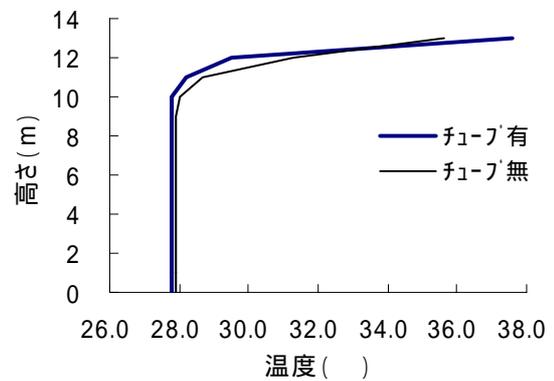


図 3-4 春期無風時の上下温度分布

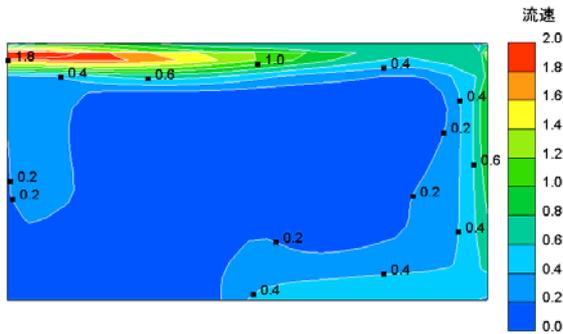


図 3-5(a) 夏期風有時の X=8m 断面風速コンター図

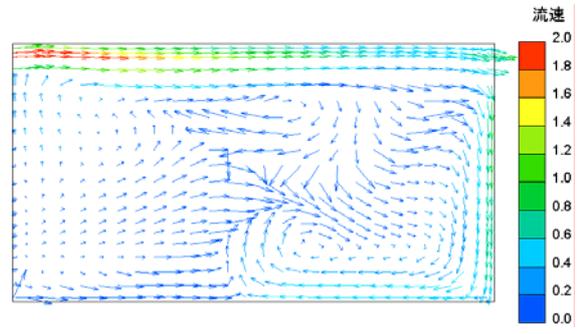


図 3-5(b) 夏期風有時の X=8m 断面風速ベクトル図

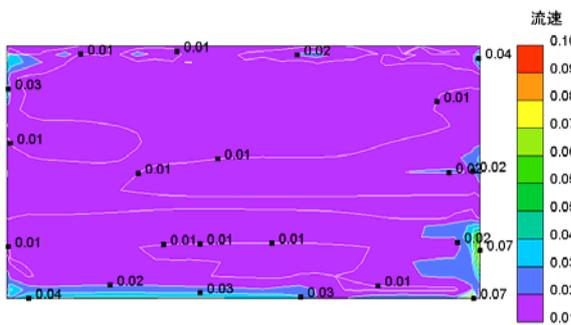


図 3-6(a) 夏期無風時の X=8m 断面風速コンター図

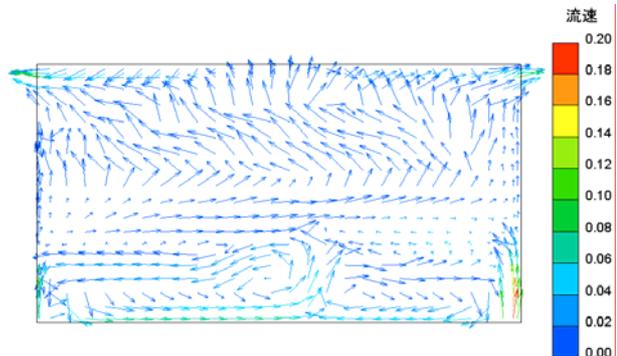


図 3-6(b) 夏期無風時の X=8m 断面風速ベクトル図

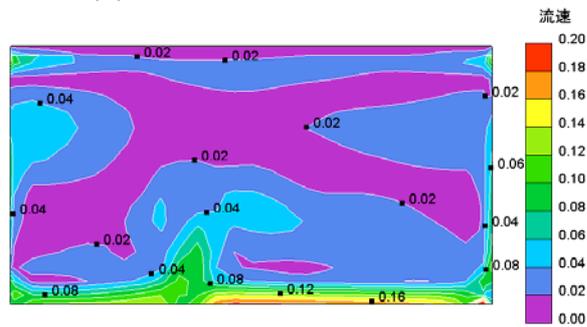


図 3-7(a) 冬期無風時の X=8m 断面風速コンター図

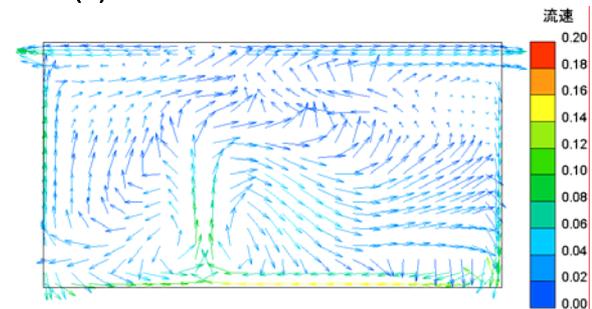


図 3-7(b) 冬期無風時の X=8m 断面風速ベクトル図

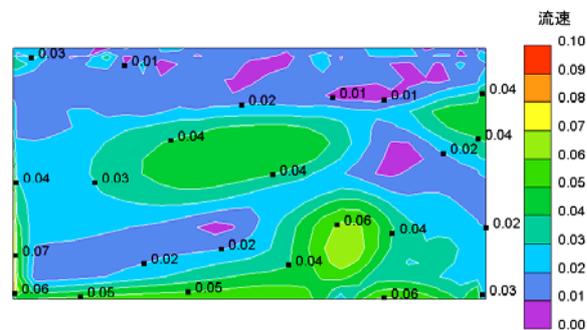


図 3-8(a) 春期無風時の X=8m 断面風速コンター図

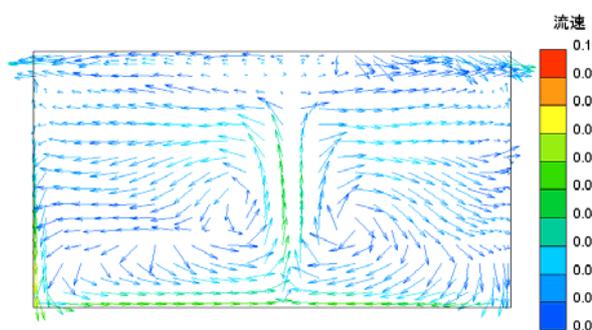


図 3-8(b) 春期無風時の X=8m 断面風速ベクトル図

3.3 まとめ

本章では、某実際のアースチューブ併用自然換気システムに対して、第2章で示したCFD連成解析方法を用いて、シミュレーションによる対象システムの計画段階の性能検証を行い、得られた下記の知見を計画段階の性能検証報告書に纏めてオーナーに提出した。

(1)外気導入経路の摩擦抵抗は、屋外給気口と2F天井換気窓の間の圧力差の55%以下であり、アースチューブ無しの場合より自然換気量が低減されるものの、必要な自然換気量が得られる。アースチューブの導入により得られる冬期、夏期、中間期の設計外気温かつ無風の場合でも対象システムの自然換気量が在室者数が40人の場合に必要な自然換気量に満足する。ただし、在室者数が600人の場合に必要な自然換気量を満足できない。そのため、対象自然換気システムに強制換気ファンを追加することをオーナーに提案した。

(2)体育館の換気窓の正面に風が吹くときには、アースチューブ有りの場合の床面開口からの自然換気量は無しの場合の60%で、室内上下温度分布の差異は僅かである。室外が無風のときには、アースチューブの有無が夏期と冬期の室内上下温度分布に大きな影響を与えるが、中間期には余り影響を与えない。チューブの導入により浮力換気の駆動力は外気との温度差の関係で、夏期には小さく、冬期には大きく、中間期には殆ど皆無であった。

(3)アースチューブの導入により、居住域の温熱環境が0.2~2.0 改善される。

(4)各ケースの室内風速はほぼ許容風速0.2m/sより小さく、卓球などの風速制限のある室内競技項目にもほぼ影響しない。

(5)アースチューブ内の摩擦抵抗のために得られる自然換気量が低減するが、アースチューブにより導入外気への予熱効果が得られるために、居住域の温熱環境の快適性は僅かであるが向上され、省エネルギーにも繋がる。

以上により、企画設計された対象アースチューブ併用自然換気システムの機能/性能はユーザーの要求を満足すると言える。ただし、以上の結論は計画段階に入手する限られた情報を用いたシミュレーション結果によるものであるため、建物が竣工する引き渡し段階において実測を行い、竣工時のシステム構成情報に基づいてシミュレーションモデルを再構築し、対象システムの特徴点の実測値またはシミュレーションの両方から引き渡し後段階のシステム検証が必要である。

本章に関する既発表論文

査読付論文

- [1] Song Pan, Hanunori Yoshida, Mingjie Zheng: Coupled Analytical Tool of Ventilation Calculation and CFD in Annexation System of Cool/Heat Tube and Natural Ventilation, Building Simulation 2007, pp.1983-1990, Beijing, Sep.3-5, 2007
- [2] Song Pan, Mingjie Zheng and Hanunori Yoshida: Commissioning of a Coupled Earth Tube and Natural Ventilation System at the Design Phase, The 7th International Conference of Enhanced Building Operation, San Francisco, USA, Nov.1-2, 2007

口頭発表論文

- [3] 潘嵩，鄭明傑，吉田治典：アースチューブ併用自然換気システムの性能検証（第2報）実システムの設計段階の性能検証，空気調和・衛生工学会平成19年度学術講演論文集，仙台，pp.1913-1916，2007.9

参考文献

- [1] 鄭明傑・潘嵩・吉田治典：アースチューブ併用自然換気システムの性能検証（第1報）CFD連成解析による自然換気解析方法，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 2007
- [2] 尹奎英：複数管型アースチューブに関する研究～近接配管を有する複数管型チューブの設計方法～，博士論文，2006.2
- [3] 富山市の気象データ：<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- [4] 石原正雄：建築換気設計，朝倉書店，1969.3
- [5] 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧第13版，2001
- [6] 内海康雄：換気・通風・気密性，空気調和・衛生工学，第71巻，第1-6号，2005
- [7] 加藤信介：数値流体力学CFDの室内環境への応用(1～7)，空気調和・衛生工学，第71巻，第6-11号，1997，第72巻，第1号，1998
- [8] Beausoleil-Morrison I, Clarke J A, Denev J, and Macdonald I A, Melikov A, Stankov P: Further Developments in the Conflation of CFD and Building Simulation, Proceeding of Building Simulation 2001
- [9] Mei Viung C: Heat transfer of buried pipe for heat pump, Journal of Solar Energy Engineering, 113, p51-p55, 1991
- [10] Benkert St, Heidt F D, Scholer D: Calculation tool for earth heat exchangers GAEA, <http://www.ibpsa.org/proceedings/bs97/papers/P008>
- [11] Mihalakakou: Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling application, Solar Energy, p163～p173, 55, 1994
- [12] 富山市の気象データ：<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>

第4章 運転フェーズの引渡し後段階における性能検証

第2章では、アースチューブの土壌・空気熱交換計算、室内上下温度分布を考慮する自然換気解析及びCFDによる室内上下温度分布計算などの三つのツールの連成解析法を提案し、室内上下温度分布を考慮する自然換気解析ツールを開発した。某実アースチューブ併用自然換気システムを対象としてシステムの特徴点の実測値とシミュレーション結果の比較により、本解析法が高い計算精度を持つことを示した。第3章では、この解析法をアースチューブ併用自然換気システムの計画段階の性能検証に利用し、対象システムの省エネルギー性能、室内温熱環境、自然換気量、室内空間の風速等をシミュレーションにより予測した。

本章では、竣工した同システムに対して、運転フェーズの引渡し段階における冬期と夏期の実測を行うことによりシステムの性能を確認する。また、実測によって明らかになった設計・施工の不具合に対する解決案の是正効果を予測検証するためには、開発したCFD連成解析法を利用している。更に、CFD連成解析法を用いて、設計外気温で無風状態のシステム性能の予測を行う。

対象建物の概要、アースチューブ併用自然/強制換気システムの概要と見取り図はそれぞれ第2章の表2-1、表2-2、図2-2(a)～(b)に示す。建物外観及び屋内運動場の内観を写真4-1、写真4-2に示す。



写真4-1 建物外観



写真4-2 屋内運動場内観

4.1 運転フェーズの引渡し後段階の性能検証項目

引渡し段階の性能検証の目的は、施工されたシステムの機能/性能がオーナーの要求を満足するかどうかを検証することであり、オーナーの要求に応じる性能検証項目の設定が重要

であった。そこで、以下に示す引渡し後段階の性能検証項目を設定した。

(1) 各種の外気条件での自然換気量の検証

対象システムの実測により、対象建物所在地の各季節の最高(低)外気温度条件で無風時の自然換気量が、在室者数がそれぞれ 40 人、600 人のときの必要換気量を満足するか否かを検証する。無風状態での実測値が得られない場合には、開発した CFD 連成解析ツールを用いたシミュレーションにより自然換気量及び室内温熱環境を同時に予測検証する。

(2) 自然換気有無による居住域温熱環境の比較検証

自然換気の有り無しの実測結果の比較により、自然換気の居住域温熱環境への改善効果を確認する。

(3) 室内における競技利用空間の各所風速の検証

CFD により室内風速分布を計算し、その計算結果により室内における競技利用空間の各所風速が許容風速(0.5m/s)以下であるか否かを検証する。

(4) アースチューブの省エネルギー効果の検証

外気温と床面開口の吹出温度の温度差及び床面開口からの自然換気量の測定値を用いて、対象システムの外気導入経路から獲得した顕熱冷熱量を計算し、その省エネルギー効果を検証する。

4.2 冬期と夏期の測定ケース・測定項目・測定位置・測定機器

性能検証の目的は、上記の(1)各開口の自然換気量、(2)居住域温熱環境、(3)室内風速分布、(4)自然換気時の省エネルギー性能を確認することであるため、表 4-1 に示す 3 種のシステム運用状態の測定を計画した。実測による性能検証を行う際に性能検証項目の設定や各性能検証項目に応じる計測ポイントの計画は重要である。一般の自然換気システムの性能検証には、室内上下温度分布や各開口の自然換気量を測定すれば十分であるが、アースチューブを併用する場合に、チューブから導入した外気の温度は、冬期には外気より高いため浮力換気の駆動力を増大させることに対して夏期には外気より低いので浮力換気の駆動力が低減されるため、アースチューブの入・出口の温湿度、床面開口の吹出風量も測定する必要がある。測定項目を表 4-2 に、各測定センサーの測定位置を図 4-1、図 4-2 に示す。また各測定センサーの設置位置を写真 4-3～写真 4-10 に示す。

表 4-1 測定ケース(冬期と夏期)

日期	ケース	運用状態	給・排気ファン	床面開口	照明	人員
2月4日～5日	CASE-1	自然換気	停止	開	有	無
2月3日 11:00～15:00	CASE-2	自然室温	停止	閉	有	無
8月11日 10:00～14:00	CASE-3	自然室温	停止	閉	有	無
8月14日 10:00～14:00	CASE-4	自然換気	停止	開	有	無
8月11日 14:30～17:00	CASE-5	強制換気 施工ミス	運転	開	有	無
8月13日 14:45～17:00	CASE-6	強制換気	運転	開	有	無

注 1: (1)測定中は窓やドアなどの開口部の開閉に注意する。

(2)測定期間に人の立入は制限する。

(3)照明は 700W×30 個全て点灯する。

注 2: CASE-2 は、おんどとりの遠隔読取設定不備の原因で 30 分毎にデータを読み取ることで実施した。

表 4-2 測定項目

測定項目	測定位置	計測機器	冬(夏)期測定点
上下温湿度分布	屋内運動場中央	無線小型温湿度計	3(8)点
床吹出口温湿度	3、10 番目床面開口	無線小型温湿度計	2(6)点
南・北換気窓開口部の空気温湿度	南・北換気窓開口部	無線小型温湿度計	2(2)点
床下ピット内空気温湿度	1F 床下ピットの入口と 南北縦シャフト出口	無線小型温湿度計	3(3)点
床下ピット内表面温度	1F 床下ピットの入口と 南北縦シャフト出口	無線小型表面温度計	3(3)点
屋外空気温湿度	屋外地上 1.5m	無線小型温湿度計	1(1)点
地中温度	屋外地下 1.98m	熱電対温度センサー	1(1)点
床表面温度	屋内運動場中央床面	無線小型表面温度計	1(1)点
床面開口吹出風速(冬期)	南側 3 番目床面開口	クリモマスター携帯型単点 風速計	1 点
床面開口吹出風速(夏期)	床面開口	アネモマスター多点風速計	12 点
南換気窓開口部風速	南換気窓開口部	アネモマスター多点風速計	4(4)点
北換気窓開口部風速	北中央換気窓開口部	アネモマスター多点風速計	2(4)点

注 1: 無線小型温湿度計・無線小型表面温度計、風速計はともに 1 分間隔で測定する。

注 2: 計画段階でのシミュレーションにより冬期の FL+11m 以下の温度分布はほぼ完全混合分布であることを確認したため、室内上下温度分布の測定点を 3 点とした。

注 3: 冬期における床面開口の吹出風速を測定する際に、各床面開口の吹出風速が異なることがわかった。そのため夏期の実測時に、床面開口風速の測定点を 12 点とした。

注 4: 冬期における床吹出温度の測定結果により、南・北床吹出口の温度が南北縦シャフトからの距離に影響されることがわかった。そのため夏期の測定では、床吹出温度の測定点を 6 点とした。

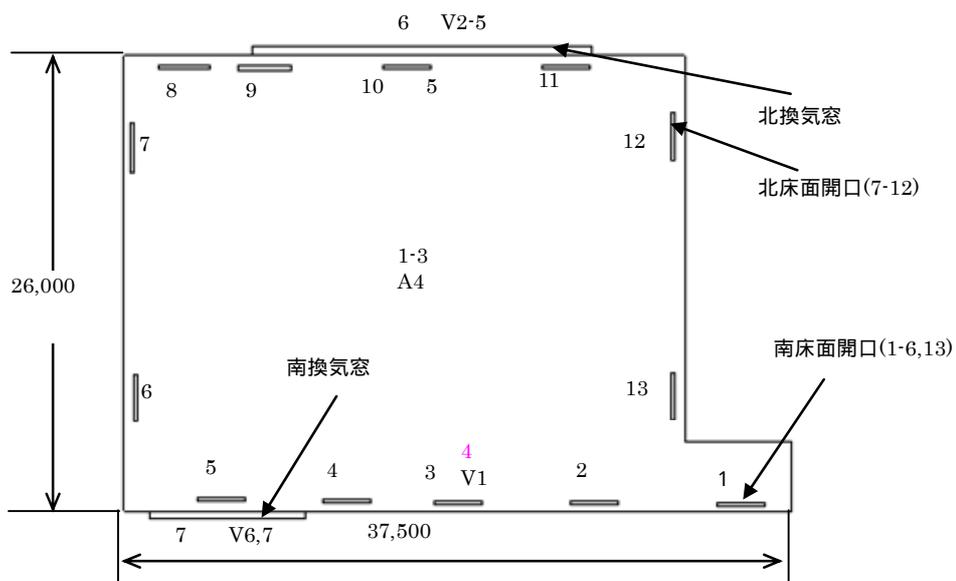


図 4-1(a) 測定位置(2階平面図) (冬期)

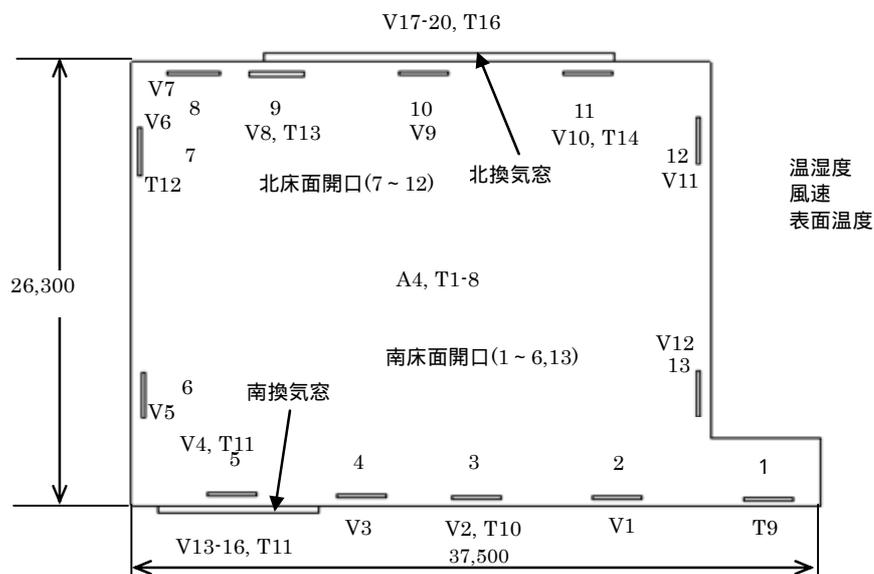


図 4-1(b) 測定位置(2階平面図) (夏期)

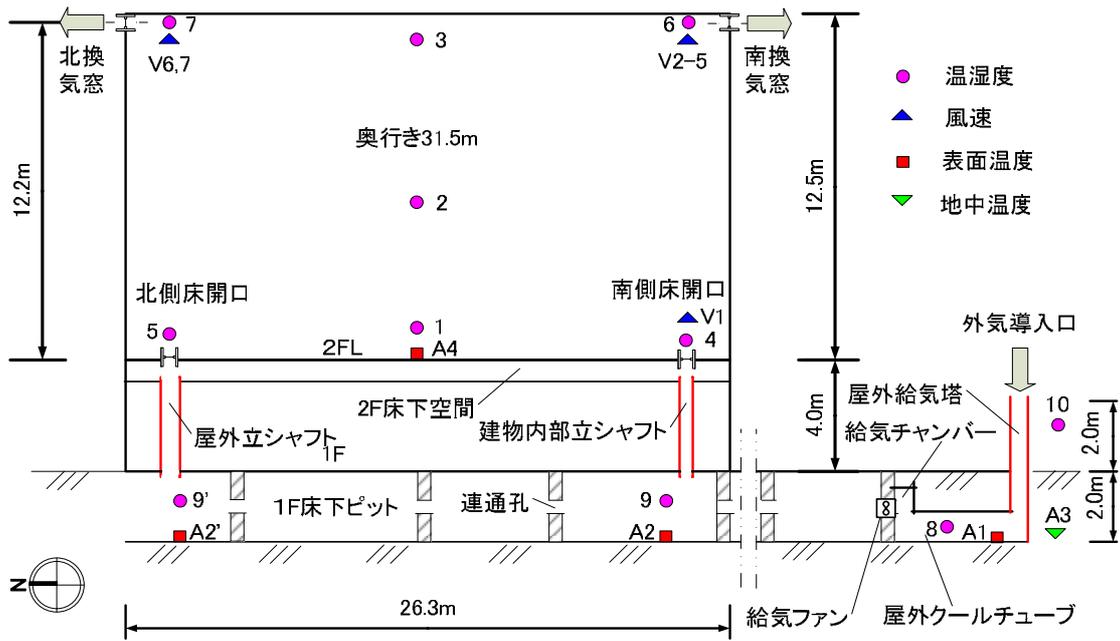


図 4-2(a) 測定位置(断面見取り図) (冬期)

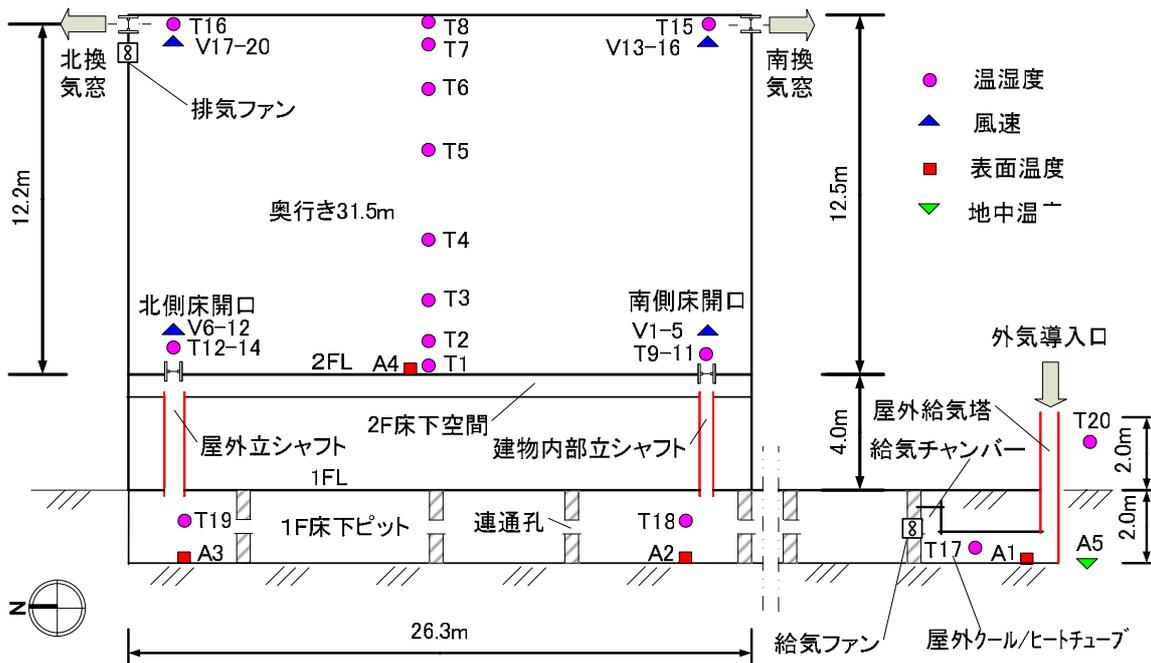


図 4-2(b) 測定位置(断面見取り図) (夏期)



写真 4-3 北換気窓風速・温度測定センサ配置図



写真 4-4 南換気窓風速・温度測定センサ配置図



写真 4-5 1F 床下ヒート出口空気温度センサ配置図

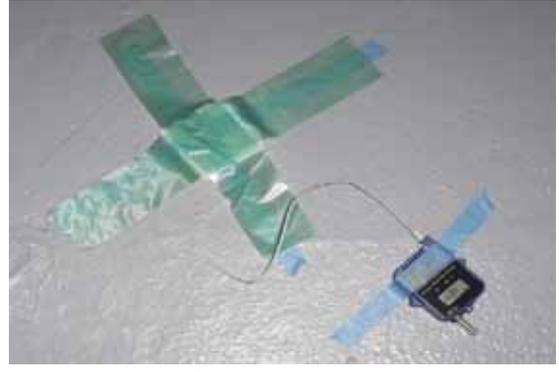


写真 4-6 1F 床下ヒート出口床面温度センサ配置図



写真 4-7 室内運動場床面温度センサ配置図



写真 4-8 屋外ファン内表面・空気温度センサ配置図



写真 4-9 上下温度分布センサ配置図



写真 4-10 床面開口温度センサ配置図

4.3 冬期実測による引渡し後段階の性能検証

4.3.1 測定期間の気象状態

1) 各日の室外温・湿度の測定値

各日の計測期間内の室外温・湿度の計測値をそれぞれ図 4-3～図 4-5 に示す。これらにより、2月3日と2月5日の室外温度の変動幅は、1 であり、両日の平均室外温度はそれぞれ 2.6 、1.9 であることがわかる。2月4日 14:00～17:30 の室外温度は、6 から 2.2 まで変化したが、16：30～17：30 の時間帯の室外温度は 3 ～2.2 となっている。また、3日間の室外相対湿度は共に 80%を超える高い水準である。

以上により、2月3日、2月4日の 16:30～17:30、2月5日の室外気温はほぼ 1.5～3.0 の範囲内で推移し、各測定ケースの室外温度条件はほぼ同じであると言える。

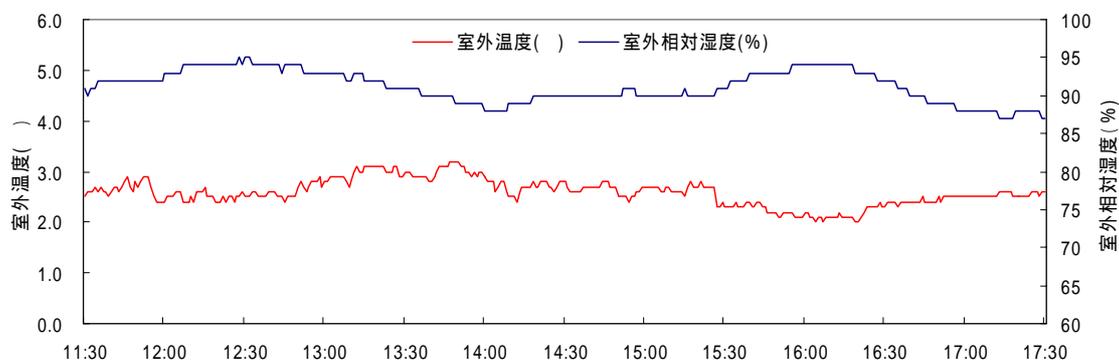


図 4-3 2月3日の室外温湿度

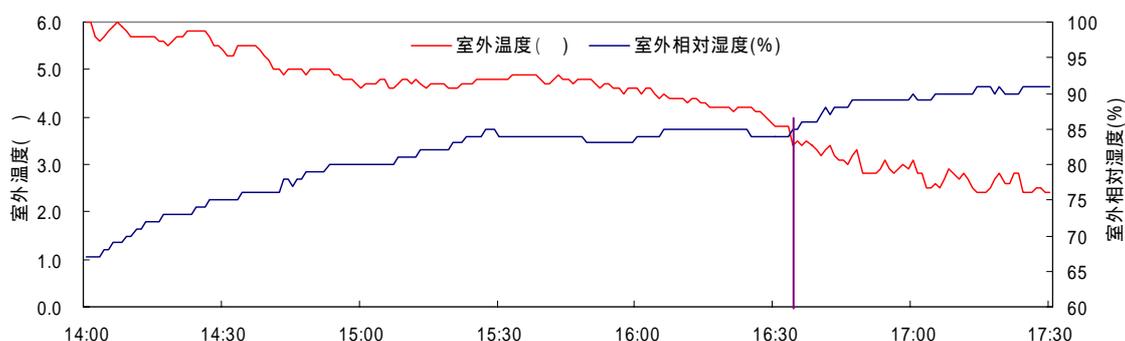


図 4-4 2月4日の室外温湿度

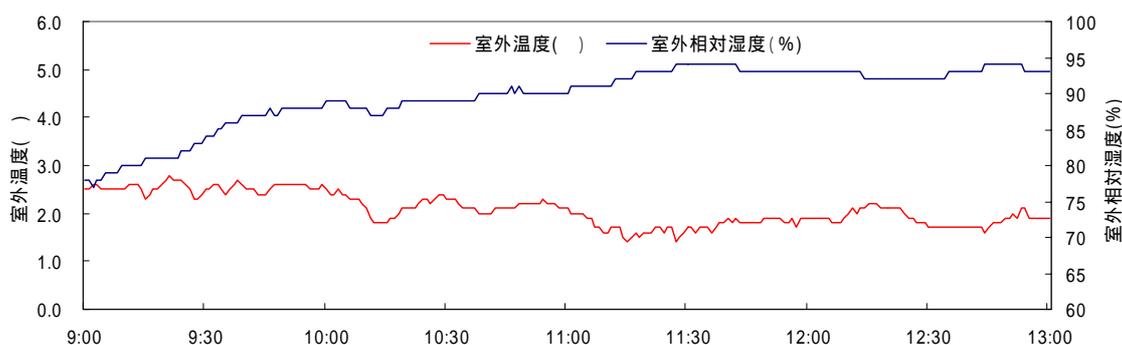


図 4-5 2月5日の室外温湿度

2) 各日の天候の气象台データ

各計測日の天候の時刻毎の气象台データを表 4-8 に示す。これにより、2月4日の午前を除いて各計測日の天候は大方雨や雪であることがわかる。そのため、2月4日 16:30 までのデータを除いて各日の室外温度は 1.5 ~ 3.0 の間に変化し、室外の相対湿度も非常に高い値で推移する。

表 4-8 各計測日の天候の气象台データ

時刻	2月3日 雨時々みぞれ一時雪	2月4日 曇一時晴後雨	2月5日 雪後みぞれ・あられを伴う
9:00	雨	晴れ	雪
10:00	雪	晴れ	曇り
11:00	雪	晴れ	雪
12:00	雪	晴れ	雪
13:00	雨	晴れ	雪
14:00	曇り	雨	曇り
15:00	雨	雨	曇り
16:00	雨	雨	曇り
17:00	曇り	雨	曇り
18:00	曇り	曇り	曇り

3) 各日の室外風速・風向の气象台データ

各日の室外風速・風向の气象台データをそれぞれ図 4-6、図 4-8、図 4-10 に、各日の室外風配図をそれぞれ図 4-7、図 4-9、図 4-11 に示す。これらにより、3つの計測日の中で、2月3日の室外風速が最も強く、16:00 に 8.7m/s に達しており、室外風速の最も弱い2月5日でも 1.0m/s 以上であったことがわかる。つまり、無風状態での計測ができなかった。そのため、開発した自然換気解析と CFD の連成解析ツールにより各季節の無風のときの自然換気量を予測し検討する必要がある。また、各日の計測時間帯の主風向はそれぞれ東又は東北東、南、西である。

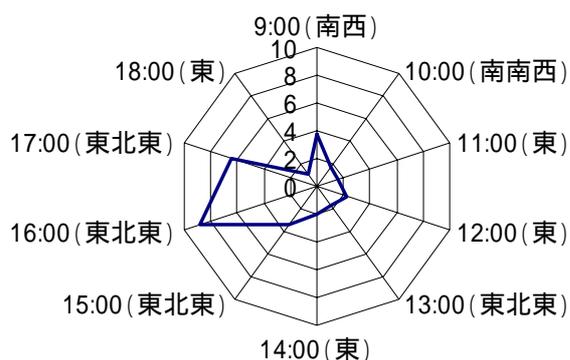


図 4-6 2月3日の室外風速(m/s)の時間変化

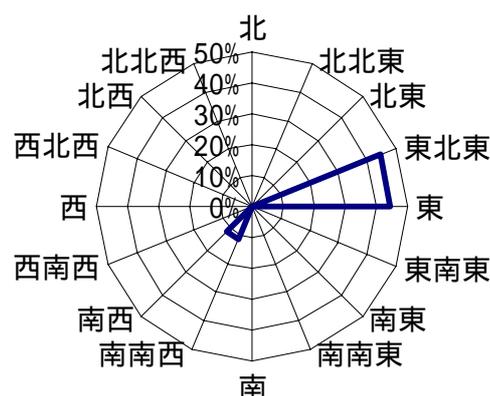


図 4-7 2月3日の室外風配図

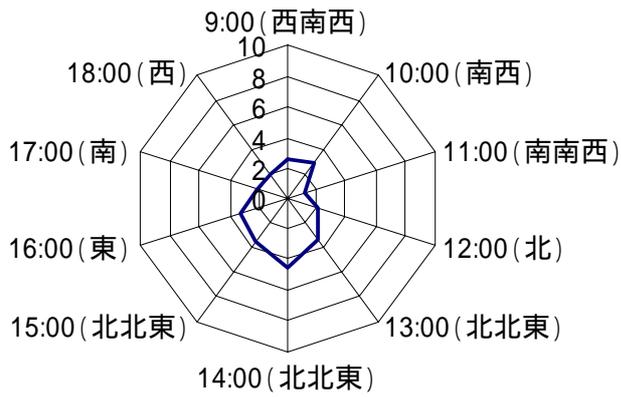


図 4-8 2月4日の室外風速(m/s)の時間変化

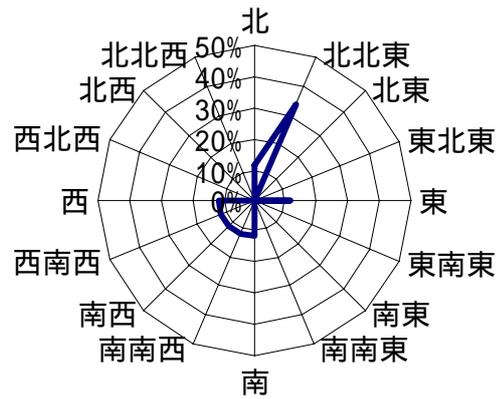


図 4-9 2月4日の室外風配図

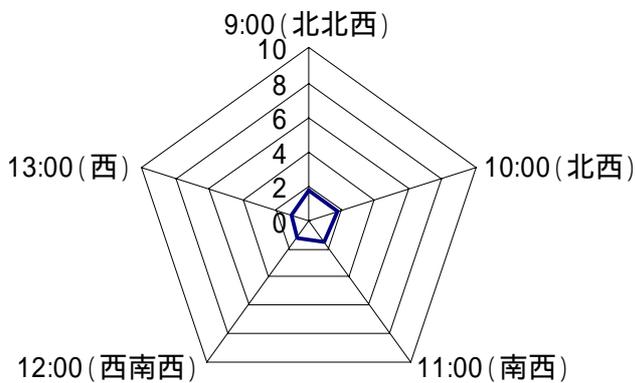


図 4-10 2月5日の室外風速(m/s)の時間変化

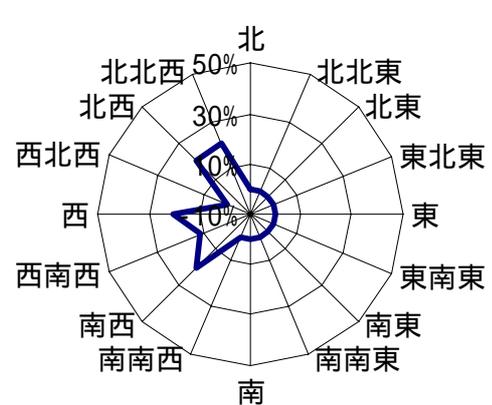


図 4-11 2月5日の室外風配図

4.3.2 上下温度分布の確認

各ケースの室内上下温度分布を図 4-12 ~ 図 4-14 に示す。これらにより、以下のことが分かる。

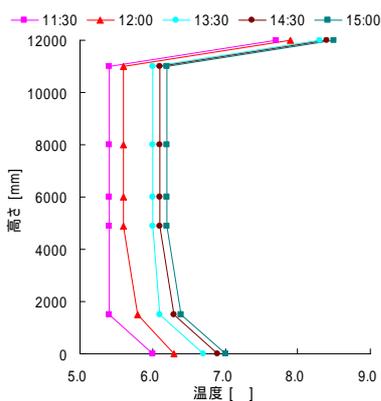


図 4-12 2月3日 11:30~15:00 (自然室温)

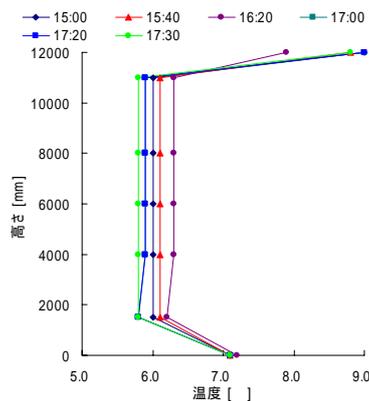


図 4-13 2月4日(自然換気) (室外風速 2.5m/s)

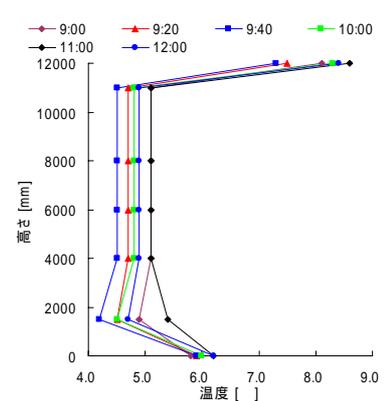


図 4-14 2月5日(自然換気) (室外風速 1.2m/s)

- 1) 各日の室内上下温度分布は、FL+11m以下の空気温度が 4.5~6.5 であり、FL+11m以上の空気温度が 7.5~9.0 である。FL+11m以上の空気温度が高いのは、照明発熱が存在す

るからである。そのため、室内上下温度分布が強い温度成層分布となっている。この上下温度分布は浮力換気の駆動力を増大させる効果がある。

- 2) 自然室温(CASE-2、2月3日 11:00～15:00)の場合には、居住域の空気温度が、11:30の5.4から15:00の6.2まで上昇する。このことは、自然換気を行わない場合には、照明発熱によって室内温度が上昇することを示している。
- 3) 2月4日の自然換気の場合には、居住域の空気温度は15:00の6.0から16:30の6.3まで上昇し、16:30から逆に17:30の5.8まで降下する。図4-10及び図4-4により、この時間帯の室外風速は3.5m/sから2.1m/sまで低下し、16:30の室外風速が約2.5m/sであり、室外温度が15:00の5.0から17:30までの2.2に連続低下し、16:30の室外温度が3.8であったことがわかる。つまり、室外風速が2.5m/s以上であっても室外温度が3.8以上の場合には、自然換気のときに室内温度が上昇し、室外温度が3.8以下となると室外風速が2.5m/sであっても自然換気は室内温度を低下させる。16:30までに室外温度が室内温度より2低くても室内温度が上昇する原因は、室内照明及びアースチューブの加熱効果があるからである。
- 4) 2月5日に2月4日と同じく自然換気を行った。居住域の空気温度は、まず9:00の5.1から9:40の4.5まで降下し、それから逆に11:00の5.1まで上昇する。図4-10の2月5日の室外風速の時間変化を見ると、室外風速が9:00～10:00の間に1.8m/sであったがそれから13:00までの1.0m/sに連続低下する。また、図4-5を見ると、2月5日の計測期間内の室外温度は2.5～1.5の範囲で変化し、大きく変動しない。これらのことにより、自然換気の場合には、室外温度が1.5まで低下しても、室外風速が1.8m/s以下となると室内温度が上昇することがわかる。

以上により、次の知見が得られる。

- (1) 照明発熱が天井付近の空気温度を上昇させ、浮力換気の駆動力を増大させる効果がある。
- (2) 換気を行わない場合には、室内に照明発熱があるため室内温度が徐々に上昇する。
- (3) 自然換気の場合に、室外風速が2.5m/s以上であっても室外温度が3.8以上となると室内温度が上昇し、逆に室外温度が3.8以下となると室内温度が降下する。
- (4) 室外風速が1.8m/s以下であると室外温度が1.5まで低くなっても自然換気のときに室内温度が上昇する。

4.3.3 居住域温湿度の確認

図4-15～図4-17にそれぞれ各ケースの計測時間帯の居住域(床上1.5m)の空気の温湿度の時間変化を示す。これらにより、以下のことがわかる。

- 1) 自然換気の場合には、居住域温度は、2月4日が約6.0であり、2月5日の約4.8より1.2高い。その原因は、前述したように2月4日の計測時間帯の外気温度が2月5日の外気温度より1.0～3.5高いからである。また、両日の居住域相対湿度はほぼ同様な値で推移している。
- 2) 換気を行わない(2月3日 11:00～15:00、自然室温)場合には、居住域の空気温度は5.5から6.5まで徐々に上昇する。

以上により、次の知見が得られる。

- (1)外気温度が約 2.5 の場合には、自然換気を行わないと居住域温度が 6.5 まで上昇するが、自然換気を行うと居住域の温度が 4.5 まで低下する。
- (2)自然換気を行う場合には、外気温度が高くなるほど居住域温度が高くなる。

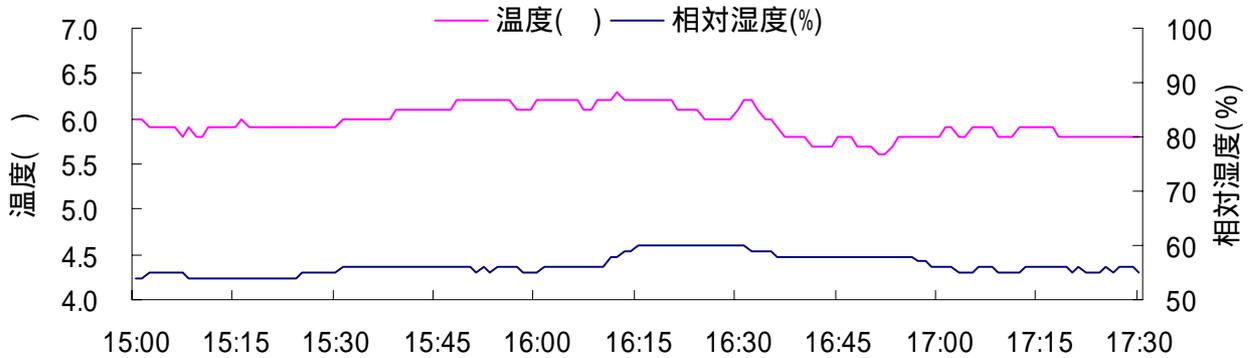


図 4-15 2月4日の居住域温湿度の時間変化(自然換気、室外風速 = 約 2.5m/s)

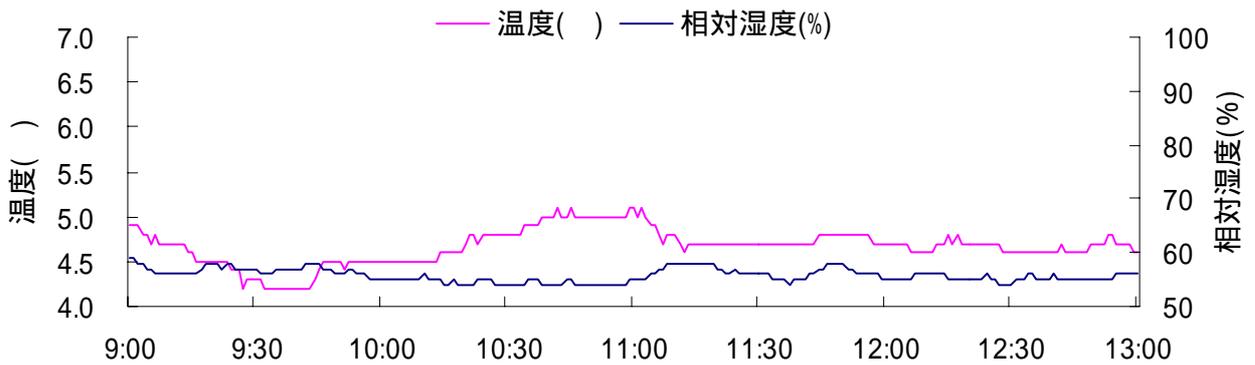


図 4-16 2月5日の居住域温湿度の時間変化(自然換気、室外風速 = 約 1.2m/s)

