

新 制

工

981

京大附図

空調システムの知的制御に関する研究

1994年

安田昌司

空調システムの知的制御に関する研究

一九九四年

安田昌司

空調システムの知的制御に関する研究

1994年

安田昌司

序

本研究は、筆者が、三洋電機(株)研究開発本部において行なった研究成果を、京都大学工学部片井修教授のご指導のもとに、京都大学工学部博士学位申請のためにまとめたものである。

近年、人間の居住空間におけるアメニティが求められるなかで、ビルオートメーションの一部として、空調システムへの要求も高度化し、インテリジェント化が進められつつある。また、より複雑で大規模なプラントにおいても、コンピュータを活用し「問題解決のための知的情報処理」という立場から、各種の方法論が提案されている。しかしながら、本研究で対象とする空調システムは、それらに比べれば小規模なため資源に制約があり、人間の快適性をも考慮しなければならないため、提案されている方法をそのまま適用することはできず、新たな方法の開発が必要である。

本研究では、空調システムにおける基本的かつ最終的な目標である「省エネルギー」と「快適性」の達成に向けて、その制御システムのための新たな方法を提案、実証することを目的としている。空調システムは、その非線形特性ゆえに物理的、数理的考察に基づく厳密な動特性を表現する熱力学的モデル化手法が確立されていない。これを踏まえて、機器単体の制御にとどまらず、設置環境、ユーザ、さらに保守サービスを含む問題へと取り扱う領域を拡大していくことにより、包括的に空調システムにおける知的制御について検討することが必要である。空調システムにおける知的制御には多様なとらえかたがあるが、本研究では、機能を階層構造化することを試み順次高度化していくことを考えた。機能階層という観点から本研究の内容には、以下の四つの段階がある。

(1) 対象の空調機器が設置状態を正常に維持していることを前提として、従来の

定常運転における性能評価にとどまらず、状況から得たデータ（情報）をフィードバック制御で自動的に処理して制御系のなすべき行為を決めるデータ駆動型の単一機能階層の制御系に関して、動的な最適化の観点から、過渡応答性能の向上を目指して、ファジィ推論を適用した非線形制御系を提案，実証する。

（２）設置状況やユーザーニーズへの適応のため、環境からの情報をあらかじめ設定されたルールと照合したうえで行為を決めるスーパーバイザ機能階層を前段に設け、その後段に設けるデータ駆動型の実行機能階層との２階層構造化によるルール駆動型制御系を提案，実証する。

（３）停止には至らないが、空調機器が部分的な劣化を起こしている異常な運転状態に対する監視制御システムについて、未経験な状況への対処のため、定性的知識により構築した静的モデルとの照合を経て診断を行う機能階層を有する静的モデル駆動型の監視制御系を提案，実証する。復旧制御についても言及する。

（４）熱力学的考察による動的モデル化が困難であることを踏まえて、将来的に、システムの動的モデル駆動型の監視制御のため、観測量からの動的モデルの抽出とその振る舞いが予測不可能なカオス状態からの回避制御について検討する。ユーザーの快適性を客観的に評価するためのカオス理論の応用についても言及する。

以下、各章において取り扱う内容を述べる。

第１章では、本研究の背景，必要性，位置づけについて述べる。

第２章では、従来、定常運転におけるCOPにより性能評価が行われてきた吸収式冷温水機の過渡応答における省エネルギー性や快適性（負荷変動に対する温度変動の収束性）の改善方法を提案し、特に大きな負荷変動時に優れた結果が得られることを示す。

第３章では、同じく正常な状態を前提として、設置環境やユーザーニーズへの適応性を狙った柔軟な制御系について階層構造化，すなわち制御目標の決定を行う機能

階層とその制御動作を実行する機能階層の 2 階層構造制御系を提案する。パッケージエアコンと吸収冷凍機について適用，効果を確認する。提案の制御系の後段部は主として工場出荷時の調整，前段部は，ユーザ設置時の調整を担当する機能を果たすと言える。

第 4 章では，吸収冷凍機を対象とし部分的な劣化を起こしている異常運転の場合を想定し，その監視制御における診断システムを提案する。定常運転から抽出される提案の静的モデルを有する機能階層は，オペレータにとって未経験な異常状況にも対応できる。診断システムのベースとして用いた静的モデルは，異常診断にとって必要十分な精度であることを実証する。

第 5 章では，動特性を含めた異常診断，および停止回避制御の将来的方法を検討する。既に熱力学的考察による動的モデル化が，いまだ困難であることを述べたが，ここでは視点を変えて現象論的にビヘービアベースでのモデル化を，近年，空調システムとのかかわりが多くなってきたカオス理論を用いて検討する。あわせてユーザの快適性評価におけるカオス理論の応用についても言及する。

第 6 章では，空調システムへの知的制御の応用に関する総括を行ない，今後の課題について述べる。

謝辞

本研究をとりまとめるにあたって、有益なるご助言とご指導をいただいた、京都大学工学部片井修教授に深甚の謝意を表します。元京都大学、現名城大学岩井壮介教授には、本研究をまとめる機会を与えていただきました。ここに感謝の意を表します。また、本論文に関して貴重なご指摘をいただいた京都大学工学部松久寛教授、ならびに、有益なご助言をいただいた京都大学工学部榎木哲夫助教授に謝意を表します。さらに、日本機械学会RC106研究分科会、RC123研究分科会で、本研究のバックグラウンドにもなった数多くのディスカッションの場をおつくりいただいた京都大学工学部井上紘一教授、幸田武久助教授はじめ委員のかたがたにお礼を申し上げます。

また、日頃ご指導いただく当社取締役研究開発本部本部長桑野幸徳博士、元常務取締役、現顧問大原省爾博士、当該分野を重要な研究分野として位置づけていただいた当社メカトロニクス研究所々長塚本一義博士、副所長大隅正人博士、鈴木龍司制御システム研究部々長、当該分野の研究室設立にご尽力いただいたソフトエナジー研究所酒井貴史所長、ならびに、研究遂行にあたって献身的な労をとられた知的制御研究室の諸氏に謝意を表します。

目 次

序

第1章 緒 論	1
1.1 背景	1
1.2 本研究で取り扱う課題と用いる手段	3
第2章 単一階層制御系へのファジィ推論適用による過渡応答特性の改善	11
2.1 緒言	12
2.2 吸収式冷温水機の原理と基本的制御	13
2.2.1 吸収式冷温水機の原理	13
2.2.2 吸収式冷温水機の基本的制御	16
2.3 ファジィ推論を用いた非線形制御	16
2.4 過渡応答における性能確認（実験結果）	27
2.4.1 冷凍負荷変動時の過渡応答特性	27
2.4.2 起動時における過渡応答特性	34
2.4.3 冷却水温度変化時における過渡応答特性	34
2.4.4 評価基準による性能比較	37
2.5 結言	37
第3章 ルールを用いた機能階層を有する階層制御系を用いた柔軟な制御	51
3.1 緒言	52
3.2 パッケージエアコンの原理	55
3.3 設置環境への適応を目的とする パッケージエアコンの階層構造制御	60
3.3.1 前段の機能階層におけるルールへのファジィ推論の適用	60
3.3.2 性能確認（実験結果）	65
3.4 ユーザニーズへの適応を目的とする吸収冷温水機の階層構造制御	68
3.5 結言	71

第 6 章 結 論	147
参考文献	151
著者発表論文	156

第 1 章 緒 論

1.1 背 景

まず、空調システムにおける制御への取り組み状況について総括する。

近年、人間の居住空間への要求が高まるなかで、空調システムに対する技術課題も高度化してきている。特に、業務用あるいは産業用とよばれる数十冷凍トン（1 冷凍トン=3,024 kcal/h）から数百冷凍トンクラスの中～大規模の空調システムは、セキュリティシステムなどとともに、ビルオートメーションの一部として、インテリジェント化が進められつつあるが、そのアプローチはおおむね以下の観点から行なわれていると考えられる。

- (1) 空調システムの構成要素としての個別空調機器レベルにおける省エネルギー性や空調環境の快適性のための、より高度な制御方法,
- (2) 防災、セキュリティシステムと並んで、不測の停止を回避あるいは迅速に復旧するための監視／診断／復旧システム,
- (3) 個別空調機器の組み合わせによる大規模空調システム構築のための設計システムやリアルタイムシミュレーション,
- (4) 空調システムとしての運用スケジューリングとそのための負荷予測,

現在、上記のような観点から研究対象となっている空調機器は、吸収式冷温水機、パッケージエアコンなど、家庭用エアコンとの能力比較で数十倍～数百倍規模のも

のであり、設置先としては、主として東京ドーム、大阪駅ビルなどから小型オフィスビルや工場などである。

吸収式冷温水機は、環境問題となっているフロンを全く使用せずに冷水や温水が得られること、ガス燃焼熱や高温蒸気など電気以外の多様なエネルギー形態を駆動源として選択できることなどにより、近年、急速に普及してきている。また、パッケージエアコンも環境への影響のない代替フロンの開発により、一層の普及が期待されている。このような社会的背景により、空調システムにおける研究開発の必要性がたかまってきた。

上記(1)～(4)に類似する開発項目は、原子力発電所や化学分野など、複雑で大規模なプラントにおいて、すでに多くの研究が行なわれているが、空調機器への適用事例は非常に少ないのが現状である。^[11] その原因にもあたるが、本研究で対象としている空調分野では、上記プラントに比べて規模が小さいため、制御のための自由度が小さく、主として、コンピュータ環境やセンサの選定等、使用できる資源に大きな制約がある。本研究で述べる内容も、この点に立脚した開発方針をとっている部分がある。いっぽうで基本とされている「問題解決のための知的情報処理」という観点からは、参考にすべき方法論も多く、本研究でも生かされている部分がある。対象とする空調機器は産業用、業務用といわれている中大型機器であり、コンピュータ、アクチュエータ、センサなどの資源において、家庭用の空調機器に比べた場合には、いくぶん許容度が高いため、制御対象として興味深い。

以上のように、本研究で対象とする空調機器は、制御に使用できる資源の大きさという観点からは、大型プラントと家庭用空調機器との中間的な規模であり、また、高度なシステム制御技術の利用範囲が徐々に拡大、一般化されていくという観点から、研究対象として時宜を得たものと考えられる。

いっぽう、空調システムに関する欧米を含めた研究の現状は、IEA（国際エネルギー機関）の研究分科会（ANNEX 25）において、BEMS（Building and Energy

Management System) への取り組みのなかで、特に、BOFD (Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis) と関連づけた研究課題の全体像が示されている。ここでは、設計のためのリアルタイムシミュレーションを目標として、機器要素 (空調機器単体およびその構成要素としての熱交換器など) の動的モデル化のための物理的、数理的アプローチが行なわれているが、これらは、時定数の大きい空調システムにおいては、特に過渡応答特性を含めた設計が重要となるためである。しかしながら、物理的、数理的、熱力学的考察に基づく対象の厳密な動特性を含めたモデルは、いまだ得られていないのが現状である。 [1-2]

以上の空調機器に関する欧米を含めた取り組みからわかるように、現状での問題の枠組みは、空調機器単体の高効率化や室内空調環境といった個別の最適化問題を物理的、数理的モデルにもとずいてアプローチするという点に設定されている。

1.2 本研究で取り扱う課題と用いる手段

本研究では、空調機器～人間系における普遍的な最終目標である「省エネルギー」と「快適性」の最適化をめざして、特に、制御の面から包括的に取り扱う。制御対象として取り扱う領域が異なると、それぞれの目的によって制御系は異なるものとなる。G. N. Salidis^[1-3], J. S. Albus^[1-4], Rasmussen^[1-5]らによると、知的制御は、精度と知能の両面から必要とされる機能を階層構造として構成することが提案されている。すなわち最も物理現象に近い機能階層ではアクチュエータの制御などにおける精度が重要となり、最も抽象度の高い機能階層では、目的に対する計画立案や意志決定など、人間によって行われてきた知能の一部を機械の情報処理能力によって実現することが重要となる。この両端をになう機能階層の間をいくつかのレベルの異なる機能階層が、各レベルに応じたサブゴールを設定し、全体として機械の知能化を実現することになる。このような機能の階層化を本研究における空調システム

の知的制御においても取り入れることができると考えられる。

すなわち、各状況において制御系に求められる機能とそのレベルに注目すると、機能の階層化という観点から問題を整理することができると考えられる。その階層の構成にも多様な提案がなされているが、特に、Rasmussenの原子力発電所のオペレータの行為に関する3階層モデル、すなわちスキル、ルール、モデル（知識）の三つの異なる機能レベル階層の構成が、本研究における機能階層の構成と近い。

以下では、対象とする空調機器は、物理的、数理的考察によって熱力学的に厳密な動的モデルを得る方法が確立されていないことを踏まえて、機能階層の観点から本研究の流れを説明する。

第一に、状況から得た情報をフィードバック制御で自動的に処理して制御系のなすべき行為が決まる**単一階層の制御系**のレベルがある。これは従来型の制御系と同じデータ駆動型の制御のレベルであるが、ここでは、対象の空調機器が設置状態を正常に維持していることを前提として、従来行われていた定常運転におけるCOP（＝発揮される冷凍能力／投入エネルギー、Coefficient Of Performance）を用いた性能評価にとどまらず、省エネルギーと快適性の観点から、厳密な動的モデルが得られていない空調システムを動的にも最適化することを目標として、過渡応答をも含めた性能向上をファジィ推論を用いた非線形制御により検討する。

第二に、同じく正常な場合について、対象とする空調機器の制御系が生産時点では一意に決定できず、設置場所における調整が必要な場合がある。これに対しては、設置環境やユーザーニーズへの適応性を狙って、スーパーバイザ部分を前段に設け、その実行部を後段に設ける2階層構造化により、状況からの情報をあらかじめ設定されたルールと照合したうえで行為が決まる**機能階層を有するルール駆動型の制御系**を検討する。

第三に、対象とする空調機器が、部分的な劣化を起こしている場合において、特に未経験な状況への対処のため、あらかじめルールとしては設定できず知識を用いた

静的モデルとの照合を経て行為を決定する診断のための機能階層を有する知識（静的モデル）駆動型監視制御系のレベルがある。停止には至らないが、空調機器が部分的な劣化を起こしている異常な運転状態を含めて、監視制御システムにおける診断方法を検討する。部分的な劣化の場合には、いずれかの熱交換器の効率の低下として現象が現れるが、負荷があまり大きくなければフィードバック制御によって入力エネルギーを自動的に増加させることによって、見かけ上、必要な冷凍能力が発揮されるので明には故障としては意識されない。ここで導くモデルは、物理的、数理的考察による動特性を含めた熱力学的なモデルではなく、監視制御システムの定常運転における、異常診断にとって必要十分な精度を有する静的モデルである。この静的モデルから構成される機能階層は、前述のルールによる機能階層より次の点で抽象度の高い階層である。すなわち、ルールによる機能階層ではあらかじめ経験された状況にのみ対応するのに対して、この静的モデルは各種の異なる運転状況を包含した未経験な状況をも表している。

また、このレベルの制御系は、サービスやメンテナンスの実施についての意志決定を含めたマンマシンシステムとして捕らえなければならないという点で正常運転下での制御とは異なる扱いが必要となる。まず、対象に発生している現象を多様な運転状況下で診断する方法の開発が課題となる。あくまで、この段階は定常運転における静的モデルを用いた異常診断である。前述のように動的モデルは未開発の状況にある。そして、つぎの課題としては、人手による復旧作業（メンテナンス）や冗長化による復旧制御の自動化が想定される。しかしながら、それ以前に行われる停止回避制御としては、小さい冷凍負荷にしか対応できないようなレベル以下に出力を低下させる程度にとどまっているのが現状である。

第四には、将来的研究として、動的な状態を含めた監視制御システムのために、システムの観測量から動的モデルを抽出する、現象論的、ビヘービアベースでのモデル化方法とそれを用いた診断、および停止回避制御のための新しい方法を、近

年、複雑なシステムの同定や制御において注目されているカオス理論における手法の応用という観点から取り扱う。これは、物理的、数理的考察による動特性を含めた熱力学的な動的モデル化がいまだ確立されていないことを踏まえたアプローチである。また、人間の快適性についての客観的評価など、空調システムによって住環境を提供されるという面からの扱いは、研究開発の途上にあり、カオス理論から得られた新しい方法論などの適用を模索することや実システムへの適用を試みるなどが課題となる。

以下に、上記の課題について順に、本研究における具体的対応方策を述べる。

単一階層の制御系：過渡応答特性を含めた最適化 正常な運転状況を前提とする第一の課題に関して、現場で用いられる空調機器の制御としては、PID制御が主流であり、最適制御やゲインスケジューリングPID制御は、対象が非線形性を有するために動的モデル化が困難となっていることやパラメータのチューニングが困難であることを主たる原因として、あまり普及していない。通常、PID制御系は、定常運転においてパラメータのチューニングを行ったものを画一的に用いているに過ぎず、当然ながら、立ち上げ時を含む過渡応答時や非線形性に対する適応性はない。したがって、定常状態はともかく、過渡応答時のような動的な状態においては、最適運転とはなりえない。いっぽうで現場のエキスパートには、対象の非線形性やむだ時間などに関する調整のための知識や経験がある。このような対象には、Zadehにより提唱されたファジィ推論^[1-6]を用いた制御の適用が望ましい。特に非線形性を取り込みやすい点でPID制御よりもすぐれた結果が期待できる。ファジィ制御については、すでに、Mamdani^[1-7]らに端を発して多くの成果が報告されているが、本研究で提案するファジィ制御は、駆動熱源の非線形性の取り込み、および空調機器の最終目標である「省エネ」と「快適性」をバランスさせる観点から、新奇なメンバーシップ関数を提案、特に過渡応答における性能についてPID制御よりも有利な点を見出だ