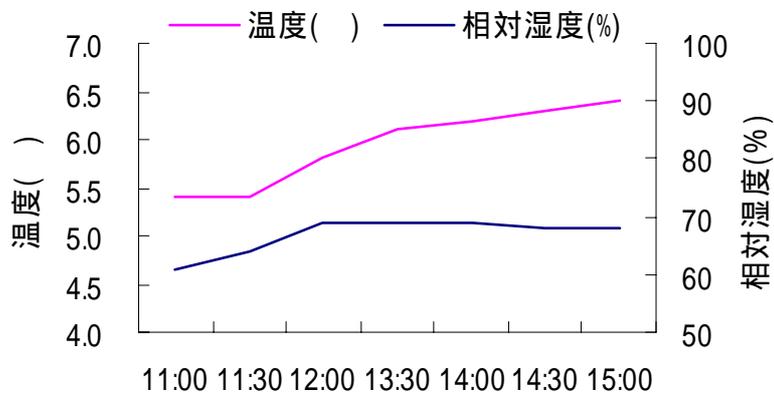


図 4-17 居住域(床上 1.5m)の温湿度(2/3 11:00～15:00：自然室温)

4.3.4 自然換気量の確認

1) 床面開口からの自然換気量の確認

床面開口からの自然換気量は、携帯型クリモマスター単点風速計により、**図 4-1** に示す 13 個の床面開口における 3 番目開口の吹出風速を測定し、その測定値と 2 月 4 日 16:15 に測定した各床面開口の風速と 3 番目の床面開口の風速との比率を用いて残りの 12 個の床面開口の吹出風速を推定し、その結果及び各床面開口の有効面積により床面開口全体の吹出風量を算出する。

2 月 4 日、5 日の南側 3 番目床面開口の吹出風速の測定値をそれぞれ**図 4-18**、**図 4-19** に示す。各日の床面開口の吹出風量の合計をそれぞれ**図 4-20**、**図 4-21** に示す。これらにより、以下のことがわかる。

1) 2 月 4 日 16:30~17:30 の床面開口の吹出風量は、約 $1,600\text{m}^3/\text{h}$ であり、2 月 5 日 10:36~13:00 の約 $1,200\text{m}^3/\text{h}$ より $400\text{m}^3/\text{h}$ ほど大きい。**図 4-8**、**図 4-10** を見ると、a) 室外温度は、2 月 4 日 16:30 以後の平均値が 2 月 5 日 10:36 以後の時間帯より約 1℃ 高い；b) 2 月 4 日の室外主風向は南風であり、2 月 5 日 10:36 以後の時間帯の室外主風向は南西から西に変化しており南換気窓の正面に当たる風がほとんどない；c) 2 月 4 日の室外風速が $2.2\sim 3.8\text{m/s}$ の範囲内変化しており、2 月 5 日の $1.0\sim 2.1\text{m/s}$ の 2 倍ほど大きい。つまり、浮力による自然換気の駆動力は 2 月 4 日より 2 月 5 日のほうが大きい、風力換気の駆動力は逆に 2 月 4 日の方が大きくなっている。結局、2 月 5 日より 2 月 4 日の換気駆動力が大きい、2 月 4 日の自然換気量がより大きくなる。

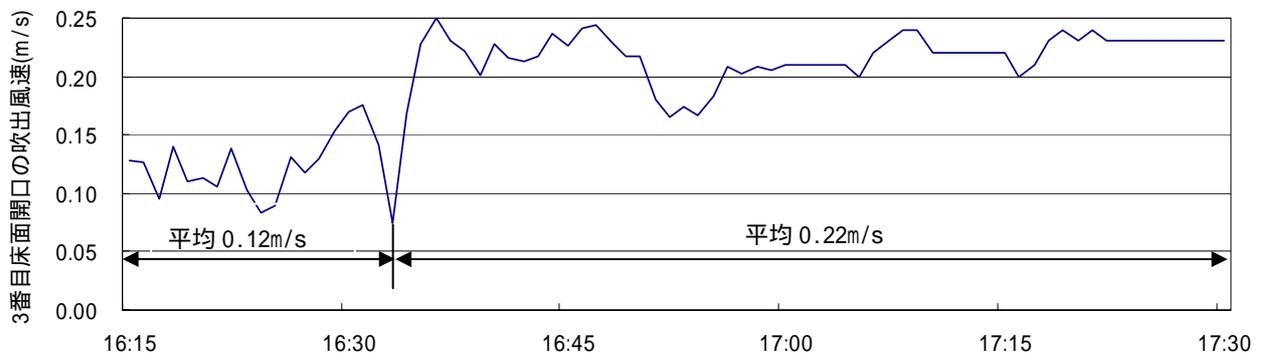


図 4-18 2 月 4 日の南側 3 番目床面開口の吹出風速の時間変化

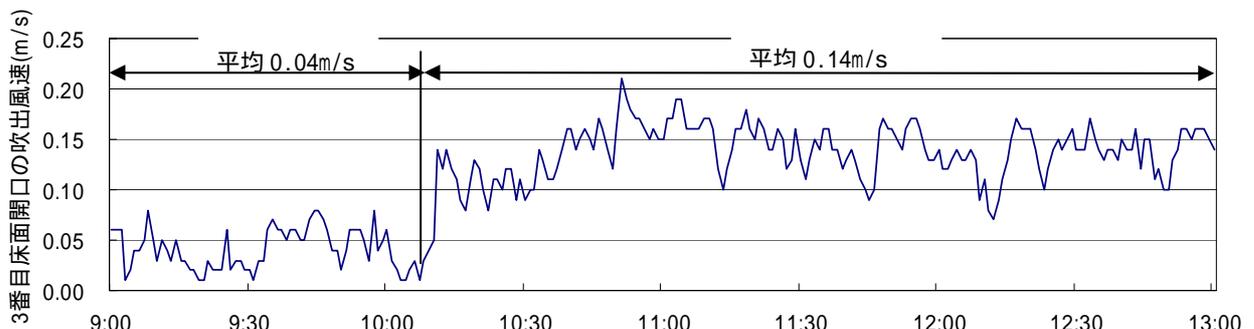


図 4-19 2 月 5 日の南側 3 番目の床面開口の吹出風速の時間変化

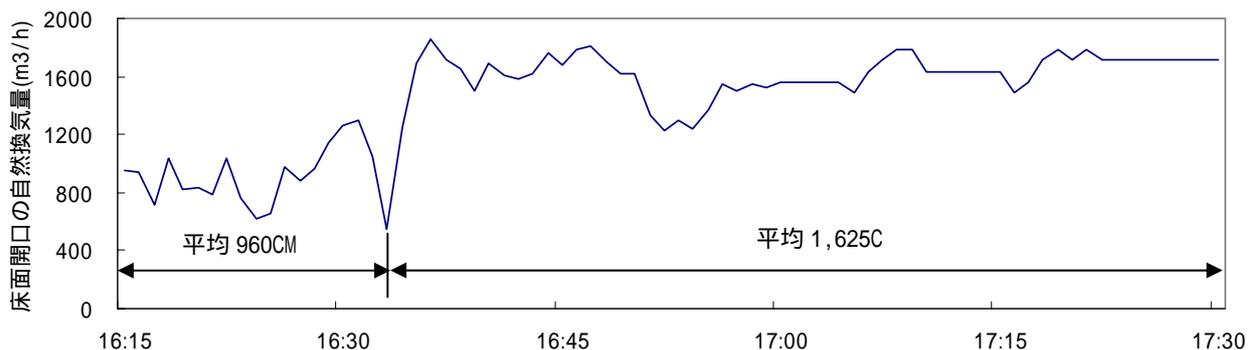


図 4-20 2月4日の床面開口からの自然換気量合計値の時間変化

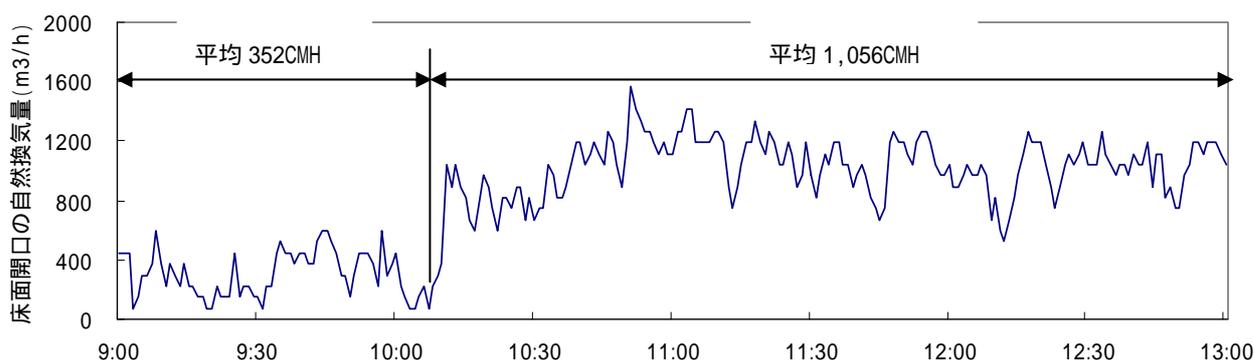


図 4-21 2月5日の床面開口からの自然換気量合計値の時間変化

2) 2月4日の16:30まで及び2月5日の10:15までの床面開口の吹出風量はそれぞれその後の約50%、30%しかない。図 4-8 を見ると、室外の主風向が16:00の東風から17:00の南風に変化し、図 4-10 を見ると、室外の主風向が10:00の北西から11:00の南西に変動する。このことは、室外風向、従い風力換気の駆動力が床面開口の吹出風量に大きな影響を与えることを示している。

2) 南・北換気窓の自然換気量の確認

南・北換気窓の自然換気量は、アネモマスター多点風速計により測定した南北換気窓の各計測点の風速の平均値と2つの換気窓の有効開口面積を乗じて求められる。

(1) 南・北換気窓開口部の風速

南換気窓風速の測定は、写真 4-4 で示されるように2つの換気窓のほぼ真中にそれぞれ2点の風速センサーを設置して測定する。図 4-22～図 4-25 にそれぞれ2月4日、5日の南・北換気窓における各測定点の風速の時間変化を示す。これらにより、南換気窓における4点の風速の測定値のばらつきが非常に大きく、これに対して北換気窓における2点の風速の測定値のばらつきがより小さいことが分かる。その原因は、2日の計測時間帯に自然換気はほぼ南換気窓から流入し北換気窓より流出したからである。図 4-26、図 4-27 にそれぞれ2月4日、5日の南・北換気窓開口部の平均風速の変化を示す。北換気窓の平均風速よりも南換気窓の方は2倍ほど大きくなっている。

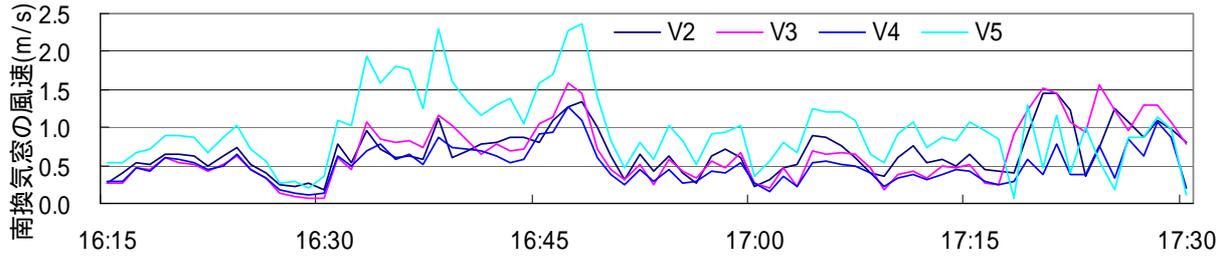


図 4-22 2月4日の南換気窓における各測定点の風速の時間変化

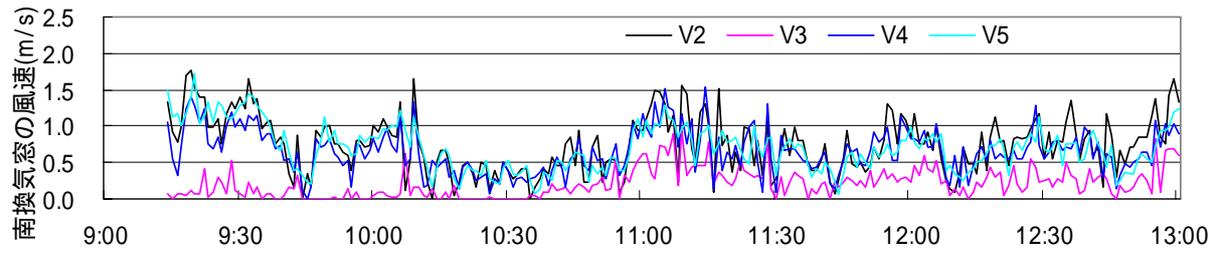


図 4-23 2月5日の南換気窓における各測定点の風速の時間変化

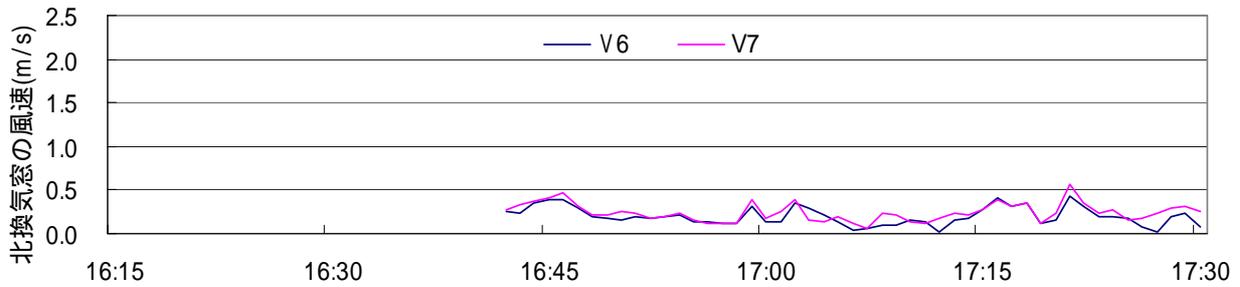


図 4-24 2月4日の北換気窓における各測定点の風速の時間変化

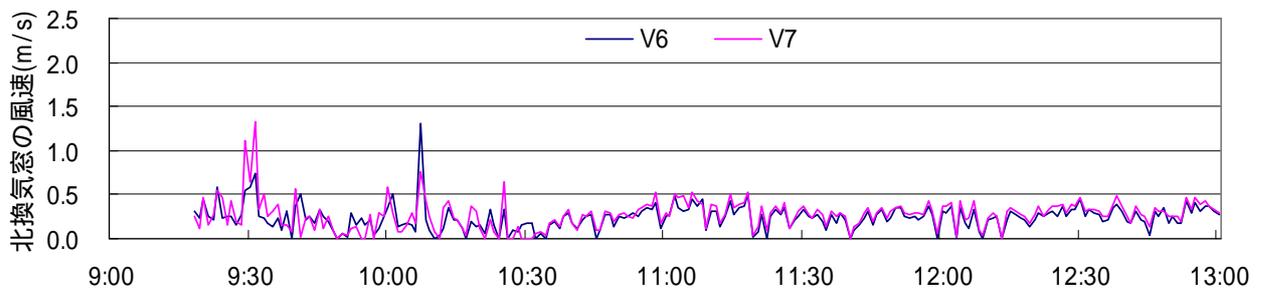


図 4-25 2月5日の北換気窓における各測定点の風速の時間変化

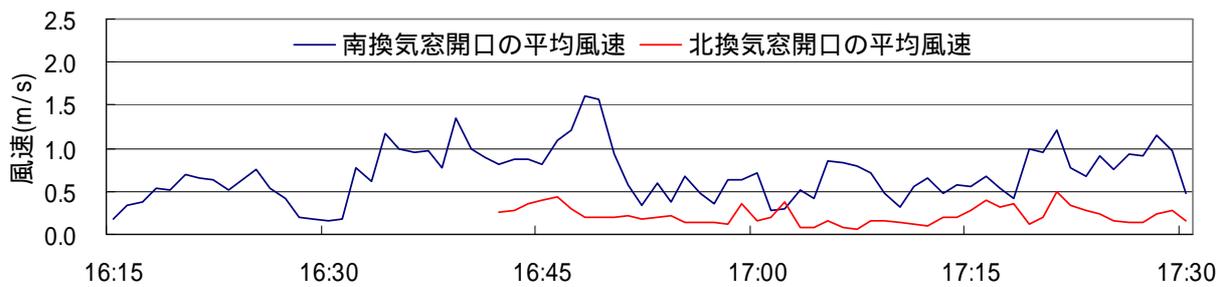


図 4-26 2月4日の南・北換気窓開口部の平均風速の時間変化

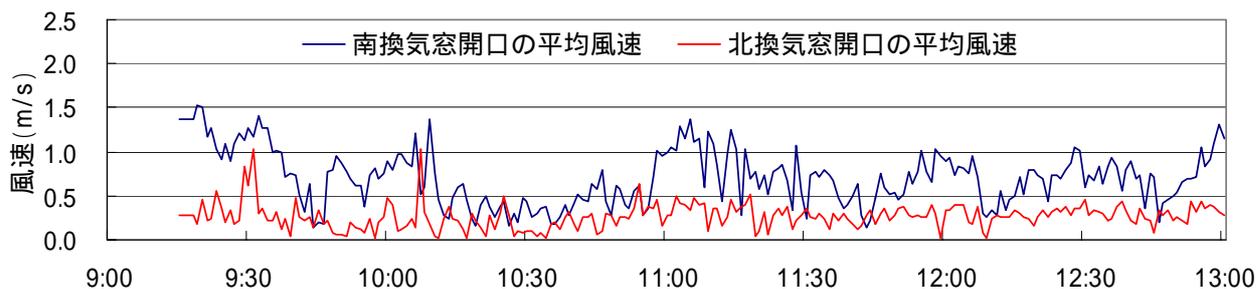


図 4-27 2月5日の南・北換気窓開口部の平均風速の時間変化

(2) 南・北換気窓の自然換気量

南・北換気窓の平均風速と有効開口面積より算出した南・北換気窓の自然換気量の時間変化をそれぞれ図 4-28、図 4-29 に示す。南・北換気窓自然換気量の平均値は、2月4日 16:34~17:30 の時間帯にはそれぞれ 11,415CMH、7,130CMH、2月5日 10:11~13:00 の時間帯にはそれぞれ 10,085CMH、8,835CMH であり、両日の北換気窓より流出する風量は南換気窓から流入する風量より 4,285CMH、1,250CMH 小さくなっている。

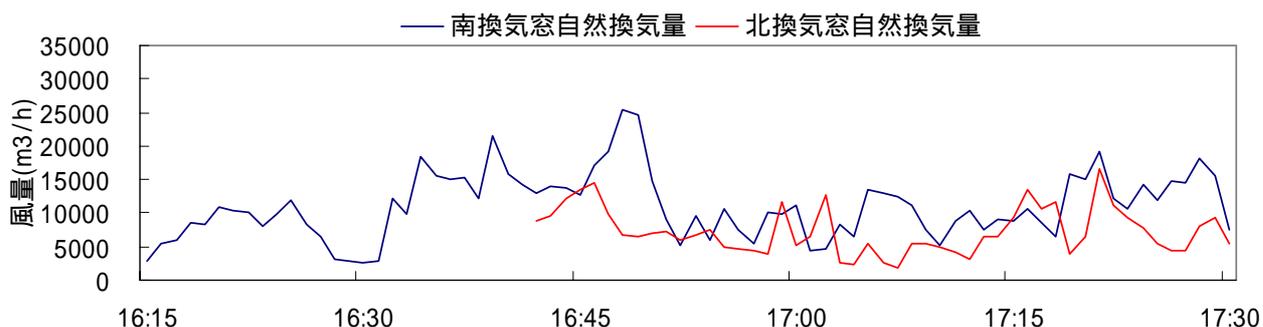


図 4-28 2月4日の南・北換気窓の自然換気量の時間変化

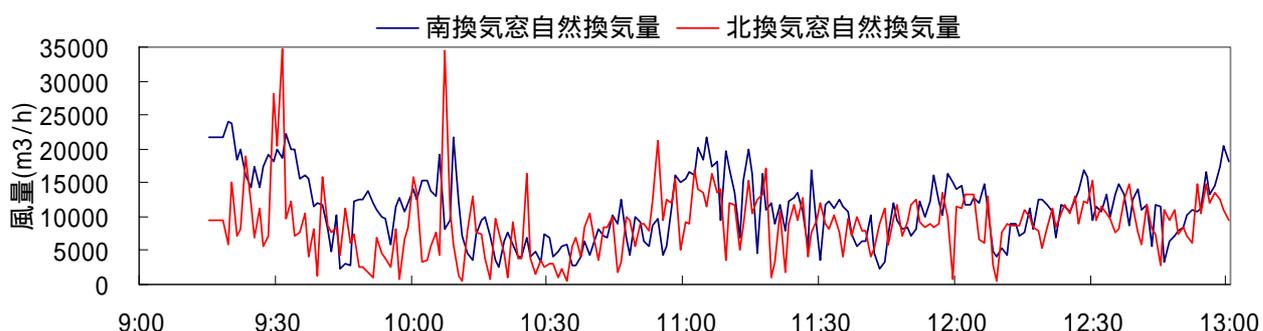


図 4-29 2月5日の南・北換気窓の自然換気量の時間変化

(3) 南・北換気窓の自然換気気流流れ方向の確認

2月4日、5日の南・北換気窓開口部の空気温度をそれぞれ図 4-30、図 4-31 に示す。2月4日の 16:15~16:30 及び 2月5日の 9:00~10:36 の時間帯において北換気窓開口部よりも南換気窓開口部の空気温度が高くなっている。このことは、これらの時間帯において自

然換気は北換気窓から流入し、南換気窓より流出していることを示している。これに対して、2月4日の16:30~17:30及び2月5日の10:36~13:00の時間帯において北換気窓開口部よりも南換気窓開口部の空気温度が低いため、自然換気は南換気窓から流入し北換気窓より流出している。

(4) 建物の流入・流出風量のバランスの確認

2月4日、5日の屋内運動場の流入/流出風量の時間変化をそれぞれ図4-32、図4-33に示す。これらにより、各時刻の室内へ流入する風量と室から流出する風量のバランスがとれていないことが多く存在することが確認できる。その理由として、以下の4点が考えられる。

- a.北換気窓の2点の風速センサーが、真中の窓の西側から0.4m、0.6mに設置されたので、これらの2点の風速より算出した平均風速は、北換気窓の面風速とは誤差がある。
- b.各時刻での各床面開口の風速は、2月4日16:15の各床面開口の風速測定値と3番目床面開口の風速測定値との比率より推定されたものであるため、その推定誤差が生じる。
- c.風速測定センサーの誤差や計測システムのシステム誤差がある。
- d.屋内運動場の扉や窓などに隙間風が存在する。ゆえに、自然換気解析とCFDの連成解析より対象システムの自然換気量を予測する際に、隙間風をモデル化にする必要がある。

また、図4-20の床面開口吹出風量と図4-28の換気窓の自然換気量、図4-21の床面開口吹出風量と図4-29の換気窓の自然換気量を比較すると、2月4日16:35~17:30及び2月5日10:11~13:00の時間帯において床面開口から室内に流入する風量は北換気窓の流入風量の、それぞれ22.8%、11.9%しかないと分かる。つまり、風がある場合には、屋内運動場物の自然換気は主に換気窓からであり、床面から流入する換気量が総換気量を占める割合が少なく、そのため床面開口からの吹出 airflow が室内の温熱環境に及ぼす影響は小さい。

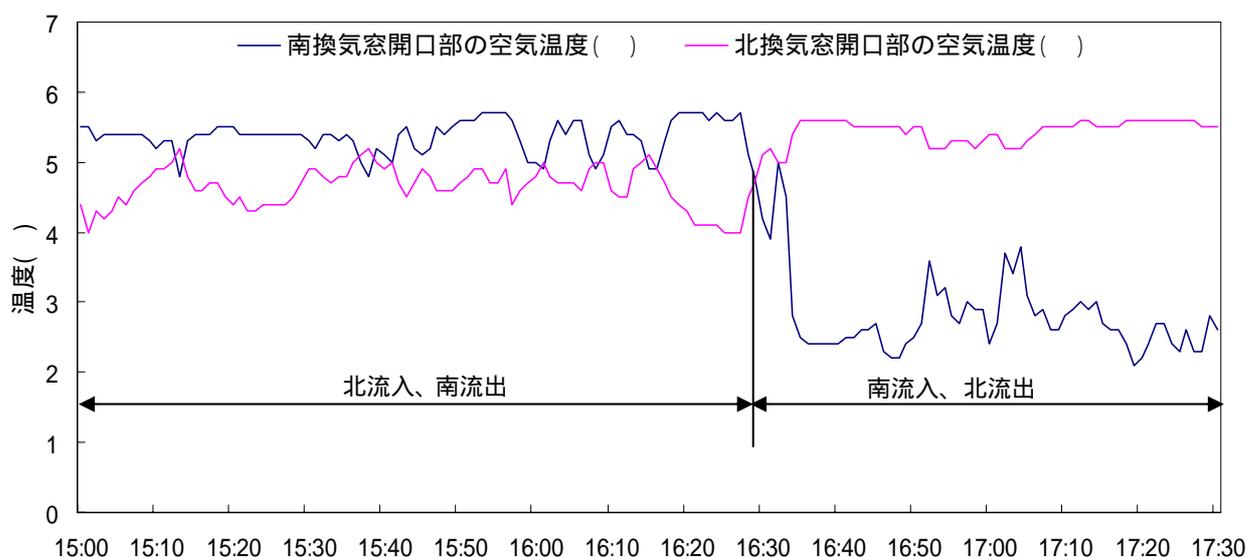


図4-30 2月4日の南・北換気窓開口部の空気温度の時間変化

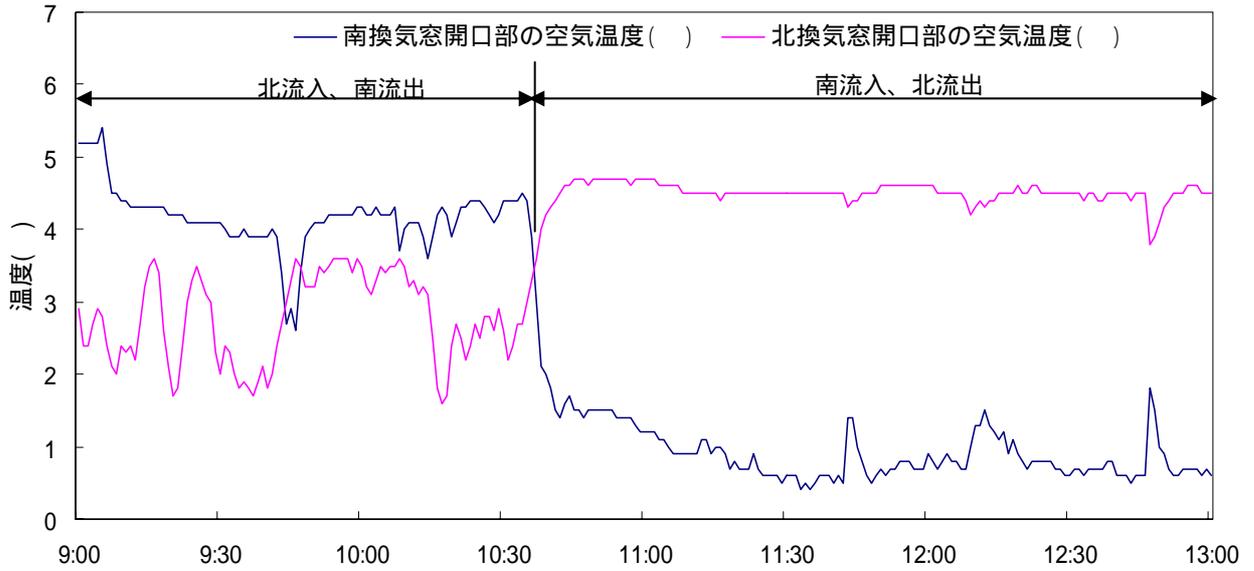


図 4-31 2月5日の南・北換気窓開口部の空気温度の時間変化

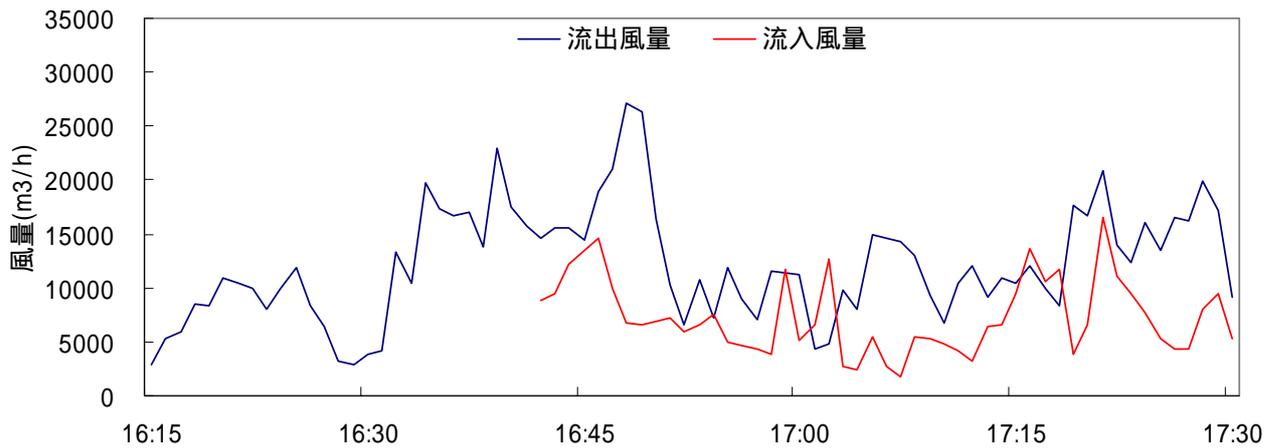


図 4-32 2月4日の屋内運動場の流入 / 流出風量の時間変化

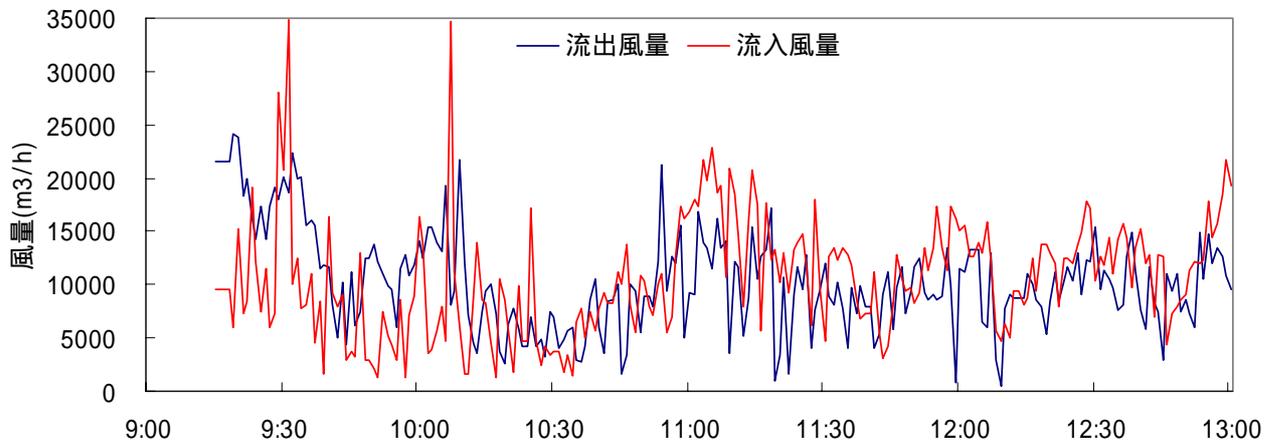
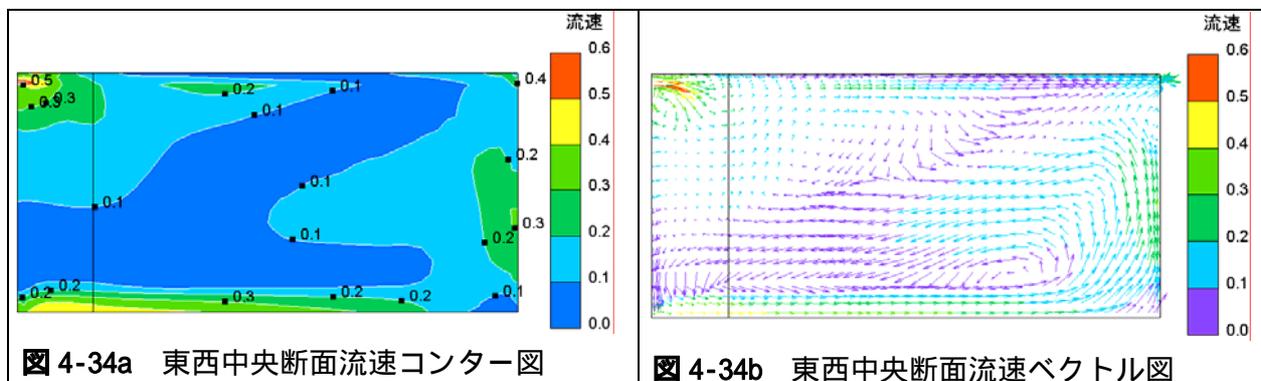


図 4-33 2月5日の屋内運動場の流入 / 流出風量の時間変化

4.3.5 室内各所風速の確認

室内各所の風速を測定することが困難であるため、冬期の室内各所の風速が許容風速の0.2m/s以下であるかどうかを検証するには、CFD解析結果によって確認することとする。図4-34に、2008年2月4日17:16の東西中央断面の風速分布を示す。これにより、室内各所の風速は、ほぼ0.2m/s以下であることがわかる。



4.3.6 アースチューブによる省エネルギー性能の確認

(1) 南・北床面開口の吹出温度の確認

自然換気時(2月4日16:15、16:59)の各床面開口の吹出温湿度の測定結果を表4-10に、自然換気時(2月4日、5日)の南・北側床面開口の吹出温度の時間変化を図4-35、図4-36に示す。これらにより、以下のことがわかる。

表 4-10 南・北床面開口の吹出温湿度の比較

時間 番号	2月4日 16:15		2月4日 16:59		時間 番号	2月4日 16:15		2月4日 16:59	
	温度	湿度%	温度	湿度%		温度	湿度%	温度	湿度%
13	7.1	67	7.1	67	7	6.4	59	5.8	62
1	7.3	66	7.3	66	8	5.7	63	5.1	65
2	8.4	61	8.4	61	9	5.4	65	4.9	67
3	8.2	63	8.2	63	10	5.1	74	4.6	77
4	8.2	61	8.2	61	11	5.3	65	4.8	68
5	8.2	63	8.2	63	12	6.2	63	5.6	65
6	7.6	67	7.6	67					

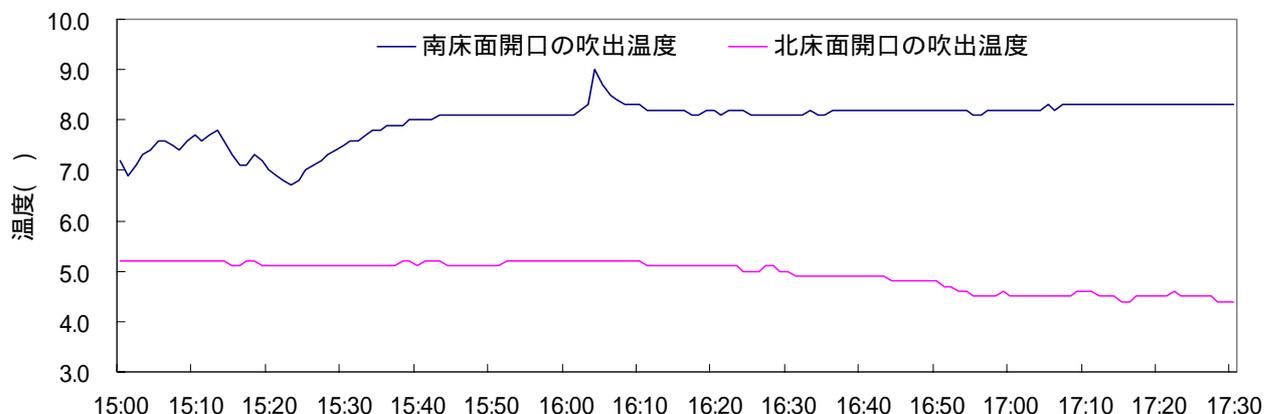


図 4-35 2月4日(自然換気)の南側3番目、北側10番目床面開口の吹出温度の時間変化

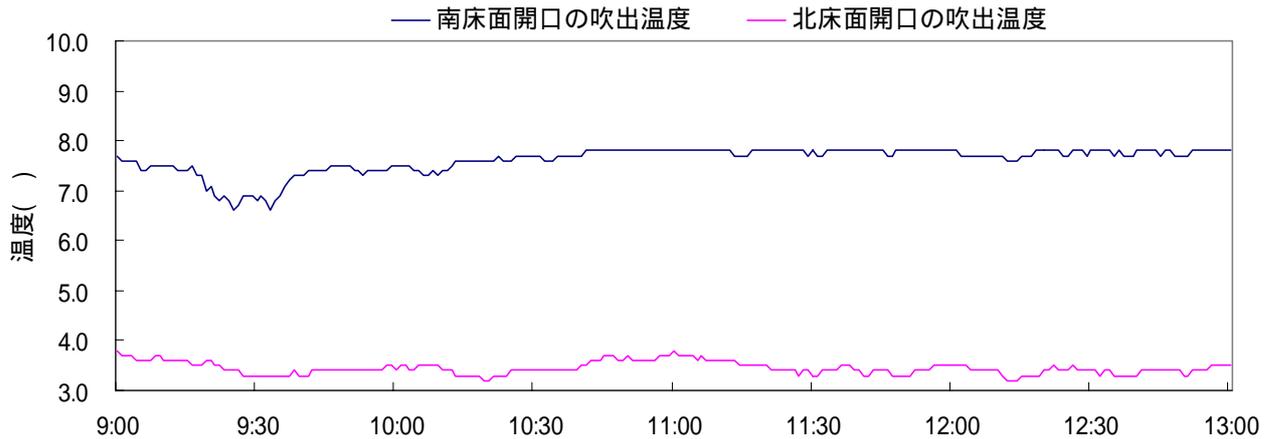


図 4-36 2月5日(自然換気)の南側3番目、北側10番目床面開口の吹出温度の時間変化

1)南側床面開口の平均吹出温度が北側床面開口の平均出温度より2.4 高い。北側床面開口の吹出温度の低い原因は、アースチューブ内の気流は、建物内の1F床下ピットを通過した後、建物外部の床下ピット(駐車場のため床下断熱施工がない部分)及び屋外駐車場における立てシャフト(断熱無)を経由してから屋内運動場の北側床面開口から室内に供給しているからである。つまり、北側床面開口の吹出気流は、建物内部の床下ピットより温められた外気を建物外部の床下ピット及び屋外駐車場における立てシャフトにより逆に冷されている。

2)2月5日の計測時間帯における南側(3番目)床面開口の吹出温度の時間平均値は約7.6であり、北側(10番目)床面開口の吹出温度の時間平均値の3.4よりも4.2高い。2月4日の南側(3番目)床面開口の吹出温度は15:00の7.0から17:30の8.3まで上昇したが、北側(10番目)床面開口の吹出温度は15:00の5.2から17:30の4.4まで降下し、南・北床面開口の吹出温度差は1.8から3.9まで拡大した。両計測日の南・北床面開口の吹出温度差が異なる原因は以下に示す。

a)図 4-18、図 4-19 を見ると、2月4日の南側3番目の床面開口の吹出風速の時間平均値は、16:15~16:34の時間帯には0.12m/sで、16:35~17:30の時間帯には0.22m/sであり、2月5日の南側3番目の床面開口の吹出風速の時間平均値は、9:00~10:10の時間帯には0.04m/sで、10:11~13:00の時間帯には0.14m/sであることが分かる。つまり、南側3番目の床面開口の平均吹出風速は、2月4日16:15~16:34の時間帯には2月5日9:00~10:10の3倍、2月4日16:35~17:30の時間帯には2月5日10:11~13:00の1.6倍となっている。

b)図 4-4、図 4-5 を調べると、2月4日の外気温は15:00の約5から徐々に17:30の2.4に降下したが、2月5日の計測時間帯の外気温はほぼ2.2で推移している。

3)2月5日には、1F床下ピット内の風量が小さいため、外気が1F床下ピットにおいて加熱される時間が長くなる。そのため、計測時間帯において外気温度が変化しても、南・北床面開口の吹出温度が異なるがその時間変化がない。これに対して、2月4日には、1F床下ピット内の風量が大きいいため、その加熱能力は限界に達しており、16:30までの外気温が2

月5日より高くても、南側床面開口の吹出温度が2月5日よりそれほど高くない。16:30以後、外気温の低下に従い、南側床面開口の吹出温度はあまり変わらないが北側床面開口から吹出気流は屋外駐車場と立てシャフトに冷却されたので徐々に低下したため、両側床面開口の温度差が徐々に大きくなった。

4) 両日の計測終了時の南床面開口の吹出温度と外気温度の差は同じく 5.9 となっている。このことは、1F 床下ピットの入口から建物内部の立てシャフトまでの 1F 床下ピットからの加熱量は両日ともに同じであり、外気温度にほぼ影響されないことを示している。

(2) 1F 床下ピットの出・入口空気の温湿度

2月4日、5日の各計測時間帯における1F床下ピットの出・入口の空気温湿度の時間変化をそれぞれ図4-37～図4-39に、2月4日の2つの計測時間帯の1F床下ピットの入口と建物内部・外部の出口の空気状態の変化を図4-40に示す。図4-40において、1F床下ピット入口の二つの空気状態点の相違は、両者の計測時間帯の相違による。

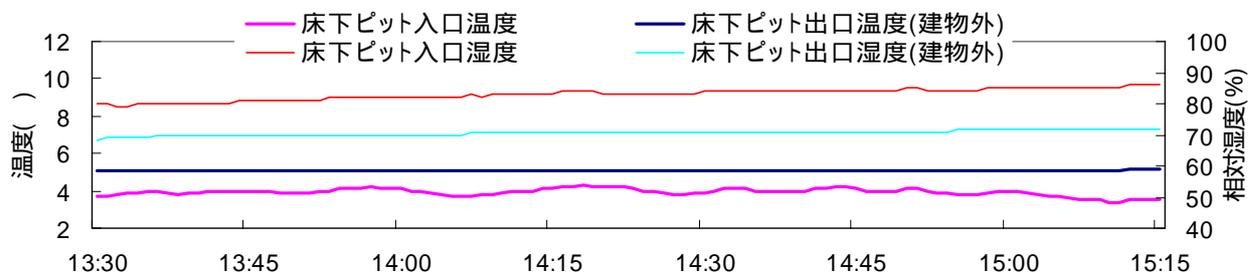


図4-37 2月4日の1F床下ピット入口と建物外部出口の空気の温湿度の時間変化

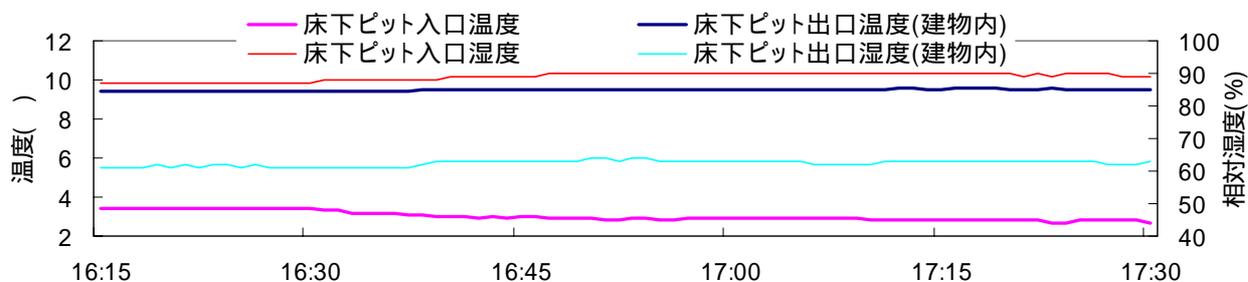


図4-38 2月4日の1F床下ピット入口と建物内部出口の空気の温湿度の時間変化

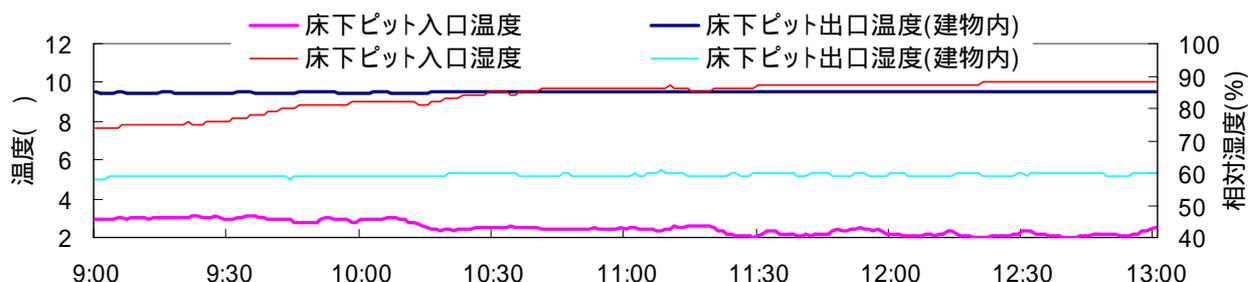
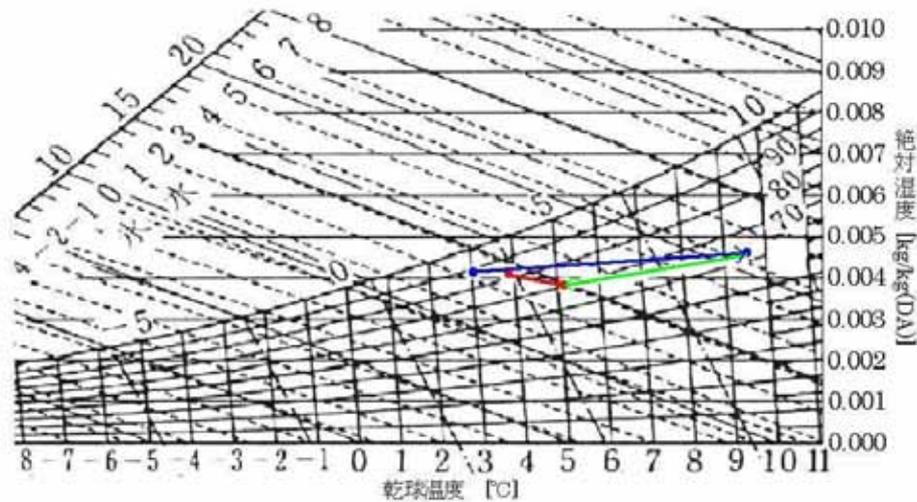


図4-39 2月5日の1F床下ピット入口と建物内部出口の空気の温湿度の時間変化



- : 1F 床下ピット入口から建物内部出口までの空気の状態変化
- : 1F 床下ピット入口から建物外部出口までの空気の状態変化
- : 1F 床下ピットの建物内部出口から建物外部出口までの空気の状態変化