している。このような単一階層の制御系は、機能階層という構造から見れば、従来の制御工学におけるフィードバック制御と同じレベルであり、最も物理情報に近いデータ駆動型の制御であると考えられる。

ルールと照合したうえで行為が決まる機能階層を有する制御系

：設置環境やユーザーニーズなど異なる状況への適応 第二の課題については、設置環境への適応やユーザーニーズへの対応といった面での柔軟性を増すため、2階層構造の制御系を提案する。空調機器に工場での生産時点では必ずしも明確ではない設置環境やユーザーニーズなどへの適応能力を付与するために、スーパーバイザとしてルールを用いて構成された制御目標の決定階層と、その制御動作の実行階層を有する2階層構造制御系は、目標値フィルタ型2自由度制御系と類似の構成である。

[3-1] 目標値フィルタ型2自由度制御系は、本来、制御目標値への迅速な収束と外乱に対する安定性の両立のために考案された方法である。ここでは、パッケージエアコンを例として、設置条件に応じて四方弁出口目標温度を階層構造制御系の前段で自動設定する適応的な制御^[1-3]を示す。また、吸収式冷温水機では、たとえばエネルギー消費量をできるだけ少なくするような運転制御を選ぶか、あるいは出力である水温が、外乱や負荷変動に対して（エネルギー消費は大きくなっても）できるだけ敏感に応答するように設定するかといった変更を容易に行なえる柔軟な制御系を提案する。このような制御系の構造を機能階層の観点から見れば、従来の単一階層に重畳する形でより抽象度の高い階層が存在すると考えられる。ここでは、このようなルール駆動型の制御系構成を提案する。

静的モデルとの照合を経て行為を決定する機能階層を有する制御系

：定常運転での監視制御システムにおける異常診断 異常事態をふまえた第三の課題について、現状では、定期点検時およびユーザからのサービスコールがあった時、サービスマンがサービスツール（コンピュータや測定装置）を用いて、原因の診断と対策を行ない復旧させている。その場合、停止のタイミングなどユーザの

快適性をできるだけ損なわない監視制御が必要となる。特に未経験な状況への対処のため、あらかじめルールとしては設定できず知識（静的モデル）との照合を経て行為を決定する機能階層を有する静的モデル駆動型の診断方法について提案する。

従来より、システム全体の融通性や拡張性から個別の空調機器自体で監視／診断機能を分散的に持たせることが必要であり、自動化が求められている。これに対しては、故障の因果関係に関する知識をプロダクションシステムの形で持つ分類型診断エキスパートシステムの適用が考えられる。しかし、すでに述べたようにコンピュータ環境の制約やサービスマンが使用する測定機器を搭載することはできないという制約から、現状では、これを適用することはできない。さらに、この方法では故障として顕在化した異常についての診断は可能であるが、部分負荷運転における潜在的な異常の同定は不可能である。そこで、システムを小型化することや実用的には温度センサによる情報を最小限度に利用する程度に限定されてしまうといった資源の制約をふまえて、潜在的な異常を同定するための新しい方法が必要となる。そのために、対象の物理モデルを用いたモデルベース型エキスパートシステムに期待が持たれる。しかし、すでに述べたように、いまだ開発されていない吸収冷凍機の動特性を厳密にシミュレーションできるような高精度すぎるモデルは、仮に開発されたとしても計算上重く、逆に、あまりに単純化されたモデルたとえば定格条件における定常運転時の関係をモデルとして用いたのでは、部分負荷状態での判定精度が期待できない。これらを考慮して、本研究では潜在的な異常と言えども必ずいずれかの熱交換器の効率低下を伴うという定性的な知識をもとに、機器の構成要素である熱交換器の機能に関する考察と実験データの解析により、監視制御における診断にとって必要十分な精度で計算負荷も軽い静的モデルを導き、これを用いた新しい異常診断システムを提案、実証する。このような静的モデル駆動型の診断の機能階層は、先に述べたデータやルールの階層より抽象度の高い階層である。さらに、得られた判定指標の値にもとづく診断においては、サービスマンメンテナンスのタイミ

ングやコスト，ユーザの快適性なども考慮にいった最適化問題と考えられ，総合的な意志決定が必要となる．異常診断に続いて，通常，人手による復旧作業，冗長システム化による復旧制御の自動化が考えられる．それ以前に停止回避運転／制御が必要であるが，出力を低下させ停止にいたることを避けるだけのレベルにとどまっているのが現状である．

観測量からの動的モデルの抽出と停止回避制御

：新しい方法の模索 最後に，第四の課題に関連して，空調機器，あるいは，それらから構成される空調システムのような非線形システムの監視制御／診断のための動的モデル化について，熱力学的観点からはいまだ確立された方法がないことをふまえて，将来的な方法を検討する．まず，空調システムに関しては，カオス現象を解析する研究分野における手法からのアプローチが興味深い．人間にとって快適といわれている自然の風のパワースペクトルが， $1/f$ (f は周波数) 分布となっていることから，空調される室内環境の制御において，開ループ制御で，石油ファンヒータによるヒータ温度の $1/f$ ゆらぎを低次元カオスの一種である間欠カオスを用いて人工的に簡易に作る方法が提案されている．^[1-9] また，人間にとって快適か否かの評価を従来の自己申告ではなく，客観的に評価するための指標として，被験者実験における人間の脳波や心拍R-R間隔のゆらぎのカオス性を用いる方法が検討されている．^[1-10] 用いられる方法論としては，ブラックボックスであるシステムから得られる，一見ランダムな1次元の時系列信号から，システム全体を表現する力学系を再構成する，いわゆるターケンスの埋め込み定理を基礎とするシステムのダイナミクスを同定する一つの方法であり^[1-11]，従来の物理的考察による部分的モデルの統合化による動的モデル構築方法に対比させると，現象論的，ビヘービアベースのモデル化方法と言える．したがって特に複雑大規模な非線形システムへの適用が期待される．この方法では，系を表現する微分方程式を得るのではなく，ダイナミカルシステムとしての幾何学的構造をアトラクタとして得る．このアトラクタ形状に

よりシステムを診断する方法が期待されている。従来は、系が線形構造であることおよびその次数を仮定した同定法が一般的であった。最近では、ニューラルネットワークが非線形写像を学習できるという特徴を利用して、Rayleigh方程式から導いた2次の非線形プラントから得られる時系列信号からシステムを同定できる、新しい構造のニューラルネットワークが報告されている^[1-12]。

本研究では、制御の観点から、これまではエノンマップ^[1-11]やローレンツアトラクタ^[1-11]といった、比較的簡単な構造のカオスにしか適用されていなかった新しい方法^[1-13]を、より複雑な非線形システムにも適用可能か？を検証するために、上記のRayleigh方程式と同等の複雑な挙動を示す典型的な2次の非線形プラントである強制振動系を対象として、今後、空調機器へ展開するための方法論としての基礎検討を行なう。ここでは、プラントがカオス状態になれば、予測不可能性により状態を捕捉できなくなることを回避するため、当該プラントにおけるカオス発生の確認とその周期運動への制御についてシミュレーション結果を示す。ユーザの快適性なるべく損なわないという目的からは、従来制御に見られる安定点への収束つまり出力を大きく低下させるあるいは停止させるのではなく、本提案のように発散しないレベルで周期運動に拘束する制御が有効である。このような検討により空調システムの制御について新しい方向づけができたと考えられる。



第 2 章 単一階層制御系へのファジィ推論 適用による過渡応答特性の改善



本章では、非線形性ゆえに厳密な動的モデル化が困難である吸収式冷温水機において、従来用いられていたPID制御における問題、すなわち、負荷一定（たとえば定格運転）で定常運転を行っている場合にパラメータをチューニングしているため、過渡応答など他の運転条件下では必ずしも最適になっていないという問題を解消するために、制御系へのファジィ推論の応用を検討する。駆動熱源の非線形特性（昇温降温特性など固有の特性）を知識として利用し、これを補償するために多入力ファジィ制御系を構成、十分に調整した従来のPID制御系を比較の対象とし、100冷凍トン二重効用吸収式冷温水機を用いた実験により比較する（1冷凍トン=3,024 kcal/h）。その結果、提案した多入力ファジィ制御系は、定常運転状態のみならず、特に、大きな負荷変動や起動特性、すなわち過渡応答領域においても省エネルギー性や快適性（負荷変動に対する応答性）といった面での性能向上が可能であることを実証する。

2.1 緒言

吸収式冷温水機は、ガス燃焼熱や蒸気など多様な駆動エネルギー源を利用できるため、電力需要がピークに達する夏期の冷房においては、エネルギー平準化の観点から特に有利であること^{[2-1] [2-2]}、環境問題となっているフロンを使用しないで冷房暖房が得られること等のために注目されており、最近では、オフィスビルや駅などの公共建造物を始めとする、比較的大型の建築物用空調機器として、需要が拡大してきている。

それにともなって、省エネルギー化、小型化などを含めた最適化に対する要求は、従来以上に大きくなってきており、制御系設計の立場からも改善すべき点は多いと考えられる。しかしながら、制御系設計の観点から吸収式冷温水機プロセスのモデル化を考えると、蒸発や凝縮といった相変化、熱移動や物質移動などのために、そのダイナミクスを正確に表現することは難しい。また、吸収液の結晶化を招かぬよう過度の温度低下を避けるという制限、入力熱源には上限、下限がある、冷却水や熱交換機の経年劣化、飽和特性を始めとする各種非線形特性など、複雑な特性が制御系のなかに存在する。そのために、精密な動的モデルは得られていない。

このようなプロセス制御系に対しては、一般に、PID制御が用いられることが多い^[2-3]。より高度な方法として、アドバンストPID、現代制御などが考えられるが、パラメータ調整やモデル化の難しさなどから実用化はあまり進んでおらず^[2-4]、吸収式冷温水機においても同様である。制御系設計に対しては、定常運転時の安定性のみならず、環境変動や2次側に依存した部分負荷変動、起動時の目標温度への追従性などに対しての即応性と安定性、さらに、このような過渡応答特性を、省エネルギー性や制御系の設置時調整や改良設計の容易さも考慮したうえで実現することが求められている。

本研究では、オペレータの知識や吸収式冷温水機の特徴に関する知識、たとえば、時定数が大きいこと、入力熱源において昇温時と降温時で特性が異なること、速応性と省エネルギー性のバランスなどを制御系に反映していくことにより、特性を改良する方法として多入力ファジィ制御の適用を検討する。この方法を、100冷凍トン（1冷凍トン=3,024 kcal/h）級の二重効用型吸収式冷温水機に適用して、実機実験を行い、その効果を実証する。

2.2 吸収式冷温水機の原理と基本的制御

2.2.1 吸収式冷温水機の原理

吸収式冷温水機は、冷水、温水のいずれかを切り替えて供給できる装置であるが、本論文では、主として冷凍機としての実験について検討結果を示す。

ここでは、Fig.2-1 に示すような二重効用型吸収式冷温水機の基本構成と冷凍機としての動作について実験装置の仕様を含めて簡単に説明する。

基本構成としては、蒸発器と吸収器からなる下胴、凝縮器と低温再生器からなる上胴、および高温再生器と複数の熱交換器、ポンプ等からなる。

冷凍機としての動作は、2次側から送られてきた水(60m³/h)を、減圧(6.5mmHg)された下胴内の蒸発器を通る管束内に導き、その管束上に散布した冷媒(水)の蒸発(5℃)により冷却する。その結果、2次側へ冷水が供給される。蒸発した冷媒は、同じ下胴内の吸収器において濃度の高い吸収液(LiBr, 臭化リチウム)に吸収される。そのため下胴内は減圧状態が維持される。濃度の高い吸収液は、冷却水(32℃)の通る管束上に散布される。そのため、発生する凝縮熱は、クーリングタワーから循環する冷却水(100m³/h)に捨てられる。また、冷媒を吸収した稀吸収液は、ポンプにより圧送され、熱交換器を経て高温再生器に送られる。高温再生器では、ガス流量制御弁により制御されたバーナによる燃焼熱によって加熱され、冷媒蒸気と中間濃度

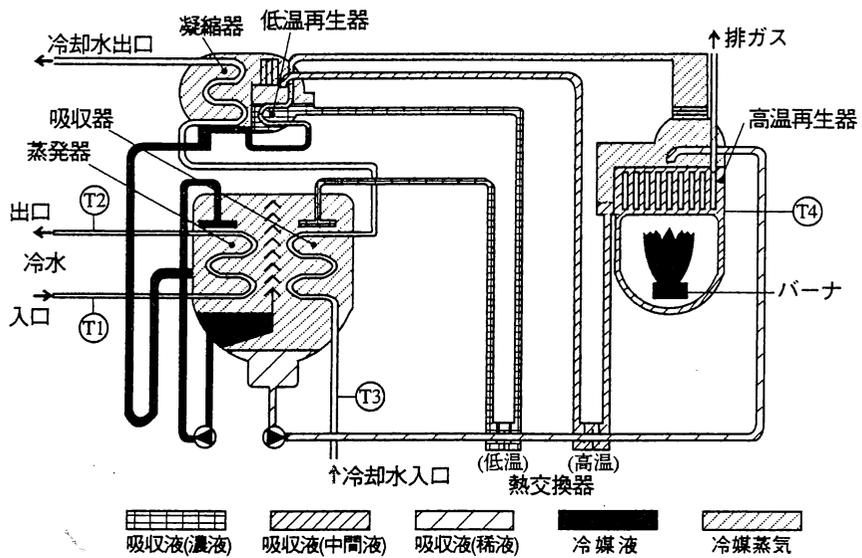


Fig.2-1 二重効用吸収式冷温水機

の吸収液に分離される。吸収液は、低温再生器に入り、高温の冷媒蒸気によりさらに高濃度の吸収液となり、再び凝縮器に至る。また、低温再生器で放熱した冷媒は、さらに冷却水で液化され蒸発器に戻る。すでに述べたように、多様なエネルギー源を選べるが、以下の実験では、主に、バーナーによる燃焼熱を用いる直火式について検討する。高温蒸気を熱源として利用される場合は、蒸気の流量制御弁により供給熱量の制御を行う。

次に、吸収サイクルについて、Fig.2-2に示すデューリング線図を用いて述べる。水溶液の濃度、温度およびその濃度と温度での溶液と平衡する溶液面上の水蒸気分圧 P との関係を示す線図が各種発表されており、デューリング線図もそのうちの一つである。濃度ごとに溶液温度について、その溶液と平衡する飽和蒸気温度をとっていくと、多くの場合、直線関係を得る。この直線をデューリング線図という。

Fig.2-2に示すデューリング線図を参照して動作を述べる。稀吸収液は、点2の状態から吸収液ポンプに入る。吸収液温度が 42°C 、圧力が 6.55mmHg である。点6から点2は、吸収作用を示す。点2から点7Hを経て、点5Hに至る過程は、高温再生器での熱交換による温度上昇を示す。点7Hでは、Fig.2-1における中間熱交換器（低温、高温）での温度上昇を示している。さらに、点5Hから点4Hでは、高温再生器における吸収液の濃縮つまり水蒸気と吸収液の分離が行われている。点4Hから点8Hは、上述の熱交換器における熱交換によって、中間濃度の吸収液の温度降下が行われていることを示す。点5に至る過程は、低温再生器における等エンタルピー変化、正確には一部の冷媒のフラッシュにより、残りの溶液の温度が点8Hから点5まで下がる。このとき、冷媒のフラッシュにより吸収液濃度は上昇するが、わずかであるため図には示さない。点5から点4は、高温再生器、低温再生器における濃縮を示す。点4から点8は、上記中間熱交換器における稀吸収液（低温）との熱交換による放熱の結果、温度が降下することを示す。さらに、吸収器にいたる冷却によって、点6になる。ここで高温再生器での圧力は、 760mmHg であり、低温再生器では、 72mmHg である。

以上を整理しておく

- 6 → 2 : 吸収液の吸収作用
- 2 → 5H : 高温再生器からの戻り高温濃溶液との熱交換による稀溶液の温度上昇
- 5H → 4H : 高温再生器での吸収液と水蒸気の分離
- 5 → 4 : 低温再生器における溶液の濃縮
- 4 → 8 : 吸収器からの低温稀溶液との熱交換による濃溶液の温度降下
- 8 → 6 : 吸収器での外部からの冷却による濃溶液の温度降下

となる。

2.2.2 吸収式冷温水機の基本的制御

吸収式冷温水機に用いられるもっとも基本的な制御目標は、ガスあるいは蒸気の弁開度操作量を制御することにより、2次側（設備側）にて冷房に供されてのち吸収式冷温水機に戻される冷水（最大負荷時12℃）を、常に目標温度（7℃）と一致させることである。冷水流量が定格値（60m³/h）であり、温度差5℃の時、冷凍負荷100%と呼ぶ。一般には、目標温度と冷水出口温度との偏差に対して、PID制御により制御弁開度操作量を出力する方法が用いられている。本研究では、提案するファジィ制御方法の性能を検討するための比較対象として、十分に調整されたPID制御^{[2-4] [2-5] [2-6] [2-7]}を用いる。その方法は、付録に示す。

2.3 ファジィ推論を用いた非線形制御

ファジィ制御の特徴としては、多入力制御系をルールの追加という形で簡便に行える点やルールに熟練者の知識を取り入れ、制御に反映させることができる点などが挙げられている。