図 4-40 2月4日の1F 床下ピット入口から建物内部・外部出口までの空気の状態変化

これらの図により、以下のことがわかる。

- a) 2月4日 13:30～15:15 の計測時間帯において、1F 床下ピット入口の空気の温湿度は 3.4～4.3、75%～86%の間に変化するが、建物外部の 1F 床下ピット出口の空気の温湿度は、ほぼ 5.1、70%の一定値で推移している。
- b) 2月4日 16:15～17:30 の計測時間帯において、1F 床下ピット入口の空気の温湿度は 2.7～3.4、87%～90%の間に変化するが、建物内部の 1F 床下ピット出口の空気の温湿度は、ほぼ 9.5、62%の一定値で推移している。
- c) 2月5日 9:00～13:00 の計測時間帯において、1F 床下ピット入口の空気の温湿度は 2.0～3.1、74%～88%の間に変化するが、建物内部の 1F 床下ピット出口の空気の温湿度は、ほぼ 9.4、60%の一定値で推移している。

以上により、各計測時間帯の 1F 床下ピット入口の空気温度は 2.7～4.3 の範囲内で変動し大差がないが、建物内部の 1F 床下ピット出口の空気温度は約 9.4 であり、建物外部のそれは約 5.1 であることがわかる。つまり、図 4-40 で示されるように、1F 床下ピット入口の導入外気は一旦約 9.4 まで加熱され、建物外部の 1F 床下ピットによって逆に 5.1 まで冷却された。

(3) 自然換気のときの導入外気への顕熱加熱量

2月4日、5日の南・北床面開口の吹出温度と外気温度の差および吹出空気のエントルピーと外気のエントルピーの差と各床面開口の吹出風量により、各日のアースチューブから導

入外気への顕熱・全熱加熱量が計算される。2月4日、5日のアースチューブから導入外気への顕熱・全熱加熱量の時間変化をそれぞれ図4-41、図4-42に、2月4日16:15~17:30の時間帯に屋外給気塔入口から南・北側床面開口までの導入外気の状態変化を図4-43に示す。

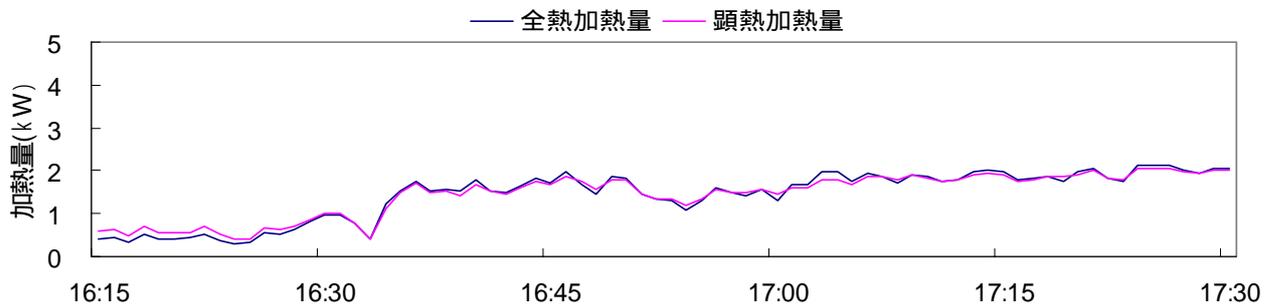


図4-41 2月4日のアースチューブからの顕熱・全熱加熱量の時間変化

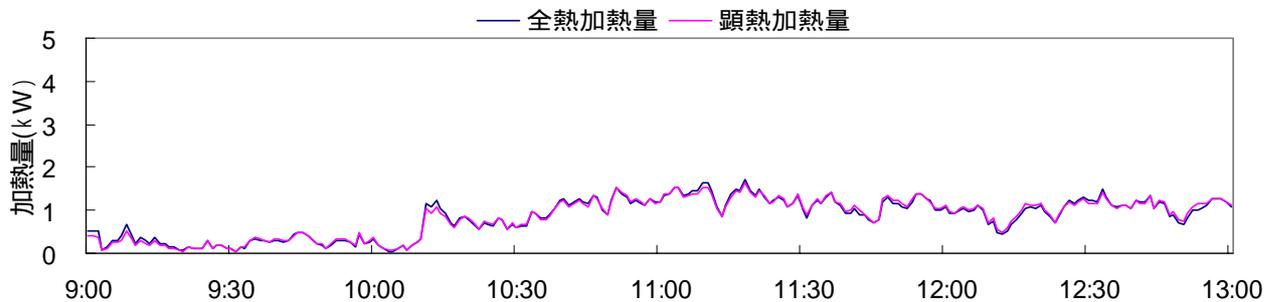
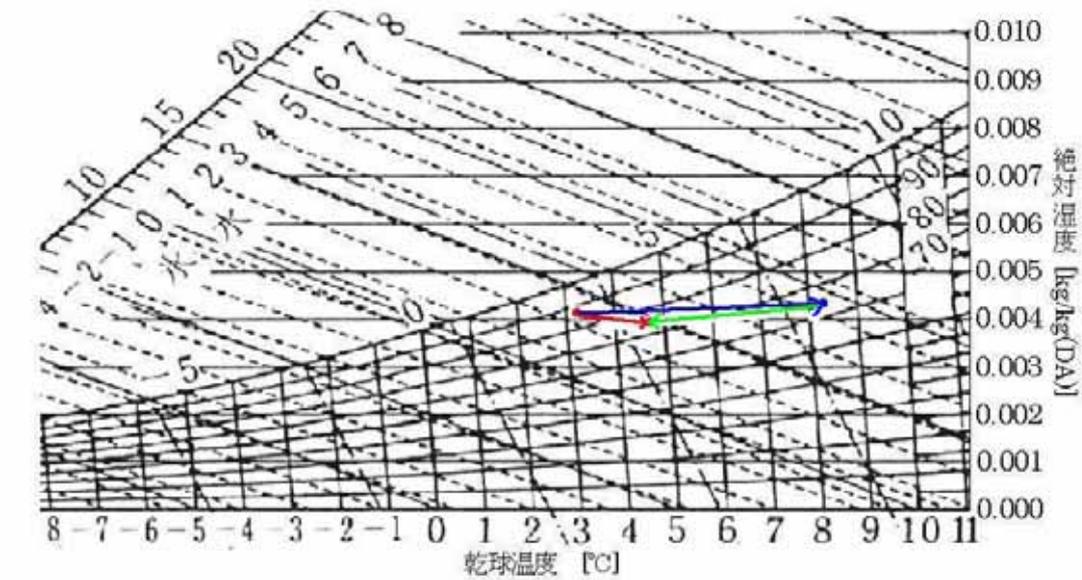


図4-42 2月5日のアースチューブからの顕熱・全熱加熱量の時間変化



- : 屋外給気塔入口から南床面開口までの導入外気の状態変化
- : 屋外給気塔入口から北床面開口までの導入外気の状態変化
- : 南床面開口から北床面開口までの空気状態の仮想遷移

図4-43 2月4日の屋外給気塔入口から南・北床開口までの導入外気の状態変化

これらにより、以下のことがわかる。

- a) 2月4日 16:33 の前後、2月5日 10:10 の前後にクール/ヒートチューブから導入外気への顕熱/全熱加熱量が異なり、両日の顕熱/全熱加熱量も異なる。その原因は、4.2.8.3 節に示した両日の2つの時間帯における1F床下ピットの顕熱・全熱獲得熱量が異なる原因とは同様である。
- b) 2月4日 16:33~17:30 および2月5日 10:11~13:00 の計測時間帯におけるクール/ヒートチューブから導入外気への顕熱加熱量は、それぞれ1.7kW、1.09kWである。これらの値を4.2.8.3 節で示した各日の1F床下ピット入口から建物内部床下ピット出口までの顕熱獲得熱量(2月4日3.83kW、2月5日2.66kW)と比べて、それぞれ2.13kW、1.57kW減少した。このことは、**図4-43**を見るとわかるように建物内部の1F床下ピット出口から建物外部の1F床下ピット出口まで熱損失が存在することを示している。

(4) アースチューブからの加熱量が室内温熱環境に及ぼす影響

アースチューブからの加熱量が室内温熱環境に及ぼす影響を考察するために、**表4-11**に示す屋内運動場の各壁面の熱貫流率及び換気窓より流出する換気量を用いて、2月4日16:59のときに室内空気温度が1 上昇する場合に必要な顕熱量を概算した。その結果、室内空気温度が1 上昇するために必要な熱量は9,758Wであることが明らかになる。2月4日16:59のアースチューブからの顕熱加熱量(1,608W)がこれの16.4%しかない。このことは、アースチューブからの顕熱加熱量が室内空気温度を0.16 しか上昇しないので、室内の温熱環境に大きな影響を与えないことを示している。

表4-11 室内温度が1 上昇するために必要な顕熱加熱量

	外壁	内壁	窓	床	屋根	必要顕熱量[W]
熱貫流率 [W/m ² ・K]	0.13	3.8	1.7	3.0	0.4	
壁体面積 [m ²]	724	719	88	865	845	
壁体貫流熱量 [W]	94.1	2,730.5	148.8	2,593.5	338.0	5,905(小計)
換気損失熱量 [W]	0.29 × 11,425 × 1/0.86=3,853(小計)					9,758(合計)

2月4日、5日のアースチューブからの顕熱加熱量が室内温度をどの位上昇させるかを示すために、上記と同様な計算を行い、その結果をそれぞれ**図4-44**、**図4-45**に示す。これらにより、両日のアースチューブからの顕熱加熱量は、室内温度を最大0.23 しか上昇させないことがわかる。

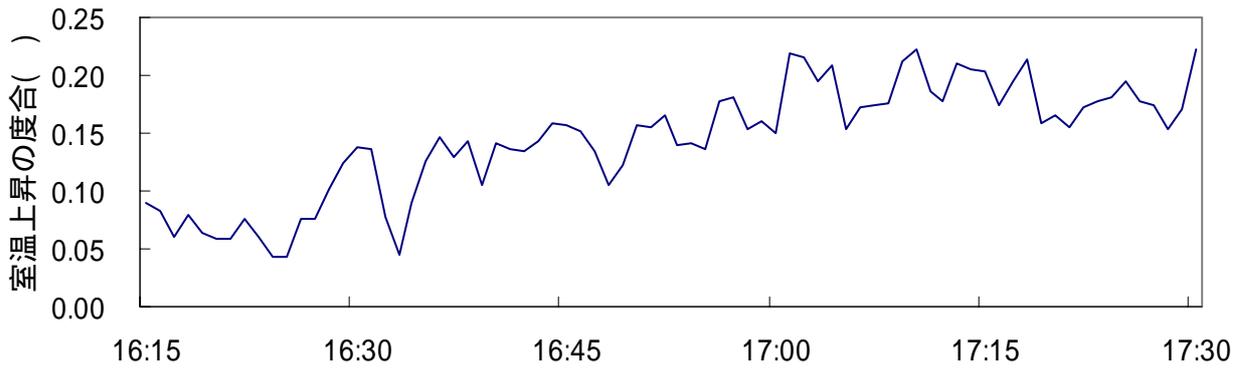


図 4-44 2月4日のアースチューブからの顕熱加熱量が室内温熱環境に及ぼす影響

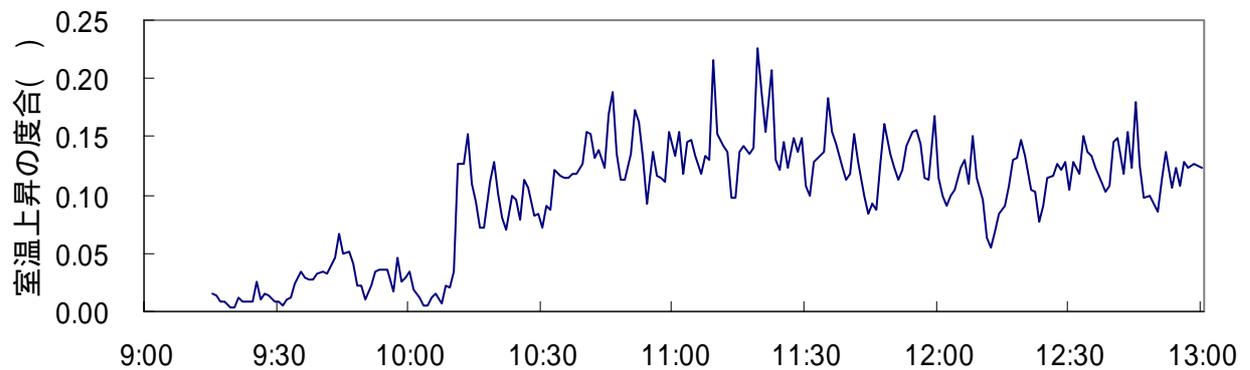


図 4-45 2月5日のアースチューブからの顕熱加熱量が室内温熱環境に及ぼす影響

4.4 CFD 連成解析方法を用いた設計不具合の解決策の効果予測

4.3.6(1)節において、南側床面開口の吹出温度よりも北側床面開口の吹出温度が低いという設計不具合を発見した。この不具合の解決策として、建物外部の床下ピットの上部及び屋外駐車場における立てシャフトに断熱施工を行う；実際の運用時に北側の床面開口を閉めるなどが考えられる。これらの2つの対策の採用効果を確認するために、冬期の実測データを利用した CFD 連成解析方法を用いて検討する。

対策 と を行った場合と原状を含む 3 ケースに対する CFD 解析結果を図 4-46 及び表 4-12 に示す。対象自然換気システムの各種の運用状態時の各開口の風量、温度の計算値及び床面開口の吹出温度の設定値を表 4-13 に示す。これらにより、建物外部の床下ピットの上部及び屋外駐車場における立てシャフトが断熱された場合又は北側床面開口を閉めた場合でも、室内居住域の空気温度が 0.1~0.2 しか上昇しないことがわかる。これは、もともとの加熱効果が少なかったことによるもので、従ってこれらの対策は不要で、対象システムは現状のままでもよい。

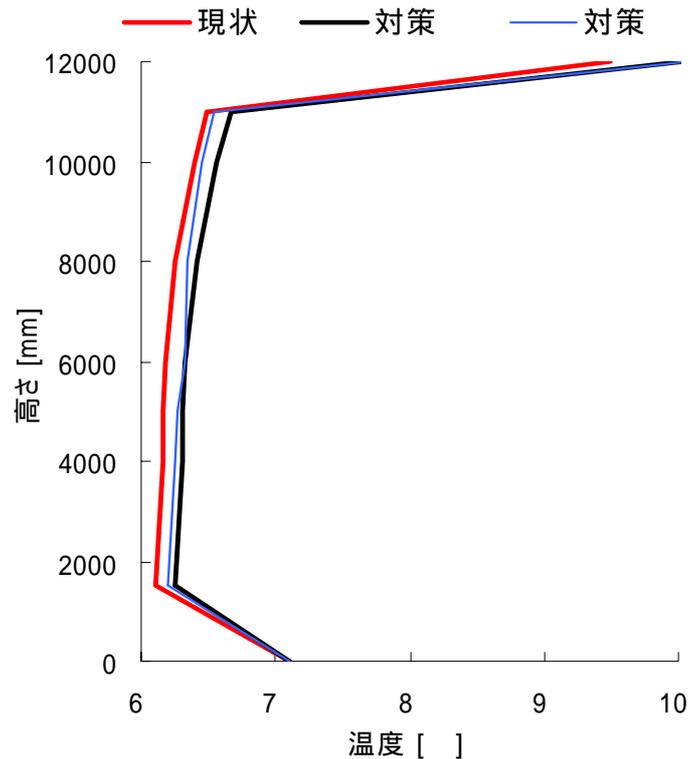


図 4-46 冬期の 3 ケースの計算結果の比較

表 4-12 冬期各ケースの CFD 解析値の比較 [°C]

ケース	FL	FL+1.5m	FL+4m	FL+6m	FL+8m	FL+10m	FL+12m
現状	7.1	6.1	6.2	6.2	6.3	6.4	9.9
対策	7.1	6.3	6.3	6.3	6.4	6.6	10.0
対策	7.1	6.2	6.3	6.3	6.4	6.5	10.1

表 4-13 各種の運用状態の各開口の温度・風量の計算結果

	南換気窓		北換気窓		南床面開口		北床面開口	
	温度 [°C]	風量 [CMH]	温度 [°C]	風量 [CMH]	温度 [°C]	風量 [CMH]	温度 [°C]	風量 [CMH]
現状	2.9	11,227	6.6	12,659	8.2	465	4.6	970
対策	2.9	11,227	6.7	12,659	8.2	465	8.2	970
対策	2.9	11,228	6.5	12,621	8.2	1,394	-	-

4.5 夏期実測による引渡し段階の性能検証

4.5.1 測定期間の気象状態

各日の室外温湿度の時間変化及び風速・風向の気象台データを図 4-47、図 4-48 に示す。図 4-47 により、8 月 11 日の室外温度と相対湿度はそれぞれ 34.1 ~ 37.7 °C、41 ~ 51% の範囲で変化し、室外風速は 10:00 の 2.4 m/s を除いてほぼ 4.0 m/s であり、主風向は北北東であったことがわかる。これに対して、8 月 14 日の室外温度、相対湿度及び室外風速はそれぞれ 28.3 ~ 37.1 °C、44 ~ 79%、

1.5 ~ 6.3 m/s の範囲で変化し、主風向は 10:00 の南南西を除いて西北西である。

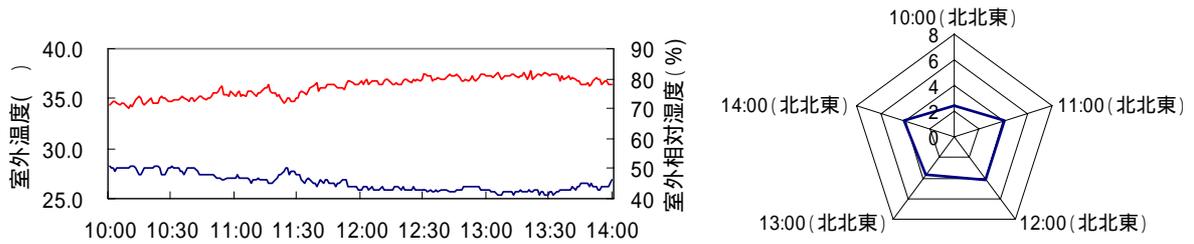


図 4-47 8月11日の室外温湿度・風速・風向

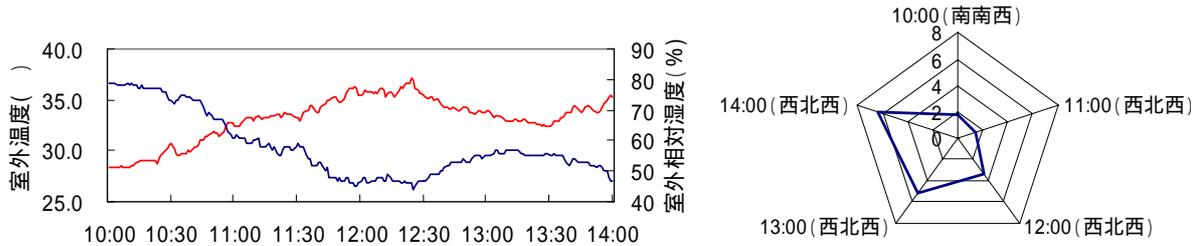


図 4-48 8月14日の室外温湿度・風速・風向

4.5.2 室内上下温度分布と居住域温度

2つの測定日の室内上下温度分布の測定結果を図 4-49、50 に示す。

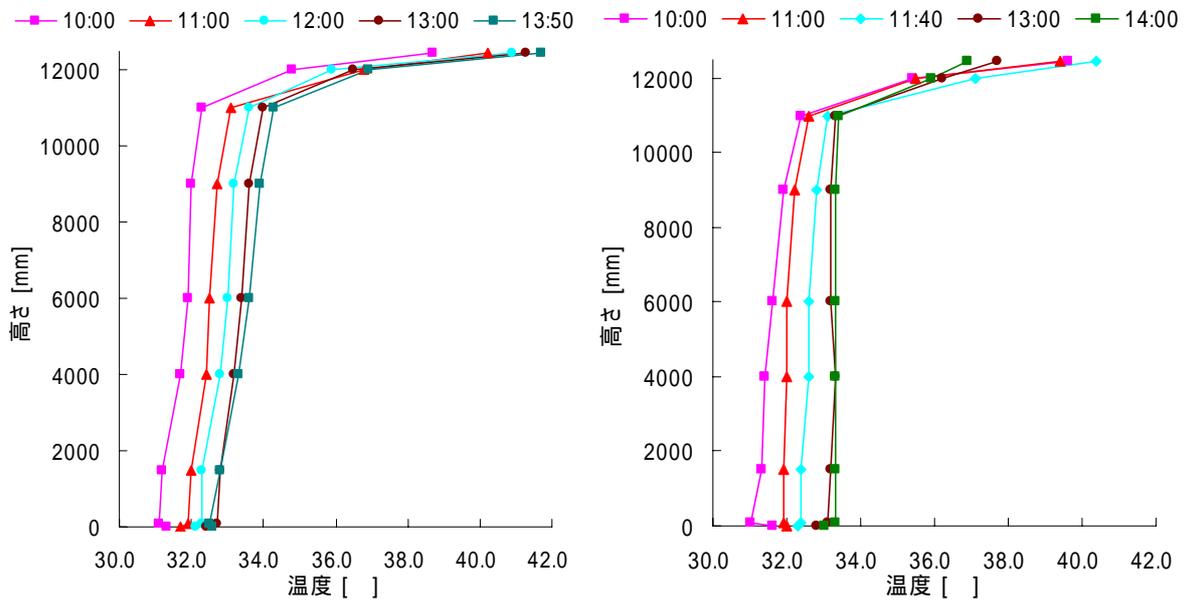


図 4-49 8月11日の室内上下温度分布
(自然換気なし)

図 4-50 8月14日の室内上下温度分布
(自然換気あり)

これらにより以下のことがわかる。

1) 自然換気の有無に関わらず、室内上下温度分布は共に強い温度成層分布となっており、床上 11m から急激な温度上昇が見られる。この室内上層部の高温空気は天井における照明器具の発熱に起因し、浮力換気の駆動力の増大に役立つ。

2)自然換気無しの場合には、南・北換気窓が閉められたため、床上 12.45m の空気温度が 1 日中徐々に 41.7 まで上昇した。これに対して、自然換気有りの場合には、上部の換気窓から外気が流入し、上層部の高温空気が流出したことで、床上 12.45m 空気温度の最大値が 40.4 であり、自然換気をしない場合より 1.3 低くなった。

3)10:00 ~ 12:00 の時間帯には、自然換気の有無に関わらず居住域の平均空気温度がほぼ 31.9 であり、これに対して 12:00 以後の測定時間帯には、自然換気有りの場合に居住域の平均空気温度が 33.1 であり、自然換気無しの場合の 32.7 より 0.4 高い。その原因は、8 月 14 日 12:00 以後の室外風速(図 4-48 を参照)が 3.3m/s 以上となり、北側換気窓から室内に流入する自然換気量は 21,000m³/h 以上となるため、床上 11m までの室内空気が温度完全混合状態となったからである。

4.5.3 各開口の自然換気量及び気流方向

8 月 14 日(自然換気有り)の南・北換気窓付近の空気温度及び各開口の自然換気量の測定結果をそれぞれ図 4-51、図 4-52 に示す。

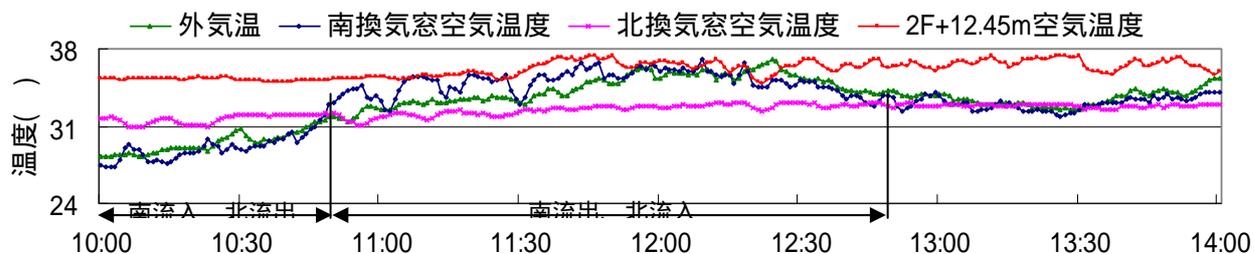


図 4-51 外気温、南・北換気窓空気温度及び 2F+12.45m 空気温度の時間変化(8/14, 自然換気)

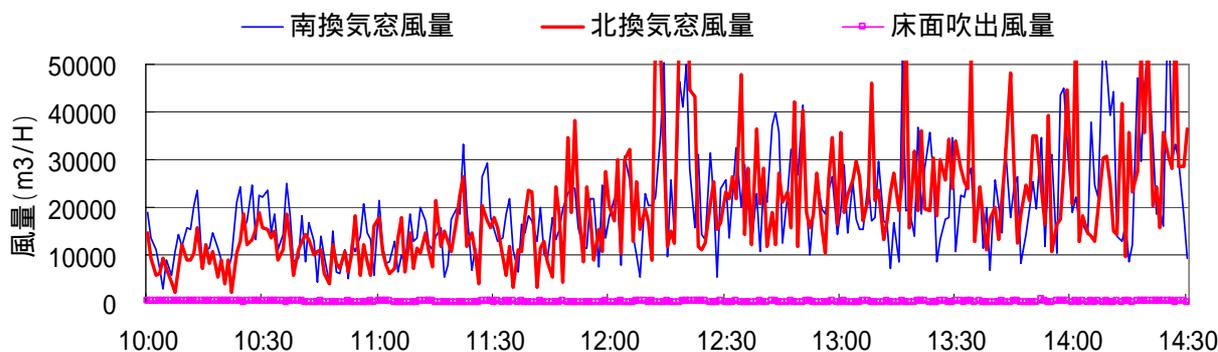


図 4-52 各開口の自然換気量の時間変化(8 月 14 日, 自然換気)

これらにより、以下のことがわかる。

1)計測期間中に上層部の空気温度が殆ど外気温より高いため、南・北換気窓の空気温度を比較することで気流方向がわかる。図 4-51 を見ると、10:00 ~ 10:48 の時間帯には南換気窓の空気温度が北換気窓より低いため、外気は南換気窓から流入し、室内上層部の高温空気が北換気窓より流出することがわかる。これに対して 10:49 ~ 12:44 の時間帯には自然換気の気流方向が逆転した。また、12:45 ~ 14:30 の時間帯には、気流方向が頻繁に変化した。

2)10:00 ~ 10:48 の時間帯の南側換気窓の流入風量と北側換気窓の流出風量の平均値は、

それぞれ 13,740、-10,453m³/h であり、10:49~14:00 の時間帯の南側換気窓の平均流出風量 (-19,704m³/h)と北側換気窓の平均流入風量(21,100m³/h)の 70%、50%しかなかった。これは 10:00~10:48 の時間帯の室外風速が 1.8m/s 以下であり、その後の時間帯の室外風速(3.3 m/s 以上)より小さかったからである。

3)一方、両時間帯の床面開口の平均吹出風量はそれぞれ 306、169 m/s であり、室外風速との相関性が見られない。その原因は、両時間帯の平均外気温はそれぞれ 29.5、34.1 であり、10:00~10:48 の時間帯の浮力換気の駆動力がその後の時間帯の浮力換気駆動力より大きいからである。但し、両時間帯の床面開口の平均吹出風量はそれぞれ屋内運動場への流入風量の平均値の 2.2%、0.8%しかない。そのため、床面開口から室内への供給冷熱量が室内温熱環境に及ぼす影響は非常に小さいと考えられる。

4.5.4 室内各所風速の確認

室内各所の風速を測定することが困難であるため、夏期の室内各所の風速が許容値の 0.2m/s 以下であるかどうかを検証するには、CFD 解析結果より確認することとする。図 4-53 に、2008 年 8 月 14 日 11:29 の東西中央断面の風速分布を示す。これにより、室内各所の風速は、0.2m/s 以下であることがわかる。

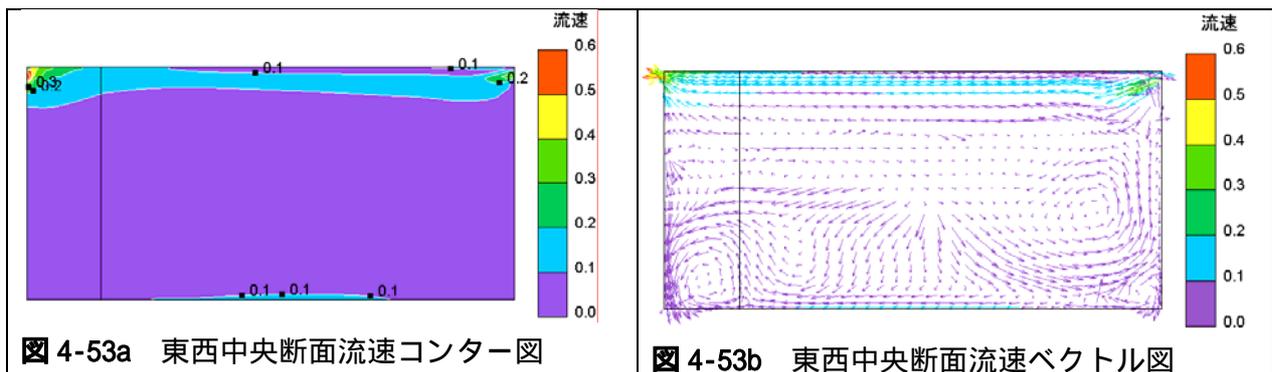


図 4-53a 東西中央断面流速コンター図

図 4-53b 東西中央断面流速ベクトル図

4.5.5 アースチューブの省エネルギー効果の検証

8 月 14 日(自然換気)の外気温度、外気導入経路における各測定点の空気温度及び床面開口吹出温度の時間変化を図 4-54 に示す。測定期間内の導入外気経路における各測定点の平均空気温度及び各区間の獲得/損失顕熱量を図 4-55 に示す。計測時間帯における外気導入経路の各測定点の平均空気温度及び各区間の空気流量を用いて、式(5-1)により算出した導入外気が外気導入経路の各区间で獲得/損失した顕熱冷熱量を表 4-14 に示す。これにより以下のことが分かる。

1)測定期間内、外気温が 28.3~37.1 の範囲内で大きく変化していたが、屋外アースチューブ入口の空気温度が平均 26.5 であり、その変化幅は 0.9 でほとんど変わらない。このことは、前述した床面開口からの導入外気量が非常に小さいため、この僅かの空気流量に対して外気導入経路区間 (屋外給気塔)が十分大きな冷却能力を持っていることを示している。

2)屋外アースチューブ入口空気温度と南側縦シャフト入口空気温度と比べて、導入外気が

外気導入経路区間 より更に平均 1.9 冷却される。

3)外気導入経路区間 については、10:00～11:51の測定期間帯に、北側縦シャフト入口の空気温度が南側縦シャフト入口空気温度より平均 0.8 低い。しかし、11:52以後、前者が後者より高くなり、且つ前者の時間変化は外気温との相関性が見られる。その原因は、屋外地下ピットはメンテナンスのための入口などの隙間から外気が侵入していたからである。

4)測定期間中に屋内運動場の床面温度が平均 32.5 という高い温度を維持しており、また床材が断熱性の弱い木材であることから、2F床下空間の空気温度がかなり高いことが容易に推測される。屋外給気塔・アースチューブ及び1階床下ピットにより冷却された導入外気は、外気導入経路区間 を通過したことで逆に加熱され、その結果、測定期間帯の南・北側床開口の平均吹出温度は、それぞれ 31.5、31.2 となり、南・北縦シャフト入口の平均空気温度より 6.9、6.5 高くなった。

5)表4-14により、導入外気が区間 からそれぞれ 3.8、1.4kWの冷熱量を獲得したが、区間 ～ により逆に加熱されたため、南北床面開口までにそれぞれ 0.1、2.6、1.7kWの冷熱量を損失した。その結果、対象システムの外気導入経路が獲得したトータル顕熱冷熱量は 0.8kWしかない。

$$Q_k = c_p \cdot \gamma_{\lambda} \cdot (\theta_{出} - \theta_{\lambda}) \cdot G / 3.6 \quad (5-1)$$

Q_k : 1F床下ピットの顕熱獲得熱量 [kW] c_p : 空気の定圧比熱 [J/(kg·K)]
 γ_{λ} : 1F床下ピット入口の空気密度 [kg/m³] θ_{λ} : 1F床下ピット入口の空気温度 []
 $\theta_{出}$: 1F床下ピット出口空の気温度 [] G : 1F床下ピットの通過風量 [m³/h]

表 4-14 外気導入経路各区間の獲得/損失顕熱冷熱量

外気導入経路区間						合計
獲得顕熱冷熱量[kW]	3.8	1.4	-0.1	-2.6	-1.7	0.8

注：「 - 」は導入外気が損失した顕熱冷熱量を意味する。

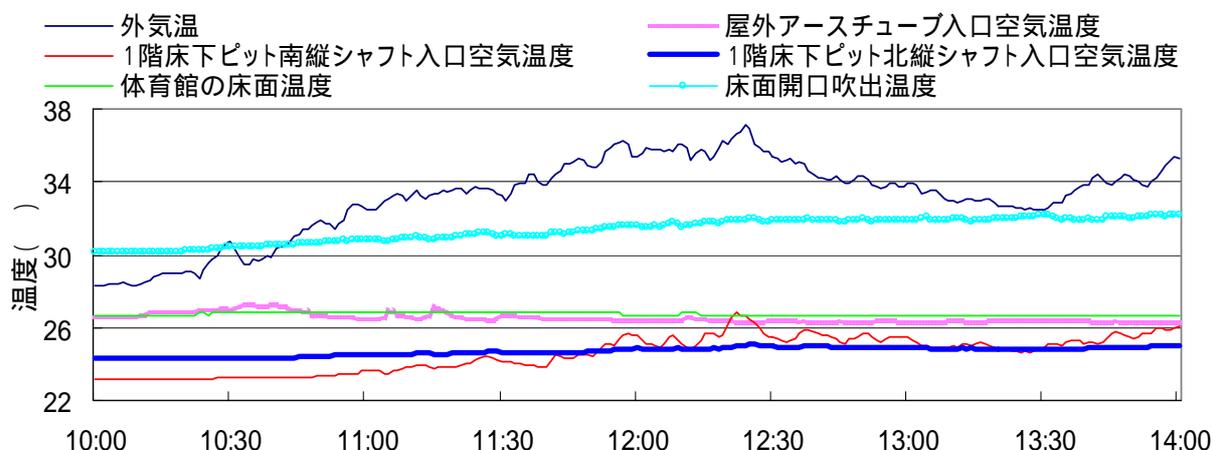


図 4-54 外気温・外気導入経路における各測定点の空気温度及び 2F 床面温度の時間変化 (8月14日, 自然換気)

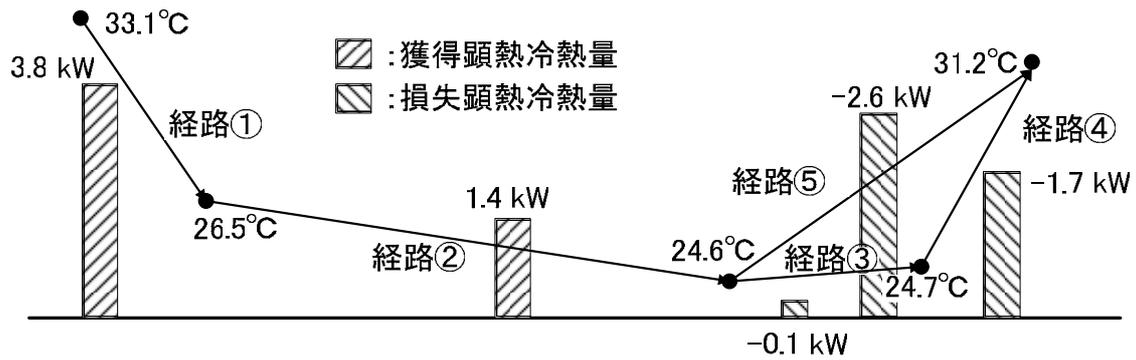


図 4-55 導入外気経路における各測定点の空気温度及び導入外気が各区間で獲得/損失した顕熱冷熱量

4.6 強制排気ファン施工ミスの影響

8月11日に強制排気運転状態(表 4-1 CASE-5)の測定を行う際に、体育館の東ドアを開けると、室内の空気が著しく館内から館外へ流れていることを発見した。このことは体育館内が正圧状態にあり、本来負圧であるはずの強制排気時の室内圧力と正反対であることを示している。その原因は、排気ファンは三相配線の施工ミスで実際には逆回転して室内へ給気していることからである。このことは施工後の引渡し後段階の性能検証の必要性を再び立証している。そのため、8月13日の午後16:30に電気スタッフより三相配線を直してから、再び強制排気運転状態(表 4-1 CASE-6)を実測した。ここでは、強制排気ファンの施工ミスが床面開口の吹出風量及び室内上下温度分布に及ぼす影響を考察する。



写真 4-11 強制排気ファンの設置位置



写真 4-12 電気制御盤

(1)CASE-5 と CASE-6 の実測結果の比較・考察

CASE-5(強制排気ファン施工ミス)と CASE-6(正常)の外気温(T20)および室内上下温度(T1-T8)の測定値をそれぞれ図 4-56 と図 4-57 に示す。CASE-5 と CASE-6 の外気温(T20)、2F+0.1 mの空気温度(T1)、アースチューブ入口の空気温度(T17)、床下ピットの南・北出口の空気温度(T18,T19)及び南・北床面開口の吹出温度の測定値をそれぞれ図 4-58、図 4-59 に示す。以下に、2つのケースの実測結果により、強制排気ファンの施工ミスが床面開口吹出風量および室内温熱環境に及ぼす影響を考察する。

1)室内上下温度分布

CASE-5(強制排気ファン施工ミス)の測定期間の平均外気温が 35.5 であり、CASE-6 の 30.8 より 4.7 高いのに、強制排気ファンが施工ミスで給気ファンとなったため、室内上部に温度の低い外気が導入され、CASE-5 の上部空間(T7、2F+12m)の測定期間の平均空気温度が 28.6 となり、CASE-6 の 31.5 より 2.9 低下した。また、居住域の空気温度 T1(1F+0.1m)、T2(1F+1.5m)について、CASE-5 の場合には、室内圧力が正圧となっており、隙間風が室内から室外へ流れていたため、居住域の両測定点の空気温度がそれぞれ 32.8 、33.3 であり、時間変化もほとんどなかった。これに対して、CASE-6 の場合には、室内圧力が負圧となっており、室下部の北扉の隙間から隙間風が室内に侵入したため、居住域の両測定点の空気温度が外気温の低下に従って 32.8 、33 から徐々に 31.6 、31.8 まで約 2.2 低下した。

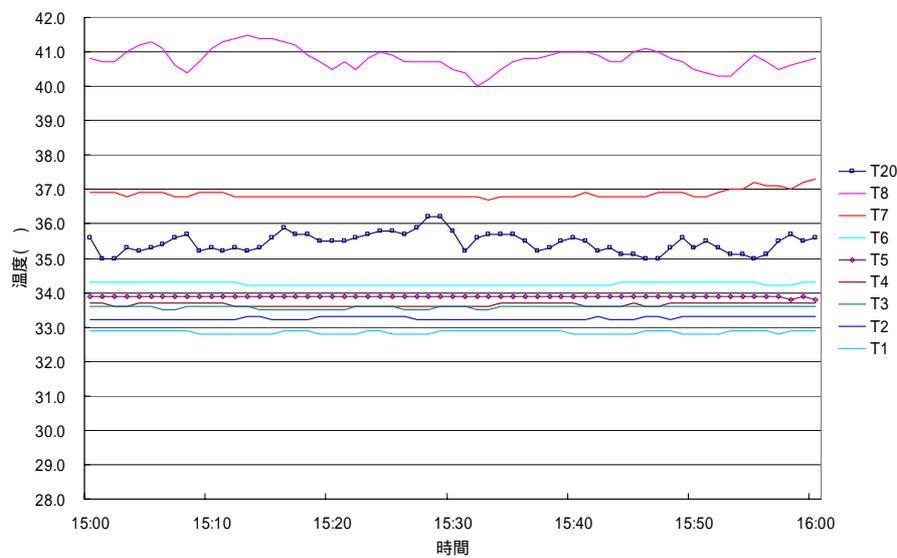


図 4-56 CASE-5 の外気温(T20)・室内上下温度(T1-T8)

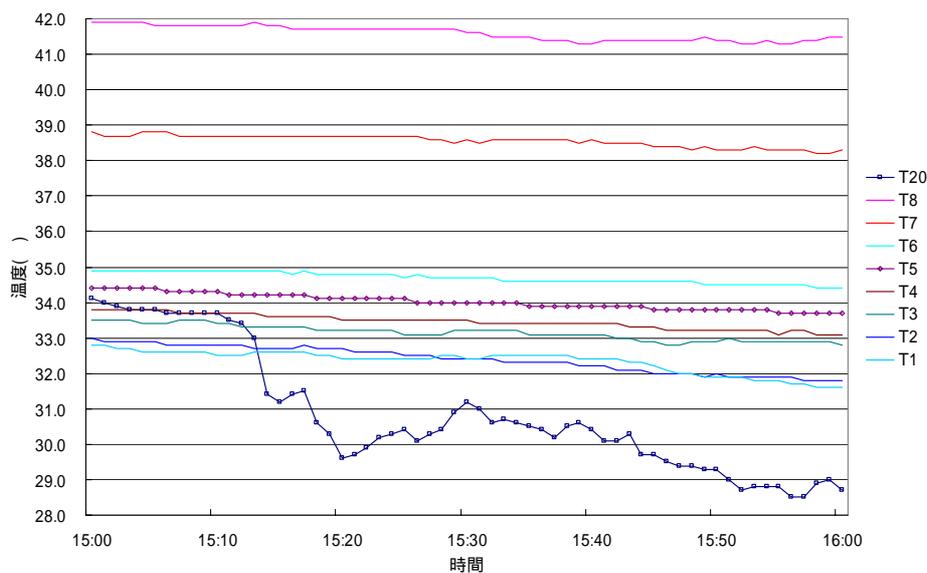


図 4-57 CASE-6 の外気温(T20)・室内上下温度(T1-T8)

2)アースチューブ入口空気温度(T17)

外気温(T20)とアースチューブ入口の空気温度(T17)との差については、8月11日の平均外気温の35.5に対して、最大4.5、最小3.2、平均3.9低下しており、8月13日の場合には、平均外気温の30.8に対して最大3.2、最小1.0、平均2.2低下した。つまり、両CASEの導入外気は、高さ4mの屋外給気塔を通過しただけでそれぞれ平均3.9、2.2冷却されている。両CASEの屋外冷却塔の冷却効果による導入外気の温度降下の度合いは、外気温の違いより変化し、外気温が高くなるほどアースチューブ入口の空気温度降下の度合いが大きくなる。

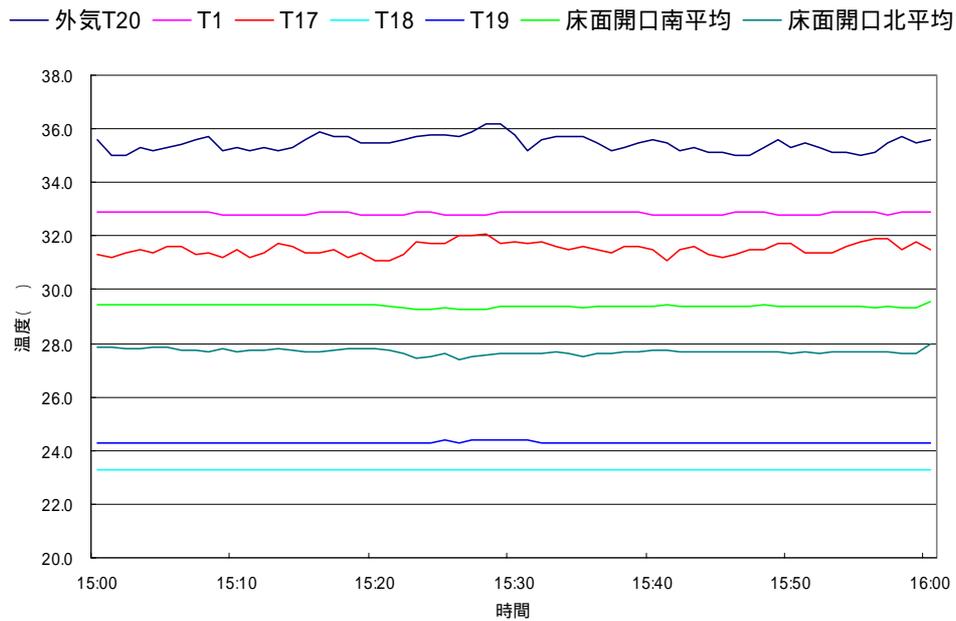


図 4-58 CASE-5 の外気温・チューブ入口・床下ピットの南/北出口の空気温度・床面吹出温度

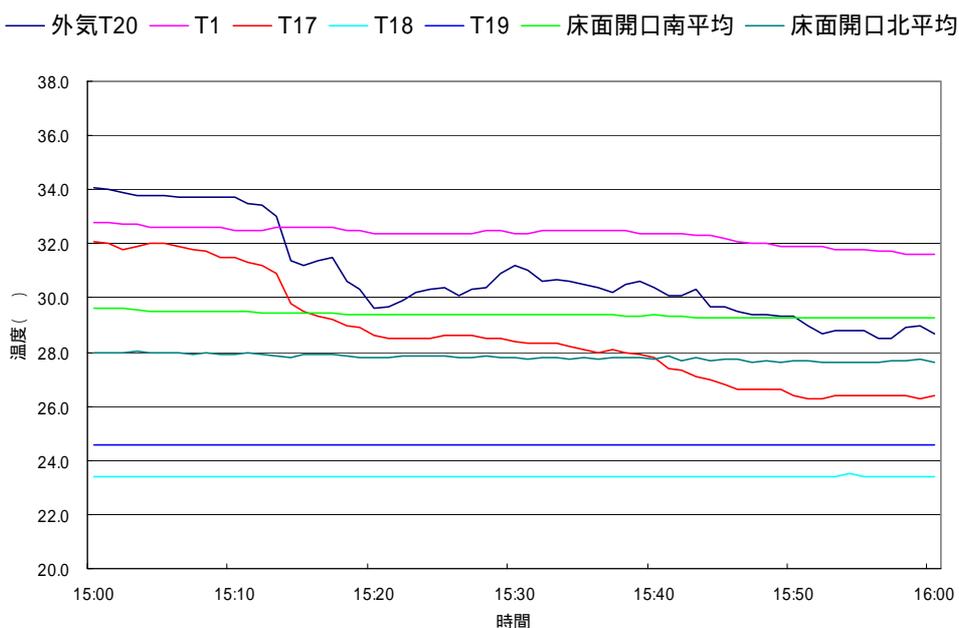


図 4-59 CASE-6 の外気温・チューブ入口・床下ピットの南/北出口の空気温度・床面吹出温度

3)床下ピットの南・北出口空気温度(T18、T19)