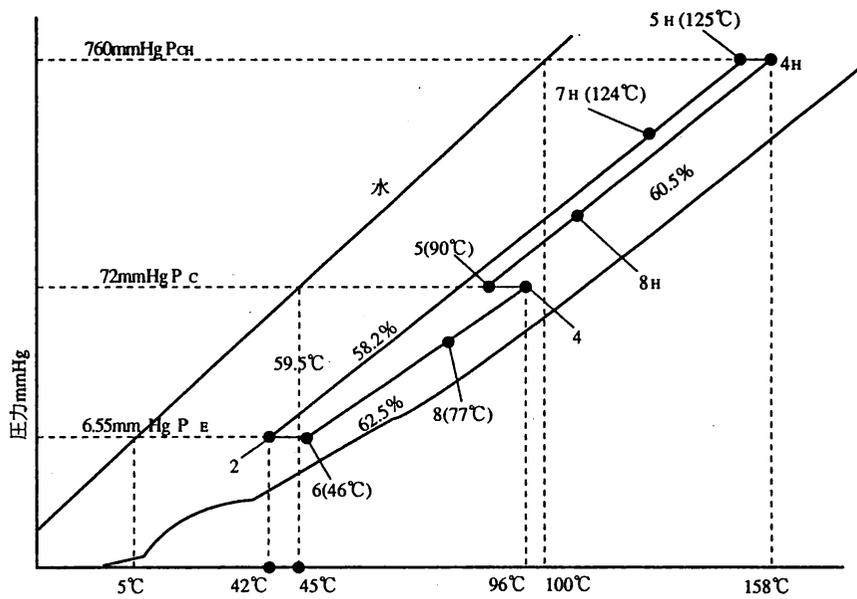


Fig.2-2 臭化リチウム溶液のデューリング線図
と二重効用吸収冷凍機のサイクル図

このような一般的な特徴以外に、たとえば、メンバーシップ関数を非対称に設定したファジィ制御であれば、入力番号によって異なるフィードバックゲインを持たせることが可能となる。従来、メンバーシップ関数の形状ではなくファジィルールを用いる方法が提案されている。すなわち、たとえば1入力1出力の定置制御系のファジィ制御器の設計を考えてみる。プラントとしては1次遅れ+むだ時間系のようなものを想定する。前件部変数として出力の偏差 E とサンプリング時間における E の変化分 ΔE 、後件部変数としては操作量 U の変化分 ΔU を考えるとす。設計の考え方は、想定されるプラントの応答の各種のフェーズにおいて、どのように制御すればよいかを記述するもので、まず、 ΔE 、 E のいずれか一方が0近傍（ZR）の場合の規則をたてる。さらにたとえば立ち上がりを加速しようとする場合には、

if $E=PB$ and $\Delta E=NS$ then $\Delta U=PM$

というルールを追加するといった形で制御の質を高めていく方法が提案されている。

しかしながら熟練者にとって、より実際の物理現象に近い各々のファジィ変数のメンバーシップ関数を変更するほうが具体的で容易に理解できる。ゲインスケジューリングPID制御などによる方法^[2-8]も考えられるが、本研究で示すような多入力系で複数のループを有するPID制御系の調整は難しい^[2-9]。ファジィ制御を用いるほうが、入力変数の追加や変更が容易に行えるだけでなく、制御則が統一された述語で表現されているため、理解しやすいと考えられる。

ここでは、Fig.2-3に示すように6入力1出力ファジィ制御系を構成し、付録に述べる方法で十分に調整されたPID制御系と実機実験により比較検討した。なお、この実験における対象としては、100冷凍トン（3,024 kcal/h）のガス直火式の吸収式冷温水機を用いた。

入力は、フィードバック制御のための変数として

- ・冷水出口温度（ T_o ）の目標温度（ T_{ref} ）との偏差： e_{T_o}
- ・偏差（ e_{T_o} ）の変化率： d_{T_o}

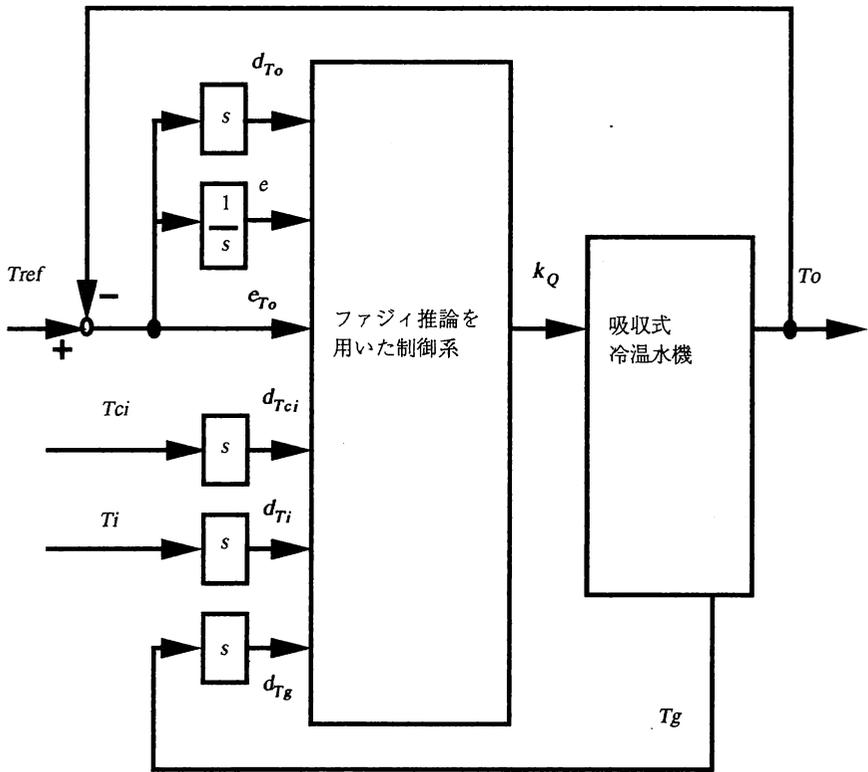


Fig.2-3 多入力ファジィ制御系

- ・ 偏差 (e_{T_o}) の過去40サンプルの平均値： e

さらに、

フィードフォワード的な制御のための変数として

- ・ クーリングタワから循環される冷却水入口温度 (T_{ci}) の変化率： $d_{T_{ci}}$
- ・ 2次側の冷房に供され温度の上昇した冷水の入口温度 (T_i) の変化率： d_{T_i}

さらに、フィードバック補償として働く変数として

- ・ 高温再生器温度の変化率： d_{T_g}

以上あわせて6変数である。

出力は、

- ・ 制御弁操作量： k_Q

である。ファジィ推論方式としては、min-max, シングルトン方式を用いた。

ここで提案している方法とPIDゲインをスケジューリングする方法との違いについて述べておく。ゲインスケジューリングPIDでは、 T_{ci} , T_i , T_g が、単にPIDの各ゲインを調整するためだけに使用されるので、偏差 e_{T_o} が、ゼロであれば入力として設定している意味がなくなるが、多入力ファジィ制御系では、そのような場合であっても、フィードフォワード入力あるいはフィードバック補償として、各入力が偏差 e_{T_o} とは独立して作用することができる点にある。このことは、吸収式冷温水機のような時定数の大きい制御対象の場合には重要な点である。

次に、提案の制御方法に関する詳細な説明を行う。まず、使用したファジィルールを Fig.2-4 (a)~(d) に、メンバーシップ関数を、Fig.2-5 (a)~(f) に示す。また、具体的な温度測定点は、Fig.2-1 にT1 ~ T4 で示す。

e_{T_o} と d_{T_o} については、すでに述べた駆動熱源の昇温/降温における非線形特性をメンバーシップ関数に取り入れるようにした。ラベルは、PB, PM (Positive Medium),

PS (Positive Small) , ZR, NS, NM (Negative Medium) , NB (Negative Big) で表わす。

ルールの構成方法としては、たとえば以下のようなものである。

If e_{T_o} is NB and d_{T_o} is NB , then k_Q is PB .

(冷水出口温度が目標温度より高く、かつ、さらに偏差が拡大しているならば、弁開度を大きく開く。)

つまり、ガスインプットを増加させることにより冷凍能力を増加させ、その結果、冷水の出口温度を低下させて目標の7℃に収束させるようにする。

If e_{T_o} is ZR and d_{T_o} is NB , then k_Q is PS .

If e_{T_o} is PB and d_{T_o} is NB , then k_Q is PS .

If e_{T_o} is NB and d_{T_o} is ZR , then k_Q is NM .

If e_{T_o} is ZR and d_{T_o} is ZR , then k_Q is ZR .

If e_{T_o} is PB and d_{T_o} is ZR , then k_Q is PM .

If e_{T_o} is NB and d_{T_o} is PB , then k_Q is NS .

If e_{T_o} is ZR and d_{T_o} is PB , then k_Q is NS .

If e_{T_o} is PB and d_{T_o} is PB , then k_Q is NB .

上記以外の四つの変数については、前件部がひとつの条件のみで構成される。例を以下に示す。

If d_{T_i} is PB , then k_Q is PB .

いずれも、PBはPBに、ZRはZRに、NBはNBに対応させている。

Fig.2-4は、以上のようなルールの記述を表にまとめたものである。

次に、メンバーシップ関数に反映させた知識の例を示すと、吸収式冷温水機では、制御弁開度を大きくする場合には緩慢に増加させ、小さくする場合には迅速に減少させることが必要である。これは、たとえば2次側に依存する冷凍負荷が大きくなり

k_Q		e_{T_o}				
		NB	NS	ZR	PS	PB
d_{T_o}	NB	PB		PS		PS
	NS		PS	PS	PS	
	ZR	NM		ZR		PM
	PS		NS	NS	NS	
	PB	NS		NS		NB

(a) 冷水出口温度に関するルール

d_{T_i}	NB	NS	ZR	PS	PB
k_Q	NB	NS	ZR	PS	PB

(c) 冷水入口温度に関するルール

e_{T_o} & d_{T_o} & d_{T_g} is ZR

e	NB	NS	ZR	PS	PB
k_Q	NB	NS	ZR	PS	PB

(d) 冷水出口温度偏差の積分値に関するルール

$d_{T_{ci}}$	NB	NS	ZR	PS	PB
k_Q	NB	NS	ZR	PS	PB

(b) 冷却水入口温度に関するルール

Fig.2-4 ファジイルール

冷水出口温度が7℃より高くなった場合に制御が働くが、制御弁によって入力される熱量によって加熱させていくのはたやすいが、放熱ファンのようなアクティブな温度降下装置を持たないために、制御目標である冷水温度が目標温度7℃よりも過剰に低下することや、それにとまなう吸収液の結晶化につながる高温再生器の高温側へのオーバーシュートを避けなければならないからである。

このような熟練者の知識は、Fig.2-5 (a)(b)に示す冷水出口温度の偏差 e_{T_o} と変化率 d_{T_o} 、Fig.2-5(c)に示す冷水入口温度の変化率 d_{T_i} のメンバーシップ関数を非対称に設定することで表現している。たとえば偏差 e_{T_o} で説明しよう。Fig.2-5 (a)より偏差の符号が正であれば、ゲインが急速に大きくなり、負であれば、あまり急速な変化はさせないことを狙っている。従来のPID制御では、このような偏差の符号によるゲイン調整は行えず、メンバーシップ関数が対称であることと同等と考えられる。通常のPID制御では、偏差の符号に対してフィードバックゲインが等しいために、熱源の昇温／降温における非線形特性を取り込むことができない。これは、ゲインスケジューリングPID制御でも可能であるが、非線形特性を言語的に表現するファジィ制御のほうが、調整が容易と考えられる。特に、本論文ではメンバーシップ関数の非対称化により、これを取り入れている。すでに述べたように、これは、ルールの追加という形でも可能と考えられるが、オペレータにとっては対象の物理的機能に関する直接的な知識の方が容易に抽出できた。

しかしながら、これだけでは、フィードバック制御におけるゲインを低く設定することになるために、緩慢な弁操作によって応答性が劣化することが予想されるため、従来は、非常停止用リミッタへの入力としてON/OFF制御に用いていた冷水入口温度の変化率 d_{T_i} 、冷却水入口温度の変化率 $d_{T_{ci}}$ 、高温再生器温度変化率 d_{T_g} を多入力ファジィ制御系の入力変数とすることによりフィードフォワード的な制御を加味することにした。この知識は、Fig.2-4(b), (c)に制御ルールを示すように、冷水入口温度の変化率 d_{T_i} や冷却水入口温度の変化率 $d_{T_{ci}}$ などを入力変数とすることにより、

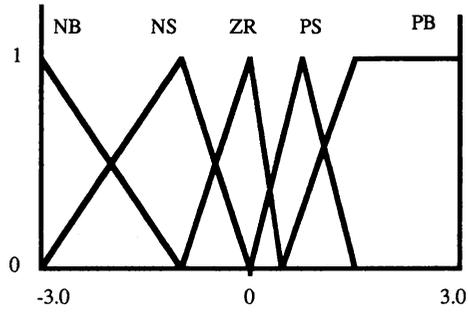
冷水出口温度を入力とするフィードバック制御と独立して同時に実現しているため、時定数やむだ時間により冷水出口温度の偏差が、まだ変化をおこしていない状態、すなわち偏差がゼロの状態でも予見的に制御弁開度の操作を行うことができる。この点は、時定数の大きい吸収式冷温水機の場合、特に有効となる。

次に、提案の多入力ファジィ制御のもう一つの特徴について述べる。

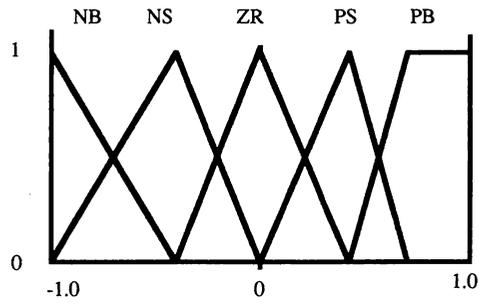
知識をルールで表現する時、そのルールの出力に対する影響度が異なる場合がある。たとえば、応答の速さと省エネルギーのいずれを優先するか、といった場合には、熟練者の知識から、関連するメンバーシップ関数のピーク値を変更することで結果への影響度を調整した。つまり応答の速さを優先するにはフィードフォワード入力である d_{Ti} 、 d_{Tci} などの影響度を大きくしなければならない。ここでは、あとで実験例を示すように、PID制御との比較において負荷が増加して冷水出口温度が7℃よりも大きくなった場合には、燃料消費が少なくPID制御と同等の応答速度で収束するよう、また、負荷が減少した場合には同等の燃料消費でより速い応答になるようにチューニングしたものを示す。

このような知識については、Fig.2-5 (c), (d), (f) に示す。冷却水入口温度の変化率 d_{Tci} のメンバーシップ関数を、フィードフォワード本来の目的である速応性を考慮した形で表現しているが、省エネルギー性を考慮して、ピーク値を 0.5 としている。また、Fig.2-5 (c) では、予見的な制御を加えるために冷水入口温度の変化率 d_{Ti} のピーク値を0.4と表現している。さらに、Fig.2-5 (f) では、定常偏差の減少のために冷水出口温度の偏差の積分値に関する知識をピーク値0.5で表現している。

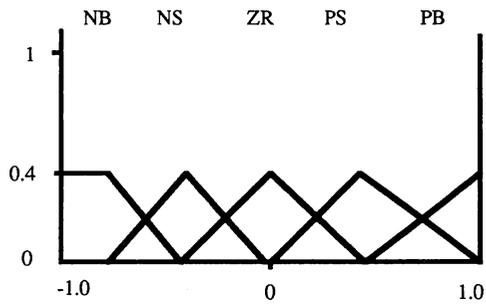
本章では、このピーク値は、以下の目的で調整した値を示している。すなわち、冷水入口温度がステップ状に増加、すなわち負荷がステップ状に増大した場合、冷水出口温度の応答性がPID制御と同等となるように調整している。これで結果としてエネルギー消費がPID制御の場合よりも少なくなった。また、逆に、冷水入口温度がステップ状に減少すなわち負荷が減少した場合には、PID制御と同じ程度のエネルギー消



(a) 冷水目標温度と測定温度との偏差 : e_{T_o}

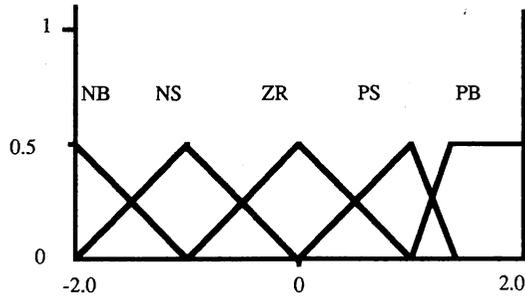


(b) 冷水出口温度の変化量 : d_{T_o}

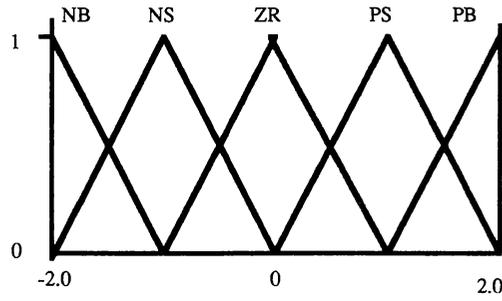


(c) 冷水入口温度の変化量 : d_{T_i}

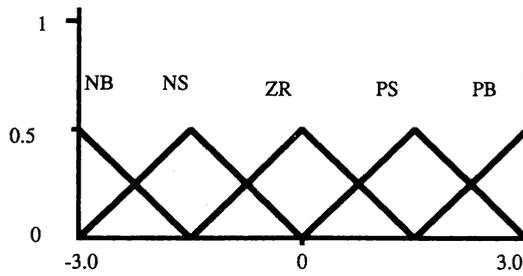
Fig.2-5 メンバシップ関数



(d) 冷却水入口温度の変化量 : $d_{T_{Ci}}$



(e) 高温再生器温度の変化量 : $d_{T_{Tg}}$



(f) 冷水出口温度偏差の平均値 : e

Fig.2-5 メンバシップ関数

費で、よりすばやい応答性を示すように調整している。これらの詳細は、2.4で述べる。

後件部としては実数型で表現している。Fig. 2-5 (g)にガス直火式の一例を示す。

外観をFig.2-6に示す。吸収式冷温水機本体の外形寸法は、長さ2600mm、幅1700mm、高さ1900mm。また、運転時重量は、4.8tonである。

2.4 過渡応答における性能確認（実験結果）

ファジィ制御系の性能を検討するため、100冷凍トン二重効用吸収式冷温水機に適用して、評価実験を行った。実験条件としては、冷水流量 $60\text{m}^3/\text{h}$ 、冷却水流量 $100\text{m}^3/\text{h}$ 、冷水出口温度 7°C で冷水入口温度は負荷が100%の時 12°C としている。性能比較の対象としては、十分に調整されたPID制御系を用いた。調整は、応答の整定時間と振幅減衰比により評価することとし、まずジューグラーニコルス限界感度法を適用（比例ゲイン8.3、積分時間300、微分時間75、制御周期30秒）してのち、上記の観点から評価、調整した。詳細は付録に示す。

2.4.1 冷凍負荷変動時の過渡応答特性

冷凍負荷変動として、2次側から流入してくる冷水温度（冷水入口温度）をステップ状に変化させた場合の応答を比較した。実験では模擬負荷装置すなわち冷水に対して適度な量の温水を混合させることによって、指定の冷凍負荷の場合の冷水入口温度にできる装置を用いた。そのため厳密なステップ状入力とはなっていないが性能確認には十分であると考えられる。

既に述べたように吸収式冷温水機で負荷100%とは、冷水入口温度 12°C を冷水出口温度 7°C に冷却している状態、すなわち 5°C の温度差を意味する。以下で例示する負荷変動幅40%、30%は、非線形性を補償できていることを示すため、かなり大きい値を選んでいる。また実際の運転条件にあわせるため冷却水温度を連動させている。

NB	NM	NS	NZ	ZR	PZ	PS	PM	PB
-90	-60	-30	-15	0	15	30	60	90

(g) 弁開度 k_Q

Fig.2-5 後件部メンバーシップ関数
(シングルトン)

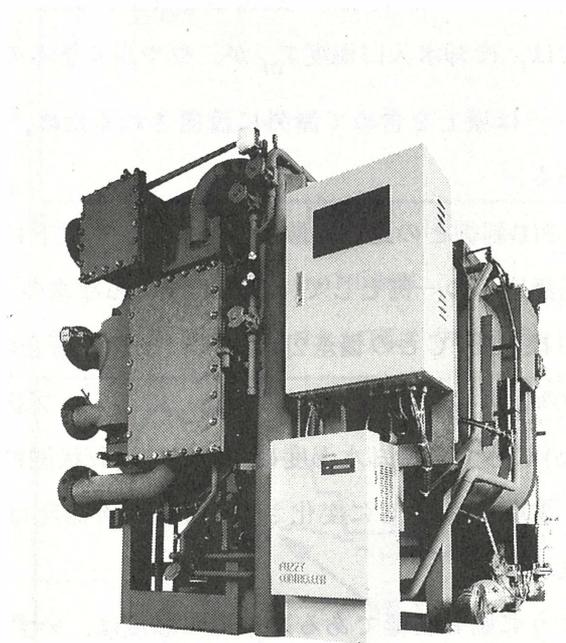


Fig.2-6 ファジィコントローラ付き
吸収式冷温水機の外観

変化させる方法としては、冷却水入口側に実験用として、模擬的に負荷を可変とする装置を冷水温度の模擬負荷と同様に設置し、そのなかで一定温度の温水と、適量、混合させることを行った。

実際の運転では、クーリングタワー（冷却水の熱を大気に放熱させるために屋外に設置される冷却塔）にあまり余裕がないのが実状であり、負荷が増加すると冷却水系への放熱が増加し、これを充分大気に放熱しきれず、循環する冷却水の温度すなわち提案の制御系では、冷却水入口温度 T_{ci} が、やや高くなるのが一般的である。

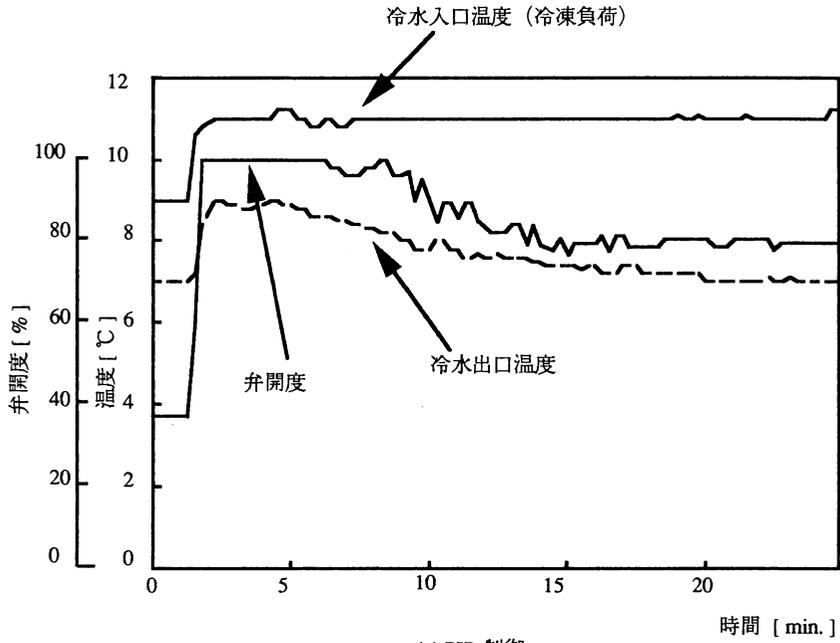
また、クーリングタワーは屋上を含めて屋外に設置されるため、日射の影響でも温度が変化することがある。

さて、提案の方法とPID制御との比較実験の結果について以下に述べる。

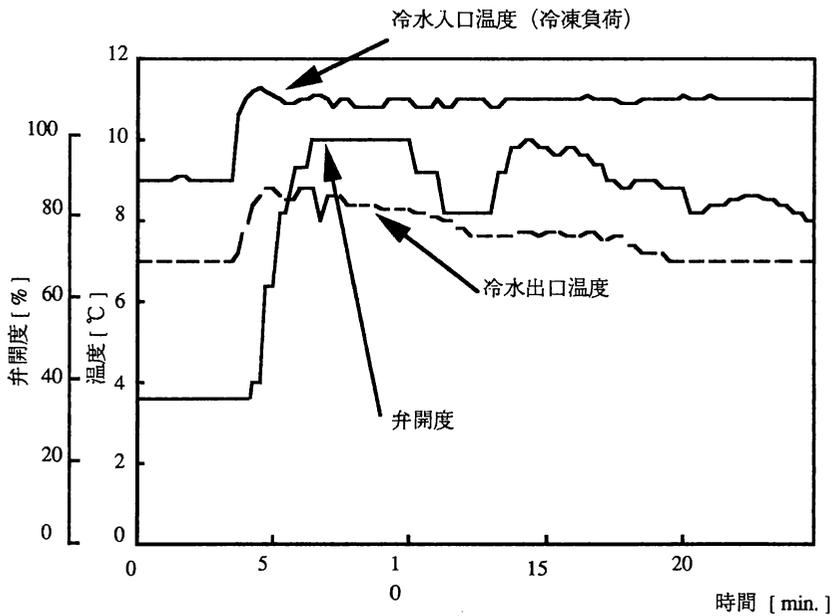
冷凍負荷の増加を過渡応答の一例として、流入してくる冷水の入口温度を、9℃（負荷40%，すなわち、目標温度7℃との偏差2度と負荷100%の場合の偏差5度の比が40%）から11℃（負荷80%，同じく偏差4度と5度の比）にステップ状に増加させた場合の結果を Fig.2-7 (a)(b) に示す。冷却水温度は、実際の運転状態にあわせるため、冷水入口に連動させて、30℃から32℃に変化させている。弁開度は、弁の開度の全開に対する割合を%で表示した。

グラフからわかるように制御目標である冷水出口温度は、いずれの制御方法でも、ほぼ同等の応答性、安定性が得られ、15分程度で整定した。しかし、その入力である制御弁操作の様子を見ると、ファジィ制御では特に4分から7分あたりで操作が緩慢であるのに対して、PID制御では、2分から3分のところでわかるように、敏感な応答を示している。制御目標である冷水出口温度の時間変化が、Fig.2-7(a), (b)の比較において、ほぼ同等の収束を示していること、つまり冷水出口温度への影響にほとんど差が見られないことから、以下のことが推測される。

すなわちPID制御における制御弁の操作は、入熱量としては飽和しており、排熱損失の増加（＝無駄）に消費されているのではないかと考えられる。逆に提案のファ



(a) PID 制御



(b) ファジィ制御

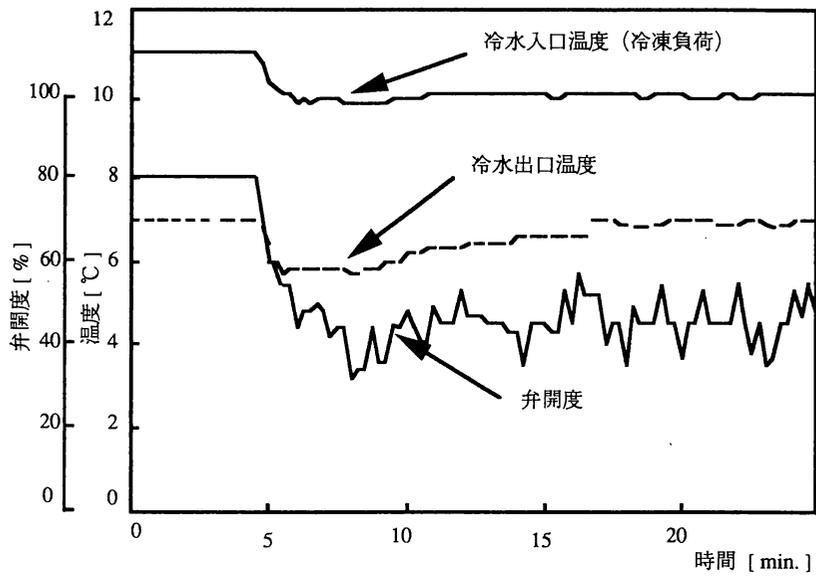
Fig.2-7 冷凍負荷増加における応答
(冷却水温度変化を運動)

ジィ制御では、吸収液や高温再生器におけるバーナからの吸熱特性を知識としてよく取り込んでいる、つまり高温再生器における吸熱にとって、必要十分な燃焼量となっているため省エネルギーとなっていること、およびフィードフォワード入力の設定により応答速度が改善にされていること、が考えられる。

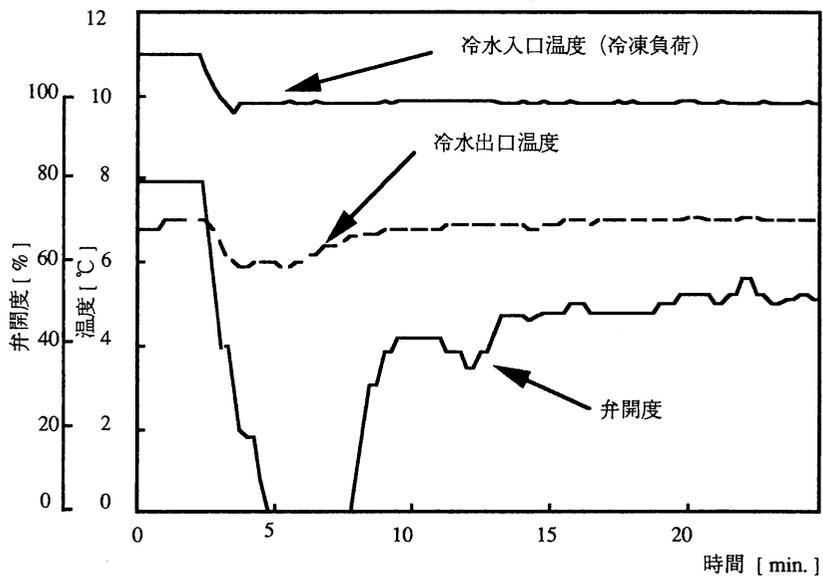
次に、すでに述べた偏差の符号に依存した非線形性がうまく補償されていることを確認するための冷凍負荷減少時の実験結果を示す。 e_{T_o} 、 d_{T_o} 、 $d_{T_{ci}}$ に関するメンバーシップ関数の形から容易に推定されるように、ファジィ制御では急速に制御弁を「閉」側に操作する結果となった。Fig.2-8(a)(b)に冷水入口温度を11℃（負荷80%）から9.5℃（負荷50%）にステップ状に減少させた結果を示す。この場合、ファジィ制御では、冷水出口温度の応答速度が約10分であり、PID制御の場合の約15分よりも速くなっている。これはメンバーシップ関数の非対称性、フィードフォワード入力に負うところであると考えられる。

結果として2次側（ユーザ側）冷房温度の変動を速く整定させることができ快適性向上が図れた。また、この操作は、冷水温度の過剰な低下を防ぐことができるため、吸収液の結晶化などの不良発生を防ぐ意味で設定されたリミッタを越えない操作が可能となった。

以上、熱源における非線形性が、提案の多入力ファジィ制御により補償されていることを示したが、このように、冷凍負荷の変動が大きいほど、提案の制御方法のほうが、省エネルギー性も含めて、吸収式冷温水機に適した制御が可能であることが示された。従来、空調機器の性能評価として定常運転状態での効率、すなわちCOP（成績係数、発生した冷凍能力／投入エネルギー）が用いられ、カタログ値としても示されてきたが、過渡状態については具体的な性能評価は行われてこなかった。しかしながら、本提案の方法によれば、過渡状態における性能改善（負荷増加時には、少ないエネルギー消費でCOP改善、負荷減少時には、PID制御と同等のエネルギー消費ですばやい応答性）が行えることがわかる。



(a) PID 制御



(b) ファジィ制御

Fig.2-8 冷凍負荷減少における応答
(冷却水温度変化を連動)

2.4.2 起動時における過渡応答特性

前節で提案のファジィ制御は、冷凍負荷変動が大きいほど有効となることがわかった。しかし、吸収式冷温水機のように定値制御が中心となる場合、通常、それほど大きな負荷変動は発生しない。ただ、起動時においては大きな負荷変動がある。従来は、すばやい立ち上がりをオーバーシュート（冷水出口温度の過剰な低下）なしに達成するために、機器個別にルール型のシーケンス制御を設け、目標温度7℃近傍にてPID制御に切り替えていた。ここでは、切り替えなしに提案の制御方法のみを用いた結果を示す。

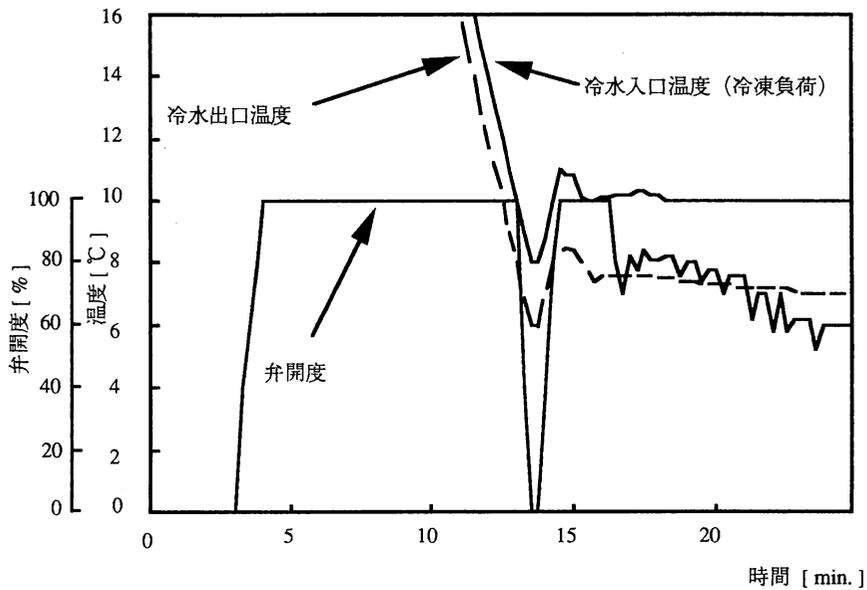
まず、冷凍負荷を60%に設定した場合の起動時の様子をFig.2-9 (a)(b) に示す。PID制御では、約13分まで制御弁が全開のまま維持されているのに対して、ファジィ制御では、冷水温度が4～5分において、すでに徐々に制御弁を閉じはじめていることがわかる。この弁操作からもファジィ制御のほうが、駆動熱源における吸熱特性を知識としてうまく取り込んだ省エネルギー性の高い制御を実現していることがわかる。

起動時を含めて、大きな負荷変動に対しては、提案のファジィ制御のほうが吸収式冷温水機の特徴を生かし、省エネルギー化と2次側温度変動の整定時間が短いという意味での最適化ができていられると考えられる。