測定期間内の床下ピットの南・北出口空気温度の平均値は、CASE-5 の場合にはそれぞれ 23.3 、 24.3 であり、CASE-6 の場合にはそれぞれ 23.4 、 24.6 であり、両 CASE の床下ピットの南・北出口空気温度がそれぞれほぼ同じであり、北側床下ピット出口の空気温度よりも南側のほうが約 1.1 低い。このことは、夏期には、対象アースチューブ自然換気システムの床下ピット出口の空気温度は、外気温の変化に影響されず、外気導入経路の熱交換能力が充分大きいことを示している。

4)南・北床面開口の吹出温度

測定期間内の南・北床面開口の吹出温度の平均値は、CASE-5 の場合にそれぞれ 29.4 、 27.7 、CASE-6 の場合にそれぞれ 29.4 、 27.8 で両日の南・北床面開口の吹出温度がほぼ同じである。そこで、以下のことが推定される。

- 1)強制排気ファンが給気運転となっても、南・北床面開口の吹出温度に影響を及ぼさない。
- 2)夏期には、対象アースチューブ自然換気システムの床面開口の吹出温度は、南側のほうが 29.4 であり、北側の 27.7 より約 1.7 高い。

南・北床面開口の吹出温度を床下ピットの南・北出口空気温度と比較すると、南・北床面開口の吹出温度が床下ピットの南・北出口空気温度より、それぞれ 6.0 、 3.5 高い。北床面開口の吹出温度の上昇の原因は、導入外気が 1F と 2F の間の約 4m の断熱施工無しの屋外縦シャフトを通過したことで加熱されたからである。しかし、導入外気が南側の室内縦シャフトを通過しただけで、その温度が 6.0 上昇することが考えられなく、その原因は、南側室内縦シャフトからの導入外気が 2F 床下空間を通過し、その温度が温度の高い床面によって加熱されたと推定される。

5)床面開口吹出風量の比較

両 CASE の床面開口の吹出風量の測定値を図 4-60 に示す。これにより、CASE-5(排気ファン施工ミス)の場合には、排気ファンが給気ファンとなっているため、床面開口が室内の正圧に押さえられ、測定期間内の平均吹出風量は 1,167 m³/h となり、CASE-6 の正常状態の 2,488 m³/h の 46.9% しかない。また、両 CASE の床面開口の吹出風量がそれぞれ 2 台の給気ファンの定格給気風量(7,200 m³/h)の 16.2%、34.6% しかない。つまり、給気風量の 83.8%(CASE-F1)、65.4%(CASE-F2)が 1F 床下ピットの間隙から漏れてしまった。更に、強制換気時に建物の隙間風は 8,712m³/h であり、2 台の排気ファンの定格風量(11,200m³/h)の 77.8% となっている。

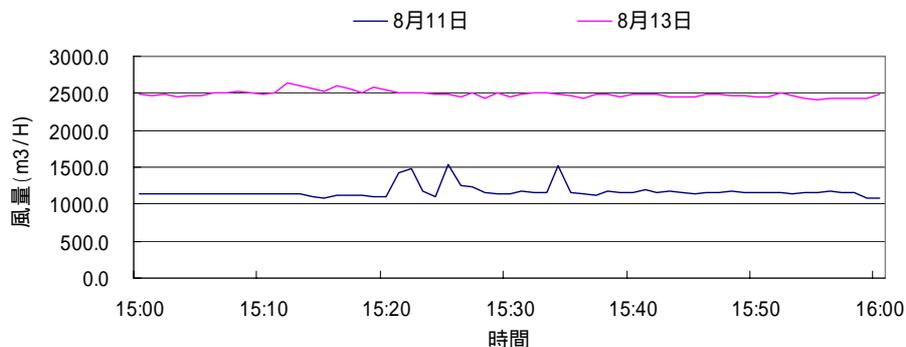


図 4-60 両 CASE の床面開口の吹出風量の時間変化の比較

6)排気ファンの施工ミスが1F床下ピットの顕熱除去熱量に及ぼす影響

両 CASE の屋外アースチューブ入口空気温度、1F 床下ピットの南・北出口温度及び床面開口の吹出風量より算出した屋外アースチューブ入口から 1F 床下ピットの南・北出口までの顕熱除去熱量の時間変化を図 4-61 に示す。これにより、CASE-5 の顕熱除去熱量は約 3.1 kW で、ほぼ変化しないことがわかる。これに対して、CASE-6 の顕熱除去熱量は、最大値の 7.2 kW から徐々に減少し、測定終了時(15:59)に最小値の 2.1 kW となった。両 CASE の顕熱除去熱量の時間変化の差異の原因は、以下の 2 つが考えられる。

両日の外気温が異なる。CASE-F1 の外気温が 35.0 ~ 36.2 でありほとんど変化しないのに対して、CASE-F2 の場合には、外気温が 32.1 から 28.3 まで徐々に低下した。

両 CASE の測定開始から 10 分後までの時間帯の顕熱除去熱量の違いは、両 CASE の床面開口の吹出風量が異なる。

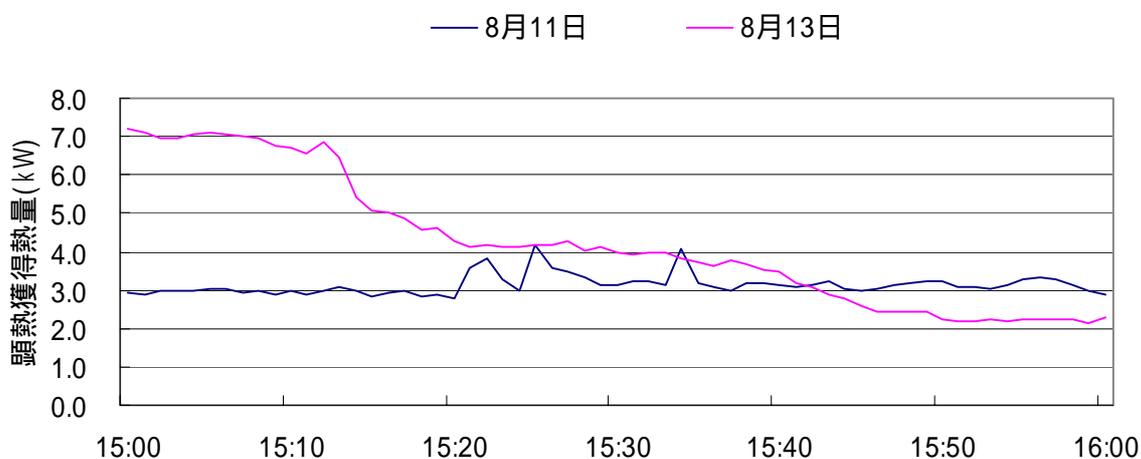


図 4-61 両 CASE のアースチューブ入口から 1F 床下ピットの南・北出口までの顕熱除去熱量の比較

4.7 CFD 連成解析による各種外気条件でのシステム性能の予測検証

冬期と夏期の実測の際に、設計外気温で無風状態の測定ができなかったため、シミュレーションにより対象システムの各種外気条件でのシステム性能を予測検証する必要があった。

冬期、夏期および中間期の設計外気温かつ無風時の CFD 連成解析(CASE-a、CASE-b、CASE-c)では、屋外給気塔及び建物外皮の隙間から流入する空気温度をそれぞれ設計外気温の-1.2、34.9、27.8 とし、各床面開口の吹出温度はユンの開発したツールを用いて計算した。

表 4-15 ~ 16 に吹出風量の変化により床面開口の吹出温度の実測値と計算値の比較を示す。

表 4-15 冬期の床面開口吹出温度の計算結果

床面開口の吹出風量 [m ³ /h]	外気温度[]	床面開口の出口温度の実測値[]	床面開口の出口温度の計算値[]
500	-1.2	5.8	5.5
1000	-1.2	5.9	6.1
1500	-1.2	6.2	6.3
2000	-1.2	6.4	6.5

表 4-16 夏期の床面開口吹出温度の計算結果

床面開口の吹出風量 [m ³ /h]	外気温度 []	床面開口の出口温度 の実測値[]	床面開口の出口温度 の計算値[]
50	34.9	30.5	30.0
100	34.9	30.9	30.4
150	34.9	31.2	31.0
200	34.9	31.7	31.2

表 4-17 中間期の床面開口吹出温度の計算結果

床面開口の吹出風量 [m ³ /h]	外気温度[]	床面開口の出口温度 の計算値[]
200	27.8	26.0
400	27.8	26.3
600	27.8	26.5

これらにより、冬期と夏期の計算値は実測値と良く一致していることがわかる。そこで、CFD 連成解析により夏期と冬期の設計外気温かつ無風状態のシステム性能を予測する際に、床面開口の吹出温度の予測値をアースチューブの熱交換解析ツールに入力して、床面開口の吹出温度を算出し、これを室内上下温度分布を考慮した自然換気解析および CFD 解析の入力とした。なお、中間期の設計外気温で無風時の CFD 連成解析(CASE-c)では、外気温を設計値の 27.8 とし、各床面開口の吹出温度を表 4-17 に示す計算値を用いた。

4.7.1 自然換気量の予測

各ケースの各自然換気開口の自然換気量及び室内上下温度分布の解析結果を表 4-18、表 4-19 及び図 4-62 に示す。これらにより、以下のことがわかる。

(1)冬期の設計外気温かつ無風時

表 4-19 及び図 4-62 により、冬期の設計外気温かつ無風の場合には、床上 1.5m の居住域の空気温度が 6 であることがわかる。また、表 4-18 を見ると、床面開口及び建物外皮の隙間からそれぞれ 1,599.4 m³/h、3,384.3 m³/h の外気量が流入し、南・北換気窓からそれぞれ -1,652.4、-3,331.2 m³/h の風量が流出する。この自然換気量は在室者数が 40 人場合に必要な自然換気量に満足できる。但し、在室者数が 600 人の場合に必要な自然換気量(12,000m³/h)には満足できないため、強制換気を行う必要がある。

(2)夏期の設計外気温かつ無風時

表 4-19 及び図 4-62 により、夏期の設計外気温かつ無風の場合には、床上 1.5m の居住域の空気温度が 34.1 であることがわかる。また、表 4-18 により、床面開口及び建物外皮の隙間からそれぞれ 101.8 m³/h、609 m³/h の外気量が流入し、南・北換気窓からそれぞれ -227.2、-488.6 m³/h の風量が流出する。この自然換気量は在室者数が 40 人場合に必要な自然換気量に満足できない。よって、必要な自然換気量を得るために、強制換気を行う必要がある。

(3)中間期の設計外気温かつ無風時

表 4-19 及び図 4-66 により、中間期の設計外気温かつ無風の場合には、床上 1.5m の居住

域の空気温度が 28.1 であることがわかる。また、表 4-18 を見ると、床面開口及び建物外皮の隙間からそれぞれ 428 m³/h、736 m³/h の外気量が流入し、南・北換気窓からそれぞれ -383、-781 m³/h の風量が流出する。この自然換気量は在室者数が 40 人の場合に必要な自然換気量に満足できるが、在室者数が 600 人の場合に必要な自然換気量に満足できない。中間期の外気温は 27.8 以下であるため、在室者数が 600 人であれば、強制換気を行わないで屋内運動場の 1F の北側外扉を開けて換気を行ったほうがよい。

表 4-18 各季節の設計外気温かつ無風時の各開口の自然換気量の予測値

	CASE-3	CASE-4	CASE-5
南換気窓流入/出風量 [CMH]	-1652.4	-227.2	-382.6
南換気窓流入/出空気温度 []	8.9	53.0	40.4
北換気窓(or ファン)流入/出風量 [CMH]	-3331.2	-488.6	-781
北換気窓(or ファン)流入/出温度 []	7.7	54.1	41.2
東扉隙間風量 [CMH]	1,027.4	115.7	188
北外扉・窓隙間流入/出風量 [CMH]	2,356.8	493.3	548
隙間風合計値 [CMH]	3,384.3	609.0	736
床面開口の吹出風量の合計 [CMH]	1,599.4	101.8	428

注) : [-]は室外に流出することを示す。

表 4-19 各季節の設計外気温かつ無風時の室内上下温度分布の予測値 単位[]

	FL+0.1m	FL+1.5m	FL+4m	FL+6m	FL+9m	FL+11m	FL+12m	FL+12.45m
CASE-3	5.7	6.0	6.2	6.4	6.5	6.7	7.0	16.7
CASE-4	33.8	34.1	34.2	34.2	35.4	37.8	42.1	68.7
CASE-5	27.9	28.1	28.1	28.2	28.6	29.7	32.6	57.5

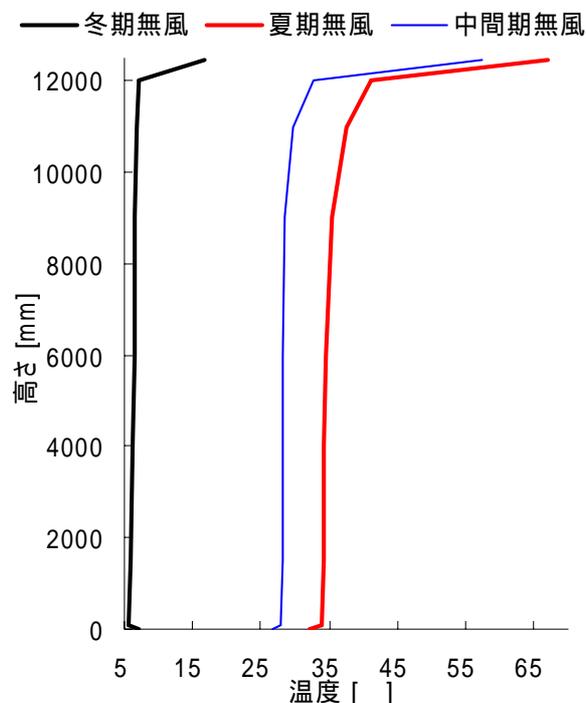
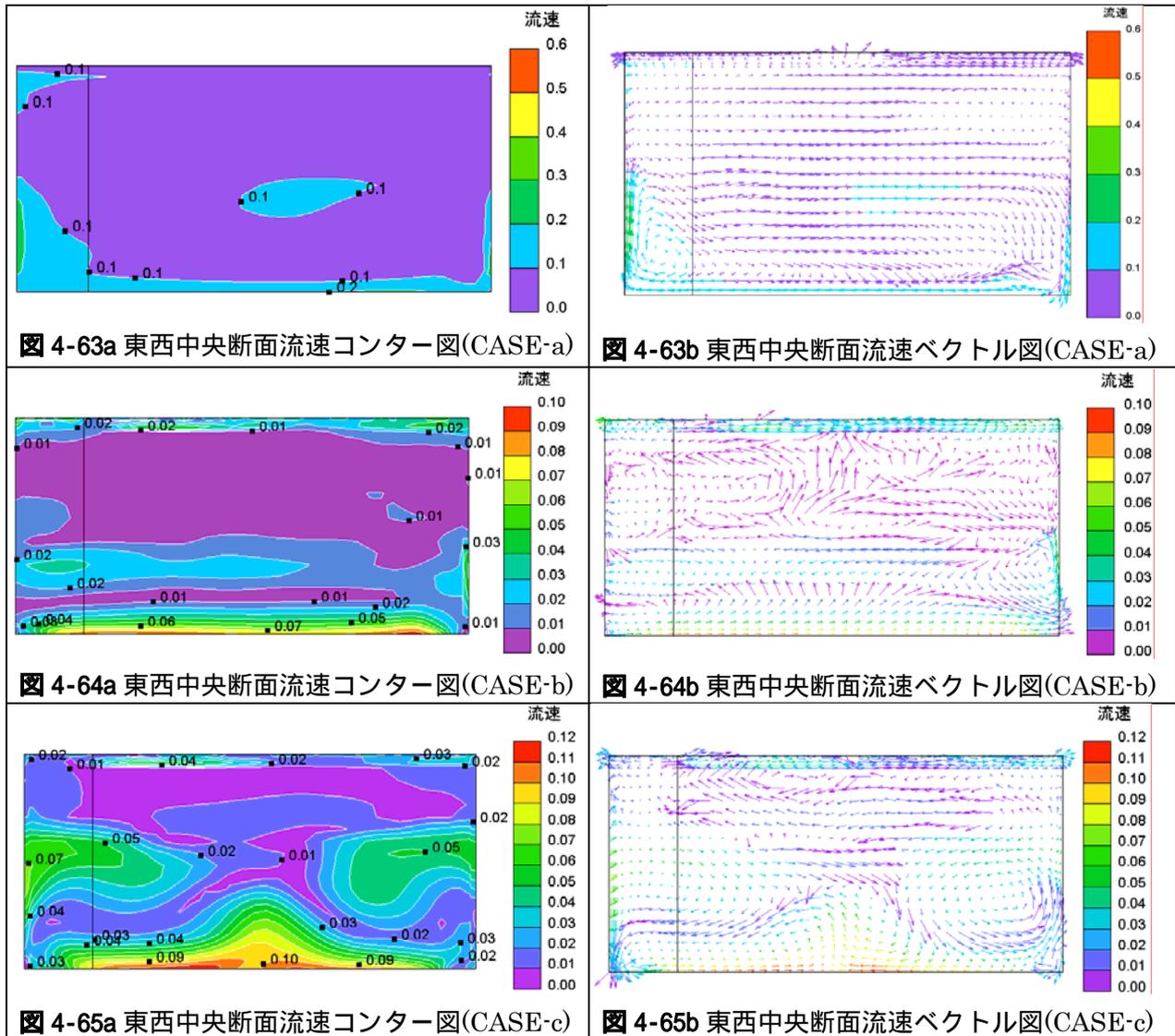


図 4-62 夏期・中間期無風時の上下温度分布

4.7.2 室内各所風速の確認

室内各所の風速を測定することが困難であるため、各ケースの室内各所の風速が 0.5m/s 以下であるかどうかを検証するには、各ケースの CFD 解析結果より確認することとする。図 4-63～図 4-65 に、各ケースの東西中央断面の風速分布を示す。これらにより、各ケースの室内各所の風速は、0.5m/s 以下であることが確認できる。



4.8 まとめ

本章では、竣工した某小学校屋内運動場のアースチューブ併用自然換気システムに対して、引渡し後段階の冬期と夏期に実測を行うことにより、室内の気流・温熱環境、自然換気量及び省エネルギー性などのシステム性能を検証した。また、夏期の実測の際に、強制排気ファンが三相配線の施工ミスで強制給気ファンとなっていたことがわかった。強制排気ファンの施工ミスが強制換気量に与える影響を明らかにするために、2 ケースの実測結果を比較検証した。また、冬期実測によって明らかになった設計・施工不具合に対する解決案の是正効果を予測検証するためには、開発した CFD 連成解析法を利用した。更に、各季節の設計外気温かつ無風時の自然換気量と室内上下温度分布の予測検証を行うために、CFD 連成解析法を用いた。以下、引渡し後段階の実測と CFD 連成解析により得た知見をまとめる。

(1) 室内上下温度分布と居住域温度

室内上下温度分布は、F L+11m以上の空間の空気温度が急激に上昇し、それ以下の空間の空気温度はほぼ一定で、強い温度成層分布となっている。F L+11m以上の高温空気は、照明発熱に起因しており、この高温空気は浮力換気の駆動力を増大させる効果がある。

自然換気の場合には、上部の換気窓から外気が流入し、上層部の高温空気が流出したことで、南・北換気窓が閉められた自然換気を行わない場合と比べて、上層部の空気温度がより低くなっている。

外部風速が高い場合、換気窓より屋内運動場内への流入風量が多く、換気窓の高さから居住域までの室内空気が完全混合状態となり、居住域温度が自然換気をしない場合より高くなる。

(2) 各自然換気開口の自然換気量

室外風速と風向が各開口の自然換気量と換気気流の流れ方向に大きな影響を与える。特に、冬期実測結果により、室外風向によって床面開口からの自然換気量は最大値の $1,800\text{m}^3/\text{h}$ から約 10% の $200\text{m}^3/\text{h}$ まで低減することがある。

南・北換気窓の開口部の風向は室外風向によって変化し、その風量は室外風速、即ち開口部の風圧に影響される。

風があって風向が換気窓正面との角度がそれほど小さくない場合には、換気窓からの自然換気量は風力換気に寄与する。

(3) アースチューブの省エネ効果と室内温熱環境に及ぼす影響

a. 冬期の場合、自然換気量が比較的に大きな 2 月 4 日 16 : 59 の実測データにより算出したアースチューブからの顕熱加熱量は $1,827\text{W}$ しかなく、これにより室内温度が 0.18 しか上昇できない。

b. 夏期の場合、床面開口からの導入外気の温度が居住域の空気温度より低いが、床面開口からの外気導入量が少ないため、また外気導入経路における隙間から外気の侵入及び断熱施工無しの縦シャフトと 2F 床下空間の冷熱損失が存在するため、導入外気が獲得した冷熱量

が 0.8kW しかない。

以上により、測定時の外気条件では導入外気が屋内運動場内の温熱環境に大きな影響を与えないことがわかる。

(4)CFD 連成解析による設計不具合の二つの解決策の効果予測

冬期実測の結果により、南・北床面開口の吹出温度差は最大 4.2 もあると言った設計不具合を発見した。北側床面開口の吹出温度の低い原因は、アースチューブ内の気流が建物内部の 1F 床下ピットを通した後、一部が建物外部の床下ピット(駐車場のため床下断熱施工が無い部分)及び屋外駐車場における縦シャフト(断熱無い)を経過してから屋内運動場の北側床面開口から室内に吹出すからである。この問題点の改善策として、a)建物外部の床下ピットの上及び屋外駐車場における縦シャフトを断熱すること、b)北側床面開口を閉めること、という 2 つの異なる運用方法を考えた。そして、CFD 連成解析によりこの 2 つの改善策を採用する場合のシミュレーションを行った。その結果、冬期には 2 つの改善策の室内居住域の空気温度に及ぼす影響は、0.1 ~0.2 しか上昇しないので、現状のままで運用してもよいと査定した。

(5)強制排気ファンの設計ミスが発見

夏期の実測により、強制排気ファンが三相配線の施工ミスで強制給気となったことを発見した。強制排気ファンの施工ミスの場合と施工ミス修復後の実測値により、ミスある場合の床面開口からの自然換気量が施工ミス修復後の 50% しかないことがわかった。このことは、施工後の引渡し後段階の性能検証の必要性を示した。

(6)開発した自然換気解析と CFD の連成解析ツールを用いて冬期、夏期および中間期の設計外気温かつ無風状態時の自然換気量を予測検証した。冬期の場合、床面開口および建物外皮の隙間からの自然換気量の合計値は 4,983m³/h であり、在室者数が 40 人の場合に必要な自然換気量(800m³/h)は満たされるが、在室者数が 600 人の場合に必要な自然換気量(12,000m³/h)は満たされないため強制換気を行う必要がある。これに対して夏期には、床面開口および建物外皮の隙間からの自然換気量の合計値は 711m³/h であり、在室者数が 40 人の場合にも必要な自然換気量が満たされないため、強制換気を行う必要がある。中間期には、床面開口および建物外皮の隙間からの自然換気量の合計値は 1,164m³/h であり、在室者数が 40 人の場合に必要な自然換気量(800m³/h)に満たされるが、在室者数が 600 人の場合に必要な自然換気量(12,000m³/h)は満たされない。また、中間期の外気温は 27.8 以下であるため、在室者数が 600 人であれば、強制換気を行わないで屋内運動場の 1F の北側外扉を開けて換気を行うほうがよいと考えられる。

第 1 部のまとめ

第 1 部は実測及び自然換気解析と CFD の連成解析によるアースチューブ併用自然換気システム性能の予測と検証に関する研究であり、4 章から成る。

1 章は序説であり、アースチューブ併用自然換気システムについて、自然換気解析とアースチューブの熱交換解析の既往研究の成果を整理し、本研究の目的、位置づけ及び第 1 部の論文構成について述べている。

2 章では、本研究で提案するアースチューブの熱交換解析、室内の上下温度分布を考慮した自然換気及び CFD による室内温度分布の予測の三つを連成する解析法について述べたうえ、特に自然換気の CFD 連成解析部分について詳細に述べている。

3 章では、企画フェーズにおいて、自然換気解析と CFD の連成解析法を応用して某体育館のアースチューブ併用自然換気システムに対して性能検証を行い、以下の知見を得た。

(1) 体育館の風上側開口に正面から風が吹くときには、アースチューブからの換気量より風力換気が圧倒的に大きいため、アースチューブからの自然換気は室内温熱環境に大きな影響を与えない。

(2) 無風のときには、自然換気の駆動力は浮力のみとなり、アースチューブの導入は摩擦抵抗の増加により自然換気量の低減をきたすものの、必要な換気量は確保できる。

(3) 床面のアースチューブよりの外気導入開口の風速は 0.5 m/s の許容風速より小さく、卓球など風速制限の厳しい競技にも影響を及ぼさない。

(4) アースチューブの導入により、対象空間の居住域の温熱環境に幾分の改善が得られ、外気条件によっては 7% ~ 36% の負荷低減があり、これによる省エネルギー効果が認められる。

4 章では、運用フェーズにおいて、実測及び自然換気解析と CFD の連成解析法を応用して某体育館のアースチューブ併用自然換気システムに対して性能検証を行い、以下の知見を得た。

(1) 冬期と夏期の室内上下温度分布は共に強い温度成層分布となっており、床上 11m から急

激な温度上昇が見られる。

(2)各季節の自然換気量は在室人数が少なくとも40人の場合の必要自然換気量をほぼ満足できる。

(3)各種の外気条件でのCFD解析結果により室内各所の風速は許容風速0.2 m/s以下である。

(4)アースチューブの導入により、導入外気が予熱/予冷され若干の省エネルギー効果が期待できる。冬期には導入外気への顕熱加熱量が約1.7kWであり、導入外気温度を5.9 上昇させることができる。夏期には導入外気の冷却量が0.8kWであり、導入外気温度を3.0 低下させることができる。

(5)自然換気解析とCFDの連成解析法を用いて計画・設計フェーズでの情報や経験不足に起因する不具合原因を追及し、改修案のシステム性能を予測検証することができることを示した。これにより、本解析手法の運用フェーズでの活用法を明示するとともに、設計フェーズでの活用の重要性を示唆した。

付録 室内上下温度分布の有無の自然換気量と居住域温熱環境に及ぼす影響

第1部では、開発したCFD連成解析法を説明した。一方、一般的な自然換気解析法は、室内発熱量と自然換気による熱収支の熱バランスの計算による平均室温の計算とこれを用いた自然換気解析を繰返し計算して、自然換気量と平均室温を同時に求めている。本付録では、上述の室内熱負荷バランス計算と自然換気解析の繰返し計算より得た平均室温、自然換気量を開発したCFD連成解析より得た室内上下温度分布、自然換気量と比較することで、室内上下温度分布を考慮することの有無が自然換気量の推定値にどのような誤差を生ずるかを検討し、本手法の妥当性を示す。

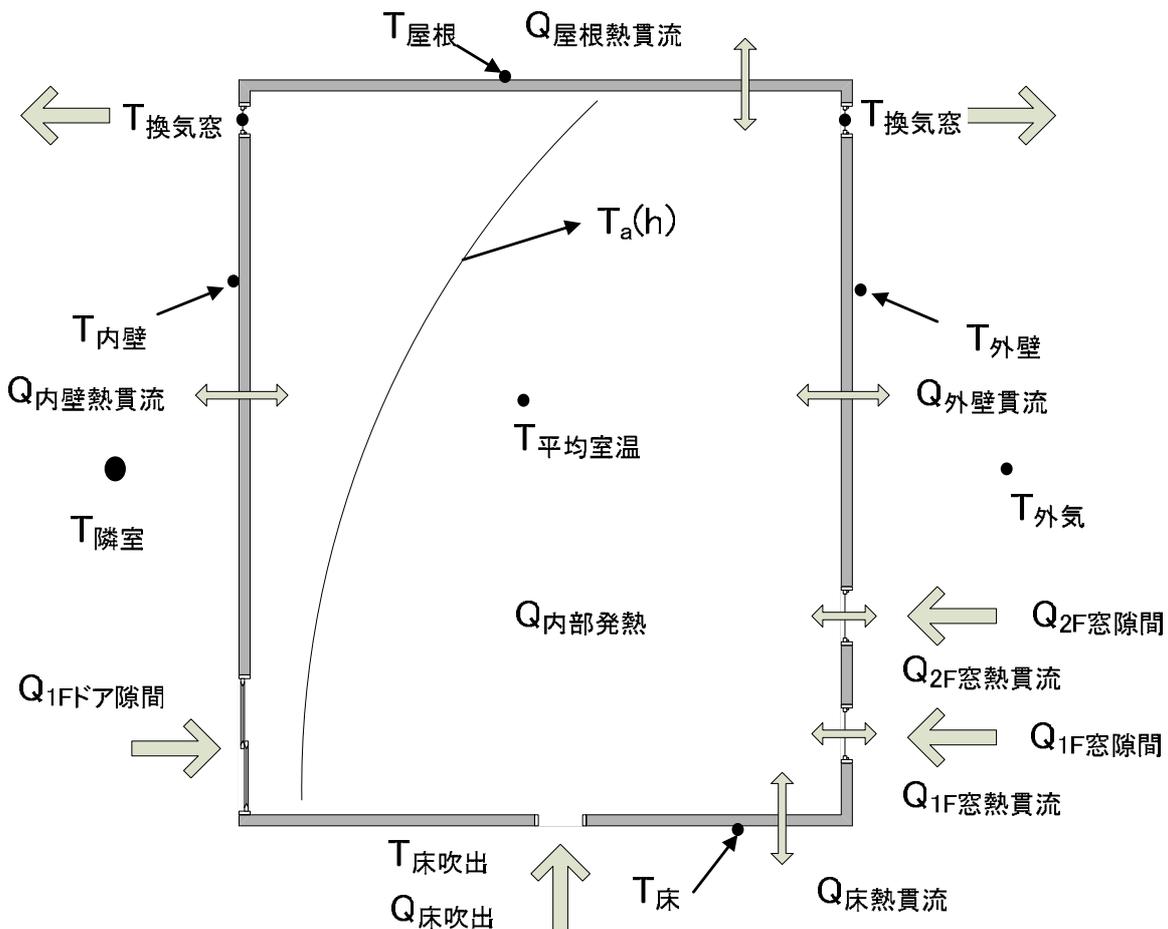
1. 計算方法及び計算ケース

比較検討ケースは、**付表-1**に示す自然換気とCFDの連成解析により冬期・夏期・中間期の設計外気温かつ無風状態の自然換気量を予測検討したケースとする。二種類の自然換気解析法における室内温度の扱いは、以下の通りである。

計算方法a：室内上下温度分布を考慮したCFD連成解析方法。

計算方法b：室内の熱負荷バランス計算により得た平均室温を用いる。

付図-1に各壁面の熱貫流量と自然換気及び隙間風による熱収支の見取り図を示す。計算方法aとbの熱収支計算は同じく、式(1)に示す。



付図-1 各壁面の熱貫流量と自然換気及び隙間風による熱収支の見取り図

(1) 各壁面の熱貫流量と自然換気及び隙間風による熱収支

$$Q_{\text{外壁熱貫流}} + Q_{\text{内壁熱貫流}} + Q_{\text{屋根熱貫流}} + Q_{\text{床熱貫流}} + Q_{1F\text{窓熱貫流}} + Q_{2F\text{窓熱貫流}} \\ + Q_{1F\text{窓隙間}} + Q_{2F\text{窓隙間}} + Q_{1F\text{ドア隙間}} + Q_{\text{床吹出}} + Q_{\text{内部発熱}} = 0 \quad (1)$$

(2) 室内の熱収支バランス計算法

室内発熱量、壁体の貫流熱量ならびに自然換気による除去熱量の熱収支バランス計算による平均室温の計算では、以下に示す計算式(2)～(11)を用いた。

$$Q_{\text{外壁熱貫流}} = K_{\text{外壁}} A_{\text{外壁}} (T_{\text{外壁}} - T_{\text{平均室温}}) \quad (2)$$

$$Q_{\text{内壁熱貫流}} = K_{\text{内壁}} A_{\text{内壁}} (T_{\text{隣室}} - T_{\text{平均室温}}) \quad (3)$$

$$Q_{\text{屋根熱貫流}} = K_{\text{屋根}} A_{\text{屋根}} (T_{\text{屋根}} - T_{\text{平均室温}}) \quad (4)$$

$$Q_{\text{床熱貫流}} = K_{\text{床}} A_{\text{床}} (T_{\text{床}} - T_{\text{平均室温}}) \quad (5)$$

$$Q_{1F\text{窓熱貫流}} = K_{\text{窓}} A_{1F\text{窓}} (T_{\text{外気}} - T_{\text{平均室温}}) \quad (6)$$

$$Q_{2F\text{窓熱貫流}} = K_{\text{窓}} A_{2F\text{窓}} (T_{\text{外気}} - T_{\text{平均室温}}) \quad (7)$$

$$Q_{1F\text{窓隙間}} = 0.29 \times (T_{\text{外気}} - T_{\text{平均室温}}) \times G_{1F\text{窓隙間}} / 0.86 \quad (8)$$

$$Q_{2F\text{窓隙間}} = 0.29 \times (T_{\text{外気}} - T_{\text{平均室温}}) \times G_{2F\text{窓隙間}} / 0.86 \quad (9)$$

$$Q_{1F\text{ドア隙間}} = 0.29 \times (T_{\text{隣室}} - T_{\text{平均室温}}) \times G_{1F\text{ドア隙間}} / 0.86 \quad (10)$$

$$Q_{\text{床吹出}} = 0.29 \times (T_{\text{床吹出}} - T_{\text{平均室温}}) \times G_{\text{床吹出}} / 0.86 \quad (11)$$

ここでは、各壁面内表面の温度を平均室温とする。

(3) 室内上下温度分布を考慮した CFD 連成解析方法

なお、計算方法 b の室内熱負荷バランス計算のための建物外皮の解析条件を付表-2 に、内部発熱量を付表-3 に示す。計算方法 a では、CFD により室内上下温度分布を求めて、これを開発した室内上下温度分布を考慮した自然換気解析ツールにより自然換気量を求めている。CFD 解析用各壁面の熱貫流熱量計算条件(熱貫流率、壁外表面温度)は計算方法 b と同様であるが、壁内表面温度は CFD 解析の成り行き値である。そのため、CFD 解析では各壁面の内表面温度が高さにより異なる。特に天井と床の内表面温度が計算法 a と大きな差異が生じる。計算法 a は以下に示す計算式(12)～(21)を用いた。

$$Q_{\text{外壁熱貫流}} = K_{\text{外壁}} \int_0^h dA_{\text{外壁}} (T_{\text{外気}} - T_a(h)) = K_{\text{外壁}} A_{\text{外壁}} T_{\text{外気}} - K_{\text{外壁}} \int_0^h dA_{\text{外壁}} T_a(h) \quad (12)$$

$$Q_{\text{内壁熱貫流}} = K_{\text{内壁}} \int_0^h dA_{\text{内壁}} (T_{\text{隣室}} - T_a(h)) = K_{\text{内壁}} A_{\text{内壁}} T_{\text{隣室}} - K_{\text{内壁}} \int_0^h dA_{\text{内壁}} T_a(h) \quad (13)$$

$$Q_{\text{屋根熱貫流}} = K_{\text{屋根}} A_{\text{屋根}} (T_{\text{屋根}} - T_{12.5\text{mの室温}}) \quad (14)$$

$$Q_{\text{床熱貫流}} = K_{\text{床}} A_{\text{床}} (T_{\text{床}} - T_{0.1\text{mの室温}}) \quad (15)$$

$$Q_{1F\text{窓熱貫流}} = K_{\text{窓}} A_{1F\text{窓}} (T_{\text{外気}} - T_{1.0\text{mの室温}}) \quad (16)$$

$$Q_{2F\text{窓熱貫流}} = K_{\text{窓}} A_{2F\text{窓}} (T_{\text{外気}} - T_{6.0\text{mの室温}}) \quad (17)$$

$$Q_{1F\text{窓隙間}} = 0.29 \times (T_{\text{外気}} - T_{\text{換気窓}}) \times G_{1F\text{窓隙間}} / 0.86 \quad (18)$$

$$Q_{2F\text{窓隙間}} = 0.29 \times (T_{\text{外気}} - T_{\text{換気窓}}) \times G_{2F\text{窓隙間}} / 0.86 \quad (19)$$

$$Q_{1F\text{ドア隙間}} = 0.29 \times (T_{\text{隣室}} - T_{\text{換気窓}}) \times G_{1F\text{ドア隙間}} / 0.86 \quad (20)$$

$$Q_{\text{床吹出}} = 0.29 \times (T_{\text{床吹出}} - T_{\text{換気窓}}) \times G_{\text{床吹出}} / 0.86 \quad (21)$$

各自然換気開口及び隙間の個数・寸法・開口温度等の計算条件を付表-4に示す。これにより、二種類計算法における各自然換気開口および隙間付近の空気温度は異なることがわかる。

付表-1 比較検討ケース

CASE	外気温 []	室外主風向・風速 [m/s]
CASE-1(冬期、設計外気温かつ無風時)	-1.2	
CASE-2(夏期、設計外気温かつ無風時)	34.9	
CASE-3(中間期、設計外気温かつ無風時)	27.8	

付表-2 各壁面の計算条件

	北外壁	内壁	窓	床	屋根
熱貫流率 [W/m ² ・K]	0.13	3.8	1.7	3.0	0.4
壁外表面温度[] CASE-1	-1.2	2.4	-1.2	8.2	-1.2
CASE-2	34.9	35.9	34.9	33.2	45.0
CASE-3	27.8	27.8	27.8	26.8	35.0

付表-3 内部発熱量

人体発熱量 [W]	照明発熱量 [W]	日射量 [W]
0	21,000	0

付表-4 各開口の個数・寸法・開口温度の計算条件

	有効面積	高さ[m]	各開口付近空気温度 []					
			冬期		夏期		中間期	
			a	b	a	b	a	b
床面開口	1,960×56×13	2FL+0	8.2	8.2	32.0	32.0	27.8	27.8
東扉隙間	0.04m ²	2FL+1.0	2.4	2.4	34.5	35.9	27.8	27.8
北外扉・窓隙間	0.4m ²	2FL+3.0	-1.2	-1.2	34.9	34.9	27.8	27.8
南壁面換気窓	10,906×43.8	2FL+11,880	8.9	5.9	53.0	37.0	40.4	30.3
北壁面換気窓 排気ファン	20,625×43.8 714×714×2	2FL+11880	7.7	5.9	54.1	37.0	41.2	30.3

2. 二種類の計算法の解析結果の比較

二つの計算方法より得た 3 ケースの室内上下温度分布または平均室温の計算結果の比較を付図 2~4 に、3 ケースの自然換気量及び居住域温度の計算結果を付表-5 に、各 CASE の床面・天井の貫流熱量と自然換気熱量の計算結果を付表-6 に示す。これらにより、以下のことがわかる。

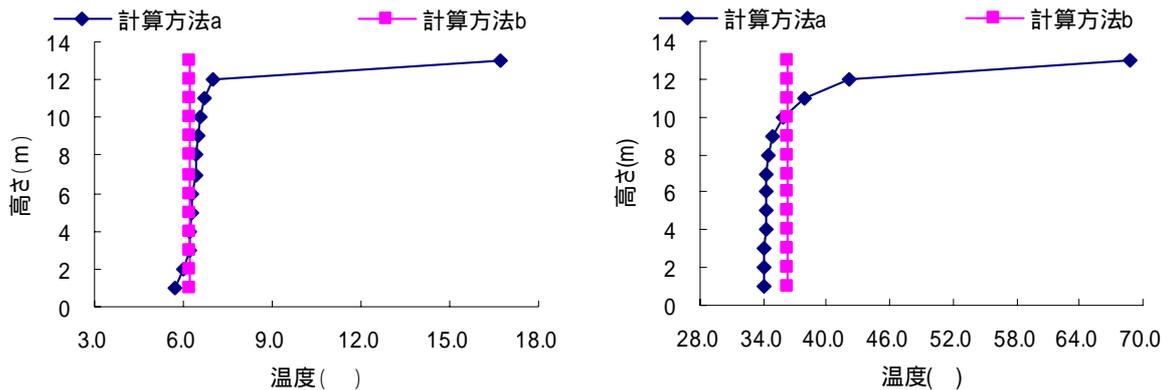
1)冬期(CASE-1)、夏期(CASE-2)と中間期(CASE-3)の室内の熱負荷バランス計算により得た平均室温は、それぞれ 6.2、36.2、30.5 であり、CFD 連成解析より得た居住域の空気温度より、それぞれ 0.5、2.1、2.4 高い。

2)冬期の設計外気温かつ無風の場合(CASE-1)には、計算方法 a により算出した床面開口及び南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量は、それぞれ 1,599 m³/h、-1,652 m³/h、-3,331 m³/h、3,384m³/h である。これに対して、計算方法 b により算出した床面開口及び南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量は、それぞれ 1,549 m³/h、-1,562 m³/h、-3,146 m³/h、3,159m³/h である。つまり、冬期の設計外気温かつ無風時の各自然換気開口の自然換気量及びトータル隙間風量について、計算方法 b は計算方法 a よりそれぞれ 3.1%、5.4%、5.6%、6.6%過小計算されている。

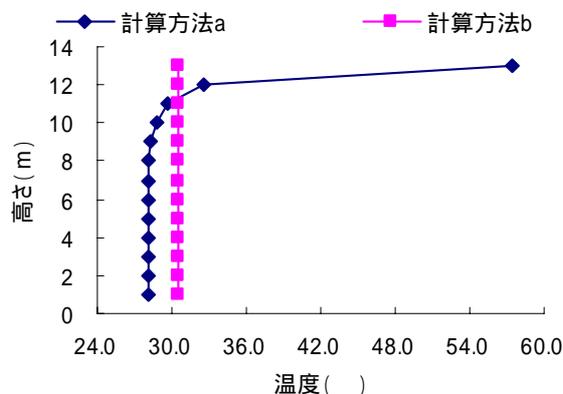
3)夏季の設計外気温かつ無風の場合(CASE-2)には、計算方法 a により算出した床面開口及び南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量は、それぞれ 107 m³/h、-227 m³/h、-489 m³/h、609m³/h である。これに対して、計算方法 b の熱バランス計算によって算出した床面開口の吹出し風量は 0 となる。また、南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量は、それぞれ -119 m³/h、-224 m³/h、363m³/h である。つまり、夏期の設計外気温かつ無風時の南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量について計算方法 b は計算方法 a よりそれぞれ 47.6%、50.1%、49.3%過小計算されている。

4)中間期の設計外気温かつ無風の場合(CASE-3)には、計算方法 a により算出した床面開口及び南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量は、それぞれ 428 m³/h、-383 m³/h、-781 m³/h、736 m³/h である。これに対して、計算方法 b により算出した床面開口及び南・北換気窓の自然換気量とトータル隙間風量は、それぞれ 643 m³/h、-514 m³/h、-1,050 m³/h、920m³/h である。つまり、中間期の設計外気温かつ無風時の各自然換気開口の自然換気量及びトータル隙間風量について、計算方法 b は計算方法 a よりそれぞれ 50.2%、34.2%、34.4%、25.0%過大計算されている。

5)付表-5 により、冬期と夏期の場合には、計算方法 b により算出した平均室温は計算方法 a により算出した室内上下温度分布の平均値よりそれぞれ 0.6 、0.5 低く、計算方法 b により算出したトータル自然換気量も計算方法 a により算出したこれよりそれぞれ 5.5%、49.3% 低いことがわかる。また、中間期の場合には、計算方法 b により算出した平均室温は計算方法 a により算出した室内上下温度分布の平均値より 0.6 高く、計算方法 b により算出したトータル自然換気量も計算方法 a により算出したこれより 34.4%高い。つまり、二種類の計算法により得たトータル自然換気量の差異は、平均室温の差異に相関する。



付図-2 CASE-1(冬期)の室内上下温度分布比較 付図-3 CASE-2(夏期)の室内上下温度分布比較



付図-4 CASE-3(中間期)の室内上下温度分布の比較

3.二種類の計算法の自然換気量の差異の考察

二種類の計算法より得た自然換気量の差異の原因は、壁面貫流熱量及び自然換気による除去熱量が異なるを考える。室内上下温度分布の有無が垂直壁面の貫流熱量に影響を与えないが、天井及び床面の貫流熱量に大きな影響を与える。

付表-6 により、冬期の場合には、屋根表面温度が -1.2 であり、計算法 a、b の天井付近の室内空気温度はそれぞれ 16.7 、6.2 となっている。そのため、二つの計算法はともに天井から室外へ放熱することとなるが、計算法 b の放熱量が 58.7%少ない。また、計算法 a と b により算出した自然換気量を見ると室内から室外への放熱量はそれぞれ 9,357、5,605W

となり、計算法bのほうが40.1%少ない。付表-5を見ると計算法bの平均室温は計算法aより低いことがわかる。そのため、計算法bの自然換気量は計算法aのそれより少ない。

夏期は冬期と同様に、計算法bの室外への放熱量は計算法aのこれより少ないため、計算法bの自然換気量は計算法aの自然換気熱量より少ない。

一方、中間期の場合は、床面と天井の貫流熱量の合計については、計算法bのほうは計算法aより少ないため、計算法bの平均室温は計算法aより高くなっている。計算法bの自然換気量が計算法aより大きい、換気窓付近の空気温度が計算法aより低いため、自然換気より室外に流出する熱量が少ない。

以上により、二種類の計算法により算出した自然換気量の差異は、平均室温と室内熱収支の違いに左右されることがわかる。

付表-5 各 CASE の自然換気量(m^3/h)及び居住域温度($^{\circ}\text{C}$)の計算結果

	CASE-1			CASE-2			CASE-3		
	a	b	差	a	b	差	a	b	差
床面開口自然換気量	1,599	1,549	-3.1%	107	0	—	428	643	50.2%
南換気窓自然換気量	-1,652	-1,562	-5.4%	-227	-119	-47.6%	-383	-514	34.2%
北換気窓自然換気量	-3,331	-3,146	-5.6%	-489	-244	-50.1%	-781	-1,050	34.4%
北外扉隙間風量	1,242	1,170	-5.8%	187	122	-34.8%	260	384	47.7%
2F 北窓隙間風量	1,115	1,006	-9.8%	306	150	-51.0%	288	224	22.2%
東扉隙間風量	1,027	983	-4.3%	116	91	-21.6%	188	312	66.0%
トータル自然換気量	4,983	4,708	-5.5%	716	363	-49.3%	1,164	1,564	34.4%
天井付近空気温度	16.7	6.2	10.5	68.7	36.2	32.5	57.5	30.5	27
居住域空気温度	5.7	6.2	0.5	34.1	36.2	2.1	28.1	30.5	2.4
室内上下温度平均値	6.8	6.2	-0.6	36.7	36.2	-0.5	29.9	30.5	0.6