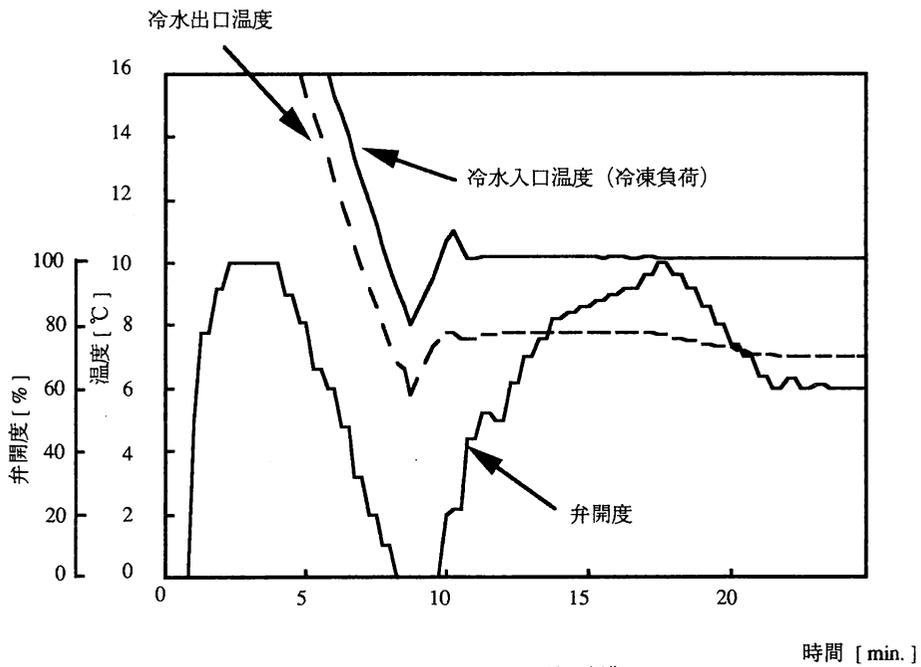
2.4.3 冷却水温度変化時における過渡応答特性

負荷が一定で定常運転を行っている場合でも、クーリングタワーへの日照の影響により冷却水温度のみが変化することがある。PID制御では、この影響が冷水出口温度に反映されるまでは何ら制御されない。また、冷却水入口温度をPIDゲイン調整に用いるようなゲインスケジューリングPID制御でもやはり同じことである。しかしながら提案のファジィ制御では、フィードフォワード制御としての動作が期待できる。

Fig.2-10 (a), (b) に冷却水入口温度を30℃から32℃に変化させた場合の結果を示す。



(a) PID 制御



(b) ファジィ制御

Fig.2-9 立ち上げ時における応答
(冷凍負荷60%に設定)

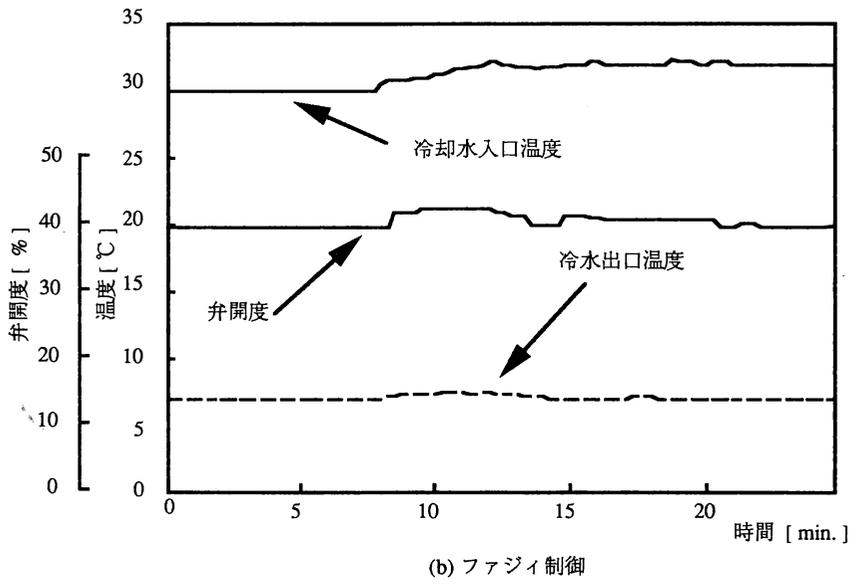
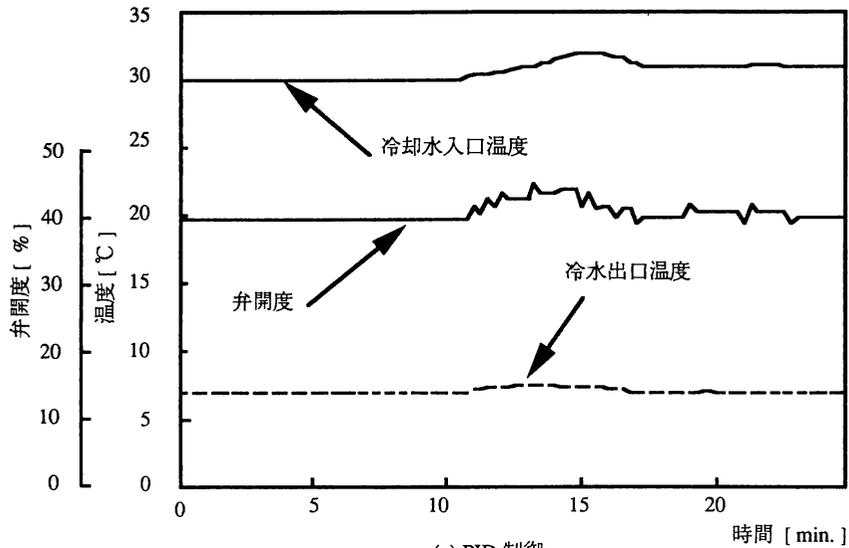


Fig.2-10 冷却水温度の増加に対する応答応答

冷却水入口温度上昇時、PID制御では、冷水出口温度の追従には若干の遅れをとともなうが、ファジィ制御では、入力として冷却水入口温度を取り入れているため、わずかではあるが、応答がはやい。冷凍負荷変動の場合には、省エネルギーを重要視した制御ルールを採用したのに対して、この場合の制御ルールは、応答性を重視しメンバーシップ関数の非対称性を逆に設定している。しかし、省エネルギーの重要度も高いため、ピーク値0.5とした。ピーク値の決定は、この場合、経験的知識により決定した。従来、PID制御における冷却水入口温度は、それが極端に低い場合にのみ吸収式冷温水機を非常停止させるためのリミッタとして働くものであった。

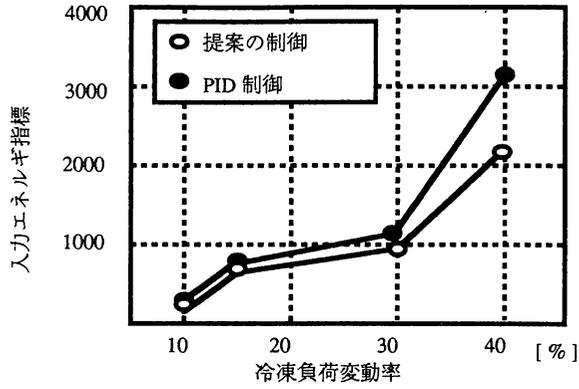
ファジィ制御では、容易に制御ルールを変更できるものの、このようなエネルギー消費量と応答性能の両方を定量的に考慮した評価基準すなわち制御戦略の決定方法については、さらに検討が必要である。

2.4.4 評価基準による性能比較

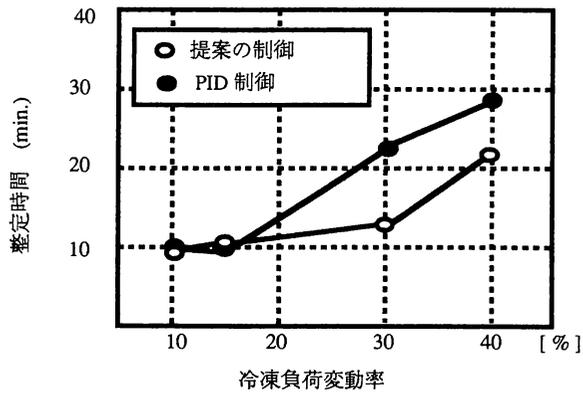
ふたつの制御方式について、いくつかの負荷変動の大きさに応じて2.4.1と同等の実験を行った。Fig.2-11(a)(b)(c)に、ステップ状負荷変動における評価基準、すなわちエネルギー消費、整定時間、偏差積分値における比較結果をまとめる。入力エネルギー指標は、弁開度操作量に見られる開度の積分値すなわちほぼインプットされるガス量を示す。整定時間は、特に負荷が減少する場合を示しており、増加する場合は、ほぼ同等であることはすでに述べた。負荷変動が急激であるほど、本提案の制御方式がPID制御よりも優位に働くことが明らかである。理由については、すでに述べた。

2.5 結言

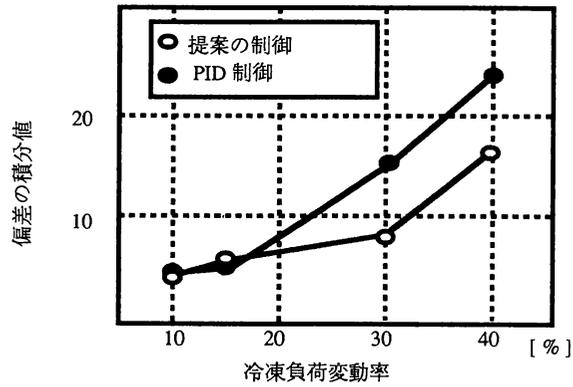
厳密な動的モデル化が困難な非線形性を有する吸収式冷温水機の制御系について、多入力ファジィ制御の適用を検討し、動的な変動がある過渡応答の場合をも含めた



(a) 入力エネルギー指標



(b) 整定時間



(c) 偏差の積分値

Fig.2-11 評価基準の比較

性能向上が可能となった。

従来、吸収冷温水機の性能評価指標として、COP（成績係数）がある。これは定格運転条件における定常状態での、入力エネルギーと得られる冷凍能力の比を示すものであって、立ち上げ時や負荷変動時といった過渡状態における性能は、含まれていなかった。空調機器の評価は、その最終目標でもある「省エネルギー性（エネルギー消費量）」と「快適性（負荷変動に対する冷水出口温度の応答性）」の観点から行われるべきものである。提案の方法では、特にこの点における改善が、定常運転条件では従来と同等の性能であることを前提として可能であることを示すことができた。特に以下の点で工夫を行った。

吸収式冷温水機では、制御弁開度を大きくする場合には緩慢に増加させ、小さくする場合には迅速に減少させることが必要であり、このような知識を制御系に取り込むために、すなわち、熱源の昇温、降温時の違いという非線形な特性をふまえて偏差の符号に対するフィードバックゲインを変化させるため、メンバーシップ関数を非対称に設定したファジィ制御を提案した。

実機実験により検討したところ、特に、負荷がステップ状に増加する場合には緩慢な弁操作により、省エネルギー化の可能性が得られた。また、負荷がステップ状に減少する場合には、敏感な応答性を示すため、冷水出口温度の過剰な低下を防止、2次側冷房の温度変動への影響も少なく快適性向上につながった。

さらに、吸収式冷温水機のような時定数の大きいシステムで応答性をあげるためには、フィードフォワード制御することが必要であり、ファジィ制御では入力変数を比較的容易に追加できることを利用して、予見的な制御として、冷水入口温度や冷却水入口温度などを入力変数として追加することにより応答性を改善できることを実験により確認した。

また、制御プログラムとして、従来は立ち上げ時には、PID制御とは別に機器個別にルールをチューニングした制御を設けていたが、提案のファジィ制御では、これ

をも包括的にひとつの制御方法のなかで取り扱うことができるようになった。

今後の課題としては、過渡状態も含めたCOPや応答速度など、制御における多様な評価基準をいかに仕様あるいは性能として設定するかという点があげられる。これは、自動車だとえていえば、従来の性能評価が60km定地走行での燃費を示していたのに対して、各種の過渡的性能を含めて、10モード燃費で評価するのと似ている。もっとも、自動車は都心部で過渡応答中心の走行状態に陥るのに比べれば、空調機器は、過渡状態の発生は少ない。しかし、環境問題のたかまりから、遠からず、本研究で行った過渡特性を含めた、きめ細かな評価が求められることになるだろう。

また、第3章へのつながりとして述べると、本章では、省エネルギー性、応答性などを含めた多様な制御目標に対する定量的な評価に応える方法として、メンバーシップ関数のピーク値を変更するという形で、経験的な知識による方法を取り込んだが、この点は、いわば設置先ユーザーの要望によっても左右される点であると言える。すなわち、多少のエネルギー消費の増加があっても、温度変動はなるべく抑制したいという要望、これは客室空調を行うホテル等での設置が考えられる。また、温度変動はあってもよいからトータルでの省エネルギー性を優先したいという要望、これは一般のオフィスビルで空調コストを自ら負担する場合等が考えられる。このように空調機器の生産時点においては一意に決定できない制御パラメータがあることが、家庭用空調機器との大きな違いであり、こういった面での環境への適応能力が必要である。

*** 付 録 ***

(1) ファジィ推論によるPIDゲインの調整方法

本研究で用いた方法を示す。ここでは簡単のため、PI制御を考える。

PI制御における比例、積分の各ゲイン K_p 、 K_i の調整におけるオペレータの知識をファジィルール化したファジィ推論を用いて、以下のアルゴリズムで調整した。

(1) ジーグラニニコルスの限界感度法により K_p 、 K_i を求め、その値で冷水出口温度を定常状態にする。

次に過渡応答に対して敏感なゲインにチューニングするため以下の方法を用いた。

(2) 冷水出口目標温度を7℃として、負荷を40%（冷水入口温度9℃）から80%（11℃）に変動幅40%でステップ状変化させた時の冷水出口温度の振るまいから、特徴抽出する。

(3) 出力の応答波形を Fig.2-A1 に示す評価基準（振幅減衰比 DP 、整定時間 TS 、弁開度操作変化量 IE ）

にもとづいてファジィルールにより評価し、 K_p 、 K_i を変更する。調整があらかじめ定めた限界以下になれば収束したとする。

DP は、2回目のオーバーシュートと1回目のオーバーシュートの比を示す。 TS は、整定時間で、目標値の0.1℃以内に5分以上あれば整定とする。 IE は、制御弁開度の変化で、変化ははじめから5分後以降の最大値と最小値の差を示す。これは、過剰な弁操作を防ぐためである。これらを用いて、 DP は0に、 TS は小さく、 IE も小さくするための、 K_p と K_i の変更方向と大きさを決定する。

調整による第 n 推論後のゲインは以下の式による。

$$K_p(n) = K_p(n-1) \times 2^{m_p}$$

$$K_i(n) = K_i(n-1) \times 2^{m_i}$$

$$\text{但し, } -1 \leq m_p \leq 1, -1 \leq m_i \leq 1$$

調整値 m_p と m_i に対するファジイルールの一例を Fig.2-A 2 に示す。パラメータ調整時のブロック図を Fig.2-A 3 に示す。

実験の結果、限界感度法により得られた初期値は、 $K_{op}=10$ 、 $K_{oi}=500$ 。経験的に得られている値は、 $K_{ep}=10$ 、 $K_{ei}=200$ 。調整過程での応答波形と評価基準の値、ゲインを Fig.2-A 4 (a)~(d) に示す。この方法で調整終了時の値は、 $K_{fp}=9.9$ 、 $K_{fi}=240$ であった。ここで用いた方法は、プラントに関する熟練者の知識、たとえば、概略とりうるゲインの範囲に関する知識をもとに、その範囲内での微調整を自動的に行いたい場合に適している。