注：風量前の[-]は空気が室内から室外へ流出することを意味する。

付表-6 各 CASE の床面・天井の貫流熱量と自然換気熱量の計算結果 [W]

	CASE-1			CASE-2			CASE-3		
	a	b	差	a	b	差	a	b	差
床面の貫流熱量	6319	5055	-20.0%	-2275	-7634	235.6%	-3286	-9252	181.6%
天井の貫流熱量	-6033	-2494	-58.7%	-7988	2959	—	-7583	1530	—
床・天井貫流熱量 合計	286	2561	795%	-10263	-4675	-54.4%	-10869	-7722	-29%
自然換気熱量	-9357	-5605	-40.1%	-4553	-141	-96.9%	-5332	-1671	-68.7%
熱収支	-9071	-3044	-66.4%	-14816	-4816	-67.5%	-16201	-9393	-42%

第 2 部

パターン認識による空調システムの

不具合検知・診断

第1章 序 説

1.1 本研究の背景

空調システムの最適運転・管理のためには、システムの運転状態の把握、および適切な不具合検知・診断を行う必要がある。技術の進歩に伴い、空調システムはますます複雑化し、不具合が発生した際に運転管理者の経験に基づく対応が困難となる同時に、近年の“団塊世代”の大量定年が大きな起因となって、経験豊富な熟練管理者の確保も難しくなりつつある。このような状況に備え、BEMS を含む設備管理システムの中に不具合検知・診断ツールを組み込み、発生する不具合を計測データに基づいて自動的に検知・診断し、その結果を元に譬え未熟な技術者でも迅速に対応できるようなシステムを構築することが重要である。なかでも、空調システムの不具合検知・診断ツールは、システムの適正運転を阻害する異常状態を検知・排除し、ビルの環境とエネルギー性能を確保するために必要不可欠であり、空調システムの継続的なコミッショニングを行うための重要な支援ツールであると言ってよい。

1.2 既往の研究

IEA/ECBCS の ANNEX25, 34(ビル最適化、不具合検知・診断および計測システム研究分科会)では、空調システムの不具合検知・診断法について研究を行った。その中で、空調システムの不具合検知・診断手法を、エキスパートシステムをコアとする手法、システムの定性的な情報に基づく手法、そしてシステムの定量的な情報に基づく手法の3種類に分類した。以下にそれぞれの手法を記述する。

(1) エキスパートシステム

エキスパートシステムをコアとする手法は、従来型のルールベースエキスパートシステムとファジイアブダクションによるエキスパートシステムをコアとする手法のほかに、不具合の発生と現象の因果関係をつリー状に纏めたフォルトツリーによる不具合診断手法、そして因果ネットワークによる不具合診断手法なども含んでいる。

柴田ら^[1]は BEMS の計測データおよび各種のシステム効率などの指標値の不具合を閾値で判断することで、不具合検知・診断知識データベースによりターボ冷凍機の性能低下等の不具合現象を検知し、不具合機器及び不具合原因を診断するエキスパートツールを開発した。神村ら^{[2][3]}はファジイアブダクションを用いた不具合検知・診断システムを実際の蓄熱式空調システムに適用し、システム開発及び利用面からその有効性と実用性について検討した。

(2) 定性的な手法

システムの定性的な情報に基づく手法は、確率的定性シミュレーション手法と符号付き有向グラフを用いた定性推論手法がある。

湯本ら^[4]は制御システムの計装図と制御内容に基づいて、人間の定性的な判断を模擬する確率的定性モデルを作成し、BEMS の計測データによって定性値の閾値、伝播規則・関数を決めて、定性的なシミュレーションによる空調熱源システムの不具合検知ツールを報告した。潮崎^[5]はエキスパート診断方法の中に検知診断対象によっては多大な労力がかかる診断ルール作成の代わりに、対象の装置に対して符号付有向グラフを用いた定性推論による検知診断を試みた。

(3) 定量的な手法

システムの定量的な情報に基づく手法は、システム構成要素の物理モデルを利用した連結型水蓄熱槽の不具合と氷蓄熱槽の蓄氷コイルの不具合を検知・診断手法がある^[6]。吉田^[7]は冷却コイル・PI 制御器・制御弁で構成されるサブ空調システムの制御弁不具合を例に、拡張カルマンフィルターを用いる検知方法の有効性を検討した。吉川ら^[8]はマハラノビスの汎距離を用いた不具合検知手法の有効性を確認し、さらに空調システムの動的シミュレーションプログラムである HVACSIM+(J)により作成したデータを用いた不具合検知手法の有効性を検討した。

1.3 本研究の目的

以上の不具合検知・診断手法では、エキスパートシステムをコアとする手法は専門家による検知・診断のルールの作成が必要であり、多大な労力がかかるという問題点がある。また、定性的な検知・診断手法はシンプルな空調システムの不具合検知・診断に有効であるが、複雑な空調システムの不具合検知・診断に対して適用できないことが多い。そのため、定量的な情報に基づく検知率・診断率の高い検知・診断方法の開発が望まれる。そこで本研究では、パターン認識法を用いて、対象システムの計測データおよびそのフーリエ解析値の各種の統計量を、システム状態を識別する特徴値として、変数選択アルゴリズムにより最適な不具合検知・診断ベクトルを選び出し、これによりシステムの運転状態を識別・判断する手法を提案し、実システムへの応用によってその有効性を実証した。

判別分析に基づいた人間の外界事象を認識・識別することを模擬するパターン認識法は、1930年代にフィッシャーによって開発され、マハラノビス、ラオなどによって、古人類の頭蓋骨の多次元計測値を利用した人種判別方法として始めて応用された^[9]。以後、医学における計量診断、心理学における適正診断、経済学における経営状況の分析・倒産の予測、メーカーにおける品質管理、さらに政治学、社会学の分野でも広く応用されてきた。本研究における判別分析法は、マハラノビスの汎距離を用いた点では吉川らの研究とは同様であるが、およそ 10 年前に吉川らに先立ち蓄熱システムに対する応用例を報告した経緯がある^[10]。また、不具合検知・診断パラメータの設計方法及び判別率増分法によるそれらの個数の最適化手法の開発、変数選択法の蓄熱システムの不具合検知・診断ツールへの適用などについては類似した研究報告は見られない。

1.4 第2部の構成

第1部は以下のように5章により構成される。

本章では、まず本研究の背景を述べて、そして既往の研究をレビューした。今までのエキスパートシステムや定性的な手法は次第に定量的な手法へ発展して行く中で、本研究の目的は空調分野で初めて多変量解析分野のパターン認識による判別法を応用し、運用段階でのコミショニング作業に適用できるシミュレーションツールを開発し、その有効性を実システムへの適用により検証し、実システムの不具合検知・診断へ展開するための基礎資料を蓄積することである。その上、第1部の各章の構成を述べた。

第2章では、本研究で使われるパターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法を説明した。パターン認識による不具合検知方法を用い空調システムの運転状態を判断する際には、不具合検知用データの獲得、最適検知パラメータの導出、マハラノビス汎距離による不具合判定の三つのプロセスが必要である。不具合検知用データを獲得するためには、正常状態データが実測によって得られ、不具合状態データが実測とシミュレーションの2つの手段によって得られる。獲得された不具合検知用データをベースに、統計的な定量化手法を用いて、各測定値及びそのフーリエ変換値により検知・診断パラメータを設計する。それらのパラメータを用いてマハラノビス汎距離による不具合検知を行い、検知率が最も高いベクトル(パラメータの集合)を最適検知・診断ベクトルとして選ばれ、新しいデータを診断する。

第3章では、既存の変数選択法、AIC変化量法、及び本研究において新たに開発した判別率増分法等の三つの不具合検知・診断ベクトルの最適化方法のアルゴリズムを記述している。一般にパラメータの数が多ければ多いほど不具合検知・診断モデルの不具合識別・診断能力が強くなることが期待される。しかし、個々のパラメータが不具合検知・診断に有効であるようにみえても、実際にはほかのパラメータとの強い相関により、複数のパラメータが同じ状態を示唆している場合も多々見られる。よって、人間の外界事象に対する最適識別・判断過程を模擬し、真に不具合検知・診断に有効な特徴パラメータを選び出すプロセスが必要である。

第4章では、某蓄熱式空調システムの蓄熱槽内温度プロファイルの実測データとそのフーリエ変換結果について数学的な定量化手法を用いて計算した検知ベクトルによる不具合検知を行った結果、本不具合検知・診断方法の有効性を実証した。本不具合検知方法の特徴は次のようにまとめられる。

- (1)対象システムの各種状態でのデータベースが得られていることが前提となる。
- (2)対象システムに関する基本的な知識に基づいて、全ての不具合状態に応じた予備検知パラメータを作成することが、本不具合検知・診断手法を有効に利用するために必要である。
- (3)マハラノビス汎距離により判別分析を行うために、不具合検知・診断ベクトルの分布の正規性が要求されるが、本不具合検知手法では検知パラメータの最適化を行うため、二つ以上の検知パラメータを用いる場合、各最適化された不具合検知・診断パラメータの

分布は正規分布からある程度外れていても、確率の高い不具合検知・診断を行うことができる。

第 5 章では、本手法を 2 種類の不具合のみ存在する某可変風量システムの不具合検知・診に適用した例により、パターン認識に基づく不具合検知・診断方法が可変風量システムの不具合検知、システム状態診断にも有効であることを示している。以下に、本手法を可変風量システムの不具合検知・診断への適用性を述べる。

(1)可変風量システムの不具合検知・診断ツールを作成するためには、正常状態及び各種の不具合状態における、空調機の冷水出入口温度、給還気温度、冷水流量、給気風量、各ゾーンの温度、各 VAV 風量などのシステムの特徴的な状態値の計測データを予め用意する必要がある。

(2)可変風量システムの運転状態特徴値およびそれらのフーリエ解析値により最適不具合検知・診断パラメータを作成し、検知・診断ベクトルの最適化を行う。

(3)最適な不具合検知・診断ベクトルにより、実システムの不具合検知・診断ツールを作成し、システムの実測データを作成したツールに入力して、不具合検知・診断を行う。

本章の研究結果により、パターン認識による可変風量システムの不具合検知・診断ツールは、システムの適正運転を阻害する異常状態の検知・診断にも適用でき、可変風量空調システムの運用段階や継続的な Cx のための支援ツールとして有効に利用されることを実証した。

参考文献

- [1] 柴田克彦；空調設備に用いるターボ冷凍機の性能低下の検知と診断，建築学会計画系論文集，p51-59，1996，7
- [2] 神村，宮坂，宮崎，竹井：蓄熱式空調システムの異常検知・診断に関する研究，その1：異常検知・診断システムの開発，空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，1996. 9
- [3] 神村，宮坂，宮崎，竹井：蓄熱式空調システムの異常検知・診断に関する研究，その3：ファジイアブダクションを用いた異常診断システムの評価，空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，1997. 8
- [4] 湯本・大川・薦田・宮坂：確立的定性推論によるビル空調用熱源システムの不具合検知方式，電気学会論文誌 C,vol. 116-C, No. 11, Nov, 1996
- [5] 潮崎：定性モデルとして符号付有向グラフを用いた空調蓄熱系の異常診断、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，pp. 1061-1064，1996
- [6] 相良・中原：連結型蓄熱槽の異常検知・診断における物理モデルの検討、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，1996
- [7] 吉田：状態空間モデルによる空調システムの実時間不具合検知、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，pp. 437-440，1995
- [8] 吉川・相良・山中・甲谷・丹羽：動的シミュレーションによるデータを用いた空調システムの不具合検知に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，pp. 2113-2116，2007
- [9] 柳井晴夫・高木廣文：多変量解析ハンドブック，現代数学社，1995，京都
- [10] 潘嵩・鄭明傑・中原信生：パターン認識による蓄熱システムフォルトの検知に関する研究その4 検知パラメータ最適化プログラムの開発,日本建築学会東海支部研究報告集,36,1998年2月

第2章 パターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法

パターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法は多変量データ解析や判別分析法を利用している。本手法をわかりやすく説明するために、まず考古学、経済学、医学などほかの分野で多変量データ解析を用いて判別分析を行ったいくつかの事例を紹介する。

- (1) 小切手に A 氏, B 氏, C 氏, D 氏の 4 人のなかの誰かがサインしたかを確かめるために、4 人の筆跡より判別式を作り、そこに書かれている筆跡により、誰が書いたかを判別する。
- (2) 妊娠の血液中の何種類かのステロイドホルモンを調べることにより、正常分娩かどうかを予測する。
- (3) 有価証券報告書にある経常利益率、金利負担率、流動比率、当座比率などにより、企業の倒産、非倒産を予測する。
- (4) 外国の古戦場で発掘した頭蓋骨の特徴によりクラスター分析を行い、A 人種のものか、B 人種のものかを判別する。
- (5) 持込まれた一つの貝が、日本産のものか、オーストラリア産のものなのか、知りたい。そこで、それらの形態の諸特性により判別式を作り、これにより、それがどちらに属するか判別する。
- (6) 上顎第 1 小臼歯と第 2 小臼歯を見分けるため、それらの諸形態を計測し、それに基づき判別式をつくり判別する。

これらの事例は新たに得られたものが、どの群に属するかを判別することであるが、判別分析は、それぞれの群を識別するのに有効な変数は何かを探る、有効要因の選別にも用いられる。

- (7) 歯科医が、あごの型を九つのタイプに分けようとする。歯科医が分類された各タイプのもの各特徴値を計測し、差異大きな特徴値を調べることによりどの部位をみて分類しているかを探る。
- (8) 男物着尺地と紳士服地の物性を調べ、布地の特徴をどの物性値が、どの程度よく表現しているかを調べる。

一方、空調システム分野に着目すると、これまでにエキスパートシステムを利用する方法や定性的な方法を用いて、空調システムの不具合検知・診断に関する研究が行われているが、上述したパターン認識や判別分析を空調システムの不具合検知・診断に適用する例が見られなかった。上述したほかの分野で有効性が実証されたパターン認識や判別分析法を空調システムの不具合検知・診断にも適用できると考えられ、本研究ではそれを試みた。また、後述

する不具合検知図・診断図により検知・診断されるデータを正常と不具合のどちらのパターンに属することを判断する方法は判別・診断を同時に行う方法であり、以後本手法をパターン認識による不具合検知・診断法と呼ぶ。

人間の外界事象を認識する能力を電子計算機により再現するような研究は応用計算技術の発展につれてますます盛んになっている。本研究は、フーリエ解析、相関分析、クラスター分析、変数選択機能を持つ判別分析などの幾つかの統計的な解析手法を用い、実測データからシステムの状態変化の特徴を見出すことで、不具合検知、システム状態診断を数学的に再現しようとするものである。状態の判断には人間のパターン認識を模擬した手法を採用しており、上述したパターン認識手法の応用として位置付けられる。人間に備わっている非常に多くの情報を瞬間に処理し、複雑な外界事象の本質を学習・認識・最適判断するようなパターン認識は、一般に A:外界事象の多くの情報の中から必要な情報のみを抽出する過程、B:事象の本質を識別・判定する過程の二つに大別される。A の対象システムに対する特徴の抽出については、十分な経験のある専門家のみが可能となるものだが、これを汎用・実用化するためには実測データの統計的分析により対象システムの特徴を抽出する必要がある。その際に有効な手法として、空間不変性を有する、位相変動・周波数などのシステムの変化特徴を抽出できるフーリエ解析法を取上げる。しかし、一般に実測データの中には、不具合検知・診断にマイナスとなる高周波数の雑音（ノイズ）が含まれるため、フーリエ解析値に低域通過型フィルタを適用しこれを削除するために有効である。雑音を削除したものの各種の統計値からいろいろなシステム状態を識別する特徴パラメータが多数作成される。

パターン認識による不具合検知・診断法を用いて空調システムの運転状態を判断する際には、不具合検知・診断モデル作成用トレーニングデータの獲得、検知・診断パラメータの設計、マハラノビス汎距離による診断など三つのプロセスが必要となる。以下にこれらの三つのプロセスについて説明する。

2.1 不具合検知・診断モデル作成用データの獲得

本手法を空調システムの不具合検知・診断に適用する際に、不具合検知・診断モデルを同定するためのトレーニングデータを予め用意する必要がある。以下は正常状態と不具合状態のトレーニングデータの獲得方法を述べる。

(1) 正常状態のトレーニングデータの獲得

竣工した空調システムを十分に調整し、正常状態であることが確認された後、関連状態値を計測し、これを正常状態でのデータとする。

(2) 各種不具合状態のトレーニングデータの獲得

実測方法：対象システムにおいて各種の不具合を意図的に発生させ、それらの不具合が発生するときの各状態値を計測して、これを各種不具合状態でのデータベースとする。

シミュレーション方法：動的シミュレーションプログラムを用いて、正常状態での各状態値をシミュレートし、その計算結果を実測データと比較して検証する。シミュレーションの

結果が実測データと十分に一致することを確認した後、同シミュレーションプログラムを用いて各種不具合状態での状態値を計算し、これらを不具合状態値のデータとする。

2.2 不具合検知・診断パラメータの導出

不具合検知・診断パラメータはシステム状態の実測データおよびそのフーリエ変換値の統計値として算出される。不具合検知・診断パラメータの設計方法は以下の通りである。

(1) 正常状態と各種の不具合状態でのシステム状態値のデータについてフーリエ解析を行い、状態値変動の位相・周波数などのシステムの動特性を抽出する。二次元実フーリエ解析式は式(2-1)で示される。

$$\begin{aligned}
 [F_{kl}] &= \begin{bmatrix} C \\ S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ S \end{bmatrix}_{kl} = \begin{bmatrix} C_k C_l & C_k S_l \\ S_k C_l & S_k S_l \end{bmatrix} \\
 &= \frac{a_1 a_2}{NM} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{s=0}^{M-1} x_{rs} \begin{bmatrix} \cos \frac{2\pi kr}{N} & \cos \frac{2\pi ls}{M} \\ \sin \frac{2\pi kr}{M} & \sin \frac{2\pi ls}{M} \end{bmatrix} \\
 &k = 0, 1, 2 \cdots N/2 \quad l = 0, 1, 2 \cdots M/2 \\
 a_1 &= \begin{cases} 2 & 0 < k < N/2 \\ 1 & k = 0, N/2 \end{cases} \\
 a_2 &= \begin{cases} 2 & 0 < l < M/2 \\ 1 & l = 0, M/2 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

ここで、 x : 状態値

C, S : x の実周期関数の余弦と正弦成分

F_{kl} : x のフーリエ変換値であり、 C, S からなるマトリックス

N, M : それぞれ測定時間のサンプル数と状態値の個数

k, l : それぞれ時間と空間に対するフーリエ変換値の個数

(2) 統計的な定量化手法を用いて、各状態値とそれらのフーリエ変換結果により予備検知パラメータを算出する。パラメータ同志の相関性が高い場合、表現できるシステムの特徴が相似することを意味するため、共に不具合検知パラメータに含めても検知率の向上には繋がらない。そこで、パラメータ同志の相関係数を用いたクラスター分析を行い、パラメータを分類し、類似したパラメータを除去する処理を行う。

2.3 マハラノビス汎距離による不具合判定

2.2 節の方法で作成した不具合検知・診断パラメータの一つ或はそれ以上のパラメータの組み合わせは不具合検知・診断ベクトルと呼ばれる。正常状態と各種の不具合状態に対する各検知ベクトルの検知率を計算し、検知率が最も高いベクトルを最適検知ベクトルとして選出する。不具合検知率の計算法は以下のようなものである。

不具合検知・診断ベクトル用いて、マハラノビス汎距離 D (Mahalanobis' generalized distance)

により、正常状態と各種不具合状態での確率的なベクトル空間範囲（式(2-2)で示される D より決まる範囲）または式(4-25)で示される判別関数を作成する。

ある状態の計測データにより計算した p 個のパラメータからなるベクトル y が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うとき、マハラノビス汎距離 D の平方は式(2-2)で定義される。一般に母平均と母分散・共分散が未知の場合、50 以上のデータがあれば、それらのデータの平均値と分散・共分散で代用しても差し支えない。

$$\begin{aligned}
 D^2 &= (y - \mu)^T \Sigma^{-1} (y - \mu) \\
 y &= [y_1 y_2 y_3 \cdots y_p]^T \\
 \mu &= [\mu_1 \mu_2 \mu_3 \cdots \mu_p]^T \\
 \Sigma &= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 & \cdots & \sigma_1 \sigma_p \\ \sigma_2 \sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_2 \sigma_p \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sigma_p \sigma_1 & \sigma_p \sigma_2 & \cdots & \sigma_p^2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

温度、湿度などシステム状態値を計測し、瞬時計測値により計算した検知パラメータの値が正常状態あるいは不具合状態であるか否かをマハラノビス汎距離 D により判定し、不具合検知・不具合診断を行う。マハラノビス汎距離 D による判定法は次の通りである。

各種の運転状態でのデータベースより選び出した各最適検知パラメータの母平均を計算し、これらを各種の運転状態での最適検知パラメータ分布の中心とする。空調システムにおいて発生する全ての不具合のデータベースが既知であると仮定すると、ある実測値より計算した検知・診断パラメータについて、上述の分布中心からのマハラノビス汎距離 D が求まることになる。そこで、実測値は汎距離が最も近い運転状態の分布に属するものと判定できる。

また、トレーニングを用いて選び出した最適検知ベクトルを用いて、新たな実測データについて、上記と同じようにマハラノビス汎距離 D の比較により、そのデータが正常と不具合のどちらに属することを診断できる。

2.4 まとめ

本章では、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法の基礎理論について述べた。不具合検知・診断モデル作成用トレーニングデータの獲得については、正常状態の場合は実測により得られるが、不具合状態の場合は様々な異なる不具合を実際に発生させ実測によるデータ収集が困難なので、精度が検証されたシミュレーションプログラムを利用する方法が有効である。不具合検知・診断パラメータの作成は、温度、湿度など計測されたシステム状態値および位相・周波数などシステムの動特性を抽出するためにのフーリエ変換値に対して、統計的な手法を用いて行われる。また、新たに計測されたシステム特徴値のデータにより、システムが正常か否かはマハラノビス汎距離によって判定される。

本章に関する既発表論文

査読付論文

[1] 鄭明傑・潘嵩・中原信生:パターン認識による蓄熱制御フォルトの検知と診断に関する研究第2報-実用化方法と実蓄熱システムへの応用例、空気調和・衛生工学会論文集, No. 72, 1999年1月

口頭発表論文

[2] Mingjie Zheng, Song Pan and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of Thermal Storage Tank Using State Parameter Vector Space, Air Conditioning In High Rise Buildings'97, Shanghai, China, September 8-11, 1997

[3] 潘嵩・鄭明傑・中原信生:空調システムフォルトの動的シミュレーション(その12 3つのパラメータによる実システムのフォルト検知と診断),平成9年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集II, 1997年8月

参考文献

[1] Anderson, T.W. and R.R. Bahadur: Classification into two multivariate normal distribution with different covariance matrices. Ann. Math. Statist., 33, 420-431, 1962

[2] Fujikoshi, Y.: Selection of variables in two-group discriminant analysis by error rate and Akaike's criteria. technical report No.40, Statistical Research group, Hiroshima University, 1981

[3] Harman, H.H.: Model Factor Analysis. 3rd ed., pp.290-299, the Univ. of Chicago Press, 1976

[4] Konishi, S. and T. Sugiyama: Improved approximations to distribution of the largest and the smallest latent roots of a Wishart matrix. Ann. Inst. Statist. Math., 33, 27-33, 1981

[5] Sugiyama, T.: Tables of percentile points of a vector in principal component analysis, J. of Japan Statist., Soc., 1, 63-68, 1971

[6] 杉山高一・尾崎公: 歯の咬耗度による年齢推定に関する重回帰分析. 応用統計学, 5, 123-138, 1976

[7] 杉山高一・牛沢賢二: 主成分分析における固有ベクトルの信頼性について. 応用統計学, 8, 73-80, 1979

第3章 不具合検知・診断ベクトルの最適化方法

一般にパラメータの数が多ければ多いほど不具合検知・診断モデルの不具合識別・診断能力が強くなることが期待される。しかし、個々のパラメータは不具合検知・診断に有効であるようにみえても、実際にはほかのパラメータとの強い相関により、複数のパラメータが同じ状態を示唆している場合も多々見られる。よって、人間の外界事象に対する最適識別・判断過程を模擬し、真に不具合検知・診断に有効な特徴パラメータを選び出すプロセスが必要である。本章では、列挙法のほかに三つの不具合検知・診断ベクトルの最適化方法のアルゴリズムを述べる。

3.1 列挙法

設計された N 個の不具合検知・診断パラメータを用いて、一次元から N 次元の不具合検知ベクトルを用いて検知を行い、検知率の最も高いベクトルを最適検知・診断ベクトルとして選出する方法を本研究では列挙法と呼ぶ。列挙法で選出した不具合検知・診断ベクトルは真の最適検知ベクトルである。しかし、不具合検知・診断パラメータの数が多の場合、計算時間が膨大となるため、実用できない。

3.2 変数選択法

3.2.1 変数選択法の概要

変数選択法は、実測データの統計的な特徴に基づいて最適不具合検知・診断パラメータを同定することで、最適不具合検知・診断ベクトルを選出するとともに、システムモデルの構造も識別できる統計的な手法である。本研究では、この手法をシステム状態の判別分析モデルの最適化に応用する。一般に判別分析モデルにおける予備パラメータの個数が多ければ多いほど、各種のシステム状態での不具合検知・診断ベクトルの分布中心の間のマハラノビス汎距離が広くなり、システム状態の判別能力が強くなると推察できる。しかし、必要以上の数のパラメータを用いて同定した判別分析モデルの見かけ上の判別率が高くなっても、それは最適な判別分析モデルとはいえない場合もある。また、パラメータ同士は相関性があるので、一つのパラメータの持っている不具合検知・診断に寄与する情報の一部は、ほかのパラメータによって既に抽出されてしまっていることもある。よって、既に q 個のパラメータを選択した場合、新たに r 個のパラメータを追加するかどうかは、この r 個のパラメータによる、真に不具合検知・診断に寄与する情報量と、追加されるノイズの量と比較して判断するのがよい。この2つの量の比較には次に示す F 統計量が用いられる。

q 個と $q+r$ 個のパラメータによる正常状態と不具合状態でのパラメータの分布中心の間のマハラノビス汎距離をそれぞれ D_q^2 , D_{q+r}^2 とすると、新たに r 個のパラメータを追加することによる、パラメータの分布中心の間のマハラノビス汎距離の平方の増加分 ($D_{q+r}^2 - D_q^2$) が単なる誤差によるものか、あるいは判別に実質的な役割を果たしているかは、式(3-1)で示されるような自由度 ($r, N-q-r+1$) を有する統計量 F_q の有意性より判断される。一般に実測データの個数 N が大きいときに、この検定統計量 F_q について F 分布の上側 16%あるいは 17%点あたり、 $F_q = 2$ を基準として判断するのが妥当である。

$$F_q = \frac{N-q-r-1}{r} \frac{D_{q+r}^2 - D_q^2}{\frac{N(N-2)}{N_1 N_2} + D_q^2}$$

$$N = N_1 + N_2 \quad (3-1)$$

ここに、 N_1, N_2 はそれぞれ正常状態および不具合状態のデータの個数である。今回の計算では、対象蓄熱システムにおいて正常状態と冷凍機の吸い込み三方弁不具合しか現れていない為、 D_q^2 の計算式は式(2-2)で示される。

$$\begin{aligned} D_q^2 &= (\mu^1 - \mu^2)^T \Sigma^{-1} (\mu^1 - \mu^2) \\ \mu^1 &= [\mu_1^1, \mu_2^1, \mu_3^1, \dots, \mu_q^1]^T \\ \mu^2 &= [\mu_1^2, \mu_2^2, \mu_3^2, \dots, \mu_q^2]^T \\ \Sigma &= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12} \sigma_1 \sigma_2 \cdots & \rho_{1q} \sigma_1 \sigma_q \\ \rho_{21} \sigma_2 \sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2q} \sigma_2 \sigma_q \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{q1} \sigma_q \sigma_1 & \rho_{q2} \sigma_q \sigma_2 \cdots & \cdots & \sigma_q^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-2)$$

ここに、 μ^1, μ^2 はそれぞれ不具合状態と正常状態での q 個のパラメータの平均値のベクトルであり、 σ, ρ はそれらの分散と相関係数である。 Σ は q 個のパラメータの分散・共分散行列である。

3.2.2 変数選択法の計算アルゴリズム

図 3-1 に変数選択法による不具合検知・診断パラメータ最適化プログラムのフローチャートを示す。計算アルゴリズムは次のようである。

(1) まず全ての M 個の予備パラメータを 1 つずつ用いてそれぞれの標準偏差を計算し、これらにより M 個の一次元のときの検定統計量 $F_j^{(1)} (j=1, M)$ を計算し、 $F_j^{(1)}$ の最も大きなパラメータを一次元最適不具合検知・診断パラメータとする。

(2) パラメータの個数を 1 つずつ増やして、 i 次元のときの $(M-i)$ 個のパラメータベクトルの正常状態及び各種の不具合状態での分布中心の間のマハラノビス汎距離を計算し、これらにより $(M-i)$ 個の検定統計量 $F_j^{(i)} (j=1, M)$ を計算し、 $F_j^{(i)}$ の最も大きなベクトルを i 次元最適不

具合検知・診断ベクトルとする。

(3) i 次元最適不具合検知・診断ベクトルの検定統計量 $F_{\max}^{(i)}$ を収束判断基準 F_{α} と比較することで、最適不具合検知・診断パラメータの個数とそれらのパラメータを同時に決定する。つまり、 $F_{\max}^{(i)} \geq F_{\alpha}$ の場合、更に一つのパラメータを増やして、 $i+1$ 次元の計算に進む。逆に $F_{\max}^{(i)} < F_{\alpha}$ の場合、最適化計算を終了させ、 $i-1$ 次元の最適なものを最適不具合検知・診断診断モデルとする。

また、最適化計算を行う際に、既に取り入れたパラメータの不具合検知・診断に貢献する情報が新たに追加されたパラメータによって肩代わりされてしまっている場合、そのパラメータを削除するアプローチもプログラムに組み込んでいる。

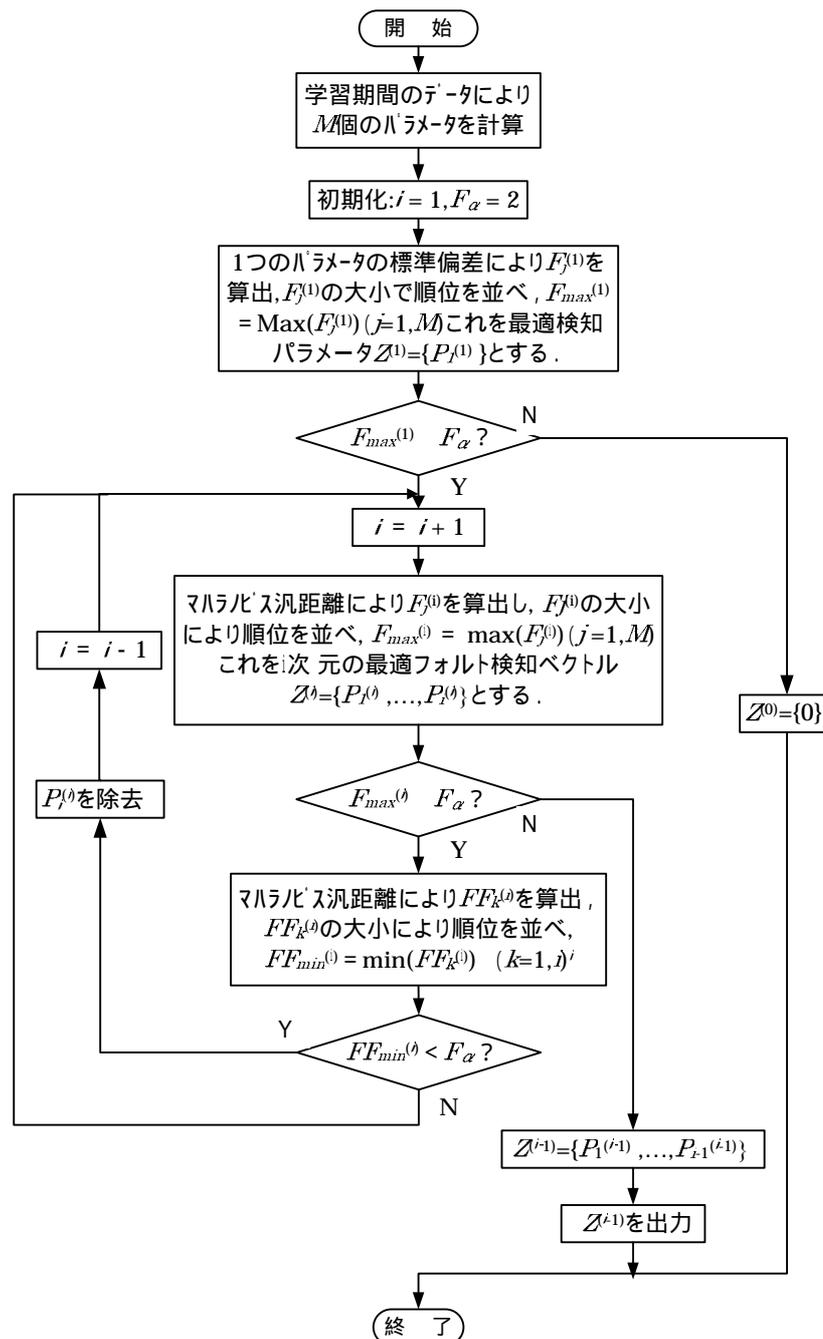


図 3-1 変数選択法プログラムのフローチャート

3.3 判別率増分法

3.3.1 判別率増分法の概要

判別率増分法は仮説検定に基づく変数選択法と異なり、直接に見かけ上の判別率によって不具合検知・診断モデルを最適同定する方法である。

一般に、不具合検知・診断モデルの次元数が大きくなるほど見かけ上の判別率が大きくなるが、新たに追加されたパラメータによる判別率の増加量は小さくなることが推察できる。故に、既に q 個のパラメータを選択した場合、新たに r 個のパラメータを増加するのが真に判別に有効であるかどうかは、判別率の増加量により判断される。 q 個および $(q+r)$ 個のパラメータからなる q 次元および $(q+r)$ 次元ベクトルの中で、判別力が最も高いものの見かけ上の判別率をそれぞれ $R_{\max}^{(q)}$ 、 $R_{\max}^{(q+r)}$ とすると、判別率の増加量 $(R_{\max}^{(q+r)} - R_{\max}^{(q)})$ が収束判断基準 b より大きい場合 (式(3-3)に示す)、この r 個のパラメータを追加すればよいと考えられる。

$$R_{\max}^{(q+r)} - R_{\max}^{(q)} < b \quad (3-3)$$

上式において、 b の値を小さくするほど、選び出されたモデルの不具合検知・システム状態診断の能力が強くなると考えられる。しかし、これを小さすぎる値に設定すると、選び出されたベクトルはモデル作成用データを学習しすぎて、新たなデータに対する誤診断率が高くなる危険性がある。また、誤診断の確率はモデル作成用データの統計的な特性に従うので、新たに1つのパラメータの追加による判別率が增加されても、かならずしも実際の誤診断率が減少されることにはならない。よって、見かけ上の判別率により不具合検知・診断パラメータの最適化を行う際に、理論誤診断率も考察する必要がある。つまり、ある次元数の最適不具合検知・診断ベクトルの理論誤診断率が誤診断率の許容値 d より大きい場合、新たに1つのパラメータを追加した方がよいといえる。

システム状態が二つしかない場合、これらの状態でのパラメータベクトルの分布中心 μ^1 、 μ^2 を式に代入して、二つの状態の判別関数 Z^1 、 Z^2 を算出し、これらの平均値と分散により正規化した統計量は $N(0, 1)$ 分布に従う為、式(3-4)により理論誤診断率 R_a が求められる。

$$R_a = \Pr \left\{ u_a < \frac{0 - E[Z]}{S[Z]} \right\} \quad (3-4)$$

ここに、 $E[Z]$ 、 $S[Z]$ はそれぞれ正常状態と不具合状態の判別関数 Z^1 、 Z^2 の平均値と分散である。

3.3.2 判別率増分法の計算アルゴリズム

判別率増分法のプログラムのフローチャートを図 3-2 に、その計算アルゴリズムを以下に示す。

- (1) 全ての予備パラメータを一つずつ用いてそれらの見かけ上の判別率を求め、判別率の上位である $M1$ 個のパラメータを次の計算の予備パラメータとする。
- (2) 直前の計算ステップに選び出された見かけ上の判別率の上位の $[M1 \times (k-1)]$ 個の $k-1$ 次元ベクトルを残りの $(M-k+1)$ 個のパラメータと組合せて、それぞれの見かけ上の判別率を求め、判別率の上位の $(M1 \times k)$ 個の k 次元ベクトル $Z_{j,k} (j=1, M1 \times k)$ の理論誤診断率をチェックした後、これらを次の計算用予備ベクトルとする。
- (3) $R_{\max}^{(q+r)} - R_{\max}^{(q)} \geq b$ の場合、もう一つパラメータを増し、 $R_{\max}^{(q+r)} - R_{\max}^{(q)} < b$ まで(2)の計算を反復し、最適不具合検知・診断パラメータとパラメータの個数を同時に決定する。

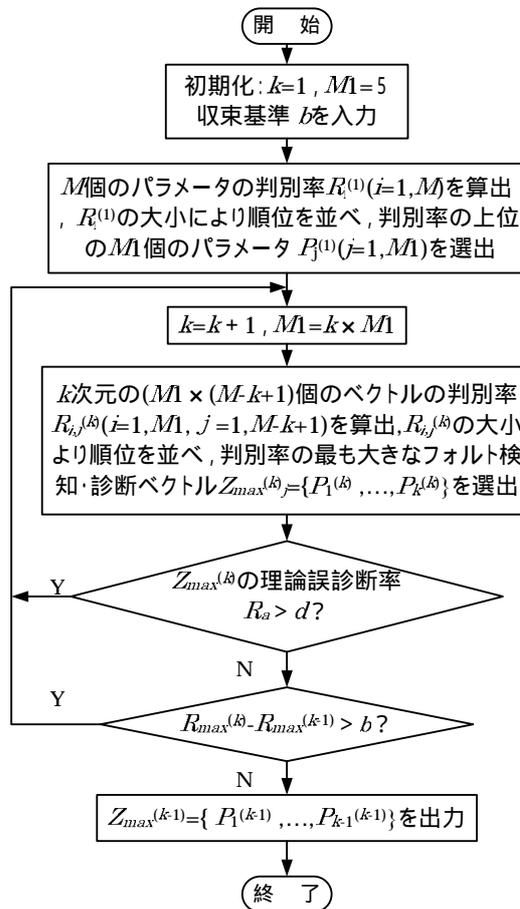


図 3-2 判別率増分法プログラムのフローチャート

3.4 AIC の変化量によりモデルを当てはめる手法

赤池情報量基準 (Akaike's Information Criterion, 以後 AIC と呼ぶ) による最適モデルを検知・診断モデルの最適化に適用した。更にこの手法を用いた場合の収束判断基準が最適検知・診断モデルの判別・診断率に及ぼす影響を調べ、最適な収束判断基準を選び出した。

AIC の変化量によりモデルを当てはめる手法は、実測データの統計的な特徴に基づいてシステムモデルの構造およびパラメータを同定する手法であり、本研究では、この手法を不具

合検知・診断モデルの最適化に応用した。一般に、パラメータの個数が多ければ多いほど、各種のシステム状態の分布中心のマハラノビス汎距離の平方 D_{2q} が大きくなり、システム状態の判別能力は高くなることが推察できる。

しかし、必要以上のパラメータを用いて、同定した検知・診断モデルの見かけ上の判別率が高くなっても、それはある特定のデータに関してしか適用できないという恐れもある。よって、ノイズの少ない、真に判別に有効な情報を有する最適不具合検知・診断モデルの選出には、適切な最適化計算の収束判断基準の選定が重要である。一般に、実測データより得たパラメータは、検知・診断に寄与する情報と、障害となる雑音とを同時に有している。また、パラメータの間に相関性があるので、一つのパラメータの持っている検知・診断にプラスする情報の一部は、ほかのパラメータによって既に示唆されていることもある。よって、既に q 個のパラメータを選択した場合、新たに r 個のパラメータを追加するかどうかは、この r 個のパラメータによる、真に検知・診断に寄与する情報と障害となる雑音の量とを比較して判断する必要がある。 q 個と $q+r$ 個のパラメータによる正常状態と不具合状態の分布中心間のマハラノビス汎距離をそれぞれ D_q^2 、 D_{q+r}^2 とすると、新たに r 個のパラメータを追加することにより、検知・診断パラメータの分布中心間のマハラノビス汎距離の平方の増加分 $D_{q+r}^2 - D_q^2$ が単なる誤差によるものか、あるいは判別に実質的な役割を果たしているかは、もっと便利なモデルの当てはまりのよさの指標とされる AIC を用いた方が良いと報告されている。AIC は、式(3-7)で示されるように、計測データに基づく最大対数尤度とモデルの自由パラメータ数より計算される。

$$AIC = -2 \times \log(L^*) + 2 \times q \quad (3-5)$$

各状態のパラメータベクトルは(正規分布に従い、かつ各パラメータが互いに独立と仮定すると、すべての計測データを用いて各パラメータの確率密度関数の積からなる連合尤度は式(3-8)となる。

$$L = (2\pi)^{-\frac{mq}{2}} |\Sigma|^{\frac{n}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N (x_i^j - \mu^j)' \Sigma (x_i^j - \mu^j) \right\} \quad (3-6)$$

計測データが 50 以上ある場合、最小二乗法により、式(1)の中の μ^1 、 μ^2 および Σ 等の未知数はそれぞれ各状態サンプル平均値のベクトル \bar{X}^1 、 \bar{X}^2 および分散共分散マトリックス S と推定され、これらを式(3-5)に代入すると、式(3-6)で示されるような最大尤度が得られる。つまり、近似的に真の分布に最も近いモデルが得られる。

$$L^* = (2\pi)^{-\frac{mq}{2}} |S|^{\frac{n}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N (x_i^j - (\bar{x})^j)' S (x_i^j - (\bar{x})^j) \right\} \quad (3-7)$$

不具合検知・診断モデルの最適化を行う際に、パラメータを一つずつ追加したり、除去したりという方法をとる場合、 q 個と $q+1$ 個のパラメータによる AIC をそれぞれ AIC_q 、 AIC_{q+1} とすると、AIC の変化量 ΔAIC_{q+1} は式(3-7)のように誘導される。AIC の計算では、最大対数尤度をと最大尤度の何れを採用しても同様の結果が得られる。

$$\Delta AIC_{q+1} = AIC_{q+1} - AIC_q = -N \log \left\{ 1 + \frac{F_q}{N-q} \right\} + 2$$

$$F_q = \frac{N-q-r-1}{r} \frac{D_{q+1}^2 - D_q^2}{\frac{N(N-2)}{N_1 N_2} + D_q^2}$$

$$N = N_1 + N_2 \quad (3-8)$$

ΔAIC_{q+1} が負であれば、新に1つのパラメータを追加したときの AIC_{q+1} は AIC_q より小さく、このパラメータは検知・診断にノイズを相殺する有益な情報を持込んでいることを示す、このとき、新規に追加されたパラメータはシステム状態の認識に貢献すると判断でき、これを採用することが望ましい。 ΔAIC_{q+1} が正であれば、新たに追加されたパラメータは検知・診断に有益な情報よりもノイズを多く持込んでいることを示す。つまり、新たに追加されたパラメータはシステム状態の判別にあまり貢献しておらず、むしろ誤差を持ち込んでいるものと考えられる。

しかし、AIC の変化量によりモデルを当てはめる際に、収束判断基準とされる AIC の変化量の値を 0 とすると、選び出されたモデルが過度に複雑になる傾向がある。そのため、一般に AIC の変化量の有意な値は -1.0 とすればよいと指摘されている[7]。この場合、新たにパラメータを追加するかどうかは、 ΔAIC_{q+1} が -1.0 より大きいのか、小さいかによって判断する。

3.5 まとめ

一般にパラメータの数が多ければ多いほど不具合検知・診断モデルの不具合識別・診断能力が強くなることが期待される。しかし、個々のパラメータが不具合検知・診断に有効であるようにみえても、実際にはほかのパラメータとの強い相関により、複数のパラメータが同じ状態を示唆している場合も多々見られる。類似するパラメータの組み合わせによって不具合検知・診断ベクトルを構成するときには、計算時間が増加になるだけでなく、過剰学習によって検知・診断率の降下にも繋がるので、最適な不具合検知・診断ベクトルを見出す必要がある。本章では、列挙法のほかに、既存の変数選択法、AIC 変化量方法と新たに開発した判別率増分法の三つの不具合検知・診断ベクトルの最適化方法のアルゴリズムを述べた。

本章に関する既発表論文

査読付論文

[1] 鄭明傑・潘嵩・中原信生：パターン認識による蓄熱制御フォルトの検知と診断に関する研究、第3報-フォルト検知・診断パラメータの最適化, 空気調和・衛生工学会論文集、No. 78, 2000年7月

[2] Song Pan, Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Optimization of Fault Detection/Diagnosis model of Thermal Storage System with AIC、 pp. 30-36、 Journal of Harbin Institute of Technology, Vol. 13, Oct. 2006

口頭発表論文

[3] 鄭明傑・潘嵩・中原信生：パターン認識による空調システムの異常検知・診断に関する研究, 平成11年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集Ⅱ、富山、1999年9月

参考文献

[1] Fujikoshi, Y.: Selection of variables in two-group discriminant analysis by error rate and Akaike's criteria. technical report No.40, Statistical Research group, Hiroshima University, 1981

[2] Harman, H.H.: Model Factor Analysis. 3rd ed., pp.290-299, the Univ. of Chicago Press, 1976

[3] Konishi, S. and T. Sugiyama: Improved approximations to distribution of the largest and the smallest latent roots of a Wishart matrix. Ann. Inst. Statist. Math., 33, 27-33, 1981

[4] Sugiyama, T.: Tables of percentile points of a vector in principal component analysis, J. of Japan Statist., Soc., 1, 63-68, 1971

[5] 奥野中一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正：多変量解析法, 日科技連出版社, 1989

[6] 杉山高一：多変量データ解析入門, 朝倉書店, 1983

第4章 最適化検知・診断ベクトルによる水蓄熱システムの不具合検知・診断

本章では、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法を水蓄熱方式空調システムの1次側の不具合検知・診断へ適用し、本方法の有効性を検証する。

4.1 対象水蓄熱方式システムの計測データの概要

表4-1に対象建物及び水蓄熱方式空調システムの概要を、また図4-1に対象水蓄熱方式空調システムの構成を示す。対象システムの1次側は低温送水三方弁を有する2台のチラーと20槽の連結完全混合槽型水蓄熱槽で構成され、2次側はファンコイル、空調機、及び外調機により構成される。1995年5月から1996年9月にかけてこのシステムにおける各槽の代表温度の経時変化を実測した。計測結果より、計測開始の5月1日から7月21日にかけて、図4-1の中に示された三方弁V1に不具合が見られ、チラーへの送水に低温槽の水が混合されず、高温槽(図の左側)の水のみが流入するという不具合が発見された。7月22日にその不具合が修復され、その後正常状態で運転された。また、蓄熱槽の温度プロファイルの計測結果より、1995年10月28日から1996年4月24日まで冷水がほとんど利用されていないことが明らかとなった。従って、この期間はシステム状態を検知する必要がないと判断した。以上より、実測データのうち1995年5月1日から7月21日までの65日分のデータを不具合データ、1995年7月22日～10月27日と1996年4月25日～9月30日の257日分のデータを正常データとして、システム状態のオンライン検知・診断を試みた。

表4-1 対象建物及び蓄熱空調システムの概要

所在地	東京都
構造	鉄骨鉄筋コンクリート造
延べ床面積	17,000 m ²
階数	地上6階・地下2階
主要用途	病院(約200床)
熱源設備	チラー(3517W)2台
空調設備	空調機+FCU(病室系統) 外調機+ターミナル空調機(診察室系統) 空調機+リヒーター(手術室系統)
蓄熱槽	連結槽型・20分割槽・780 m ³

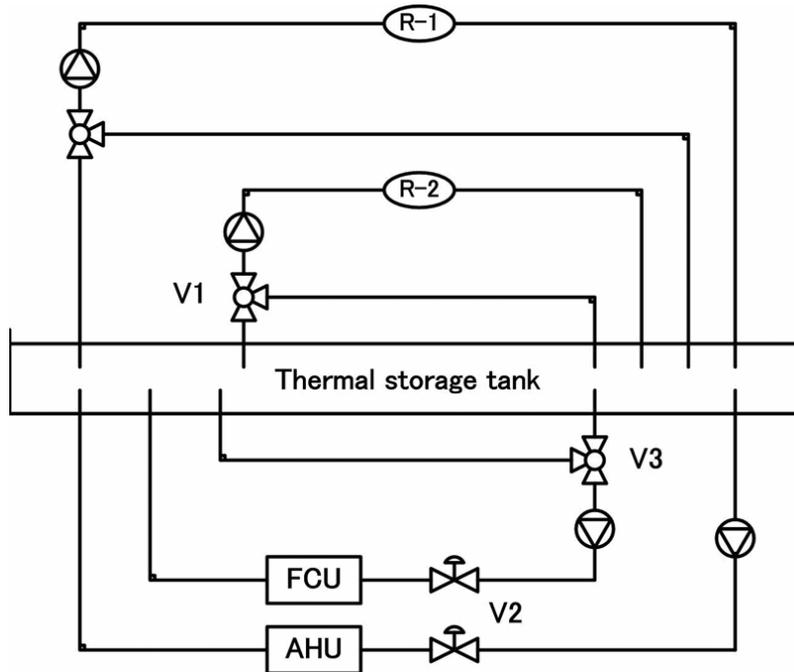


図 4-1 対象水蓄熱空調システムの略図

4.2 不具合検知・診断パラメータの設計

対象システムの特性的に関する基本的な知識に基づいて、全ての不具合状態に応じる有意性のある予備不具合検知・診断パラメータを作成することは本不具合検知・診断手法において重要である。ここでは、実蓄熱システムの特性を表現できる幾つかの統計的なパラメータとそれらのフーリエ変換値に対する統計的なパラメータと合わせて、次に示されるような 24 個のパラメータを対象水蓄熱システムの予備不具合検知・診断パラメータとする。以下の式において、 i, j はそれぞれ時刻と槽数を、 k, l はそれぞれ時間と空間に沿うフーリエ変換値の個数を示す。

- (1) 各槽の日平均温度の最小値 ($P1$)

$$P1 = \text{Min} \left(\sum_{j=1, M}^N x_{ij} / N \right) \quad (4-1)$$

- (2) 各槽の日最大温度差の平均値 ($P2$)

$$P2 = \sum_{j=1}^M (x_{\max i} - x_{\min i}) / M \quad (4-2)$$

ここで、 $x_{\max i} = \text{Max}(x_{ij})$, $x_{\min i} = \text{Min}(x_{ij})$

- (3) 各時刻全槽温度平均値の分散 ($P3$)

$$P3 = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M x_{ij} / M \right)^2 / N - \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M x_{ij} / MN \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4-3)$$

- (4) 各時刻全槽温度平均値の最大値 ($P4$)

$$P4 = \text{Max}_{i=1,N} \left(\sum_{j=1}^M x_{ij} / M \right) \quad (4-4)$$

(5) 各時刻全槽温度平均値の最小値 (P5)

$$P5 = \text{Min}_{i=1,N} \left(\sum_{j=1}^M x_{ij} / M \right) \quad (4-5)$$

(6) 各時刻全槽温度平均値の最大値と最小値の差 (P6)

$$P6 = \text{Max}_{i=1,N} \left(\sum_{j=1}^M x_{ij} / M \right) - \text{Min}_{i=1,N} \left(\sum_{j=1}^M x_{ij} / M \right) \quad (4-6)$$

(7) 各時刻全槽温度最大差の分散 (P7)

$$P7 = \left\{ \sum_{i=1}^N (x_{mij})^2 / N - \left(\sum_{i=1}^N x_{mij} / N \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4-7)$$

ここで, $x_{mij} = \text{Max}_{j=1,M} (x_{ij}) - \text{Min}_{j=1,M} (x_{ij})$

(8) 各時刻全槽温度最大差の中の最大値 (P8)

$$P8 = \text{Max}_{i=1,N} \left[\text{Max}_{j=1,M} (x_{ij}) - \text{Min}_{j=1,M} (x_{ij}) \right] \quad (4-8)$$

(9) 各時刻全槽温度最大差の中の最小値 (P9)

$$P9 = \text{Min}_{i=1,N} \left[\text{Max}_{j=1,M} (x_{ij}) - \text{Min}_{j=1,M} (x_{ij}) \right] \quad (4-9)$$

(10) 各時刻全槽温度最大差の中の最大値と最小値の差 (P10)

$$P10 = \text{Max}_{i=1,N} \left[\text{Max}_{j=1,M} (x_{ij}) - \text{Min}_{j=1,M} (x_{ij}) \right] - \text{Min}_{i=1,N} \left[\text{Max}_{j=1,M} (x_{ij}) - \text{Min}_{j=1,M} (x_{ij}) \right] \quad (4-10)$$

(11) フーリエ変換値の合計 (P11)

$$P11 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M F_{kl} \quad (4-11)$$

(12) フーリエ変換値のノルム $\|F\|^2$ (P12)

$$P12 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M F_{kl}^2 \quad (4-12)$$

(13) フーリエ変換値の $C_k C_l$ 成分の最大値 (P13)

$$P13 = \text{Max}(F_{kl}) \quad k=1, N/2 \quad l=1, M/2 \quad (4-13)$$

(14) フーリエ変換値の $C_k S_l$ 成分の最大値 (P14)

$$P14 = \text{Max}(F_{kl}) \quad k=N/2, N \quad l=1, M/2 \quad (4-14)$$

(15) フーリエ変換値の $S_k C_l$ 成分の最大値 (P15)

$$P15 = \text{Max}(F_{kl}) \quad k=1, N/2 \quad l=M/2, M \quad (4-15)$$

(16) フーリエ変換値の $S_k S_l$ 成分の最大値 (P16)

$$P16 = \text{Max}(F_{kl}) \quad k=N/2, N \quad l=M/2, M \quad (4-16)$$

(17) フーリエ変換値における各成分の最大値の平均値 (P17)

$$P17 = (P13 + P14 + P15 + P16)/4 \quad (4-17)$$

(18) フーリエ変換値に閾値を付けて、その閾値を超過する時間・空間における周波数の平均値の合計 (P18)

$$P18 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M F_{kl} \begin{pmatrix} Fl_{kl} = (k+l)/2 & |F_{kl}| > b \\ Fl_{kl} = 0 & |F_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (4-18)$$

ここで、

$$\begin{pmatrix} k = k - (N/2) & k \geq N/2 \\ k = k & k < N/2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} l = l - (M/2) & l \geq M/2 \\ l = l & l < M/2 \end{pmatrix}$$

(19) フーリエ変換値に閾値を付けて、その閾値を超過する時間・空間における周波数の平均値に基づくマトリックスのノルム $\|F\|^2$ (P19)

$$P19 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M F_{kl}^2 \begin{pmatrix} Fl_{kl} = (k+l)/2 & |F_{kl}| > b \\ Fl_{kl} = 0 & |F_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (4-19)$$

ここで、

$$\begin{pmatrix} k = k - (N/2) & k \geq N/2 \\ k = k & k < N/2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} l = l - (M/2) & l \geq M/2 \\ l = l & l < M/2 \end{pmatrix}$$

(20) フーリエ周波数の大きさが閾値を超過する頻度 (P20)

$$P20 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M F_{kl} \begin{pmatrix} Fl_{kl} = 1 & |F_{kl}| > b \\ Fl_{kl} = 0 & |F_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (4-20)$$

(21) 時間に沿う温度変動の周波数の有効成分が閾値より大きいものの中の最大値 (P21)

$$P21 = \text{Max}(Fa_{kl})$$

$$Fa_{kl} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} k & k > N/2 \\ k - N/2 & k < N/2 \end{pmatrix} & |F_{kl}| > b \\ 0 & |F_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (4-21)$$

(22) 空間に沿う温度変動の周波数の有効成分が閾値より大きいものの中の最大値 (P22)

$$P22 = \text{Max}(Fb_{kl})$$

$$Fb_{kl} = \begin{cases} \begin{pmatrix} l & l > M/2 \\ l - M/2 & l < M/2 \end{pmatrix} & |F_{kl}| > b \\ 0 & |F_{kl}| \leq b \end{cases} \quad (4-22)$$

(23) 蓄熱量 (P23)

$$P23 = \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^N (x_{i+1,j} - x_{j,i}) \sum_{i=1}^N (x_{i+1,j} - x_{j,i}) < 0 \quad (4-23)$$

(24) 放熱量 (P24)

$$P24 = \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^N (x_{i+1,j} - x_{j,i}) \sum_{i=1}^N (x_{i+1,j} - x_{j,i}) \geq 0 \quad (4-24)$$

4.3 クラスタ分析によるパラメータの分類

一般に、複数のパラメータに基づいて不具合検知・診断を行う場合、相関性の高いパラメータ同志を用いることは適切でない。ゆえに、上述した 24 個の予備パラメータのうち、相関性の高い同類のパラメータを組み合わせないように工夫する必要がある。そこで、相関係数をパラメータ同志の類似性の指標とし、クラスタ分析によりパラメータ同志の分類を行い、以下のような方法でパラメータの数を絞り込むこととした。図 4-2 はクラスタ分析による絞り込みの過程を示す。

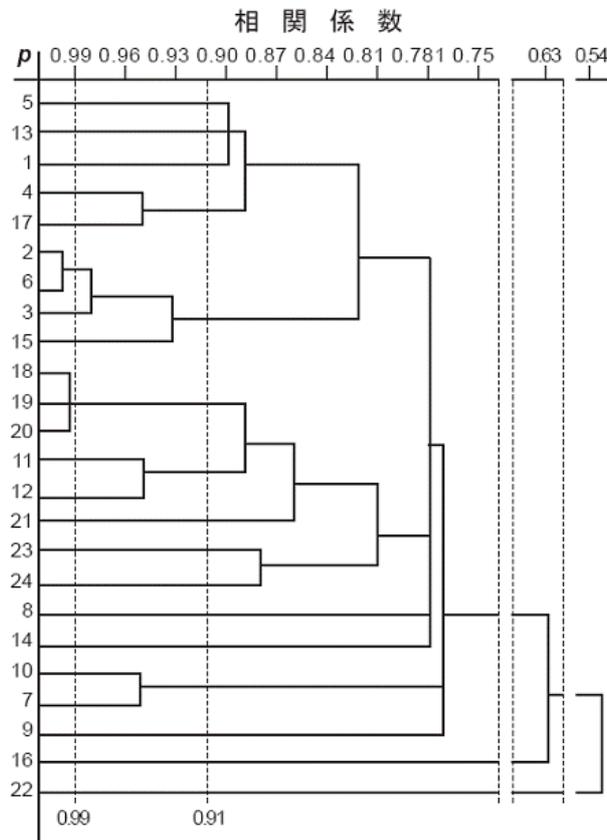


図 4-2 クラスタ分析による絞り込みの過程

表4-2 クラスタ分類結果と各クラスター内部の相関係数(閾値=0.91)

P	2	3	6	15	18	19	20	4	17	7	10	11	12	1	5	13	21	23	24	8	14	9	16	22
2		.49	.66	.62	.69	.72	.72	.76	.65	.63	.67	.68	.64	.92	.79	.78	.67	.68	.71	.74	.47	.58	.65	.58
3	.97		.56	.62	.70	.72	.71	.77	.69	.61	.65	.66	.64	.92	.79	.81	.66	.64	.70	.76	.51	.55	.64	.56
6	.99	.98		.58	.70	.72	.71	.79	.71	.62	.66	.64	.64	.92	.79	.80	.65	.65	.72	.75	.55	.57	.63	.56
15	.87	.93	.89		.69	.69	.71	.78	.74	.67	.69	.65	.58	.92	.81	.85	.67	.65	.69	.78	.51	.62	.65	.59
18	.52	.41	.48	.32		.69	.66	.71	.69	.72	.72	.66	.67	.90	.78	.73	.69	.67	.74	.78	.69	.69	.69	.70
19	.48	.37	.45	.28	.99		.70	.74	.71	.70	.72	.69	.67	.90	.77	.74	.69	.69	.74	.77	.71	.69	.69	.69
20	.55	.46	.52	.38	.99	.95		.72	.71	.71	.72	.69	.71	.90	.78	.75	.71	.70	.73	.76	.71	.69	.71	.69
4	.8	.82	.82	.71	.07	.08	.09		.63	.65	.69	.76	.74	.92	.79	.82	.76	.76	.81	.78	.68	.66	.71	.67
17	.71	.74	.73	.68	.05	.04	.04	.95		.67	.69	.69	.69	.94	.80	.85	.72	.74	.80	.76	.74	.67	.70	.64
7	.04	.06	.01	.02	.65	.59	.66	.38	.51		.69	.69	.66	.92	.80	.74	.70	.69	.76	.78	.71	.69	.64	.58
10	.12	.03	.07	.07	.69	.65	.7	.32	.43	.94		.71	.67	.92	.79	.76	.71	.71	.76	.76	.76	.76	.70	.65
11	.45	.36	.43	.26	.88	.89	.84	.12	.04	.47	.52		.66	.90	.79	.76	.69	.67	.69	.76	.67	.67	.67	.64
12	.58	.49	.55	.36	.84	.87	.81	.31	.23	.35	.43	.96		.90	.80	.77	.68	.66	.70	.76	.63	.63	.66	.59
1	.19	.2	.18	.1	.4	.36	.41	.67	.66	.47	.48	.28	.12		.90	.96	.92	.91	.92	.92	.94	.92	.90	.91
5	.06	.01	.04	.07	.59	.53	.61	.54	.59	.66	.67	.42	.27	.9		.78	.81	.79	.82	.85	.81	.84	.80	.80
13	.42	.46	.43	.36	.33	.3	.33	.85	.89	.62	.58	.2	.01	.9	.85		.77	.77	.85	.81	.87	.79	.73	.74
21	.38	.27	.36	.14	.8	.86	.75	.13	.05	.37	.43	.77	.78	.2	.3	.14		.67	.68	.77	.67	.65	.66	.63
23	.6	.5	.59	.37	.75	.79	.72	.37	.29	.24	.31	.79	.79	.1	.22	.02	.78		.67	.75	.65	.62	.67	.66
24	.62	.54	.62	.41	.79	.81	.77	.36	.31	.23	.32	.75	.81	.28	.28	0	.76	.88		.78	.74	.70	.70	.69
8	.31	.2	.26	.19	.78	.78	.77	.06	.12	.66	.77	.73	.69	.41	.49	.34	.69	.6	.65		.78	.76	.74	.78
14	.46	.48	.49	.4	.09	.04	.09	.64	.78	.64	.54	.05	.21	.29	.4	.63	.11	.31	.4	.06		.56	.64	.58
9	.18	.19	.19	.12	.16	.09	.19	.43	.54	.69	.66	.04	.15	.27	.47	.5	.14	.22	.26	.02	.76		.64	.59
16	.29	.19	.36	.19	.63	.63	.62	.03	.02	.44	.43	.54	.47	.36	.44	.32	.51	.62	.6	.5	.01	.08		.62
22	.23	.18	.19	.19	.51	.47	.52	.08	.14	.53	.54	.36	.32	.29	.43	.29	.26	.32	.32	.45	.22	.32	.35	

注：対角線以下は相関係数，対角線以上は検知率

(1) クラスターの構成と閾値

例として、**図4-2**においてP2とP6に着目する、これらの相関係数は表4-2より0.99である。ここでクラスター構成の閾値を0.99とすると、P2、P6の何れに対しても、それ以上の相関係数を有するパラメータは他に無いのでこれを一つのクラスターとする。

(2) 最近隣法

仮に閾値を0.98とすると、表4-2から分かるようにP3とP6は0.98の相関係数を持つがそれ以外にP3、P6と0.98以上の相関係数を持つものはない。P3とP2の間の相関係数は0.98未満であるが、最近隣法ではP6との近隣関係が優先され、P3のみがP2、P6と同じクラスターとして併合される。同じようにしてP18、P19、P20が閾値=0.98で一つのクラ

スターを構成することとなる。

以上よりクラスターの構成と数が採用する閾値の値によって変動することが分かる。図 4-2 は閾値を徐々に緩和し最終的に 1 つのクラスターに達するまでの全体像を示している。

(3) 閾値の選定

閾値はクラスター内部のパラメータ同士の相関係数の中に著しく小さい値が含まれないように決定する必要がある(前述の最近隣法の過程では、**表 4-2** で分かるように同一クラスターの中に閾値以下の相関係数の組み合わせが含まれることがある)。試行錯誤的にここでは閾値を 0.91 が適当であると判断し、結果として**表 4-3** のようなクラスター構成が得られた。

表 4-3 に各クラスター中のパラメータ番号及び複数のパラメータがあるクラスター内のパラメータ同志の相関係数を示す。これにより、①相関係数の閾値を 0.91 と設定すれば、分けられたクラスターの個数が 16 個であり、したがって、予備検知パラメータは 24 個から 16 個にまで絞り込めたことが分かる(**表 4-3** 中の網掛け部分)。②分類された全てのクラスターにおいて、各クラスター内部のパラメータ同志の相関係数は 0.87 以上であり、同種のものであることが確認できる。

4.4 検知パラメータの正規性の分析

マハラノビス汎距離による判別分析の前提として、検知パラメータの度数分布の正規性が要求される。しかし、実測データを用いて 24 個の予備検知パラメータの度数分布を計算した結果、多くの予備検知パラメータの度数分布は正規分布から外れていることが判った。

一般的には正規分布から大きく外れたパラメータを用いてマハラノビス汎距離により判別分析を行うと誤判別の確率が高くなるため、このようなパラメータによる不具合検知率は低くなる。しかし、前述した評価指標を不具合検知率とする列挙法を用いると、選び出だされた最適検知パラメータの検知率が最も高く最適検知パラメータの度数分布が正規性を持つことが期待できる。後述する検知パラメータの最適化を行って選び出した最適検知パラメータ P1、P13 の度数分布を**図 4-3**、**図 4-4** に示す。これらにより、P13 は正規分布に近似するが、P1 は正規分布からやや外れていることが判る。しかし、この 2 つの検知パラメータによる検知率は高いことから、P1 は正規分布からある程度外れていても、この 2 つの最適検知パラメータにより構成した判別関数は正規分布に近づいていること、本不具合検知・診断手法は最適検知パラメータの度数分布の正規性に対するロバスト性があることが推定される。

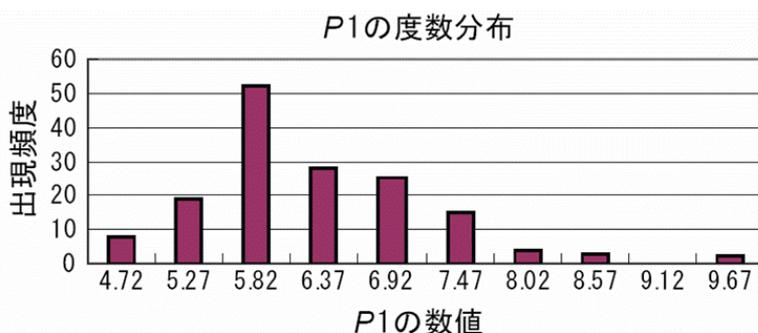


図 4-3 パラメータ P1 の度数分布

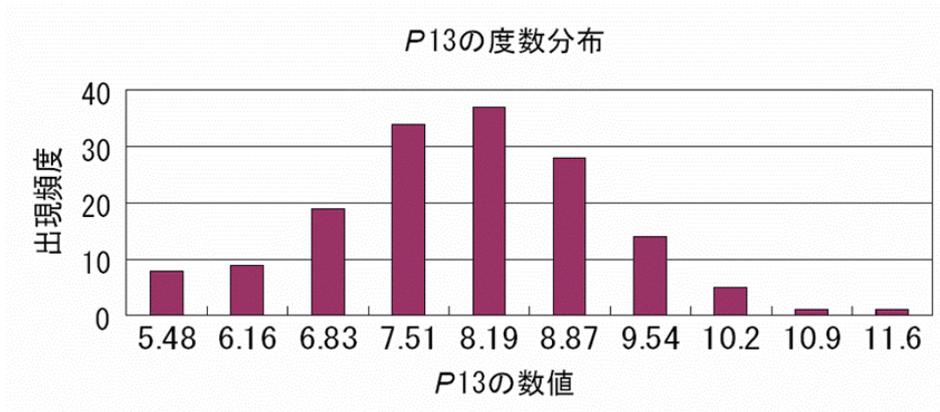


図 4-4 パラメータ P13 の度数分布

4.5 最適検知パラメータの選出

実測データの中の 95 年 7 月 22 日～10 月 27 日のデータを正常データ、5 月 1 日～7 月 21 日のデータを不具合データとして、列挙法を用いて上述の 24 個のパラメータから最適検知パラメータを推定しシステム状態の検知率を計算した。ここでは最適検知パラメータの数を 2 つと仮定した。計算結果を表 4-2 における対角線の上部分に示す。表 4-2 の中に枠を付けたデータは同じクラスター内のパラメータ同士を組合せた相関係数と検知率である。ここで、検知率とは、95 年の実測データについて、正しくシステム状態を検知できたデータ個数の割合である。表 4-2 より、以下のことがわかる。

- (1) 相関係数の大きい 2 つのパラメータを選んでも、2 つパラメータによる検知率は何れかの検知率の高い方のパラメータのみによって決定され、もう 1 つのパラメータの増加による検知率の大幅な向上は見られない。
- (2) 検知率の非常に大きい単独のパラメータを含む 2 つのパラメータの組み合わせによる検知率は高い。
- (3) 相関係数の低い 2 つのパラメータの組み合わせにおいて、それぞれが検知率に極めて有意な因子である場合は、単独の検知率よりも組み合わせた場合の検知率の方が高くなる。
- (4) 各クラスター間のパラメータの組合せのうち、P1 と P13 との組合せの検知率が 0.96 と最も高く、この 2 つのパラメータが最適検知パラメータとして選出された。図 4-5 は P1 と P13 による不具合検知図を示す。

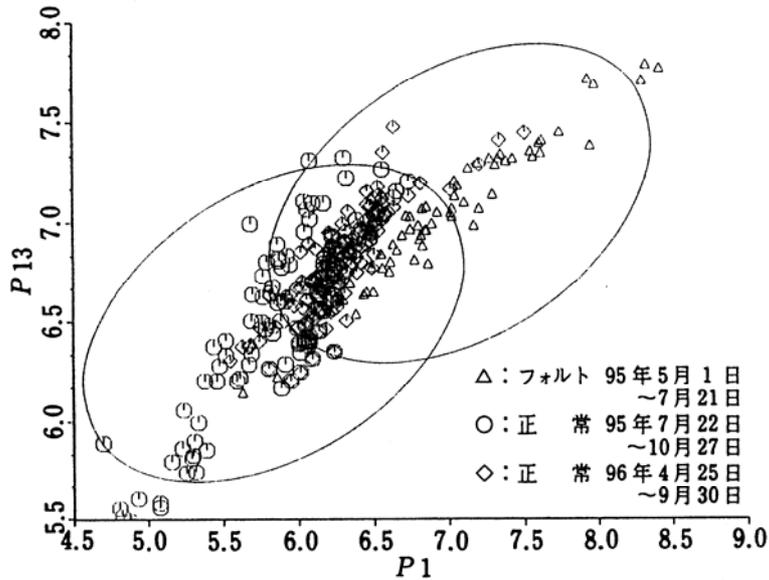


図 4-5 P1, P13 の不具合検知図

4.6 最適検知パラメータの物理的意味の考察

(1) パラメータ P1 の物理的な意味

図 4-6、図 4-7 はそれぞれ正常、不具合状態での槽内温度プロフィールとフーリエ変換図である。これらにより、三方弁の不具合がないときには、低温側槽内温度の変動が小さいことがわかる。しかし、三方弁の不具合があるときは、低温側槽内温度の上昇が大きく、温度プロフィールは空間方向に沿って変動の勾配が緩い。式(4-1)より、パラメータ P1 は低温側槽内温度の平均値であり、上述の正常状態と不具合状態における低温側槽内温度の変動特性を抽出していることがわかる。

(2) パラメータ P13 の物理的な意味

式(4-13)により、パラメータ P13 はフーリエ変換値における時間と空間に沿う各周波数の余弦成分 $C_k C_l$ の中の最大値であり、蓄熱槽内温度の時間と空間に沿う変動の激しさによるものである。図 4-6 の正常状態の場合、槽内温度は時間に沿って変動回数が多いため、フーリエ変換値 $C_k C_l$ の中の高周波数の有効成分が大きく、従って最大値 $C_k C_l$ が小さくなる。しかし、図 4-7 の三方弁が不具合している場合、温度プロフィールの時間に沿った変動の回数が少ないため、フーリエ変換値 $C_k C_l$ の中の高周波数の有効成分が小さく、最大値 $C_k C_l$ が大きくなる。よって、今回用いた 2 種の状態での槽内温度の実測データの、時間に沿う変動特性の差異は P13 によって見出すことが出来たといえる。

以上により、本不具合検知手法では、自動的に物理的な意味がある有意な最適検知パラメータを選び出すことができることがわかる。つまり、本不具合検知手法では対象システムの実測データにより最適検知パラメータを選び出しながら、マハラノビス汎距離により各種のシステム状態での統計的なベクトル範囲を決定することにより、最適検知パラメータと不具合現象の因果関係、即ち不具合検知の手法を自動的に学習する機能があることを示している。

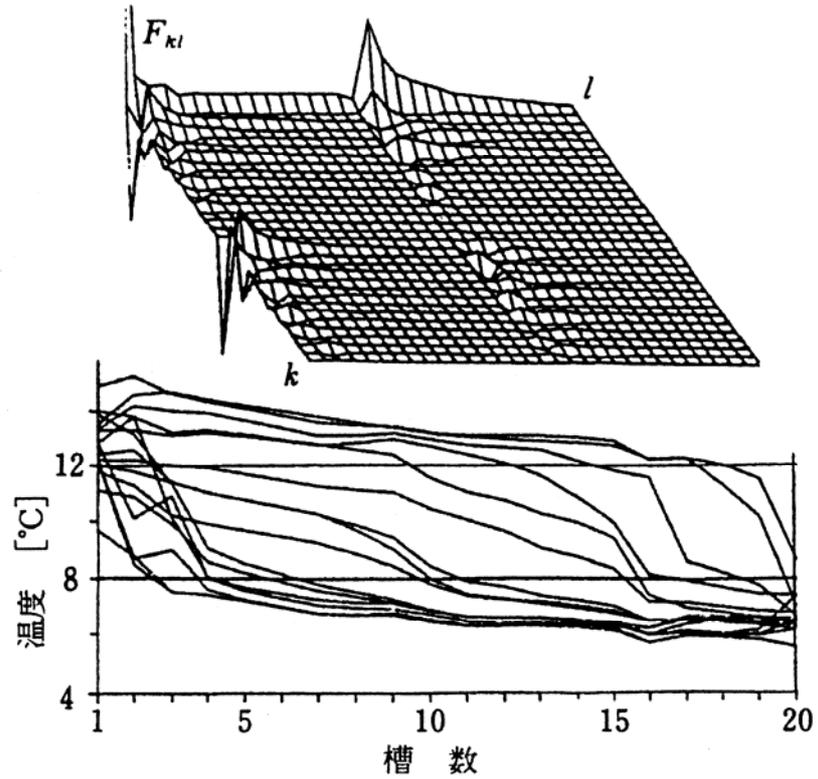


図 4-6 正常状態槽内温度プロフィールとフーリエ変換図(95年7月26日)

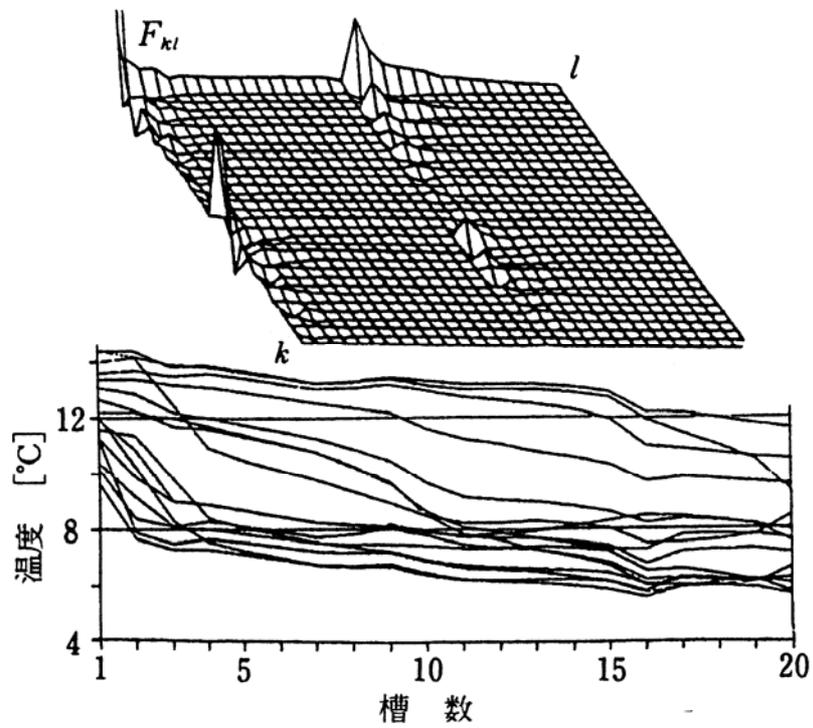


図 4-7 不具合状態槽内温度プロフィールとフーリエ変換図(95年7月15日)

4.7 オンライン不具合検知・診断

本蓄熱システムの不具合検知・状態診断方法の実用化のため、新たに選び出した2つのパラメータ(P1, P13)を用い、診断の開始時点を45分ずつ変化させ、模擬オンライン不具合検知・診断を行った結果を表4-5に示す。表4-6に表4-5の中の検知・診断率の最大値と最小値及びその分散を示す。

図4-8、図4-9、図4-10はそれぞれ検知・診断開始時刻を6, 12, 18時とした不具合検知図である。これらにより、診断開始時刻の変化により、マハラノビス汎距離より得た正常状態と不具合状態の空間範囲の大きさと位置に変化が見られるが、不具合検知・診断率に及ぼす影響は少ないことがわかる。即ち不具合検知・診断結果は検知・診断開始時刻と関係がないことが確認できる。そこで、実測データより新たに選び出した最適検知パラメータを用いて、マハラノビス汎距離法により実蓄熱システムの不具合検知・診断を行うとき、検知・診断開始時刻は不具合検知・診断率に及ぼす影響は小さく、したがって本不具合検知・診断方法は蓄熱式空調システムのオンライン不具合検知・診断にも有効であると言える。

表4-5 オンライン不具合検知・診断結果

診断 開始 時点	95年の検知率				96年の診断率	
	5月 1日～7月 21日		7月 22日～ 10月 27日		4月 25日～9月 30日	
	個数	検知率	個数	検知率	個数	診断率
0:45	57	0. 90	88	1. 0	132	0. 93
1:30	57	0. 90	88	1. 0	132	0. 93
2:15	57	0. 90	88	1. 0	132	0. 93
3:00	57	0. 90	88	1. 0	132	0. 93
3:45	57	0. 90	88	1. 0	132	0. 93
4:30	57	0. 90	88	1. 0	131	0. 92
5:15	57	0. 90	88	1. 0	132	0. 93
6:00	54	0. 86	88	1. 0	132	0. 93
6:45	54	0. 86	88	1. 0	131	0. 92
7:30	55	0. 87	88	1. 0	133	0. 94
8:15	55	0. 87	88	1. 0	133	0. 94
9:00	55	0. 87	88	1. 0	133	0. 94
9:45	55	0. 87	88	1. 0	133	0. 94
10:30	55	0. 87	88	1. 0	133	0. 94
11:15	55	0. 87	88	1. 0	133	0. 94
12:00	54	0. 86	88	1. 0	132	0. 93
12:45	54	0. 86	88	1. 0	133	0. 94
13:30	54	0. 86	88	1. 0	133	0. 94
14:15	54	0. 86	88	1. 0	132	0. 93
15:00	54	0. 86	88	1. 0	132	0. 93
15:45	55	0. 87	88	1. 0	134	0. 94
16:30	55	0. 87	86	0. 98	132	0. 93
17:15	54	0. 86	85	0. 97	131	0. 92
18:00	54	0. 86	85	0. 97	132	0. 93
18:45	55	0. 87	85	0. 97	130	0. 92
19:30	56	0. 89	86	0. 98	130	0. 92
20:15	56	0. 89	86	0. 98	131	0. 92
21:00	55	0. 87	85	0. 97	130	0. 92
21:45	56	0. 89	87	0. 99	132	0. 93
22:30	56	0. 89	87	0. 99	131	0. 92
23:15	56	0. 89	88	1. 0	131	0. 92
24:00	56	0. 89	88	1. 0	131	0. 92

表 4-6 診断開始時刻が検知・診断率に及ぼす影響

	95年 5/1~7/21		95年 7/22~10/27		96年 4/25~9/30	
	個数	検知率	個数	検知率	個数	検知率
最大値	57	0.90	88	1.0	134	0.94
最小値	54	0.86	85	0.97	130	0.92
分散	0.016		0.010		0.008	

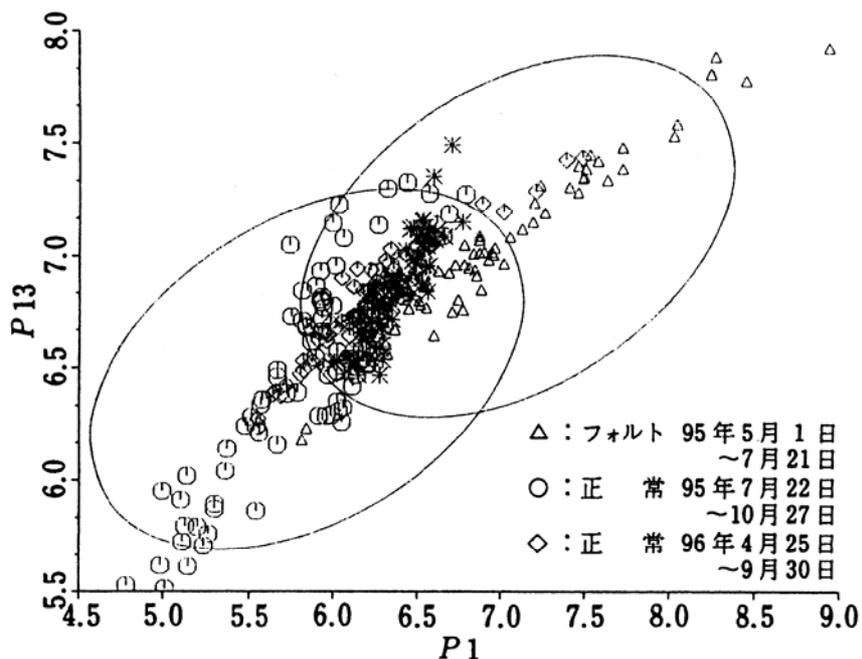


図 4-8 検知開始時点を6時とした不具合検知図

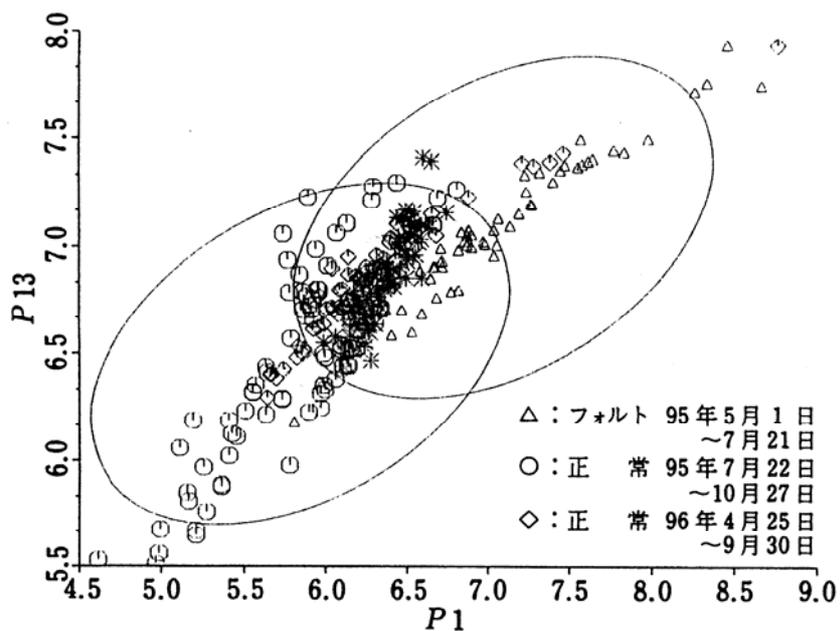


図 4-9 検知開始時点を12時とした不具合検知図

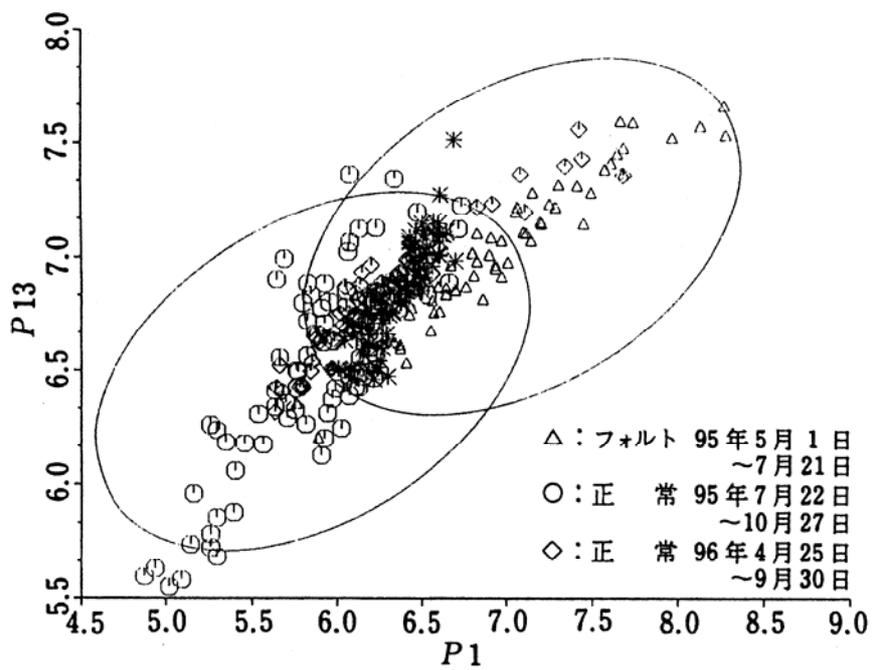


図4-10 検知開始時点を18時とした不具合検知図

4.8 変数選択法

図 4-11 は変数選択法による不具合検知・診断パラメータ最適化プログラムのフローチャートを示す。

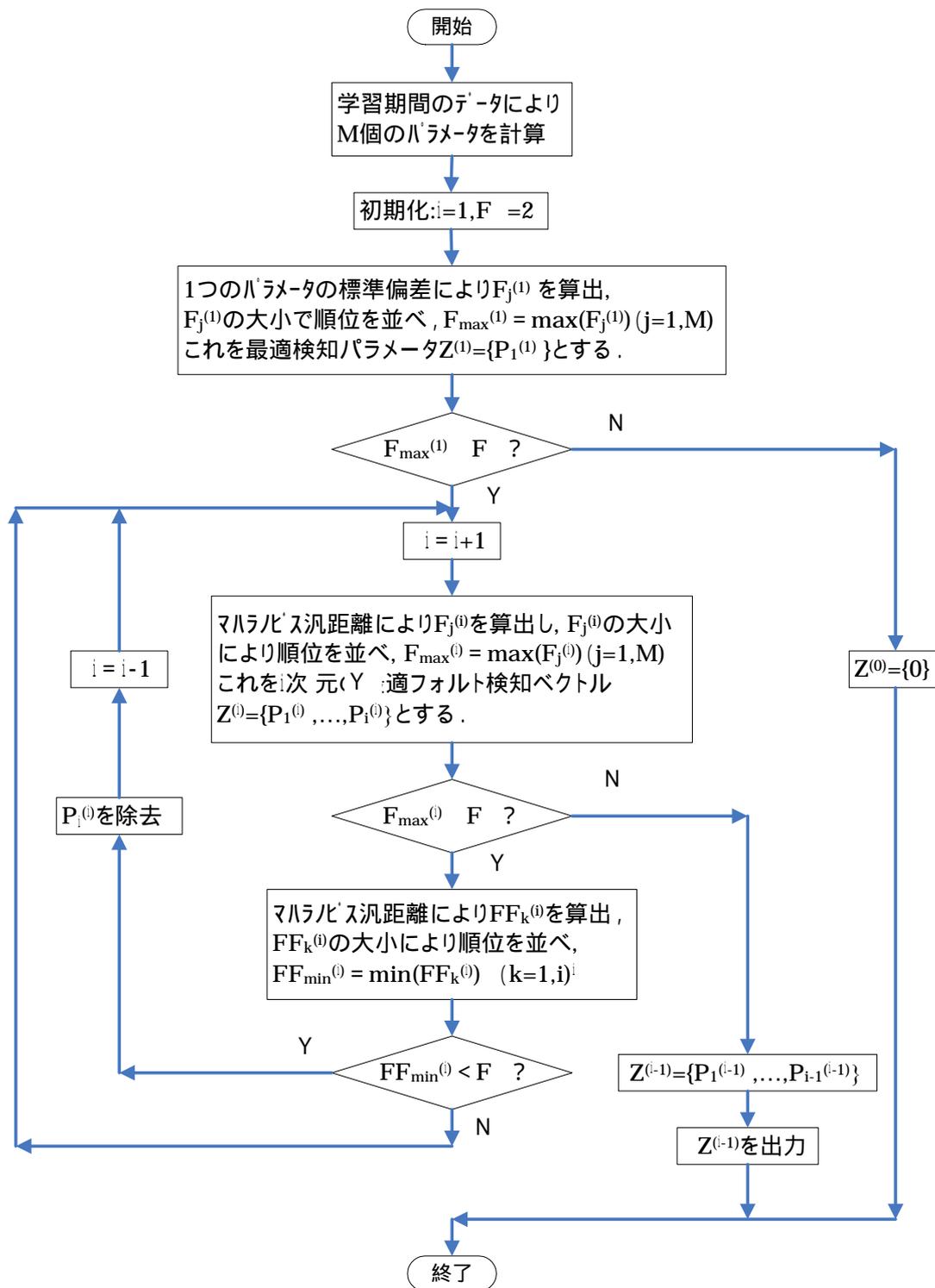


図 4-11 変数選択法による不具合検知・診断パラメータ最適化プログラムのフローチャート

4.8.1 最適化の計算収束過程

第2章で示した実蓄熱槽内温度の95年の正常状態の計測データ(7月22日~10月27日)と不具合状態の計測データ(5月1日~7月21日)をモデル作成用学習データと、96年の正常状態の計測データ(4月25日~9月30日)をモデル検証用データとして、クラスタ分析より得た16個の予備パラメータについて、変数選択法を用いて、収束判断基準 F_α をそれぞれ F 分布の上側の1%、10%点の値及び2.0、1.0としたときの不具合検知・診断パラメータの最適化計算過程を表4-7に示す。表4-7の中で、 FF は、計算中に選出されたベクトルの中に任意なパラメータが残りのパラメータに対する貢献度が小さい場合、このパラメータを除去するための指標である。例えば、表4-7の中の三次元計算において、(P17+P18, P1)は(P1)が(P17+P18)に対する貢献度 $FF_1(3)$ を求めることを示す。最適化の計算収束過程は以下のようによまとめられる。

- (1) 収束判断基準 F_α を $F_{0.01}(=6.6)$ とする場合、二次元のときの検定統計量の最大値 $F_{\max}^{(2)}$ が6.3であり、 $F_{0.01}$ より小さいので、P1は一次元最適不具合検知・診断パラメータと定められる。
- (2) 同じく(P1+P17)は収束判断基準 $F_\alpha = F_{0.01}$ のときの二次元最適不具合検知・診断パラメータとなる。
- (3) 収束判断基準=2.0の場合、最初の五次元計算においてP10の追加により、前ステップで選出された四次元最適不具合検知・診断ベクトルに含まれたP8が残りの4つのパラメータP1, P2, P10, P17に対する貢献度 $FF_3^{(5)}$ が0.1であり、2.0より小さいので、これを削除した。さらに五次元再計算の結果、 $F_{\max}^{(5)}=1.3$ となり、2.0より小さくなったので、P1, P2, P10, P17に新たにパラメータを追加する必要はない。従って最適不具合検知・診断パラメータはこれらの四つに特定できる。
- (4) 収束判断基準 F_α を1.0とすると、五次元再計算を行うときに、P1, P2, P10, P17にP5を追加することにより、P2がP1, P5, P10, P17への貢献度 $FF_4^{(5)}$ の値(0.7)が1.0より小さいので、これを削除した。更に五次元再再計算の結果、 $F_{\max}^{(5)}=0.8$ となり、1.0より小さくなったので、最適不具合検知・診断パラメータはP1, P5, P10, P17と定められる。