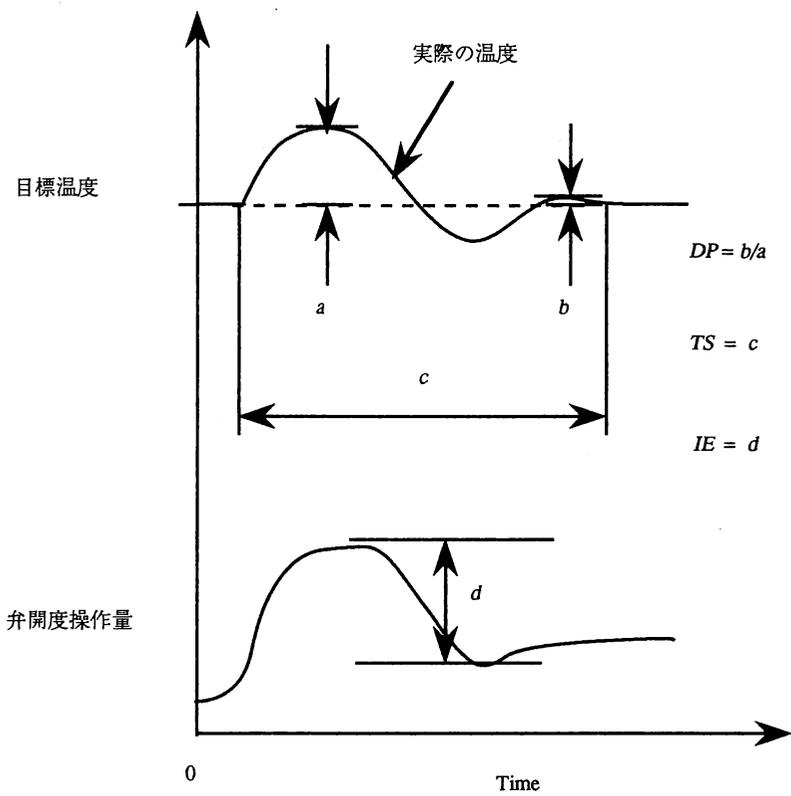


Fig.2-A1 評価基準

IE is PB

m p		DP		
		PB	PM	ZR
TS	PB	PB		NB
	PM	PB	ZR	
	ZR			PB

m i		DP		
		PB	PM	ZR
TS	PB	NB		
	PM	PB	PB	
	ZR			ZR

IE is PM

m p		DP		
		PB	PM	ZR
TS	PB	ZR		NB
	PM	PB	ZR	
	ZR	PB	ZR	ZR

m i		DP		
		PB	PM	ZR
TS	PB	NB		NB
	PM	NB	ZR	
	ZR	NB		ZR

IE is ZR

m p		DP		
		PB	PM	ZR
TS	PB	NB		
	PM	ZR	NB	
	ZR			ZR

m i		DP		
		PB	PM	ZR
TS	PB	NB		
	PM	NB	ZR	
	ZR			ZR

Fig.2-A2 PIDゲインチューニングのためのファジイルール

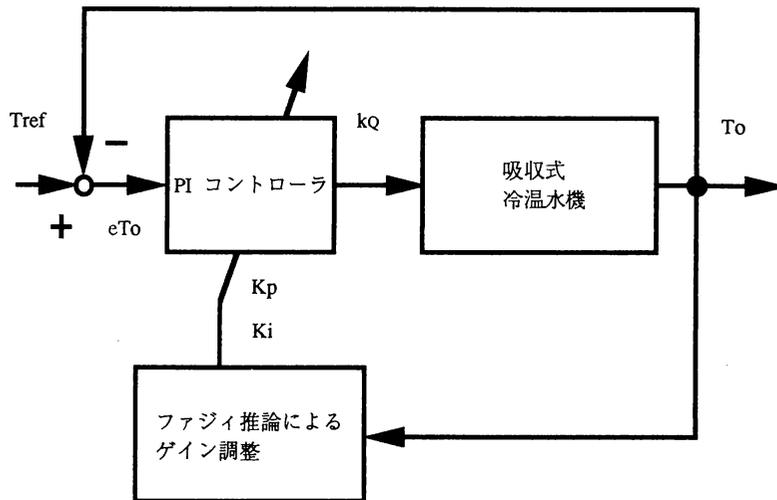
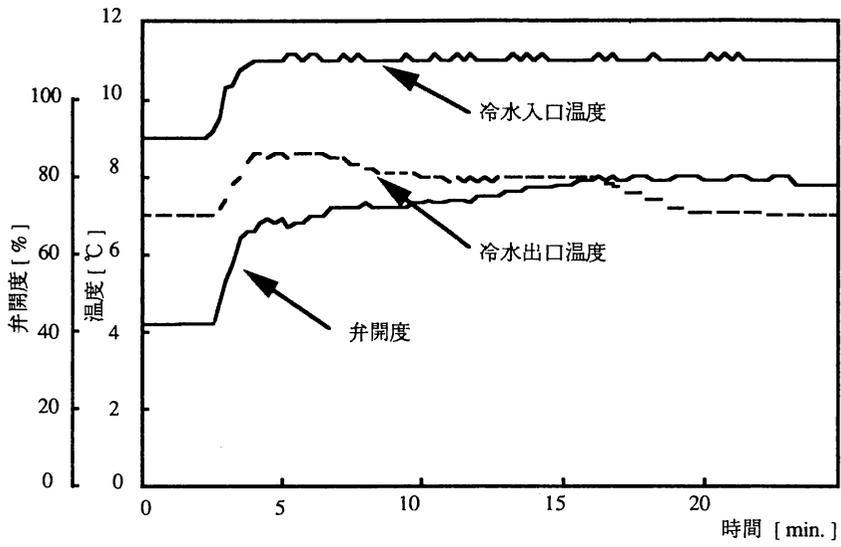
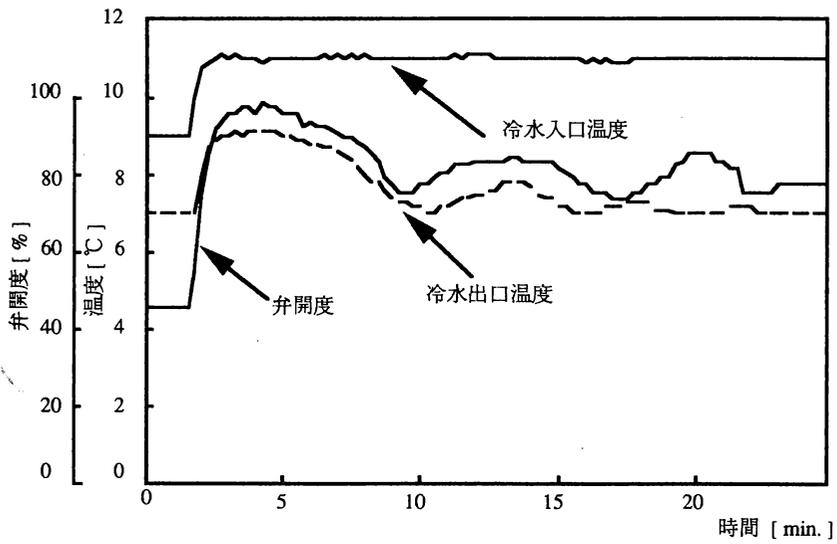


Fig.2-A3. ファジィ推論を用いた

PI 制御パラメータのオートチューニング

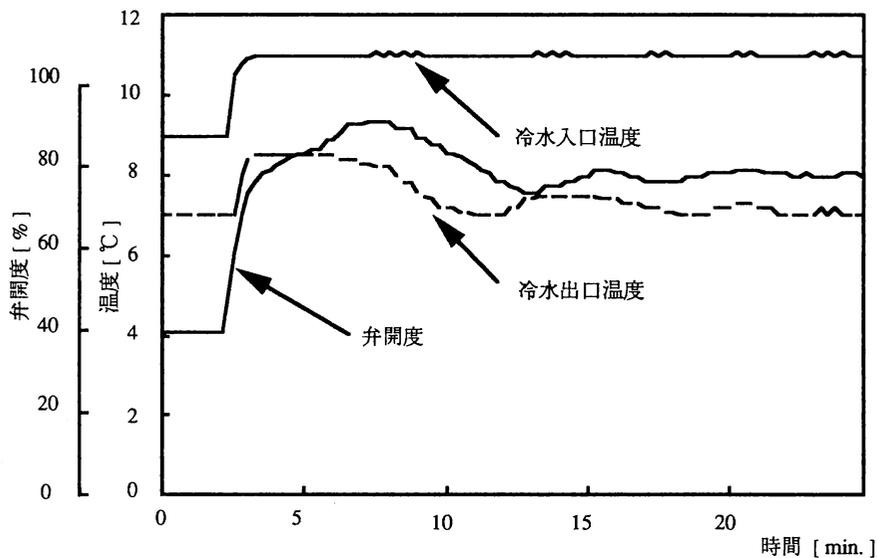


(a) 初期状態での応答
 $P=10, I=500(IE=4.0, DP=0.5, TS=40)$

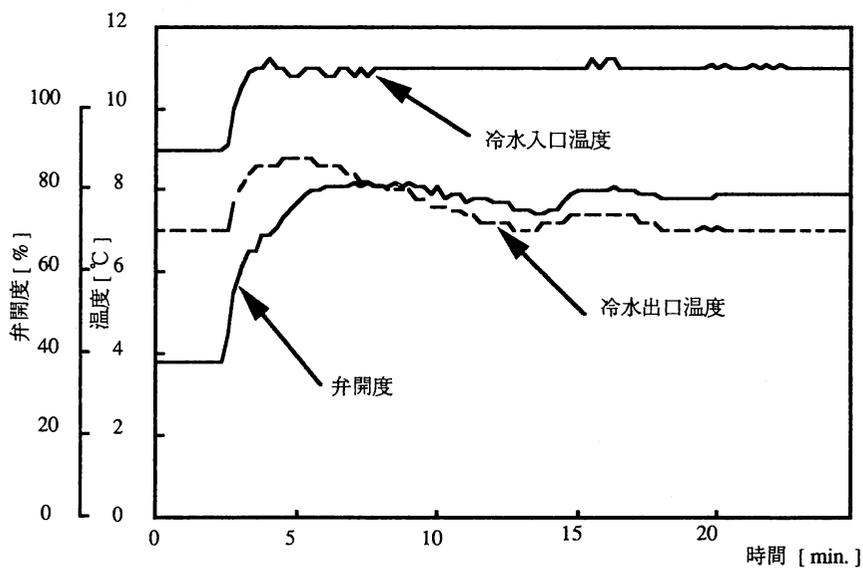


(b) 1回目のチューニングによる応答
 $P=7.9, I=330(IE=10.6, DP=0.35, TS=25)$

Fig.2-A4 PID パラメータのチューニング過程



(c) 2回目のチューニングによる応答
 $P=9.3, I=290(IE=6.2, DP=0.25, TS=20)$



(d) Final Tuning Result
 $P=9.9, I=240(IE=3.8, DP=0.18, TS=20)$

Fig.2-A4 PIDパラメータのチューニング過程

(2) ファジィ制御 [2-10] [2-11] [2-12]

本論文では、ファジィ制御のスタイルとしてmin-maxシングルトン法を用いた。より一般的な観点からファジィ制御について述べる。

Zadeh により提唱されたファジィ論理の制御への応用は、1974年のロンドン大学Mamdani によるスチームエンジンへの適用が知られている。日本では、1970年代にはいつてから研究が活発化し、1980年ころから産業界での応用が開始された。浄水場への薬品注入制御、列車自動運転システムが最初の事例である。その後、空調、鉄鋼、化学、食品、土木など、ファジィ制御は従来の制御で満足できない分野における自動化の手段として定着してきている。

ファジィ制御は、プロセスの制御方策を表す操作知識／経験（制御規則）が用意され、その重みづけによって総合的な判断を行い、操作出力値が決定される。この手順にしたがって「言葉」で表現されたあいまいさを含む情報を活用し、多くの情報を集めて一つの操作量を決定する多入力少出力制御系を実現している。これは、熟練したオペレータが過去の経験／知識から現場で行う折衷的な操作に似ているという特徴がある。

ファジィ制御には、種々の方式が提案されているが、おおむね以下の三つの方式が使用されているようである。すなわち、

- ・状態評価ファジィ制御
- ・予見ファジィ制御
- ・ファジィ適応制御

以下、順に内容を述べる。

状態評価ファジィ制御は、制御対象の数学モデルを作成するのではなく、そこで働く熟練者の側にたって、過去の経験に基づく状況の総合判断としてアルゴリズム化

する方式である。制御対象の状況判断と操作内容を If - then 形式の制御規則で表す。各制御規則の命題は、制御対象の状態や操作量を表すファジィ変数（その内容を定量的に表現したものがメンバーシップ関数である）で表現する。制御対象の状態評価値によって各制御規則の前件部の適合度を求め、その値を重みとして操作量を決定する。

すなわち、制御規則の集合である前件部のなかから一番適合する命題をひとつだけ選択するのではなく、各制御規則の前件部の命題の適合度を重みとした総合的な判断として操作量を求めるものである。そのため、日常、熟練者が行っている操作方法をそのまま言葉で表現でき、それを制御系設計に使用できる。

状態評価制御方式は、従来の制御方式では自動化がむづかしい、プロセスの数学モデル化がむづかしいことなどにより、オペレータの介入が必要な多くのプロセスに適用されている。

次に、予見ファジィ制御方式について述べる。

この方式では熟練者の運転を

- 1) 多数の制御目的をファジィ理論を用いて表現するファジィ関数
- 2) 状況をみながら、If - then で表現する制御知識
- 3) 制御対象に加わる制御指令を仮定し、制御結果を（モデルを通して）予見、
予測するシミュレーション機能

の三つの用いてアルゴリズム化する制御方式である。

対象システムの計測値を用いて制御指令の全候補値についてシミュレーションを行い、制御目的の評価値を予測する。その予測をもとにファジィ関数による多目的評価を行い、その評価値と制御知識をファジィ推論で処理し、最適な制御指令を決定する。その時点での実行可能な制御指令の実行結果を予見、予測して評価する。そして最も望ましい状況に制御できる制御指令を選択する制御方式である。

予見ファジィ制御方式は、対象システムの動特性が比較的明確であるが、その制

御目的が目標パターン（目標値にいたるまでの過程における特性）への追従性だけでは満足できない対象に有効である。交通システムで、乗客の乗り心地と速度などのバランスをとる場合のように、状況によって制御目標が変わるシステムの自動化に適している。

最後に、ファジィ適応制御についてのべる。

この方式は、制御対象のプロセス特性の変動に適応させて、制御アルゴリズムを変化させる制御手法である。プロセスの特性を代表する複数の状態を考え、各状態ごとに同一の構造を有する制御規則またはメンバーシップ関数を用意する。そして、各プロセスの状態を表すことのできる適応パラメータを導入し、現在の状況が各状態にどれだけ近いかをその適応パラメータの値で表す。続いて各状態の制御規則またはメンバーシップ関数を適応させる。その適応させた制御規則またはメンバーシップ関数によりファジィ推論を行う「階層的」な制御方式である。

適した応用分野としては、制御対象の特性がわかっており、その特性が操業状態により大きく変動するようなプロセスに効果がある。たとえば、プラントのゲインや時定数あるいは遅れ時間が操業状態によって大きく変動するプロセスや、状況により判断内容が変化するプロセスに有効である。

(3) シングルトン

たとえば、全体空間を 10 進数 1 桁の数字

$$X = \{0, 1, 2, 3, \dots, 9\}$$

とすると、偶数の集合 A は

$$A = \{0, 2, 4, 6, 8\}$$

このとき、構成要素の個数を濃度あるいはカージナル数といい、#で表す。

$$\#X = 10, \#A = 5$$

#A = 1 のとき、A をシングルトン (Singleton) とよぶ。



第 3 章 ルールを用いた機能階層を有する 階層制御系を用いた柔軟な制御



本章では，制御目標の決定機能階層とその制御動作実行機能の階層の 2 階層を有する階層構造制御系を検討する．中大型の業務用空調機器では，家庭用空調機と異なって，生産時点では一意に決定できない制御パラメータがある．たとえば，パッケージエアコンのように，特性が設置環境に依存，たとえば室内機と室外機が自由に組み合わせられ，それが数百種類にもなる，また，その接続配管長さがビル空調では一般家庭より大きなバラツキがある，といったこと，あるいは，前章で示した吸収式冷温水機における省エネルギー性と応答性のバランスがユーザの嗜好によるということ，などである．本章ではこのような状況に柔軟に適応するルール駆動型の階層構造制御系について検討する．階層構造制御系によれば，後段部は主として工場出荷時の調整，前段部は，ユーザ設置時の調整を担当すると考えられる．

3.1 緒言

中大型空調機器は、家庭用の小型空調機器に比べて制御可能なアクチュエータが多いため、より一層の省エネルギー化やメンテナンスフリー化にむけて制御面からの改善が可能と期待されている。現状の空調機器の制御系は、主として動特性の正確なモデル化がむつかしいことからPID制御系を採用することが多い^[3-1]。制御系に対しては、定常運転時の安定性のみならず、一層高度な要求として、設置時調整やメンテナンスの軽減、機器保護のための緊急停止の回避、2次側に依存した部分負荷変動時や起動時の追従性などに対する速応性と安定性、省エネルギー性などを考慮することが求められているが、これらの非線形性をも含めたモデル化は、なお一層困難であることは言うまでもない。

パッケージエアコンでは、たとえば室内機と室外機が自由に組み合わせられ、それが数百種類にもなる、また、その接続配管長さがビル空調では一般家庭より大きなバラツキがあること等のために、吸収式冷温水機や大型プラントで用いられている個別に制御器を調整するといった方法では、膨大な労力が必要となる。また、だからといって汎用的、平均的に破綻のない制御器設計（たとえば、ゆるやかな応答を目標としてチューニングしたPID制御系）では、上記の高度な要求に応えることは難しく、新たな方法、すなわち、何らかの適応性を有する柔軟な制御系設計が必要と考えられる。

もっとも、あらゆる設置条件における調整パラメータをあらかじめ実験により求めてデータベース化しておくことも考えられるが、その機種数からして非現実的方法と考えられている。また、吸収式冷温水機では、その設置台数がパッケージエアコンや家庭用エアコンに比べてはるかに少ないため、大型プラントと同様に設置時における微調整が可能である。前章で述べたピーク値調整によって、これを行なう

ことができることが予想される。

さて、従来、個別に制御器を再調整することを避ける方法として、Fig.3-1 に示すような目標値フィルタ型2自由度制御系が提案されている。この制御系では、フィードバック特性と目標値追従特性とを独立に伝達関数を設定することで調整できる^[3-1]。2自由度制御系は、PID制御系の性能改善のために各種の目的に応じた形態が考案されている。それらはいずれも制御器のパラメータ数値を2種類設定できるという範囲のものである。

本研究では、目標値フィルタ型2自由度制御系のコンセプトを活かしてその各制御器において非線形性を知識として取り込んだファジィ推論の導入を試みた。すなわち、制御器を二つに分割し、前段部にあたる目標値フィルタ部では、設置条件やニーズによって異なる制御目標の決定部をスーパーバイザとして設け、さらに後段部では、その目標に向けての制御実行部を設ける階層構造制御系にファジィ推論を加えることにより、上記課題の解決を試みる。

具体的な適用例として、パッケージエアコンの冷媒温度制御を取り上げ、階層構造制御系の検討を行う。パッケージエアコンでは、室内外機の組合せや配管長などにより機種数が膨大となり、ある条件にとって最適な制御系が必ずしも別の条件では最適とならないことが知られている。これらを制御系に含めると非常に複雑な非線形特性となる。ここでは、目標値フィルタ型2自由度制御系の考え方を活かして、新たに制御目標決定部を設け、すでにチューニングされている従来の制御系に重畳する形での制御系を提案する。前段の制御目標決定部では、四方弁出口での冷媒温度の動特性変化に関する知識に基づくファジィ推論を用いて、コンプレッサ緊急停止に至らないように、常時、安定に動作させるように最適な目標冷媒温度を適応的に自動設定する方法を示す。後段の実行部は、一般的なPI制御系である。

以上の検討を実機実験により確認することにより、目標変更に対して、最小限度の再調整（前段の制御目標決定部において後段部で使用されるメンバーシップ関数

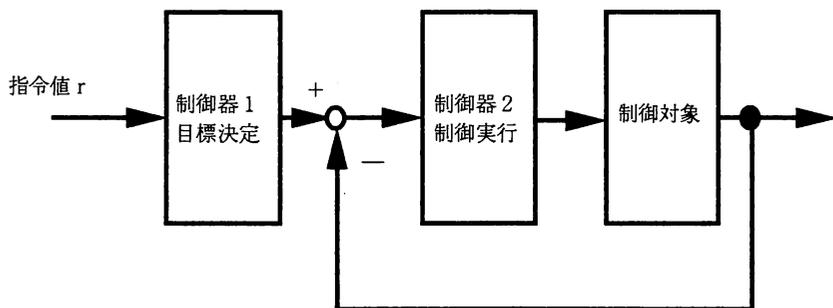


Fig.3-1 目標値フィルタ型 2 自由度制御系

のピーク値に相当するパラメータを目標に応じて調整すること)で対応できる制御系設計の可能性を示す。

次に、別の適用例として吸収冷凍機について、負荷変動に対する冷水出口温度の応答を熱源へのガスインプットで制御する場合、所望の応答をより少ないガスインプットで得るという意味での省エネルギー性を目標とする場合と、負荷変動に対する室内温度の整定が速いという意味での応答性を目標とする場合とでは、第2章で述べたように相反する目標となる。このような目標変更に対応できるように、前段の制御目標決定部で、熟練者の知識により各入力の結果への影響度をメンバーシップ関数のピーク値として反映させ、後段の実行部で、駆動熱源の昇温/降温時の差に関する非線形特性を知識によりメンバーシップ関数の非対称形状として取り込むことを主とする多入力ファジィ制御系を提案する。

3.2 パッケージエアコンの原理

産業用空調機器としては、前章で示した吸収式冷温水機以外に、パッケージエアコン、ガスエンジンヒートポンプ(GHP)、ターボ冷凍機などがある。これらは、吸収式冷温水機とは異なる原理により冷房作用を行う。パッケージエアコンなどにおいて冷房作用を発揮する作動原理は、家庭用エアコンと同じく冷媒としてのフロンの圧縮と膨張によるものである。ただ、パッケージエアコンでは、圧縮に電動コンプレッサを使用するのに対して、GHPでは天然ガスを燃料とするガスエンジンを使用している。また、ターボ冷凍機では遠心圧縮によるという原理面において、それらと異なっている。したがって、本章で述べるパッケージエアコンへの適用例は、基本的にGHPにおいても適用可能であると考えてよい。

Fig.3-2 にパッケージエアコンの動作を示す模式図を示す。この図にもとづいて以下にて説明を行う。まず、図中の点1ではガス状冷媒フロンのコンプレッサに吸入

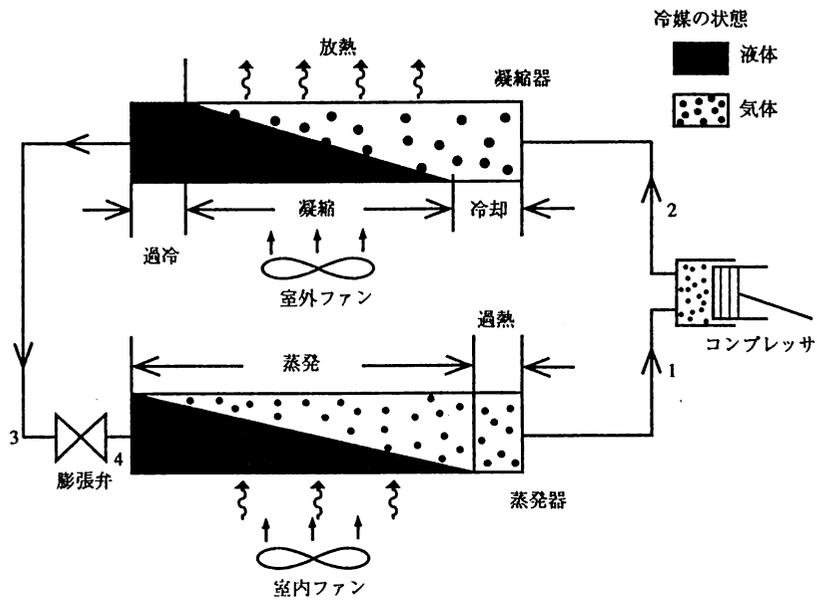


Fig.3-2 冷凍サイクルの模式図

される。コンプレッサの圧縮作用によってフロンは高温高圧ガスとなって、点2にいたる。このガスは配管を経て凝縮器（家庭用エアコンで冷房の場合の室外機にあたる）に入る。凝縮器は熱交換器であり、配管内を高温高圧ガスが流れる間にファンによって外気を送り放熱させる。その結果、ガスは温度が低下し液化する。液化冷媒は、配管を通じて点3電子膨張弁の入口に至る。電子膨張弁が制御用アクチュエータとして利用できることが、パッケージエアコンと家庭用エアコンとの大きな違いである。家庭用エアコンでは、この部分が固定絞りとなっている。

電子膨張弁は、配管の開口面積をデジタル的に可変とできるアクチュエータであって、パルスモータによる弁操作を行うものである。さて、電子膨張弁から出た液化冷媒フロンは、蒸発器（家庭用エアコンで冷房の場合には室内機にあたる）に入り、そこで配管中を流れる間に熱交換を行う。蒸発器は熱交換器であり、ファンによって送られた室内空気を冷却する。その逆に液化冷媒は吸熱して昇温、ガス化する。そして再び点1に戻る。

ここで、もっとも効率よく冷房を行うには、蒸発器において流入した液化冷媒フロンが、出口において100%ガス化していることが必要である。ここで出口において液化冷媒フロンが残っている場合には、コンプレッサからの送出冷媒量が多すぎることが考えられる。また、出口よりもはるか以前にガス化していれば、それで室内の冷房が充分なら蒸発器の仕様が過剰であり、冷房が不十分なら冷媒量が不足していることが考えられる。

一般には、出口より少し手前で完全にガス化するように冷媒流量を電子膨張弁の開口面積で制御してやる過熱度制御（ガス化した冷媒をさらに熱交換し続けるため過熱蒸気となることを意味する）が望ましく、最も直接的な制御方法である。しかしながら、蒸発器出口近傍では、ガスと液の入り交じったいわゆる二相状態になっていることが多く、そこでの温度検出が難しいため、他の安定的に温度検出が可能な位置、たとえば四方弁出口温度やコンプレッサ吐出温度が用いられる。その場合に

は、それらの温度が、過熱度とどういう関係にあるかを同定しておく必要がある。
このような冷媒の流量を制御することで所望の冷凍能力や効率を得ようとする方法を「冷媒制御」と呼んでいる。以上、模式的に冷房作用の原理と冷媒制御について説明した。

次に、ヒートポンプ作用をモリエ線図（圧力～エンタルピー線図， $p - h$ 線図）を用いて説明する。Fig.3-3にモリエ線図を示す。図における点1～点4は、上述の1～4に対応している。さて、蒸発圧力 P_0 ，蒸発器出口冷媒蒸気温度 t_1 の時，コンプレッサ吸い込み蒸気の状態は1で示され，コンプレッサで凝縮圧力 P_k まで圧縮される。圧縮の過程では断熱圧縮されるとして，等エントロピー線に沿って圧力が上昇し，コンプレッサ出口での冷媒の状態は2となる。その温度は t_2 である。コンプレッサを出た冷媒は，圧力 P_k の状態では凝縮器に入り，冷却されて P_k に対する飽和温度 t_k の飽和液となり，さらに温度 t_3 まで過冷却される時は，冷媒は過冷却度 $t_k - t_3$ の状態3で示される過冷却液となる。この冷媒液は，周囲との熱交換なく，また，流れに対する抵抗や圧力降下もなければ，3の状態のまま電子膨張弁にいたる。冷媒が電子膨張弁を通過する時は，熱の出入りがなく，仕事をするともない，圧力が P_k から P_0 へ降下するだけの絞り膨張であり，等エンタルピー変化を示す。したがって等エンタルピーで4にいたる。4では，乾き度が X_4 であり，図で示すA（圧力 P_0 の飽和液）とB（飽和蒸気）との混合した状態である。そして温度 t_0 まで降下する。4の状態では蒸発器にいった冷媒は，液の部分は周囲からの熱で蒸発し，Bでは液がなくなり，Bから1では t_0 から t_1 まで過熱され，過熱度 $t_1 - t_0$ の1の状態ではコンプレッサに吸入される。

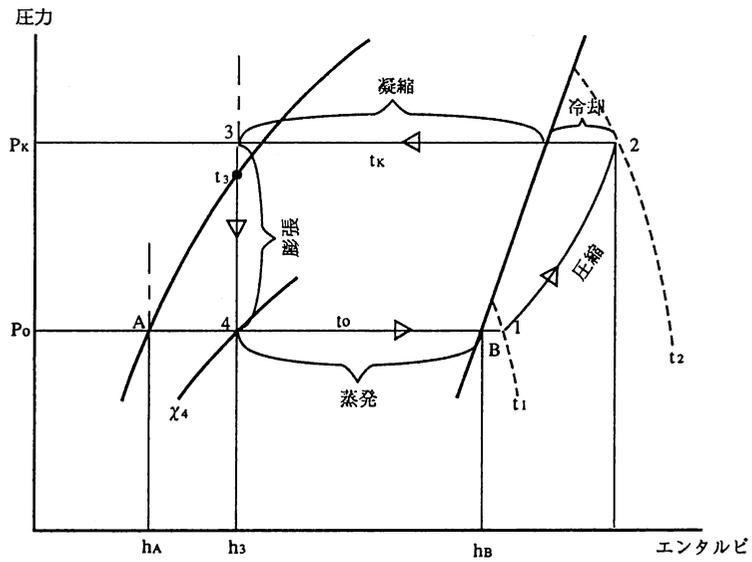


Fig.3-3 モリエ線図

3.3 設置環境への適応を目的とするパッケージエアコンの階層構造制御

3.3.1 前段の機能階層におけるルールへのファジィ推論の適用

パッケージエアコンにおける冷媒制御では、蒸発器の過熱度を適量とることが一般的な目標であり^[3-2]，そのような状態に到達，維持するために電子膨張弁の開度を適切に制御する必要がある。しかし蒸発器出口近傍の冷媒は二相状態となることが多く，安定な温度検出が難しいため，ここでは安定性を優先して蒸発器温度ではなく四方弁出口温度 T を，蒸発器冷媒飽和温度 T_{in} と凝縮器冷媒飽和温度 T_{out} から決定される目標温度 T_{ds} に追従させることを検討する。

$$T_{ds} = f(T_{in}, T_{out}) \quad (3-1)$$

Fig.3-4 にパッケージエアコンの主要構成を示す。制御系への入力変数は，四方弁出口温度 T とその変化量 dT （制御周期30秒における冷媒温度の変化）である。適度な過熱度を得るために必要十分な冷媒流量を供給するように電子膨張弁開度を制御し，四方弁出口温度を(3-1)式に従って求めた目標温度 T_{ds} に一致するよう制御する。しかしながら，コンプレッサには動作を保証するために設定された上限温度があり，これを越えると停止してしまう。したがってオーバーシュートすることなく迅速に，目標温度 T_{ds} に収束させる必要がある。ところが，四方弁出口温度 T の動特性は，設置条件や環境変動の影響を受けて異なるため，ゲイン一定のフィードバック制御でオーバーシュートを避けるためには，計算上の T_{ds} よりかなり小さい温度（安全側の値）に収束するよう設定しておく必要があった。そのため，適度な過熱度が取れてない場合もあり，機種の子合せ，配管長，設置条件や環境条件により，必ずしも限界性能を発揮できていないという課題があった。

そこで，その機種にとってオーバーシュートを起こしてコンプレッサ停止に至ることのないように，常時，適応的に目標冷媒温度を自動変更する前段部を有する階

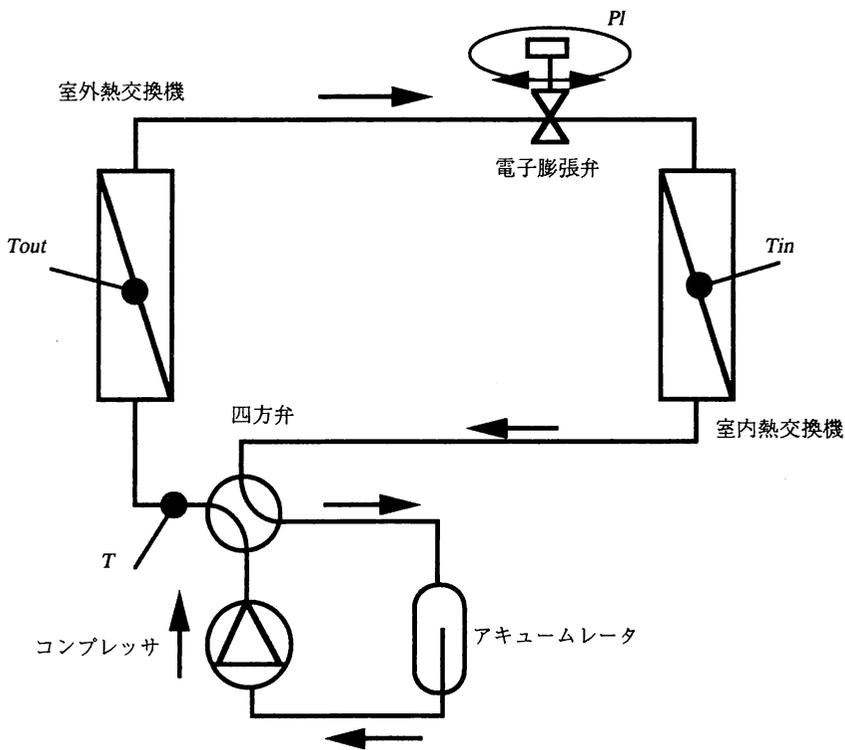


Fig.3-4 冷媒の流れ（冷房時）と測定点

層構造制御系を提案する。Fig.3-5 に制御系の基本構成を示す。

まず、階層構造制御系の前段の制御目標決定部において、ファジィ推論を用いることにより、目標温度への接近にともなう冷媒温度の動特性として四方弁出口温度 T 、およびその変化率 dT にあわせつつ、コンプレッサ停止温度 T_c をオーバーシュートすることなく、計算された目標温度 T_{ds} をより適切な値へと適応的に変更するよう制御を試みた。

メンバーシップ関数をFig.3-6 に示す。また、コンプレッサ停止に至る温度 T_c から、目標温度 T_{ds} の上限値は、100℃程度とし、また、オーバーシュートを避けるため四方弁出口温度の変化率 dT の正值に対して目標温度を大きく下げ、0 近傍では、わずかずつ上げることを方針としてルールを構築した。以下に一例を説明とともに示す。なお、ラベルはS(Small), Z(Zero), M(Medium)などFig.3-6に対応している。また、 T_a は、実際に制御で用いられる目標温度を示す。

If T is S and dT is Z , then T_a is $+1^\circ\text{C}$

(四方弁出口温度が85℃より小さくて、かつその変化が0℃なら、
目標温度を $+1^\circ\text{C}$ 上昇させる。)

If T is M and dT is Z , then T_a is $+0.5^\circ\text{C}$

(温度が90℃程度で、かつ変化率が0℃なら、
目標温度を $+0.5^\circ\text{C}$ 上昇させる。)

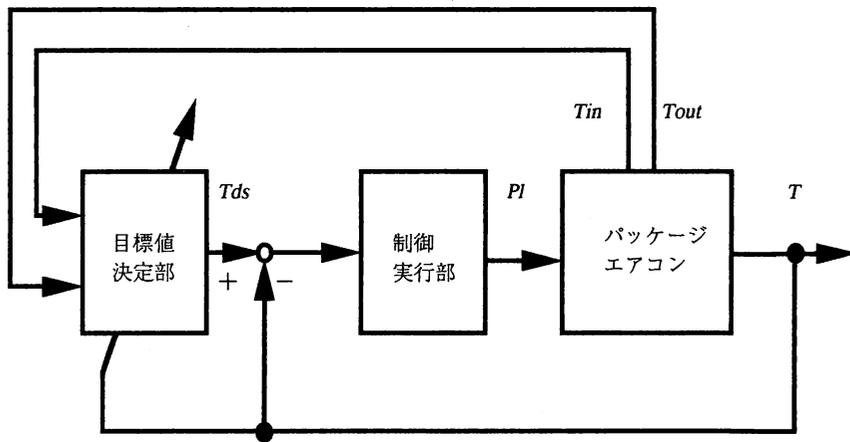
If T is M and dT is L , then T_a is -1.0°C

If T is L and dT is M , then T_a is -1.0°C

If T is L and dT is L , then T_a is -2.0°C

If T is VL and dT is S , then T_a is -1.0°C

If T is VL and dT is M , then T_a is -2.0°C



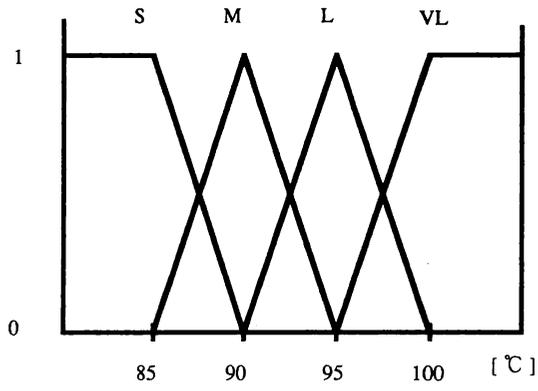
室内熱交換機冷媒飽和温度 T_{in}

目標温度 T_{ds}

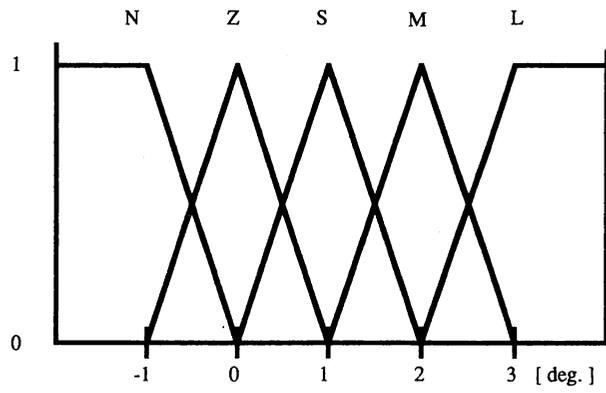
室外熱交換機冷媒飽和温度 T_{out}

電子膨張弁操作量 PI

Fig.3-5 パッケージエアコンの階層構造制御系



四方弁出口吐出温度: T



四方弁出口吐出温度変化率: dT

Fig.3-6 メンバーシップ関数

If T is VL and dT is L , then T_d is -2.0°C

上記以外のラベルの組み合わせに対しては、操作量 0.