表 4-7 変数選択法によるパラメータ最適化の収束過程

一次元：									
ハ°ラメータ	P1	P5	P13	P8	P10	P19	P24	P11	P21
$F_j^{(1)}$	82.6	57.1	47.6	37.0	29.0	22.2	15.8	14.4	13.9
二次元： $(F_{0.01}(1, >120)=6.6$ のときに、計算収束)									
P1,	P17	P13	P24	P8	P14	P23	P21	P2	P19
$F_j^{(2)}$	6.3	6.2	5.8	4.5	4.1	3.6	2.5	1.6	1.6
ハ°ラメータ	P17, P1	P1, P17							
$FF_k^{(2)}$	73.5	6.3							
三次元： $(F_{0.1}(2, >120)=2.7$ のときに、計算収束)									
P1+P17,	P8	P10	P24	P8	P14	P23	P21	P2	P19
$F_j^{(3)}$	2.4	1.9	5.8	4.5	4.1	3.6	2.5	1.6	1.6
ハ°ラメータ	P17+P8, P1		P1+P8, P17		P1+P17, P2				
$FF_k^{(3)}$	56.1		12.2		3.3				
四次元：									
P1+P17+P8,	P2	P5	P13	P11	P19	P16	P22	P14	
$F_j^{(4)}$	3.9	3.3	1.1	1.0	0.8	0.6	0.3	0.1	
ハ°ラメータ	P17+P2+P8, P1		P1+P2+P8, P17		P1+P17+P2, P8		P1+P17+P8, P2		
$FF_k^{(4)}$	43.3		8.1		5.0		3.9		
五次元：									
P1+P17+P8+P2,	P10	P9	P14	P24	P16	P23	P11	P5	
$F_j^{(5)}$	2.3	2.3	1.5	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	
ハ°ラメータ	P17+P2+P5+P10,		P1+P2+P8+P10,		P1+P17+P2+P10,		P1+P17+P8+P10,		P1+P17+P2+P8,
$FF_k^{(4)}$	45.5		9.9		0.1		6.2		2.3
P8 を削除して五次元再計算： $(F_{\alpha}=2.0$ のときに、計算収束)									
P1+P17+P2+P10,	P5	P24	P23	P21	P16	P13	P19		
$F_j^{(5)}$	1.3	1.1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2		
ハ°ラメータ	P17+P2+P5+P10,		P1+P2+P8+P10,		P1+P17+P2+P5,		P1+P17+P5+P10,		P1+P17+P2+P5,
$FF_k^{(4)}$	20.6		3.9		8.3		0.7		1.3
P2 を削除して五次元再々計算： $(F_{\alpha}=1.0$ のときに、計算収束)									
P1+P17+P2+P10,	P2	P16	P24	P13	P23	P22	P21		
$F_j^{(5)}$	0.8	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1		

以上により、 $F_{\alpha} \geq 2.0$ の場合、これを厳しく設定するほど最適不具合検知・診断ベクトルの次元数が大きくなるが、 F_{α} を 2.0 より小さくしても、最適不具合検知・診断パラメータは変動するが最適不具合検知・診断ベクトルの次元数は不変であることがわかる。また、 F_{α} を

文献に推奨された 2.0 とすると、最適不具合検知・診断パラメータは (P1, P2, P10, P17) となった。

4.8.2 判別関数による比較

各次元のベクトルのシステム状態の判別力を比較するために、式(4-25)で示される判別関数を用いて考察した。

$$Z = (X - \bar{\mu})' \Sigma^{-1} (\mu^1 - \mu^2) \quad \bar{\mu} = (\mu^1 + \mu^2) / 2 \quad (4-25)$$

ここに、 Z はある状態の計測データより計算された不具合検知・診断ベクトル X の判別関数であり、 μ^1 、 μ^2 はそれぞれパラメータベクトルの不具合・正常状態での分布中心である。式(4-25)を用いて、上述した四つの不具合検知・診断ベクトルの、95年の正常状態、96年の正常状態、95年の不具合状態での判別関数 Z の分布中心 (Z_1^2, Z_2^2, Z^1) および Z_1^2 と Z^1 、 Z_2^2 と Z^1 の間の距離を計算した結果を表 4-8 に示す。また各状態の判別関数 Z の度数分布をそれぞれ図 4-12～図 4-15 に示す。これらにより、以下のことがわかる。

表 4-8 収束判断基準が判別力に及ぼす影響(変数選択法)

F_α	パラメータ	不具合 Z^1	正常(95年)		正常(96年)	
			Z_1^2	$Z_1^2 - Z^1$	Z_2^2	$Z_1^2 - Z^1$
6.6	P1	-2.23	2.23	4.46	0.53	2.76
2.7	P1, P17	-2.47	2.47	4.96	1.33	3.80
2.0	P1, P2, P10, P17	-2.78	2.78	5.56	1.07	3.85
1.0	P1, P5, P10, P17	-2.88	2.88	5.76	0.16	3.04

□ フォルト(95年5/1～7/21) ■ 正常(95年7/22～10/27)
 ■ 正常(96年4/25～9/30)

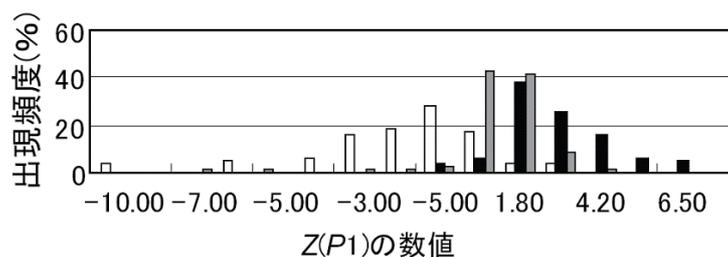


図 4-12 各状態のデータの判別関数 Z (P1) の度数分布

□ フォルト(95年5/1～7/21) ■ 正常(95年7/22～10/27)
 ■ 正常(96年4/25～9/30)

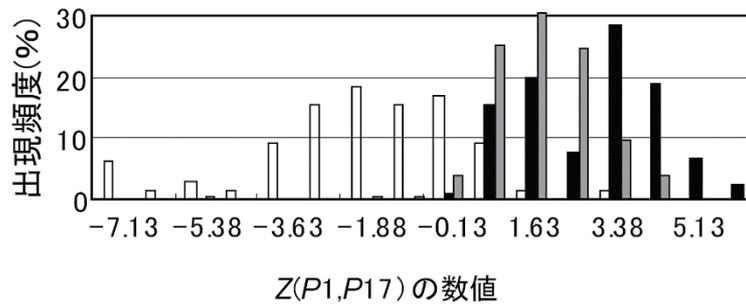


図 4-13 各状態の判別関数 $Z(P1, P17)$ の度数分布

□ フォルト(95年5/1～7/21) ■ 正常(95年7/22～10/27)
 ■ 正常(96年4/25～9/30)

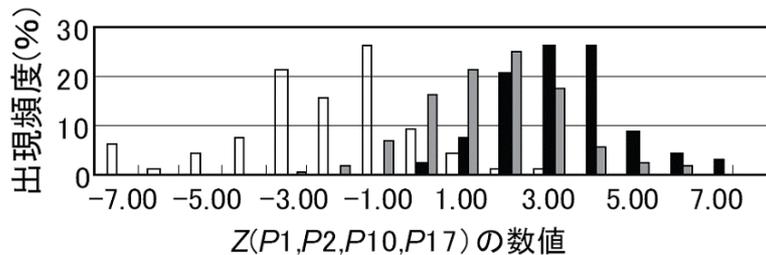


図 4-14 各状態の判別関数 $Z(P1, P2, P10, P17)$ の度数分布

□ フォルト(95年5/1～7/21) ■ 正常(95年7/22～10/27)
 ■ 正常(96年4/25～9/30)

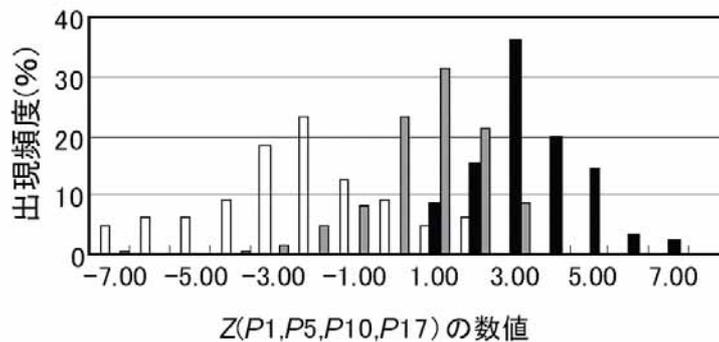


図 4-15 各状態の判別関数 $Z(P1, P5, P10, P17)$ の度数分布

収束判断基準を厳しくするほど、選び出された不具合検知・診断モデルの、95年のモデル作成用正常状態と不具合状態データの判別関数 Z の分布中心間の距離 ($Z_2^2 - Z_1^1$) が大きくなる。 $F_\alpha = 1.0$ の場合に選び出されたベクトル $(P1, P5, P10, P17)$ の $(Z_2^2 - Z_1^1)$ が 3.04 であり、 $F_\alpha = 2.0$ のときに選び出されたベクトル $(P1, P2, P10, P17)$ の $(Z_2^2 - Z_1^1)$ より小さい。つまり、収束判断基準を厳しすぎる値に設定すると、選び出したベクトルはモデル作成用データに過学習し、不

具合検知・診断力が逆に低下することになる。

二次元最適不具合検知・診断ベクトル(P1, P17)の($Z_2^2 - Z^1$)の値が3.80であり、四次元の最適不具合検知・診断ベクトル(P1, P2, P10, P17)の3.85との差は殆どない。しかし、**図 4-13**と**図 4-14**を比較すると、前者の96の正常状態のデータの判別関数Zの値はほぼ95年の正常状態のデータの分布範囲に入っているに対し、一部の後者の96年の正常状態のデータの判別関数Zの値が95年の不具合状態に入った。このことは高次元のベクトルよりも、低次元のベクトルは実際の判別・診断に有効であることを示している。

4.8.3 判別・診断率による比較

以上のように、正常状態と不具合状態での判別関数の分布中心間の距離を比較することで、異なる収束判断基準より得た4つの最適不具合検知・診断ベクトルの検知・診断力を検証した。次に、システム状態の判別・診断率によりこれらの不具合検知・診断ベクトルを比較する。ここに、判別率とはモデル作成用95年の2種状態の実測データについて、正しくシステム状態を判別できたデータ個数の割合である。診断率とは、モデル検証用96年の実測データについて、正しくシステム状態を診断できたデータ個数の割合である。

(1) 判別できないデータの検出

実測データの中の正常状態および不具合状態の分布中心から大きく外れるデータに対して、マハラノビス汎距離により判別・診断を行っても、その判定結果の信頼性はあまり高くないので、判別・診断率を計算する前にこのようなデータを検出する必要がある。一般にマハラノビス汎距離に基づく判別関数が正規分布に従う場合、ある状態のデータからその状態の分布中心までのマハラノビス汎距離の平方は統計量 χ^2 の分布に従う。よって、統計量 χ^2 の有意性検定により各種の状態の分布中心から大きく外れるデータを検出できる。つまり、式(4-26)で示されるように、ある計測データより求められた q 次元不具合検知・診断ベクトルの値から各種の状態の分布中心までのマハラノビス汎距離 D_q^2 が $\chi^2(q)$ より大きい場合、このデータはモデルを同定するときに用いられたデータと異なると推定される。ただし、統計量 $\chi^2(q)$ の有意性判定基準を厳しくするほど検定範囲が広がるが、今回の計算では、99%のモデル作成用データが検定範囲に入るように、検定基準を $\chi_{0.01}^2(q)$ とした。

$$D_q^2 > \chi_{0.01}^2(q) \quad (4-26)$$

(2) 収束判断基準が判別・診断率に及ぼす影響

表 4-9に上述した4つの収束判断基準により選び出した最適不具合検知・診断ベクトルの判別・診断率および判別・診断のできないデータの計算結果を示す。これにより以下のことがわかる。

1) 収束判別基準 $F\alpha \geq 2.0$ の場合、これを小さくするほど判別率が高くなるが、これをさらに2.0より小さくすると逆に判別率が劣る。つまり、収束判別基準を過小にすると、新たに追加されたパラメータによるマハラノビス汎距離の平方の増加分があっても、これが小さ過ぎるため、判別にあまり有効ではなく、単なる誤差によるものとなる。

2) 収束判断基準 $\geq F_{0.1}(=2.7)$ の場合、これを小さくするほど、診断率が大きくなるが、これ

をさらに $F_{0.1}$ より小さくすると逆に診断率は劣る。このことは収束判断基準を $F_{0.1}$ より小さくすると、選び出された最適不具合検知・診断ベクトルはモデル作成用データを学習し過ぎることを示している。特に、収束判断基準=1.0 の場合、同定したモデルが 96 年のモデル検証用データに対する誤診断率と診断できないケースが急激に増加している。

3) 収束判別基準を $F_{0.1}$ とした場合、選び出されたベクトルは (P1, P17) であり、これを用いた判別率は $F\alpha = 2.0$ のときに選び出されたベクトル (P1, P2, P10, P17) の判別率よりやや低いが、その診断率は最も良い結果となった。このことは、モデルを同定する際に、モデル作成用データへの過学習を避けるには、収束判断基準を文献^[4]で推奨された $F\alpha = 2.0$ よりやや大きくして、これを $F_{0.1}$ とした方が適切であることを示している。

4) 最適収束判断基準を上述した $F_{0.1}$ (=2.7) としても、判別・診断できないケースが現れた原因としては、実蓄熱システムでは、これらのケースの生起期間中に何等かの別の不具合が発生したか、または χ_2 の有意性判定範囲が小さいからと推察できる。

これらのケースの槽内温度プロファイルを調べると、その日の冷水流量が大きいので、各槽の温度がほぼ同時に大幅に変動していたことがわかる。よって、不具合検知・診断ベクトルの値は 2 種の状態の分布中心から大きく外れた結果となった。

表 4-9 収束判断基準が判別・診断率に及ぼす影響 (変数選択法)

収束判断基準		$F_{0.01}$ (=6.6)	$F_{0.1}$ (=2.7)	2.0	1.0
パラメータ		1	1,17	1,2,10,17	1,5,10,17
95年 5/1~ 7/21	判別率	0.83	0.88	0.91	0.86
	誤判別率	0.14	0.11	0.08	0.11
	不明日	7/12,13	7/12	7/12	7/14,15
95年 7/22 ~ 10/27	判別率	0.95	0.98	0.98	1.0
	誤判別率	0.05	0.02	0.02	0.0
	不明日	—	—	—	—
96年 4/25 ~ 9/30	診断率	0.72	0.91	0.75	0.63
	誤診断率	0.28	0.08	0.24	0.30
	不明日	—	7/26	7/26	7/15~19 7/25, 26,28 7/29,8/5,7

以上により、変数選択法により不具合検知・診断パラメータの最適化を行う際に、最適収束判断基準は $F_{0.1}$ であり、最適不具合検知・診断パラメータは P1, P17 であると考えられる。

4.9 判別率増分法

4.9.1 最適化計算の収束過程

16 個の予備パラメータについて、95 年のデータを学習データとして、誤診断率の許容値 d を 0.2 とし、収束判定基準 b を 0.1, 0.01, 0.0 とした最適化計算結果を **表 4-5** に、その計算収束過程を以下のように示す。

(1) まず、16 個の予備パラメータ毎の見かけ上の判別率を求め、判別率が上位であった P1 の見かけ上の判別率は 0.897 であった。その理論誤診断率は 0.174 で、許容値の 0.2 より小さいので、これが一次元最適不具合検知・診断パラメータとして選び出された。

(2) 一次元の計算で判別率の上位であった 5 個のパラメータを一つづつ用い、残りの 15 個のパラメータと組合せて $2 \times 5 \times 15 = 150$ 個のベクトルが得られた。それらの中で、(P1, P13) の見かけ上の判別率(0.955)が最も大きい、つまり、P13 の追加による判別率の増加分が 0.058 であった。また、(P1, P13) の理論誤診断率は 0.179 であり、許容値の 0.2 より小さい為、P13 は判別率の向上に実質的に貢献していることが認められ、従って P1, P13 が二次元最適不具合検知・診断ベクトルとして選び出された。

表 4-10 判別率増分法により最適化計算の収束過程

一次元：					
パラメータ	P1	P5	P8	P13	P19
判別率	0.897	0.795	0.769	0.750	0.705
理論誤診断率	0.174	0.218	0.264	0.239	0.312
二次元： (収束判定基準 $b=0.1$ のときに、計算収束)					
パラメータ	P1,P13	P1,P17	P1,P14	P1,P24	P1,P8
判別率	0.955	0.936	0.923	0.917	0.910
理論誤診断率	0.179	0.179	0.184	0.179	0.181
判別率増加量	0.058	0.039	0.026	0.020	0.013
三次元： (収束判定基準 $b=0.01$ のときに、計算収束)					
パラメータ	P1+P13, P2	P1+P13, P16	P1+P13, P14	P1+P13, P17	
判別率	0.962	0.962	0.955	0.955	
理論誤診断率	0.161	0.159	0.161	0.159	
判別率増加量	0.007	0.007	0.0	0.0	
四次元： (収束判定基準 $b=0.0$ のときに、計算収束)					
パラメータ	P1+P2+P13, P14	P1+P13+P14, P11	P1+P9+P13, P22		
判別率	0.962	0.962	0.955		
理論誤診断率	0.159	0.159	0.159		
判別率増加量	0.0	0.0	0.0		

収束判断基準 ≤ 0.01 の場合、続いて三次元の計算を行う。まず二次元の計算において、見かけ上の判別率の上位であった $2 \times 5 = 10$ 個(表 4-10 には 5 番目までしか表示していない)の二次元ベクトルを用いて残りの 14 個のパラメータと組合せて $3 \times 10 \times 14 = 420$ 個の三次元ベクトルが得られた。その中で、見かけ上の判別率が最も大きなベクトルは (P1, P13, P2) および (P1, P13, P16) の 2 つとなった。但し、これらのベクトルの見かけ上の判別率は 0.962 であり、ベクトルの次元数の増加による判別率の増加量が 0.007 しかないため、収束判断基準を 0.01 とすると、判別率の向上に実質的な貢献が認められなくなる。よって、収束判断基準が 0.01 である場合、最適不具合検知・診断ベクトルの次元数は 2 であり、最適不具合検知・診断パラメータは P1, P13 と定められた。

更に、収束判断基準が 0.0 である場合、見かけ上の判別率の上位であった多数の四次元ベ

クトルの判別率の増加量は 0.0 であるので、最適不具合検知・診断ベクトルは三次元の計算で選出された 2 つのベクトル (P1, P2, P13) および (P1, P13, P16) となった。

4.9.2 判別関数による比較

上述した四つの不具合検知・診断ベクトルを用いて計算した正常状態および不具合状態のデータの判別関数 Z の分布中心およびそれらの間の距離を表 4-11 に示す。これにより、収束判断基準 $b \geq 0.01$ の場合、これを厳しくするほど、選出された不具合検知・診断モデルの 95 年のモデル作成用正常状態と不具合状態データの判別関数 Z の分布中心間の距離 ($Z_1^2 - Z_1$) が大きくなるのがわかる。しかし、 $b = 0.01$ および $b = 0.0$ のときに、選出された三つのベクトルの判別力はほぼ等しいことも判る。このことは、判別率増分法より不具合検知・診断パラメータの最適化を行う際に、収束判断基準を 0.01 とすれば十分な判別力が得られ、従って最適不具合検知・診断パラメータは P1, P13 とされることを示している。

表 4-11 収束判断基準が判別力に及ぼす影響 (判別率増分法)

b	パラメータ	フォルト Z^1	正常(95年)		正常(96年)	
			Z_1^2	$Z_1^2 - Z^1$	Z_2^2	$Z_2^2 - Z^1$
0.1	P1	-2.23	2.23	4.46	0.53	2.76
0.01	P1, P13	-2.44	2.44	4.88	1.04	3.48
0.0	P1, P2, P13	-2.44	2.44	4.88	1.04	3.48
0.0	P1, P13, P16	-2.44	2.44	4.88	1.06	3.50

4.9.3 収束判定基準が判別・診断率に及ぼす影響

表 4-5 に示した最適化計算過程において、収束判定基準 b を 0.01, 0.1, 0.0 としたときに選出された最適不具合検知・診断ベクトルを用いて計算した 95 年のモデル学習用データに対する見かけ上の判別・誤判別率、理論誤判別率、96 年のモデル検証用データに対する診断・誤診断率および判別できないデータの日期を表 4-12 に示す。これにより、以下のことが判る。

b を厳しくするほど、最適不具合検知・診断ベクトルの次元数が大きくなり、判別・診断率も高くなる。 $b = 0.0$ の場合より、 $b = 0.01$ のときに選出された (P1, P13) の見かけ上の判別率および診断率の差はそれほど大きくないので、 b を 0.01 に設定しても十分な不具合検知・診断精度が得られる。

表 4-12 収束判断基準が判別・診断率に及ぼす影響 (判別率増分法)

収束判断基準 パラメータ		$b = 0.1$	$b = 0.01$	$b = 0.0$	
		P1	P1, P13	P1, P13, P2	P1, P13, P16
95 年 5/1~7/21	判別率	0.83	0.89	0.92	0.92
	誤判別率	0.14	0.09	0.08	0.08
	不明日	7/12, 13	7/12	—	—
95 年 7/22~10/27	判別率	0.95	1.0	0.99	0.99
	誤判別率	0.05	0.0	0.01	0.01
	不明日	—	—	—	—
96 年 4/25~9/30	診断率	0.72	0.93	0.93	0.92
	誤診断率	0.28	0.07	0.06	0.07
	不明日	—	—	7/26	7/26
	理論誤診断率	0.17	0.18	0.16	0.16

4.9.4 誤診断率と理論誤診断率の関係

誤診断率と理論誤診断率の関係を明らかにする為に、表 4-7 の中に、理論誤診断率も示した。表 4-7 より、二、三次元の最適不具合検知・診断モデルの誤診断率は理論誤診断率より小さいことが判る。このことは、モデル作成用学習データの統計的特性より求められた誤診断の確率が高いが、実際の誤診断率はそれほど生じないことを示している。但し、一次元の計算において、P1 の理論誤診断率は 0.17 であり、設定した許容値の 0.2 より小さいため、P1 は最適不具合検知・診断パラメータとして選出された。しかし、これを用いたモデル検証用データに対する誤診断率は 0.28 であり、許容値の 0.2 より大きくなった。これは、P1 だけを用いると、96 の正常状態データの分布は 96 年の正常状態データの分布と異なることを示している。よって、この現象を避けるには、低次元の最適化計算を行う際に、理論誤診断率の許容値 d をより小さい値に設定した方がよい。

4.10 AIC による最適化

4.10.1 AIC 変化量によるモデルの最適化と判断基準

AIC 変化量の有意性の判断基準をそれぞれ -1.0, 0.0 として、上述した 16 個予備検知診断パラメータについて、検知・診断モデル最適化の計算過程を表 4-13 に示す。AIC 変化量の有意性の判断基準を -1.0 とする場合には、2 つのパラメータ (P1, P17) に P8 を追加すると、 ΔAIC_{q+1} は -0.43 となり、-1.0 より大きいため、P8 の追加はシステム状態の判別にあまり役立っていないと判断し、不具合検知・診断モデルは (P1, P17) となる。これに対して、AIC 変化量の有意性の判断基準を 0.0 とする場合には、不具合検知・診断モデルは (P1, P2, P10, P17) となる。

表 4-13 AIC による最適モデルの選出過程

判断基準	-1.0			0.0		
	一	二	三	四	五	五(再)
次元数	1	1, 17	1+17, 8	1+17+8, 2	1+2+8+17, 10	1+2+10+17, 5
パラメータ	1	1, 17	1+17, 8	1+17+8, 2	1+2+8+17, 10	1+2+10+17, 5
F_q	82. 6	6. 3	2. 4	3. 9	2. 3	1. 3
ΔAIC_{q+1}	-64. 6	-4. 25	-0. 43	-1. 95	-0. 36	0. 66

4.10.2 有意性の判断基準が判別・診断率に及ぼす影響

一般に検知・診断ベクトルより構成した判別関数が正規分布に従う場合、ある状態の計測データからその状態の分布中心までのマハラノビス汎距離の平方 D_q^2 は統計量 $\chi^2(q)$ の分布に従う。よって、統計量 $\chi^2(q)$ により、マハラノビス汎距離を用いた判別分析の有意性を検定できる。つまり、ある計測データから各種状態の分布中心までのマハラノビス汎距離 D_q^2 が $\chi_a^2(q)$ より大きい場合、マハラノビス汎距離で判別を行っても、その判定結果の信頼性はあまり高くない。検定統計量 $\chi^2(q)$ の判定基準を厳しくすればするほど判別できる範囲が大きくなるが、今回の計算では、既知データの見かけ上の判別率がもっとも大きくなるよう、つまり 99% のデータを判別できるように検定基準を $\chi_{0.01}^2(q)$ とした。

表 4-14 に 2 つの AIC 変化量の有意性判断基準により選び出した検知・診断モデルの 95 年のモデル作成用学習データに対する判別率、96 年のモデル検証用データに対する診断率および正常状態と不具合状態の分布中心から大きく外れているデータを示す。これにより、以下のことがわかる。

AIC 変化量の収束判断基準=-1.0 の場合、選び出された最適検知・診断パラメータは (P1, P17) であり、これを用いた判別率は AIC 変化量の判断基準=0 のときに得られたモデルの判別率よりやや低い、診断率は最も良い結果となった。つまり、95 年のモデル作成用データへの過学習を避けるには、-1.0 は AIC の変化量による検知・診断モデルの最適化手法において、優れた判断基準であるといえる。

上述した最適収束判断基準を用いても、各種状態の分布中心から大きく離れ、判別できないデータが存在する。その原因として、今回の計算では計算期間におけるシステムの状態が正常範囲以外に、吸込み三方弁不具合だけが発生すると仮定したためと考えられる。実際にはこれらのケースの生起期間中に何等かの別の不具合が発生していた可能性も存在する。

表 4-14 有意性の判断基準が判別・診断率に及ぼす影響

ΔAIC_{q+1} の判断基準		-1. 0	0. 0
パラメータ		P1, P17	P1, P2, P10, P17
95 年 5/1~7/21	判別率	0. 88	0. 91
	誤判別率	0. 11	0. 08
	不明日率	0. 01 (7/12)	0. 01 (7/12)
95 年 7/22~10/27	判別率	0. 98	0. 98
	誤判別率	0. 02	0. 02
	不明日率	0(-)	0(-)
96 年 4/25~9/30	診断率	0. 91	0. 75
	誤診断率	0. 08	0. 24
	不明日率	0. 01 (7/26)	0. 01 (7/26)

4.10.3 最適検知モデルの構成パラメータの物理意味

以上により、(P1, P17) が最適検知モデルとして選出された。**図 4-15** に P1 と P17 による不具合検知・診断図を示す。以下でパラメータの物理的な意味を考察する。

(1) P1 の物理的意味

図 4-16, **図 4-17** はそれぞれ正常, 不具合状態の槽内温度プロフィールとフーリエ変換図である。**図 4-18** は連結完全混合槽型蓄熱槽の槽内温度プロフィールのフーリエ変換図の見方を示す。これらより、三方弁 V1 が正常稼動するとき、低温側槽内の温度変動幅が小さいことが分かる。一方、三方弁が異常であるときは、低温側槽内温度の上昇が大きく、温度プロフィールは空間方向に沿って変動の勾配が緩くなる。式(2-1)より、パラメータ P1 は低温槽内温度の平均値であり、上述の正常状態と不具合状態における低温側槽内温度の変動特性を抽出でき

ることが分かる。

(2) P17 の物理的意味

パラメータ P17 はフーリエ変換値における各成分の最大値の平均値であり、蓄熱槽内温度の時間と空間に沿う変動に対する低次周波有効成分の大きさによるものを示す。例として $S_k S_l$ 成分の最大値を考察する。図 4-16 の正常状態の場合、槽内温度は時間に沿って変動回数が多いため、 $S_k S_l$ の中の高周波数の有効成分が大きく、最大値 $S_k S_l$ が小さくなる。一方、図 4-17 の三方弁 V1 が異常である場合、温度プロフィルの時間に沿う変動の回数が少ないため、 $S_k S_l$ の中の高周波数の有効成分が小さく、最大値 $S_k S_l$ が大きくなる。ほかの領域のフーリエ変換値でも同様な傾向があり、結果として図 4-16 に示されるように正常状態と比べて不具合状態の P17 の値が大きくなっている。そのため、P17 は正常と異常状態の槽内温度の時間と空間における変動特性の差異を識別できた。

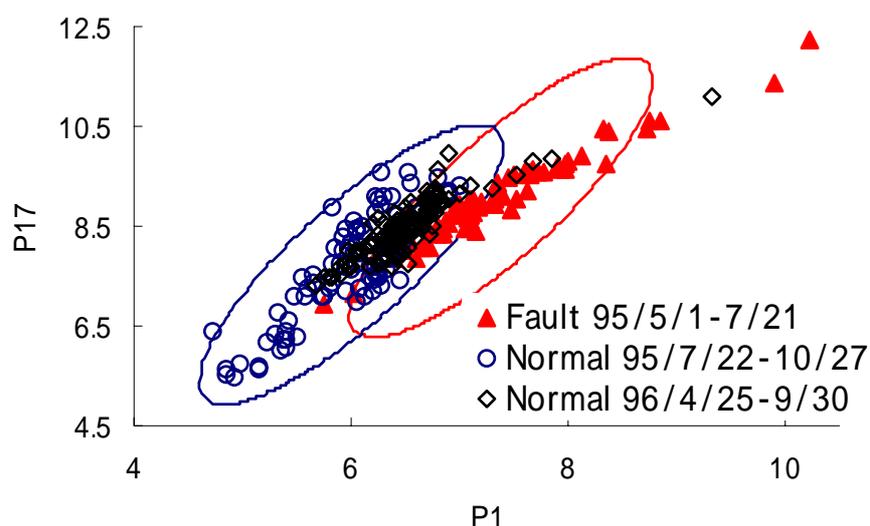


図 4-15 最適検知モデル ($P1$, $P17$) による検知・診断図

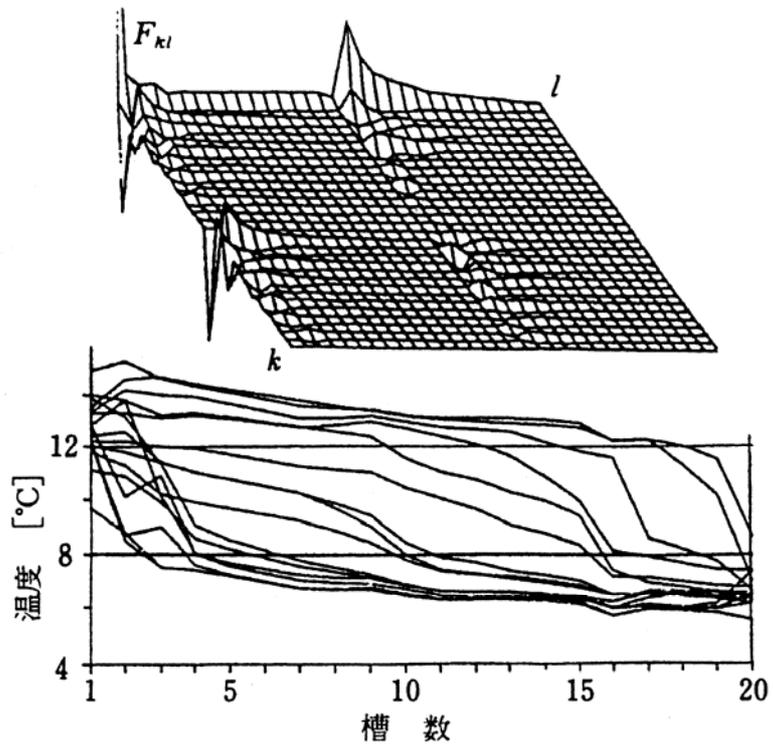


図 4-16 正常状態槽内温度プロフィールとフーリエ変換図(95年7月26日)

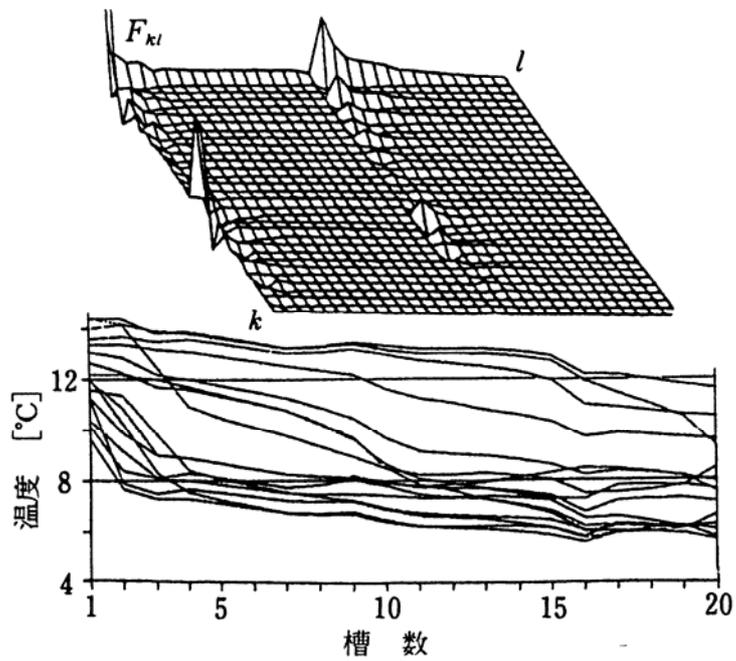


図 4-17 異常状態槽内温度プロフィールとフーリエ変換図(95年7月15日)

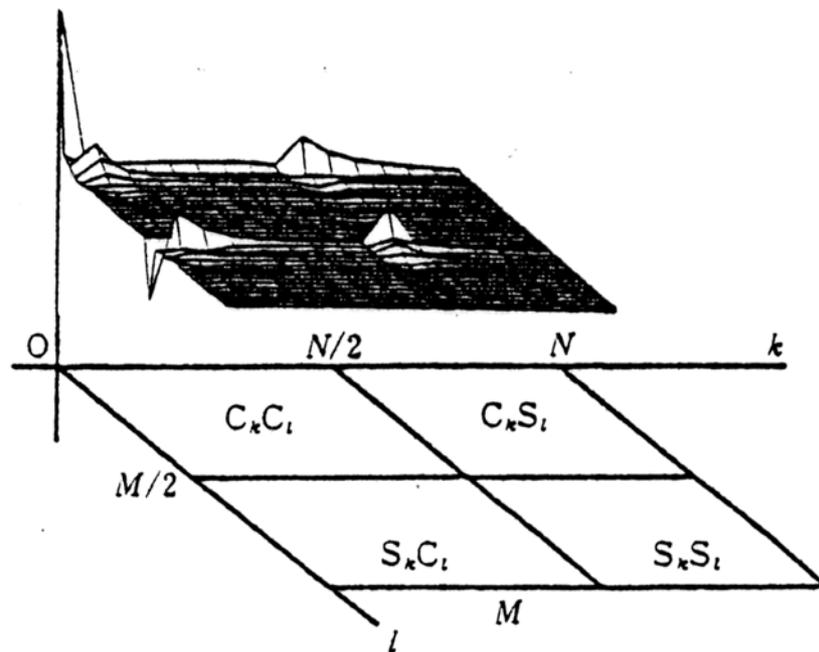


図 4-18 温度プロファイルのフーリエ変換図の見方

4.11 4種の最適化方法の比較

変数選択法および判別率増加分法より選び出した最適不具合検知・診断パラメータが真に最適なものであるかどうかを検証するために、95年のモデル作成用データの見かけ上の判別率に基づいた列挙法により、最適不具合検知・診断ベクトルとして(P1, P2, P11, P13, P14)を選び出した。さらに3種の最適化手法より選び出した3つの不具合検知・診断ベクトルを用いて、判別・誤判別率、診断・誤診断率、判別できないデータの日期の計算結果および大型計算機での計算時間を表 4-15 に示す。これにより、以下のことがわかる。

列挙法より得た最適不具合検知・診断ベクトル(P1, P2, P11, P13, P14)を用いてシステム状態の判別・診断を行う際に、モデル作成用データの見かけ上の判別率は高いが、モデル検証用データの診断率は低い結果となった。これは高次元の不具合検知・診断ベクトルにより不具合検知・システム状態診断モデルを同定すると、モデル作成用データを過学習する傾向があることを示している。

判別率増分法により選び出された(P1, P13)の見かけ上の判別率、診断率は変数選択法より選び出された(P1, P17)の見かけ上の判別率、診断率よりやや高い。これは変数選択法の場合では、追加されるパラメータがその直前の計算ステップで選び出された低次元の最適検知・診断ベクトルに対する貢献度のみに注目するからである。つまり、直前の計算ステップで、判別率が上位ではなかった幾つかのベクトルに対しては残りのパラメータと組み合わせさせた新たなベクトルが計算されないため、仮にそれらのベクトルの中で最適なものがあっても、選び出されないことによる。

判別率増分法より選び出されたモデルの見かけ上の判別率、診断率は列挙法より得たモデルの見かけ上の判別率、診断率との差がそれほど小さくなく、その計算時間は大型計算機で2分と列挙法の60分より遥かに短いので、実用的な計算方法であると言えよう。

表 4-15 4種の検知ベクトル最適化方法の比較

方法		変数選択法/AIC 法	判別率増分法	列挙法
パラメータ		P1,P17	P1, P13	P1,P2,P11,P13,P14
95 年 5/1～ 7/21	判別率	0. 88	0. 89	0. 92
	誤判別率	0. 11	0. 09	0. 08
	不明日	7/12	7/12	—
95 年 7/22～ 10/27	判別率	0. 98	1. 0	1. 0
	誤判別率	0. 02	0. 0	0. 0
	不明日	—	—	—
96 年 4/25～ 9/30	診断率	0. 91	0. 93	0. 81
	誤診断率	0. 08	0. 07	0. 15
	不明日	7/26	—	6/17,18/15,17,26,29
計算時間(分)		1. 5	2	60

4.12 まとめ

本章では、実蓄熱式空調システムの蓄熱槽温度プロフィールの実測データとそのフーリエ変換値について数学的な定量化手法を用いて計算した不具合検知・診断ベクトルの統計的な空間による不具合検知・診断を行った結果、本不具合検知・診断法は実際に運転する空調システムの状態診断、不具合検知・診断に有効であることを明らかにした。本不具合検知方法の実用性についての要点は次のようにまとめられる。

本不具合検知・診断法を実蓄熱システムに応用することにより、この種の不具合検知・診断法のシステムの不具合検知・診断に適用できると考える。但し、対象システムの各種状態でのデータベースを獲得することが前提となる。

対象システムの特性に関する基本的な知識に基づいて、全ての不具合状態に応じた予備不具合検知・診断パラメータを作成することが、本方法を有効に利用することに対して重要である。

パラメータ群に相関の高いものが含まれる場合、クラスター分析によりパラメータを分類し同類の検知パラメータを除去することで、精度の向上と計算時間の短縮が期待できる。マハラノビス汎距離により判別分析の前提として検知パラメータの分布の正規性が要求されるが、本不具合検知・診断法では検知パラメータの最適化を行うため、2 つ以上の検知パラメータを用いる場合、最適不具合検知・診断ベクトルは正規分布からやや外れていても、確率の高い不具合検知・診断を行うことができる。

本不具合検知・診断法では、対象システムの実測データにより最適検知パラメータを選び出しながら、マハラノビス汎距離により各種のシステム状態での統計的なベクトル空間範囲を決定することにより、自動的に物理的な意味がある有意な最適検知パラメータを選び出す。同時に、最適検知・診断パラメータと不具合現象の因果関係を見出すことができ、不具合検知の手法を自動的に学習するシステムと言える。

本章に関する既発表論文

査読付論文

[1]Song Pan ,Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of Water Thermal Storage HVAC systems, Proceeding of BS'99 ,Kyoto,Sep,1999

口頭発表論文

[1]鄭明傑・潘嵩・中原信生:空調システムフォルトの動的シミュレーション(その11 クラスタ一分析によるフォルト検知パラメータの分類に関する考察),平成9年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集Ⅱ,1997年8月

[2]潘嵩・鄭明傑・中原信生:パターン認識による蓄熱システムフォルトの検知に関する研究その4 検知パラメータ最適化プログラムの開発,日本建築学会東海支部研究報告集,36,1998年2月

[3]鄭明傑・潘嵩・中原信生:空気調和システムの動的シミュレーションとフォルト検知に関する研究その10 実蓄熱システムのオン・ラインフォルト検知と診断,日本建築学会1997年度大会学術講演梗概集,D-2分冊,P. 935

[4]鄭明傑・潘嵩・中原信生:パターン認識による蓄熱システムフォルトの検知に関する研究その5 オンライン検知の方法と検知ベクトルの最適化,日本建築学会1998年度大会学術講演梗概集,D-2分冊,P. 1003

参考文献

[1]中原信生:空調設備の故障検知・診断システム,日本冷凍協会論文集,Trans. Of the JAR, Vol.13,No. 1(1996),pp15~36

[2]西田豊明:定性推論の諸相(1993),朝倉書店

[3]淵一博監訳:人工知能ハンドブック,第IV巻(1993),共立出版

[4]篤田憲久・大川剛直・安信千津子:エキスパートシステムの設計と開発(1997),昭晃堂

[5]湯本・大川・篤田・宮坂:確率付定性モデルのパラメータ表現,計測自動制御学会論文集, Vol.34,No. 6, 1/6(1998)

[6]三原・青野・大川・篤田・宮坂:確率的定性推論によるビル空調設備故障診断方式,計測自動制御学会論文集, Vol.31, No. 9, 1510/1518(1995)

[7]湯本・山崎・大川・篤田・宮坂:ビル空調システム故障診断のための確率付定性モデル自動生成,電気学会論文誌C, Vol.18-C, No. 3, (1998), pp.434-441

[8]宮坂・邱・湯本・大川・篤田:確率的定性推論を利用した空調システム不具合検知方法(その4)VAVシステムの異常検知,空気調和・衛生工学会学術講演論文集(Aug.1997), pp. 949~952

[9]奥野中一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正:多変量解析法,日科技連出版社,1989

[10]杉山高一:多変量データ解析入門,朝倉書店,1983

第5章 最適化検知・診断ベクトルによるVAVシステムの不具合検知・診断

本章では、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断手法をVAV方式空調システムの二次側の不具合検知・診断へ適用し、その有効性を検討する。

5.1 対象空調システムおよび計測システムの概要

表5-1と図5-1に、対象とする横浜に建つ某研究施設の基準階における8つのゾーンを持つ単一ダクトVAV方式空調システムの二次側の概要を示す。ここで、998年夏期における、このVAVシステムの正常状態及び2種類の不具合状態（不具合①：AHU冷水二方弁を全閉に固定、不具合②：ゾーン4,5又はゾーン5のVAVダンパを全閉に固定）を対象とする。表5-2に示す22点のVAVシステム不具合検知・診断ツール作成のため、システムの特徴状態点の計測データを図5-2に示すBEMSにて10分間隔で計測した。表5-3に対象VAV方式空調システムの正常状態と不具合状態を発生させるための設定条件を示す。なお、VAVシステムの不具合検知・診断ツールの適用性を検証するために、各日の設定温度を変更した。これは、検知・診断しようとする不具合に対して室温の設定値の変更が室温、給気風量に与えた影響が、不具合検知・診断モデルの不具合検知率、システム状態診断率に大きな影響を及ぼすかどうかを確認するためである。図5-3と図5-4にそれぞれ3種のシステム状態(正常、不具合①：AHU冷水二方弁を全閉に固定、不具合②：ゾーン4,5又はゾーン5のVAVダンパを全閉に固定)におけるAHU給気風量およびゾーン5の室内温度の経時変化を示す。

これらにより、7/21の14:10~30にAHUの冷水二方弁を全閉したため、14:10~15:50のAHU給気風量とゾーン5の室内温度は急激に変動していることが判る。本研究では、この期間内のVAVシステムの各特徴状態点の計測データを不具合検知・診断モデル作成のための不具合①のデータベースとする。また、8/4の14:10~18:00にゾーン4,5のVAVダンパを全閉に固定したため、ゾーン4,5の室温はこの不具合発生前より高くなっている。そこで、この不具合②が生起した時間帯のVAVシステムの各特徴状態点の計測データを不具合検知・診断モデル作成のための不具合②のデータベースとする。また、8/7の14:10~15:50にゾーン5のVAVダンパを全閉に固定し、このときゾーン5の室内温度の変動傾向は8/4と類似する為、この不具合が生起した時間帯のVAVシステムの各特徴状態点の計測データを不具合検知・診断モデルを検証する際の不具合②のデータベースとする。一方、7/16のデータ及び7/14、7/15のデータは不具合を生起させなかったため、これら期間のVAVシステムの各特徴状態点の計測データをそれぞれ不具合検知・診断モデル作成用および不具合検知・診断モデル検証用の正常状態のデータベースとする。

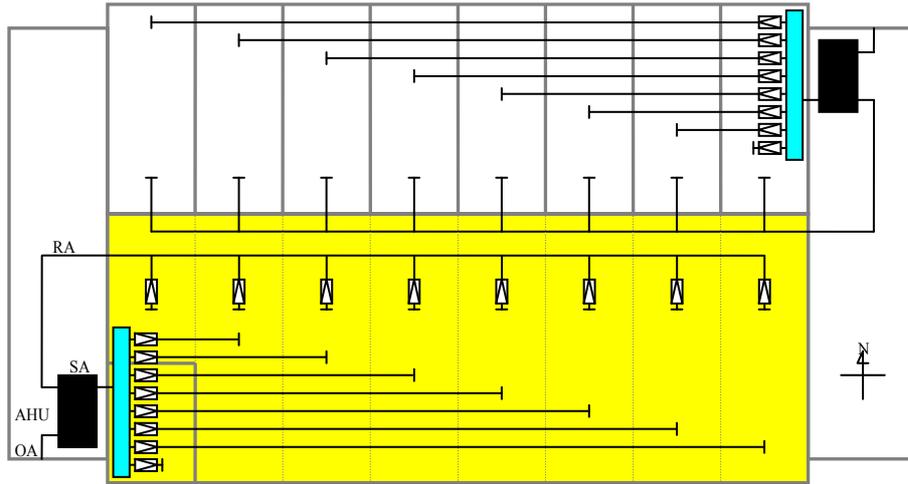


図 5-1 対象VAV系統の見取り図

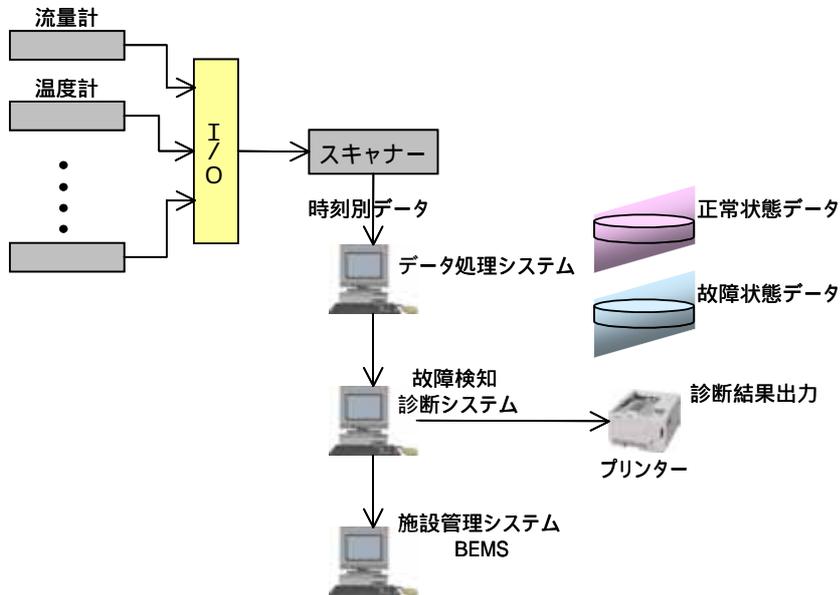


図 5-2 不具合検知・診断システムを含む BEMS の構成

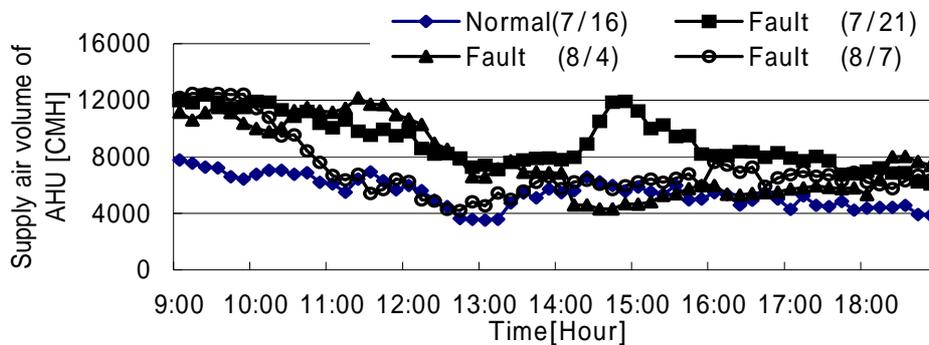


図 5-3 AHU 給気風量

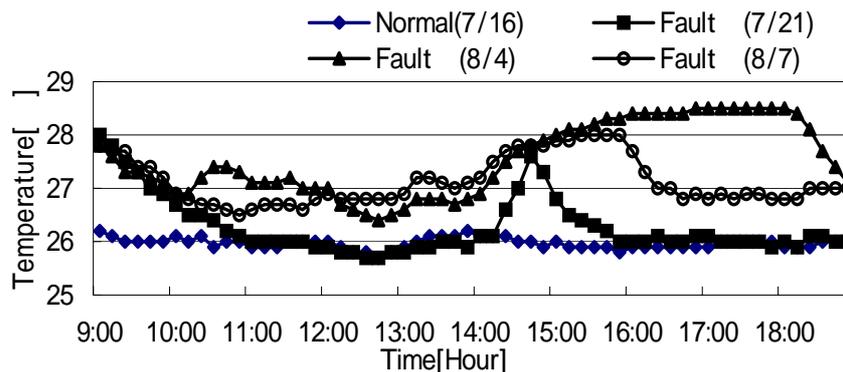


図 5-4 ゾーン 5 の室内温度

表 5-1 対象室と対象空調システム概要

対象室 (11 階建建物の基準階)	所在地	横浜市
	構造	S+SRC 造
	用途	研究執務室
	床面積(天井高)	819. 2 m ² (2. 7 m)
二次側空調設備	空調方式	単一ダクト VAV 方式(低温送風)
	AHU	冷却能力(全熱) : 64, 000 kcal/h 加熱能力(顕熱) : 37, 000 kcal/h 最大冷(温)水流量 : 145(31) l/min 冷(温)水温度 : 4 -13°C (43 -23°C) 最大送風量 : 12 000 CMH
	VAV 装置	電気式全閉機構付 最大(小)風量 : 1 500 (360) CMH
	外気導入量制御	ベンチレーションファン運転時 : 1 725 CMH ベンチレーションファン停止時 : CO2 制御

表 5-2 計測点の概要

番号	説明	番号	説明
1	空調機冷水入口温度	12	ゾーン 6 の室温
2	空調機冷水出口温度	13	ゾーン 7 の室温
3	空調機冷水流量	14	ゾーン 8 の室温
4	空調機給気風量	15	VAV1 の風量
5	空調機給気温度	16	VAV2 の風量
6	空調機還気温度	17	VAV3 の風量
7	ゾーン 1 の室温	18	VAV4 の風量
8	ゾーン 2 の室温	19	VAV5 の風量
9	ゾーン 3 の室温	20	VAV6 の風量
10	ゾーン 4 の室温	21	VAV7 の風量
11	ゾーン 5 の室温	22	VAV8 の風量

表5-3 対象 VAV 方式空調システムの正常状態と不具合状態での実験設定条件

システム状態	正常	不具合①	不具合②	不具合②
日時	7/14~7/16	7/21	8/4	8/7
室温設定値	26℃	26℃	27℃	27℃
不具合内容	—	AHU 冷水 2 方弁 全閉	室 4, 5 の VAV ダンパ全閉	室 5 の VAV ダンパ全閉
不具合の発生方法	—	冷水 2 方弁 全閉に固定	設定風量を 最小に固定	設定風量を 最小に固定
不具合発生時間	—	14 : 10~14 : 30	14 : 10~18 : 00	14 : 10~15 : 50

5.2 予備不具合検知・診断パラメータの算出

図 5-3、図 5-4 より、対象可変風量システムの三種の状態での各システム特徴状態値の変動傾向が異なることが判る。しかし、各日の設定温度および負荷状態が異なるので、これらのシステムの特徴状態値をそのまま用いて不具合検知、システム状態診断を行うことは賢明でない。例えば、図 5-3 より、AHU 冷水バルブ全閉時にゾーン 5 の温度が高くなるが、AHU の立ち上がり時にもゾーン 5 の温度が暫く高く維持していることがわかる。よって、あるゾーンの温度が高いことのみから、システム状態が異常であると判断してしまうのは危険である。つまり、少数の計測データではシステム状態を判断できない場合がある。よって、ここでは、VAV システム特徴状態点の計測値とそれらの 1 次元、2 次元フーリエ変換値の統計量を各状態日のシステム状態変動の共通の特徴を抽出する予備不具合検知・診断パラメータとする。各日の VAV システムの運転状態の共通の変動特徴を見出すために、各ゾーンの室温および風量の 1 次元および 2 次元フーリエ解析値の統計量を予備不具合検知・診断パラメータとする。ここでは、1 次元と 2 次元のフーリエ解析の時間サンプル数を 32 (=25) としたが、2 次元フーリエ解析の場合には、実測データに 8 (=23) つのゾーンの室温、風量の計測データがあるため、空間サンプル数をゾーンの個数とした。フーリエ解析の開始時刻を不具合発生開始時刻の 14:10 とし、その後、フーリエ解析の時刻を 10 分ずつ変化させ、その時刻までの 32 点の計測データを用いて解析を行なった。図 5-5 に 3 種の状態日のゾーン 5 の給気風量の 1 次元フーリエ解析結果を、図 5-6~図 5-8 に 3 種の状態日の 15 : 40 の各ゾーンの風量の 2 次元フーリエ解析結果を示す。これらより、各状態日の風量のフーリエ解析値が異なり、フーリエ解析により各状態日のシステム状態変動の特徴を抽出できることが判る。そこで、統計的な定量化手法を用いて、式(5-1)~式(5-18)に示す 26 個のパラメータを算出し、これらと次に示す一部の 2 種類の不具合と関連のある計測値を合わせて、31 個の予備不具合検知・診断パラメータを抽出した。以下の式では、 i, j はそれぞれ時刻と空間のサンプル数で、 k, l はそれぞれ時間と空間に沿うフーリエ解析値の個数である。

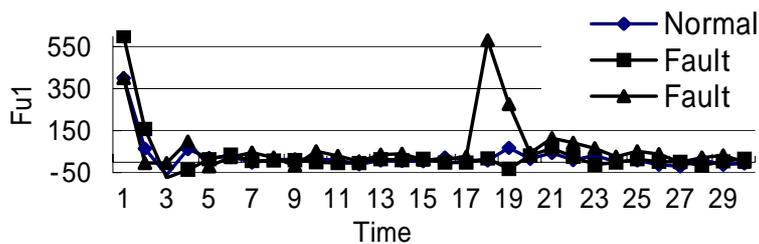


図 5-5 ゾーン 5 の風量の一次元フーリエ解析値

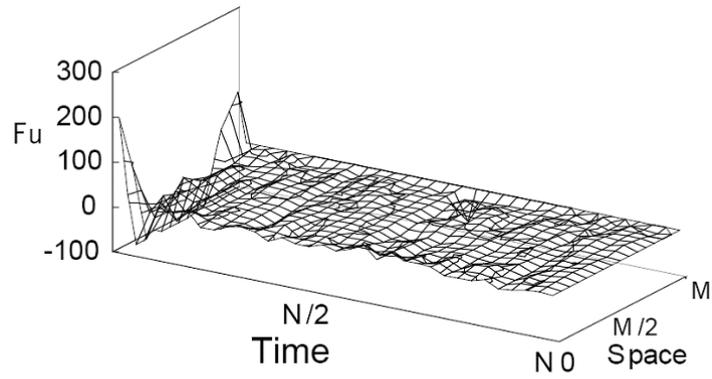


図 5-6 VAV 風量の二次元フーリエ解析値（正常状態）

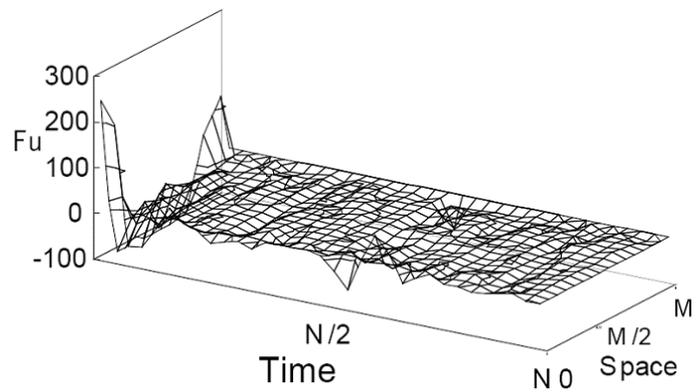


図 5-7 VAV 風量の二次元フーリエ解析値（不具合①状態）

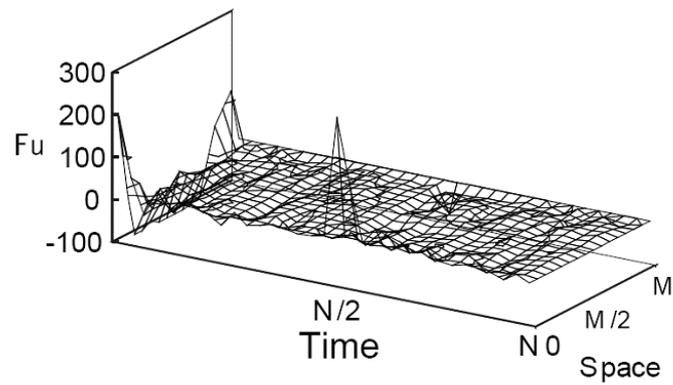


図 5-8 VAV 風量の二次元フーリエ解析値（不具合②状態）

ここで、

- | | |
|---------------|---------------------|
| P1：空調機の冷水入口温度 | [°C] |
| P2：空調機の冷水出口温度 | [°C] |
| P3：空調機の冷水流量 | [m ³ /h] |
| P4：AHU 給気温度 | [°C] |

P5 : AHU 還気温度とゾーン内温度設定値の差 [°C]

P6 : 8 つのゾーン内温度の 2 次元フーリエ解析値のノルム $\|F_t\|_2$

$$P6 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M Ft_{kl}^2 \quad (5-1)$$

P7 : 8 つのゾーン内温度の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間・空間に沿う周波数の平均値の合計

$$P7 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M Fl_{kl} \begin{pmatrix} Fl_{kl} = (k+l)/2 & |Ft_{kl}| > b \\ Fl_{kl} = 0 & |Ft_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

$$\begin{pmatrix} k = k - (N/2) & k \geq N/2 \\ k & k < N/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l = l - (M/2) & l \geq M/2 \\ l & l < M/2 \end{pmatrix}$$

P8 : 8 つのゾーン内温度の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過する頻度

$$P8 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M Fn_{kl} \begin{pmatrix} Fn_{kl} = 1 & |Ft_{kl}| > b \\ Fn_{kl} = 0 & |Ft_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

P9 : 8 つのゾーン内温度の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間に沿う周波数の中の最大値

$$P9 = \text{Max}(Fa_{kl}) \quad (5-4)$$

$$Fa_{kl} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} k & k > N/2 \\ k - N/2 & k < N/2 \end{pmatrix} & |Ft_{kl}| > b \\ 0 & |Ft_{kl}| \leq b \end{pmatrix}$$

P10 : 8 つのゾーン内温度の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの空間に沿う周波数の中の最大値

$$P10 = \text{Max}(Fb_{kl}) \quad (5-5)$$

$$Fb_{kl} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} l & l > M/2 \\ l - M/2 & l < M/2 \end{pmatrix} & |Ft_{kl}| > b \\ 0 & |Ft_{kl}| \leq b \end{pmatrix}$$

P11, P12 : ゾーン 4, 5 の温度の 1 次元フーリエ解析値のノルム $\|Ft1_{,4}\|_2, \|Ft1_{,5}\|_2$

$$P11,12 = \sum_{k=1}^N Ft1_{k,q}^2 \quad q = 4,5 \quad (5-6)$$

P13, P14 : ゾーン 4, 5 の温度の 1 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間に沿う周波数の合計

$$P13,14 = \sum_{k=1}^N Fe_{k,q} \begin{pmatrix} Fe_{k,q} = k & |Ft1_{k,q}| > b \\ Fe_{k,q} = 0 & |Ft1_{k,q}| \leq b \end{pmatrix} \quad q = 4,5 \quad (5-7)$$

$$\begin{pmatrix} k = k - (N/2) & k \geq N/2 \\ k & k < N/2 \end{pmatrix}$$

P15, P16 : ゾーン 4, 5 の温度の 1 次元フーリエ解析値が閾値を超過する頻度

$$P15,16 = \sum_{k=1}^N Fg_{k,q} \begin{pmatrix} Fg_{k,q} = 1 & |Ft1_{k,q}| > b \\ Fg_{k,q} = 0 & |Ft1_{k,q}| \leq b \end{pmatrix} \quad q = 4,5 \quad (5-8)$$

P17, P18 : ゾーン 4, 5 の温度の 1 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間に沿う周波数の中の最大値

$$P17,18 = \text{Max}(Fr_{k,q}) \quad q = 4,5 \quad (5-9)$$

$$Fr_{k,q} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} k & k > N/2 \\ k - N/2 & k < N/2 \end{pmatrix} & |Ft1_{k,q}| > b \\ 0 & |Ft1_{k,q}| \leq b \end{pmatrix}$$

P19 : 8 つのゾーンの風量の 2 次元フーリエ解析値のノルム $\|Fu\|_2$

$$P19 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M Fu_{kl}^2 \quad (5-10)$$

P20 : 8 つのゾーンの風量の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間・空間に沿う周波数の平均値の合計

$$P20 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M Fm_{kl} \begin{pmatrix} Fm_{kl} = (k+l)/2 & |Fu_{kl}| > b \\ Fm_{kl} = 0 & |Fu_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

$$\begin{pmatrix} k = k - (N/2) & k \geq N/2 \\ k & k < N/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l = l - (M/2) & l \geq M/2 \\ l & l < M/2 \end{pmatrix}$$

P21 : 8 つのゾーンの風量の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過する頻度

$$P21 = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M Fp_{kl} \begin{pmatrix} Fp_{kl} = 1 & |Fu_{kl}| > b \\ Fp_{kl} = 0 & |Fu_{kl}| \leq b \end{pmatrix} \quad (5-12)$$

P22 : 8 つのゾーンの風量の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間に沿う周波数の中の最大値

$$P22 = \text{Max}(Fc_{kl}) \quad (5-13)$$

$$Fc_{kl} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} k & k > N/2 \\ k - N/2 & k < N/2 \end{pmatrix} & |Fu_{kl}| > b \\ 0 & |Fu_{kl}| \leq b \end{pmatrix}$$

P23 : 8 つのゾーンの風量の 2 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの空間に沿う周波数の中の最大値

$$P23 = \text{Max}(Fd_{kl}) \quad (5-14)$$

$$Fd_{kl} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} l & l > M/2 \\ l - M/2 & l < M/2 \end{pmatrix} & |Fu_{kl}| > b \\ 0 & |Fu_{kl}| \leq b \end{pmatrix}$$

P24, P25 : ゾーン 4, 5 の風量の 1 次元フーリエ解析値のノルム $\|Fu1_{,4}\|_2, \|Fu1_{,5}\|_2$

$$P24,25 = \sum_{k=1}^N Fu1_{k,q}^2, \quad q = 4,5 \quad (5-15)$$

P26, P27 : ゾーン 4, 5 の風量の 1 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間に沿う周波数の合計

$$P26,27 = \sum_{k=1}^N Ff_{k,q} \begin{pmatrix} Ff_{k,q} = k & |Fu1_{k,q}| > b \\ Ff_{k,q} = 0 & |Fu1_{k,q}| \leq b \end{pmatrix}, \quad q = 4,5 \quad (5-16)$$

$$\begin{pmatrix} k = k - (N/2) & k \geq N/2 \\ k = k & k < N/2 \end{pmatrix}$$

P28, P29 : ゾーン 4, 5 の風量の 1 次元フーリエ解析値が閾値を超過する頻度

$$P28,29 = \sum_{k=1}^N Fh_{k,q} \begin{pmatrix} Fh_{k,q} = 1 & |Fu1_{k,q}| > b \\ Fh_{k,q} = 0 & |Fu1_{k,q}| \leq b \end{pmatrix}, \quad q = 4,5 \quad (5-17)$$

P30, P31 : ゾーン 4, 5 の風量の 1 次元フーリエ解析値が閾値を超過するものの時間に沿う周波数の中の最大値

$$P30,31 = Max(Fs_{k,q}) \quad q = 4,5$$

$$Fs_{k,q} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} k & k > N/2 \\ k - N/2 & k < N/2 \end{pmatrix} & |Fu1_{k,q}| > b \\ 0 & |Fu1_{k,q}| \leq b \end{pmatrix} \quad (5-18)$$

5.3 最適不具合検知・診断ベクトル(ツール)の選出過程

以上に示した 31 個の予備不具合検知・診断パラメータについて、前述した VAV システム不具合検知・診断ツール作成のためのシステム特徴状態点の計測データを用い、既に開発した判別率増分法による不具合検知・診断ベクトルの最適化及び不具合検知・診断モデル検証のためのシステム特徴状態点の計測データによる最適不具合検知・診断ベクトルの選出を行った。この過程を表 5-4 に示す。これにより、不具合検知・診断ベクトルの次元数の増加により、三種のシステム状態の判別率の合計値が向上されることがわかる。これは、マハラノビス判別空間の次元数の増加により、不具合検知・診断の能力が強くなることを示している。また、2 つのパラメータからなる最適不具合検知・診断ベクトルを用いるとき、不具合検知・診断モデル作成用システムの特徴状態点の計測データを正確に判別できる検知・診断ベクトルは多数存在するため、不具合検知・診断モデル検証用システム特徴状態点の計測データに対する診断率によって最適不具合検知・診断ベクトルを選び出す必要がある。そこで、表 5-4 に示す判別・診断率の合計がそれぞれ 3.0、1.95 となる不具合検知・診断ベクトル

(P21, P27) と (P25, P27) を抽出した。図 5-9、図 5-10 はそれぞれこれらの 2 つの最適検知・診断ベクトルによる VAV システムの不具合検知・診断図である。これらの図より、2 つの VAV システムの不具合検知・診断ベクトルを用いた 2 次元マハラノビス汎距離空間は、高い精度で 3 種の VAV システム状態を認識できることが判る。

表 5-4 判別率増分法の計算収束過程

パラメータ		P27	P26	P19	P1	P5	P6	P11	P24
判別率	正常	0. 83	0. 93	1. 00	0. 83	1. 00	0. 70	1. 00	1. 00
	不具合①	0. 82	0. 82	1. 00	0. 73	0. 55	0. 82	0. 91	1. 00
	不具合②	1. 00	0. 88	0. 58	1. 00	1. 00	1. 00	0. 58	0. 42
	合計	2. 65	2. 63	2. 58	2. 56	2. 55	2. 52	2. 49	2. 42
パラメータ		P21+P27	P25+P27	P9+P5	P6+P14	P6+P16	P16+P25		
判別率	正常	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0
	不具合①	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0
	不具合②	1. 0	1. 0	1. 0	0. 96	0. 96	0. 96	0. 96	0. 96
	合計	3. 0	3. 0	3. 0	2. 96	2. 96	2. 96	2. 96	2. 96
判別率増加量		0. 2	0. 2	0. 2	0. 16	0. 16	0. 16	0. 16	0. 16
診断率	正常	0. 95	0. 95	0. 8	0. 95	0. 95	0. 95	0. 95	0. 95
	不具合②	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0	1. 0
	合計	1. 95	1. 95	1. 8	1. 95	1. 95	1. 95	1. 95	1. 95

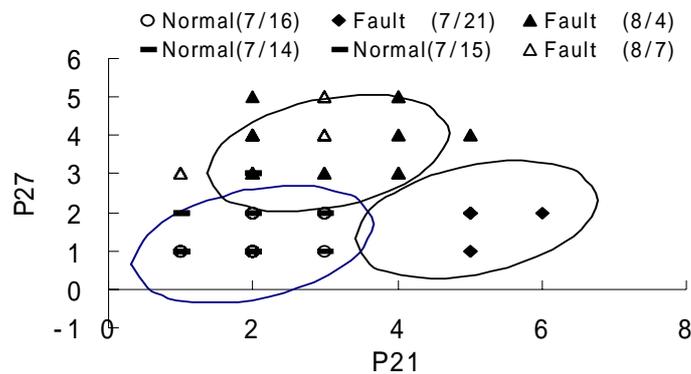


図 5-9 P21, P27 による不具合検知・診断図

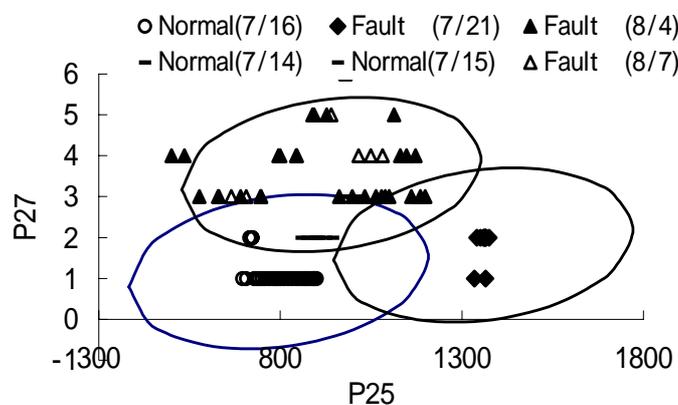


図 5-10 P25, P27 による不具合検知・診断図

5.4 対象 VAV システムの不具合検知・診断ツールの入出力

以上より、対象 VAV システムにおいて、2 種類の不具合（不具合①：AHU 冷水二方弁を全閉に固定、不具合②：ゾーン 4、5 又はゾーン 5 の VAV ダンパを全閉に固定）が発生した場合において、不具合検知・診断ツールは P21, P27 あるいは P25, P27 からなる 2 次元不具合検知・診断ベクトルを不具合検知・診断図として出力できた。

ここで、同定された対象 VAV システムの不具合検知・診断ツールの入力データは、AHU 給気風量 8 つのゾーンの VAV 風量である。不具合検知・診断結果(ツールの出力)としては、VAV システム実運転時の AHU 給気風量と各 VAV 風量のフーリエ解析値の統計量より算出された不具合検知・診断ベクトルが **図 5-9** または **図 5-10** にプロットした位置が正常状態又は不具合状態の分布中心からのマハラノビス汎距離より判定される(システム状態は、汎距離の最も近い運転状態に属すると判定される)。

抽出された最適不具合検知・診断パラメータの物理的な意味について以下にまとめる。不具合①では AHU の冷水二方弁が全閉不具合を発生させたため、**図 5-3** に示す AHU の給気風量は急激に変動し、従って各ゾーンの風量変化の周波数も正常状態より大きくなった。従って P21, P25, P27 は各ゾーンの VAV 風量変動の周波数を解析するフーリエ解析値の統計的なパラメータであり、VAV システムの不具合①の検知・診断に最も有効なものとして選び出されたと考えられる。

不具合②では、ゾーン 4, 5 の VAV ダンパを全閉させ、風量が急激に低減したので、**図 5-5** の不具合②状態日のゾーン 5 の風量の 1 次元フーリエ解析値が設定した閾値を超過するものの周波数が正常状態日よりも多くなる。式(5-16)により、P27 はこのような周波数の合計値である為、VAV システムの正常状態と不具合②状態の風量変動の差異として検出された。

5.5 まとめ

本章では、2種類の不具合のみ存在する場合の VAV システムの不具合検知・診断ツールの作成と適用例により、パターン認識に基づく不具合検知・診断方法は VAV システムの不具合検知、システム状態診断に有効であることを示し、以下の知見を得た。

VAV システムの不具合検知・診断ツールを作成するためには、正常状態及び各種の不具合状態における、①空調機の冷水出入口温度、②給還気温度、③冷水流量、④給気風量、⑤各ゾーンの温度、⑥各 VAV 風量などのシステムの特徴状態値の計測データを予め用意する必要がある。(一般に各種の不具合状態データを実運転中のシステムから得ることは困難であるため、空調システムの動的シミュレーションプログラムを用いて各種の不具合状態でのシステムの特徴状態値を計算し、これらをシステムの不具合検知・診断モデル作成のためのデータベースとして蓄積する方法も考えられる)

本文で対象とした2種類の不具合(不具合①: AHU 冷水二方弁を全閉に固定、不具合②: あるゾーンの VAV ダンパを全閉に固定)のみに限定する場合、AHU 給気風量、各 VAV 風量のフーリエ解析値の統計的なパラメータ P21, P25, P27 からなる2つの2次元不具合検知・診断ベクトルから成る不具合検知・診断ツールは、高い精度で VAV システムの不具合検知・診断を行うことが可能である。この場合の不具合検知・診断ツールの入力データは、①AHU 給気風量、②各 VAV 風量のみであり、出力データは、実運転時の AHU 給気風量、各 VAV 風量の実測値より算出した最適不具合検知・診断パラメータからなるベクトルが不具合検知診断図にプロットした位置であり、その位置が正常状態又は不具合状態の分布中心からのマハラノビス汎距離よりシステム状態が判定される。(システム状態は、汎距離の最も近い運転状態に属すると判定される)

パターン認識による VAV システムの不具合検知・診断ツールは、システムの適正運転を阻害する異常状態の検知と排除、及びビルの環境とエネルギー性能を確保するためのものであり、空調システムの運用段階や継続的な Cx のための支援ツールとして有効である。

本章に関する既発表論文

査読付論文

[1] Song Pan, Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of HVAC Systems with Pattern Recognition, The 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China, September 4-9, 2005

口頭発表論文

[1] Mingjie Zheng, Song Pan and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of VAV HVAC Systems with Pattern Recognition, Proceeding of ISHVAC' 99, Shenzhen, China, Nov, 1999

参考文献

- [1]Harunori Yoshida:Typical Faults of Air Conditioning Systems Fault Detection by ARX Model and Extended Kalman Filter,ASHRAE Transactions,Vol.102, Part 1, pp.557-564,Feb.1996
- [2]Harunori Yoshida,Sanjay Kumar,Yasunori Morita:Online Fault Detection and Diagnosis in VAV Air Handling Unit by RARX Modeling,Energy and Buildings,Vol.33,pp.391-402, 2001
- [3]Seem,J.E.,House,J.M.and Monroe,R.H.:On-Line Monitoring and Fault Detection,ASHRAE Journal,Vol.41,No.7,pp.21-26, 1999
- [4]Grubbs, Frank: Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples,Technometrics, Vol.11,No.1,pp. 1-21,Feb. 1969
- [5]M.Miyata,H.Yoshida,M.Asada,F.Wang,and S.Hashiguchi:Fault Detection and Diagnosis Method for VAV Terminal Units,International Conference for Enhanced Building Operation, 2004.10
- [6]宮坂房千加, 金雄毅, 濱田和康, 潮崎淳, 三淵裕之, 山崎高弘: 大規模建物空調システムのフィードデータを利用した異常分析, 空調調和・衛生工学会論文集. No.80,pp. 97-105,Jan. 2001
- [7]IEA Annex 25,Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book,Eds.J.Hyvarinen and S.Karki,Technical Research Center of Finland, 1996
- [8]IEA Annex 34,Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance Final Report, Arthur Dexter,Oxford University,United Kingdom,2001
- [9]杉山高一: 多変量データ解析入門, 朝倉書店, 1983, 東京
- [10]鄭明傑・中原信生: 空調システム不具合の動的シミュレーション, その7 パターン認識による蓄熱槽検知診断ためのパラメータに関する考査, 空気調和・衛生工学会平成7年度学術講演会講演論文集, 1995. 10, 広島

終章 総括

本論文は空調システムの性能検証に関する研究であり、2部を以て構成した。

第1部はアースチューブ併用自然換気システムのを対象として、外気導入経路の摩擦抵抗と室内上下温度分布を考慮した自然換気解析とCFDの連成解析法を開発し、これを用いたシミュレーションおよび実測により実システムの企画段階と引渡し後段階の性能検証を行った。

第1部の第2章では、CFD連成解析法における三つの計算ツールのアルゴリズムを紹介し、本手法を用いて某小学校屋内体育館のアースチューブ併用自然換気システムの自然換気量と室内上下温度分布を予測した結果と実測値の比較により開発したツールの再現性を検証し、CFD連成解析法は対象システムの設計レビューを行うための自然換気量と室内温熱環境の確認に利用できることを示した。

第1部の第3章では、CFD連成解析法を対象システムの計画/設計段階の性能検証に関する研究を行った。対象システムの設計段階での性能検証を行った結果は、以下のようにまとめられる。

- (1)夏期に体育館の開口の正面に風があるときには、アースチューブからの自然換気量が自然換気量の約8%しかなく、室内の温熱環境には大きな影響を与えない。
- (2)室外が無風のときには、自然換気の駆動力は、浮力のみとなり、アースチューブの導入により自然換気量が低減されるが、今回の計算条件では必要な自然換気量が得られる。
- (3)室内の各所の風速はほぼ許容風速の0.2 m/sより小さい。つまり、風速制限の厳しい卓など競技項目に殆ど影響を及ぼさない。
- (4)アースチューブの導入により、その蓄熱蓄冷効果によって、取入れ対象の予熱予冷がなされ、対象空間の強い温度成層型室温分布と相まって、居住域の温熱環境に幾分の改善が見られ、本例では7~36%の省エネルギー効果が得られた。

第1部の第4章では、対象システムの引渡し段階での性能検証に関する研究を行った。実測結果及び自然換気解析とCFDの連成解析により性能検証を行った結果は、以下のようにまとめられる。

- (1)この種のシステムの引渡し段階での性能検証のために、外気の温湿度・風速風向、地中土壌温度、チューブ内空気温湿度、チューブ内表面温度、室内床面開口及び各換気窓の温湿度・風速、室内床面温度、室内上下温湿度分布などを測定する必要がある。換気窓の開口面

積が大きいため、多点風速計により面風速を測定し、測定誤差を最小限に抑える必要がある。

(2)実測により、計画・設計段階での情報や経験不足に起因する設計不具合を検証できる。本研究では、屋外の地下ピット及び立てシャフトの断熱施工をしていないため、北側床面開口の吹出温度が南側床面開口の吹出温度より低いと言った実施設計の不具合を発見した。

(3)自然換気解析と CFD の連成解析により、設計不具合の改修案の効果を予測できる。(2)の設計不具合に対して、a)屋外地下ピットの上部と屋外立てシャフトの断熱、b)北側床面開口を閉めるなどの 2 つの運用改善策が提案し、効果を検討した結果、居住域の空気温度がともに $0.1^{\circ}\text{C}\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ しか上昇しないことが分かった。屋外地下ピット及び屋外立てシャフトの断熱施工の工事費を考慮すると、現状のままで運用するほうが得策であることをシステムの設計者と運用管理者に提言した。

第 2 部ではパターン認識による空調システムの不具合検知・診断ツールの開発およびこれを用いた水蓄熱システムと可変風量システムの不具合検知・診断に関する研究結果を纏めたものである。

第 2 部の第 2 章では、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断法のシミュレーションアルゴリズムを紹介し、空調システムの各種状態の動特性を抽出するためにフーリエ解析と統計的な手法を用いることを提案した。

第 2 部の第 3 章では、不具合検知の最適化方法について述べた。即ち、一般に検知用のパラメータの数が多ければ多いほど不具合検知・診断モデルの不具合識別・診断能力が強くなることが期待されるが、個々のパラメータは不具合検知・診断に有効であるようにみえても、実際にはほかのパラメータとの強い相関により、複数のパラメータが同じ状態を示唆している場合も多々見られる。よって、人間の外界事象に対する最適識別・判断過程を模擬し、真に不具合検知・診断に有効な特徴パラメータを選び出す必要がある。ここでは、変数選択法、AIC 変化量法、及び新たに開発した判別率増分法の三つの不具合検知・診断ベクトルの最適化方法のアルゴリズムを記述し、判別率増分法による不具合検知・診断ツールを開発した。

第 2 部の第 4 章では、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断法を某水蓄熱式空調システム不具合検知・診断に応用した結果、本不具合検知・診断方法の有効性を実証した。

第 2 部の第 5 章では、パターン認識による空調システムの不具合検知・診断法を可変風量システムの不具合検知・診断に適用し、本手法は可変風量システムの不具合検知、システム状態診断にも有効であることを示した。

以上、本研究では、空気調和・換気システム並びに蓄熱システムにおいて、快適性と省エネルギー性の実現、さらには地球温暖化防止のためにシステムの設計施工と引渡し・運転

管理のライフサイクルを通してのコミッショニング(性能検証)過程の適用を前提とし、幾つかの先端的なシステムに対するコミッショニング過程に沿った設計最適化と引渡し検証、不具合検知・診断を実用化するための、連成シミュレーション手法とパターン認識手法の開発を行い、実システムへの適用を行ってその有用性を立証したものである。本研究によって開発したシミュレーション手法、及び得られたコミッショニングの実施プロセスに関する知見は、今後のコミッショニング作業で活用され、空調システムの省エネルギー設計と最適運用管理を確実に実現させ、地球環境保全に寄与することができると信じて已まない。

本研究に関連する既発表論文リスト

学術論文

- [1] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生 : パターン認識による蓄熱制御フォルトの検知と診断に関する研究 第2報-実用化方法と実蓄熱システムへの応用例, 空気調和・衛生工学会論文集, No.72, 1999.1
- [2] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生 : パターン認識による蓄熱制御フォルトの検知と診断に関する研究 第3報-フォルト検知・診断パラメータの最適化, 空気調和・衛生工学会論文集, No.78, 2000.7
- [3] 山村真司, 梅干野晁, 潘嵩, 浅輪貴史 : 散水により形成される外部空間の微気候に関する基礎的研究, 日本環境管理学会誌 第40号, pp.19-27, 2002.9
- [4] Song Pan ,Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of Water Thermal Storage HVAC systems, Proceeding of BS'99, Kyoto, Sep.13-15, 1999
- [5] Nobuo Nakahara ,Mingjie Zheng, Song Pan and Yoshihiko Nishitani: Load Prediction for Optimal Thermal Storage
-Comparison of Three Kinds of Model Application, Proceeding of BS'99, Kyoto, Sep.13-15, 1999
- [6] Mingjie Zheng, Song Pan and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of VAV HVAC Systems with Pattern Recognition, Proceeding of ISHVAC'99, Shenzhen, China, Nov, 1999
- [7] Song Pan, Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of HVAC Systems with Pattern Recognition, The 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China, Sep. 4-9, 2005
- [8] Song Pan, Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Optimization of Fault Detection/Diagnosis model of Thermal Storage System with AIC, Journal of Harbin Institute of Technology, Vol.13, pp.30-36, Nov., 2006
- [9] Song Pan, Mingjie Zheng and Nobuo Nakahara: Optimization of Fault Detection/Diagnosis model of Thermal Storage System with AIC, The 6th International Conference of Enhanced Building Operation, Shenzhen, China, Vol.V-5-6, Nov.9-10, 2006
- [10] Song Pan, Hanunori Yoshida, Mingjie Zheng: Coupled Analytical Tool of Ventilation Calculation and CFD in Annexation System of Cool/Heat Tube and Natural Ventilation, Building Simulation 2007, pp.1983-1990, Beijing, Sep.3-5, 2007
- [11] Mingjie Zheng, Song Pan: Application as Commissioning Tool of Various HVAC Simulation Programs and Visual Tools, Building Simulation 2007, pp.1975-1982, Beijing, Sep.3-5, 2007
- [12] Song Pan, Mingjie Zheng and Hanunori Yoshida: Commissioning of a Coupled Earth Tube and Natural Ventilation System at the Design Phase, The 7th International Conference of Enhanced Building Operation, San Francisco, USA, Nov.1-2, 2007
- [13] Song Pan, Mingjie Zheng and Hanunori Yoshida: Commissioning of a Coupled Earth Tube and Natural Ventilation System at the Acceptance Phase, The 8th International Conference of

会議論文

- [1] Mingjie Zheng, Song Pan and Nobuo Nakahara: Study on Fault Detection and Diagnosis of Thermal Storage Tank Using State Parameter Vector Space, Air Conditioning In High Rise Buildings'97, Shanghai, China, Sep. 8-11, 1997
- [2] Niwa, H., Nakahara, N., Okumiya, M., Suganaga, M., Tanaka, H., Pan, S., Watanabe, T. and Zheng, M.: Comparative Study of Availability on Energy/Environment Commissioning Using Existing HVAC Simulation Programs for a Model Building, Annex40 Symposium, Paris, France, Oct. 9-11, 2004

口頭発表

- [1] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生:空調システムフォルトの動的シミュレーション(その11 クラスター分析によるフォルト検知パラメータの分類に関する考察),空気調和・衛生工学会平成9年度学術講演会講演論文集Ⅲ, 東京, pp.961-964, 1997.8
- [2] 潘嵩, 鄭明傑, 中原信生:空調システムフォルトの動的シミュレーション(その12 3つのパラメータによる実システムフォルト検知と診断),空気調和・衛生工学会平成9年度学術講演会講演論文集Ⅲ, 東京, pp.965-968, 1997.8
- [3] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生:空気調和システムの動的シミュレーションとフォルト検知に関する研究 その10 実蓄熱システムのオン・ラインフォルト検知と診断,日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京, D-2 分冊, pp.935-936, 1997
- [4] 潘嵩, 鄭明傑, 中原信生:パターン認識による蓄熱システムフォルトの検知に関する研究 その4 検知パラメータ最適化プログラムの開発,日本建築学会東海支部研究報告集, 名古屋, pp.36-39,1998.2
- [5] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生:パターン認識による蓄熱システムフォルトの検知に関する研究 その5 オンライン検知の方法と検知ベクトルの最適化,日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 分冊, 九州, pp.1003-1006, 1998.9
- [6] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生:最適蓄熱運転のための空調負荷予測に関する研究 その1 ニューラルネットワーク法に関する検討,空気調和・衛生工学会平成10年度学術講演会講演論文集Ⅰ, 札幌, pp.169-172, 1998.8
- [7] 鄭明傑, 西谷義彦, 潘嵩, 中原信生:最適蓄熱運転のための空調負荷予測に関する研究 その2 3種の負荷予測法の比較,空気調和・衛生工学会平成10年度学術講演会講演論文集Ⅰ, 札幌, pp.173-176, 1998.8
- [8] 鄭明傑, 潘嵩, 中原信生:パターン認識による空調システムの異常検知・診断に関する研究, 空気調和・衛生工学会平成11年度学術講演会講演論文集Ⅲ, 富山, pp.1693-1696, 1999.9
- [9] 潘嵩, 白澤多一, 梅干野晁, 浅輪貴史, 松永恒雄, 清水敬示, 山村真司:熱環境に配慮した建築外部空間の実現化を目的とした設計支援手法(その2) 日射遮蔽下における敷地内散水が熱環境形成に及ぼす影響,日本建築学会2000年度大会(東北)学術講演梗概集, D-1 分

冊, 東北, pp.1133-1134, 2000.9

- [10] 山村真司, 梅干野晁, 潘嵩, 浅輪貴史: 散水により形成される屋外空間の微気候に関する基礎的研究, 日本建築学会 2002 年度大会学術講演梗概集, D-1 分冊, 北陸, pp.959-960, 2002.8
- [11] 潘嵩, 燕達, 江億, 朱穎心, 中原信生: コミッショニングツールとしてのシミュレーションプログラムの比較(第5報) DeST によるシミュレーション, 空気調和・衛生工学会平成 15 年度学術講演会講演論文集 II, 松江, pp.1233-1236, 2003.9
- [12] 潘嵩, 燕達, 奥宮正哉: DeST を用いた空調設備のコミッショニング その1 設計段階のコミッショニングへの適用例, 日本建築学会東海支部研究報告集, 42, 名古屋, pp.509-512, 2004.2
- [13] 中原信生, 潘嵩: 暖冷房負荷推定における内部発熱稼働率設定の方法に関する研究 第1報 寒冷地庁舎における蓄熱システム設計における事例と試算, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集 第5号, 名古屋, pp.13-18, 2004.3
- [14] 奥宮正哉, 潘嵩, 伊藤嘉奈子, 中原信生: 冷暖房負荷計算におけるシミュレーションツールの比較研究, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集 第5号, 名古屋, pp.19-22, 2004.3
- [15] 潘嵩, 燕達, 奥宮正哉, 中原信生: DeST を用いた空調設備のコミッショニング その2 空調システムの方案検討への適用例, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集 第5号, 名古屋, pp.23-26, 2004.3
- [16] 加藤伯彦, 小林利文, 奥宮正哉, 潘嵩, 岩田陽治: 寒冷地における暖房負荷の算定方法に関する研究, その1 寒冷地事務所建物における負荷実測, 日本建築学会 2004 年度大会学術講演梗概集, D-2 分冊, 北海道, pp.83-84, 2004.4
- [17] 潘嵩, 奥宮正哉, 小林利文, 加藤伯彦, 岩田陽治: 寒冷地における暖房負荷の算定方法に関する研究, その2 MICRO-PEAK/2000 の計算値と実測値との比較, 日本建築学会 2004 年度大会学術講演梗概集, D-2 分冊, 北海道, pp.85-86, 2004.9
- [18] 丹羽英治, 奥宮正哉, 菅長正光, 田中英紀, 鄭明傑, 潘嵩, 渡邊剛: システムシミュレーションと性能検証, 空気調和・衛生工学会平成 16 年度学術講演会講演論文集 II, 名古屋, pp.89-92, 2004.9
- [19] 潘嵩, 鄭明傑, 奥宮正哉, 中原信生: パターン認識による VAV 方式空調システムのフォルト検知と診断に関する研究, IBPSA-Japan 2005 年講演会講演論文集, pp.157-162, 2005.1
- [20] 鄭明傑, 潘嵩: シミュレーションプログラム及びビジュアルツールの Cx への適用性調査, IBPSA-Japan 2007 年講演会講演論文集, pp.1-9, 2007.2
- [21] 鄭明傑, 潘嵩, 吉田治典: クールチューブ併用自然換気システムの性能検証 (第1報) CFD 連成解析による自然換気解析方法, 空気調和・衛生工学会平成19年度学術講演論文集, 仙台, pp.1909-1912, 2007.9
- [22] 潘嵩, 鄭明傑, 吉田治典: クールチューブ併用自然換気システムの性能検証 (第2報) 実システムの設計段階の性能検証, 空気調和・衛生工学会平成19年度学術講演論文集, 仙台, pp.1913-1916, 2007.9

- [23] 潘嵩, 鄭明傑, 吉田治典 ; クールチューブ併用自然換気システムの性能検証 (第 3 報) 冬期実測によるシステム性能の検証, 空気調和・衛生工学会平成 20 年度学術講演論文集, 草津, pp.1445-1448, 2008.9
- [24] 鄭明傑, 潘嵩, 吉田治典 ; クールチューブ併用自然換気システムの性能検証 (第 4 報) 自然換気解析と CFD の連成解析によるシステム性能のコミッショニング, 空気調和・衛生工学会平成 20 年度学術講演論文集, 草津, pp.1449-1452, 2008.9
- [25] 潘嵩, 鄭明傑, 吉田治典: 実測およびCFD連成解析によるアースチューブ併用自然換気システムの引渡し段階でのコミッショニング, IBPSA-Japan 2008 年講演会講演論文集, 2008.11
- [26] 鄭明傑, 潘嵩: 密閉式冷却塔の最大許容冷却時間のシミュレーションツールの開発, IBPSA-Japan 2008 年講演会講演論文集, 2008.11

謝辞

本研究を進めるにあたり、並々ならぬご指導ご鞭撻を賜りました京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授 吉田治典博士に深甚なる謝意を表します。

副査として本論文の審査をして頂きました京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 銚井修一博士、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授 高橋大弐博士には、本論文をまとめるに際し、本論文の構成や内容に関して貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 准教授 上谷芳昭博士、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 助教 王福林博士には、ゼミにて有意義なご意見、ご助言を数々頂きました。先生方の鋭い質問が、より深く考えるためのきっかけとなりました。ここに記して謝意を表します。

本研究は株式会社三晃空調技術研究室にて勤務している間の研究成果をまとめたものであり、社会人博士という幸運な機会を与えて頂いた宮原雅文技術本部長に心から感謝の意を表します。技術研究室の上司である鄭 明傑博士には、研究テーマの立案から具体的な研究実施ならびに本論文の纏めまで、甚大なお教示をいただきましたことを深く感謝いたします。

名古屋大学名誉教授、NPO 法人建築設備コミッショニング協会理事長 中原信生博士には、京都大学の博士課程入学を推薦頂き、本論文のまとめに貴重なご助言ならびに論文の修正を戴きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

社団法人空気調和・衛生工学会 コミッショニング委員会 コミッショニングツール小委員会の委員各位には、委員会にて研究の発表をさせていただいた際に数々のご指導とご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 都市空間工学講座の皆様には、研究活動から日々の生活まで大変お世話になりました。宮田征門博士、細渕勇人博士、三浦克弘博士、山口弘雅博士とは、様々な議論をさせていただきました。また、李博氏、張兆明氏には、本論文を取りまとめるに当たりご助力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

名城大学工学部建築学科 准教授 吉永美香博士には、本論文を取りまとめるに当たりご助言をいただきました。名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 助教授 尹 奎英博士には、アースチューブと土壌の熱交換解析ツールの作成に当たりご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

最後に、私の研究生生活をさまざまな面で支えてくれた数多くの先輩方、友人、そして家族に心より感謝します。

2009年5月吉日
潘 嵩