環境変動や機種の違いによる冷媒温度の動特性変化が、時間軸に対する温度変化の勾配の違いとなって表れる場合を想定してルール化した。Fig.3-7に概念的にこの方法を示す。四方弁出口温度 T とその変化 dT からファジィ推論により、こののち、 T がコンプレッサ緊急停止に至る温度をオーバーシュートしない範囲で、目標温度 T_{ds} に収束するように T_{ds} を変更する。この操作が、Fig.3-5における目標値決定部に相当し、後段の制御系を調整する必要がない。

また、目標温度計算式 (3-1) は、簡単のため1次式

$$T_{ds} = A \cdot T_{in} - B \cdot T_{out} + C \quad (3-2)$$

とし、係数はあらかじめ定常状態で過熱度が一定量取れるように弁開度を設定した場合の T_{in} 、 T_{out} 、 T_{ds} の関係を実験により求めた値とした。本来、種々の条件下でA、B、Cが設定できればよいが、これは今後の課題である。また、後段の制御実行部は、PI制御とした。

3.3.2 性能確認 (実験結果)

実験条件としては、室内側入口空気温度を 27°C 、室外側空気温度を 35°C として、風量は最大($30\text{m}^3/\text{min.}$ 、 50Hz)に設定、冷房運転を行なった。機種は、コンプレッサが5馬力でON/OFF制御方式、配管長7mで、電子膨脹弁は500パルスで全開、初期値215パルスとした。また、制御周期は30秒、目標温度の更新は2分毎に可能とした。

Fig.3-8に実験結果の一例を示す。これは、立上げ時の様子であり、弁開度の初期値としては、十分に開いた状態としている。図中A部では、四方弁出口での冷媒温度 T がしだいに目標温度 T_{ds} に収束していくが、 dT が0または負値のため前記のアルゴリズムに従って、目標温度自体も修正されている。これは、 dT の変化の大きさ

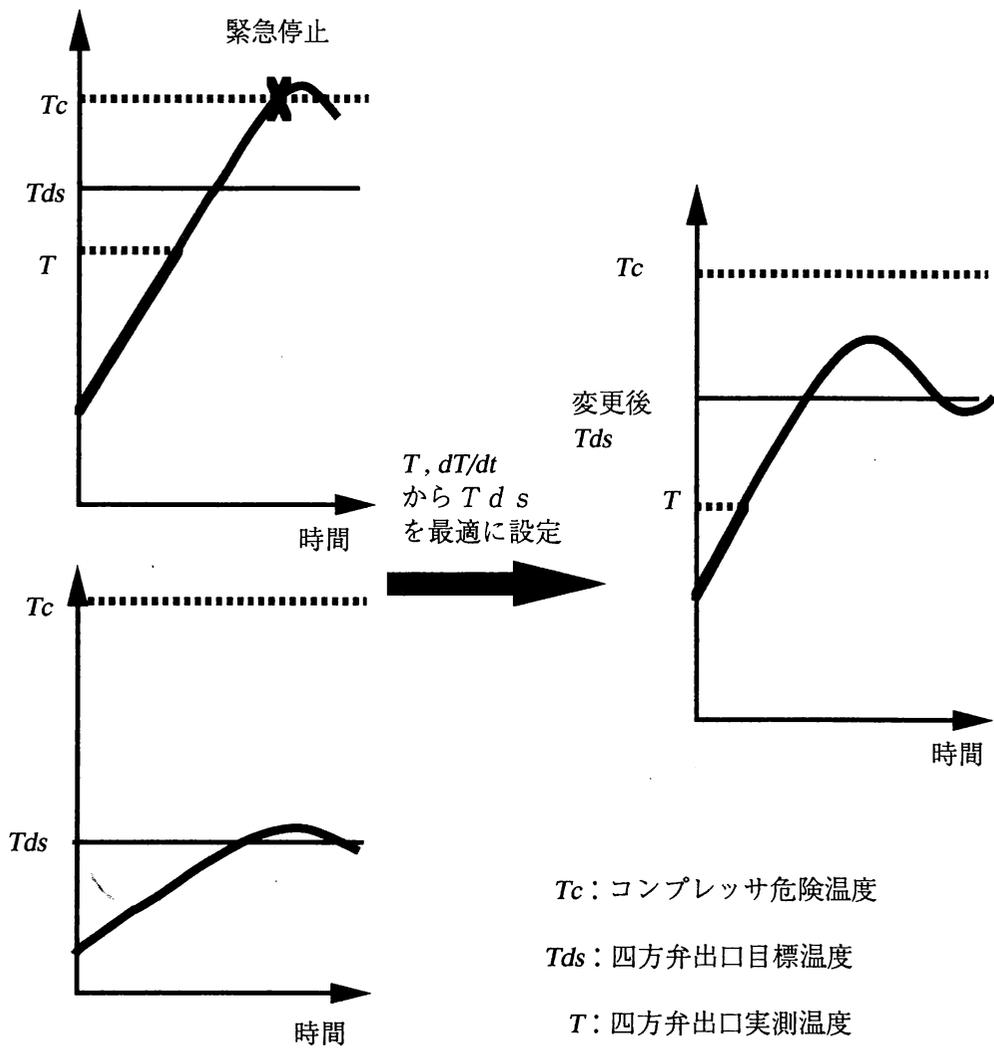


Fig.3-7 パッケージエアコンに対する階層構造制御系の動作概念模式図

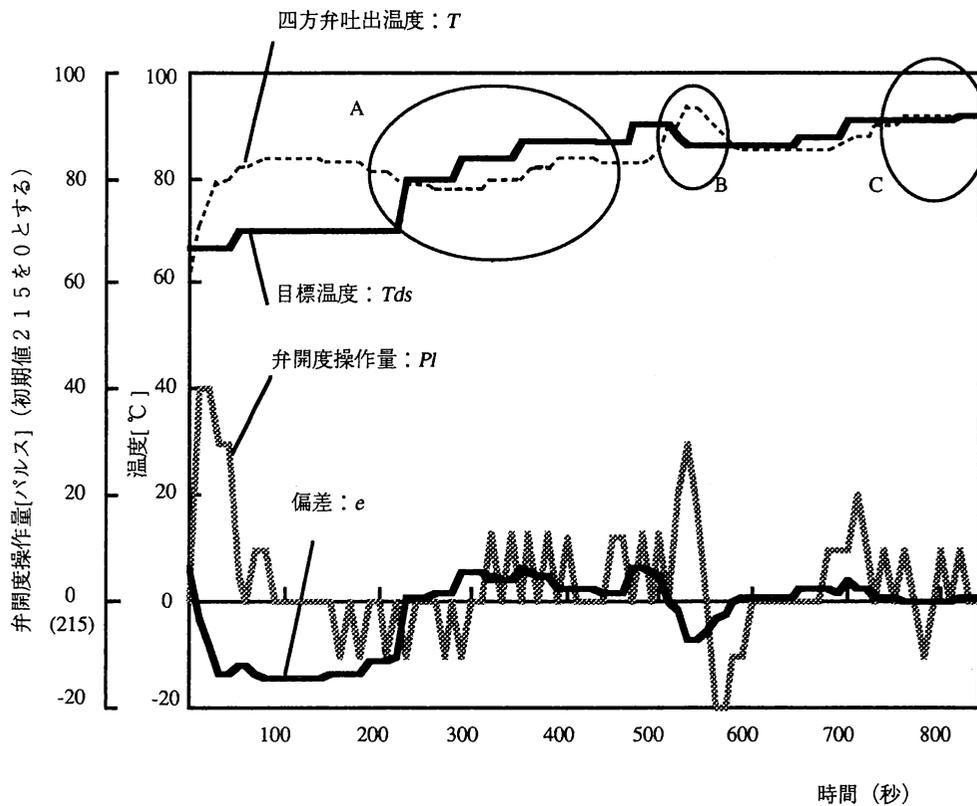


Fig.3-8 パッケージエアコンの階層構造冷媒温度制御

により、オーバーシュートせずに収束できる目標温度へと適応的に制御されていることを示している。さらに、B部では本手法における T_{ds} 変更の様子を説明するために偏差に対する弁開度操作量をやや大きく設定したため若干オーバーシュートしているが、 dT が正值となりファジィルールに従って下げる方向へと目標温度が補正されている様子を示している。最後は、C部のように収束する。

ここで示した例では、制御目標が一つのパラメータ（四方弁出口での冷媒目標温度）ではあったが、設置条件や環境条件が変化しても、それが T や dT に影響を与えるものである限りは、時々刻々、コンプレッサ緊急停止に至らず安定的に運転できるという意味で最適となるよう目標温度 T_{ds} を適応的に変更する系を示した。

中大型空調機器における設置時やその後の環境変化によって制御系パラメータの再調整が必要とされるような場合には、ここで述べた制御目標の決定部を独立させた2自由度制御系であれば、最小限度の再調整、ここでは冷媒温度変化の動特性を検出しファジィ推論によって目標温度を変更するという調整で済む、これを重畳する後段の制御系としては、従来から経験的に調整されているPID制御でもよいことは言うまでもない。勿論、制御実行部におけるPID制御のゲインは上記の例で述べた如くオーバーシュートしないよう、かつ収束までの時間はなるべく速くなるように調整する必要があり、この点の自動化が次の課題である。また、多入力系では、以下で示すように、後段の制御系にもファジィ制御を用いた方が、前段とあわせて統一的な考え方で制御系を構成できると考えられる。

3.4 ユーザニーズへの適応を目的とする吸収式冷温水機の階層構造制御

二重効用型吸収式冷温水機の基本構成は、既に、Fig.2-1 に示した通りである。

第2章で既に述べたように、吸収式冷温水機における基本的な制御目標は、ガスあるいは蒸気の弁開度操作量を制御することにより、2次側（設備側）から供給される

冷水を、常に目標温度（通常7℃程度）と一致させることである。変動要因としては、起動時を含めた負荷変動や冷却水温度変化などがある。一般には、目標温度と冷水出口温度との偏差に対して、PID制御により制御弁開度操作量を出力する方法が用いられる。しかしながら、PID制御系では、制御目標としては出力の応答特性等が与えられるが、たとえば「燃料消費をできるだけ抑え」かつ「速応性も持つ」等、多様で変更も多い制御目標の場合に柔軟に対応するには、ここで述べる2自由度制御系の考え方を取り入れたファジィ制御系の方が、変更も容易で拡張性も高いと考えられる。2自由度制御系の考え方とは、制御目標の決定と制御の実行を独立に設定できるということであり、ここでは、省エネルギー性と出力の速応性のバランスを容易に可変とする制御目標決定部を設けた制御系の吸収式冷凍機への適用例を以下に示す。

Fig.3-9 に構成例を示すように、入力は、冷水出口温度の偏差(e_{T_o})、冷水出口温度の偏差の変化率(d_{T_o})、冷却水入口温度の変化率($d_{T_{ci}}$)、冷水入口温度の変化率(d_{T_i})、 e_{T_o} の過去40サンプルの平均値(e)、高温再生器温度の変化率(d_{T_g})の6入力である。もともと e_{T_o} 、 d_{T_o} 、 d_{T_i} は、PID制御における変数であり、その他はリミッタとして使用していた変数である。

出力は、制御弁開度の操作量(k_Q)である。

まず、制御目標決定部では、同時に達成することがむづかしい要求、たとえば、応答の速さと省エネルギーのいずれを優先するかを考慮する。このなかで評価関数を設定して制御量を調節することも考えられるが、ここでは実装上の簡便さなどを考慮して、各入力の影響度としてメンバーシップ関数のピーク値を、知識に基づくルールベース^[3-4]により変更可能とすることとした。

第2章で既に結果を示したように、冷水入口温度がステップ状に増加した時に、従来用いていたPID制御での冷水出口温度の応答特性（整定時間など）と同等になるようメンバーシップ関数のピーク値を調整した場合を示す。このように実際の現象に

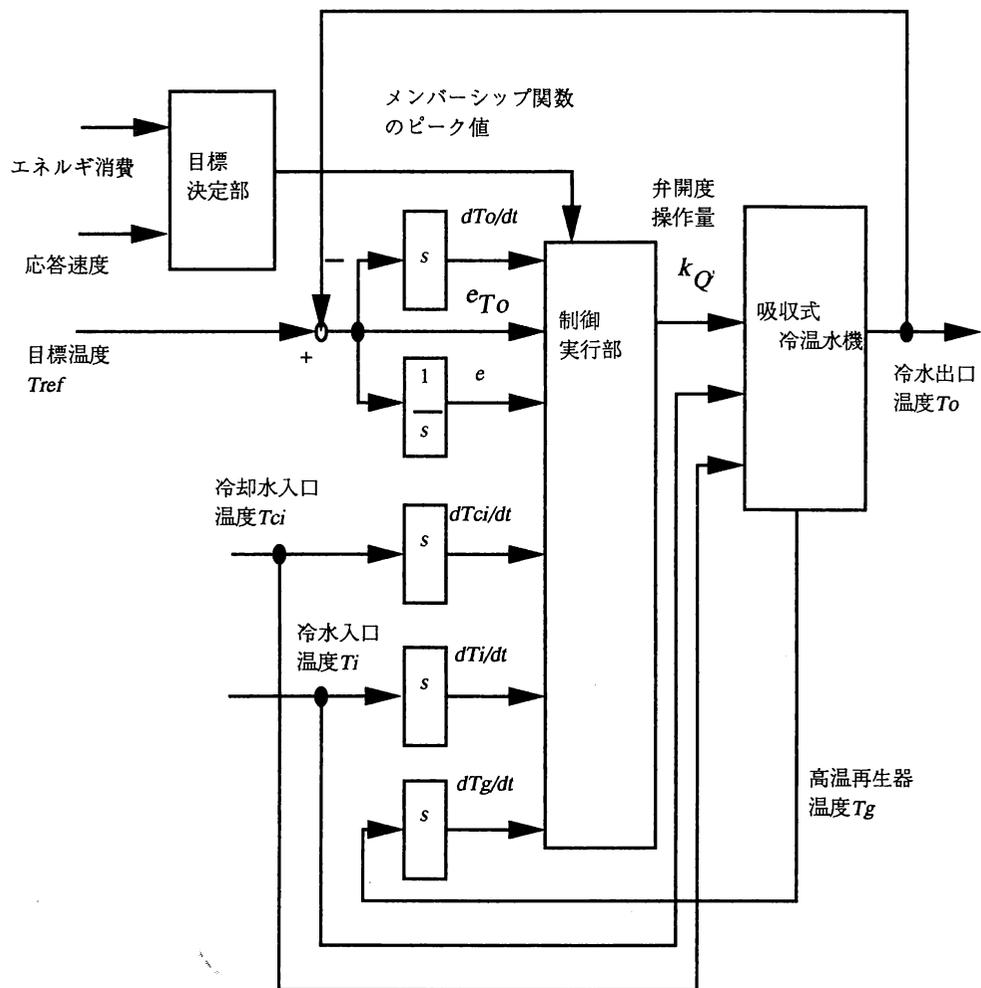


Fig.3-9 吸収式冷温水機の階層制御系

近い知識によりメンバーシップ関数が決定されているので、たとえば「もう少し応答性を重視しよう」というニーズが発生した場合でも、調整はメンバーシップ関数のピーク値を少し変更する、すなわちフィードフォワードに寄与するパラメータ dT_{ci} 、 dT_i のピーク値を大きくするだけで済み、制御実行部全体を再度調整する必要はない。たとえば、冷却水温度変化に対して速応性を期待したい場合には、冷却水入口温度の変化率 dT_{ci} のメンバーシップ関数を、0.5より大きくする、あるいは、多少ガスインプット量が増加し省エネ性は低下しても、冷水出口温度の速応性を向上させ快適性を高めたい場合なら、冷水入口温度の変化率 dT_i のピーク値を0.4より大きくする等である。この数値の大きさについては、熟練者の経験にもとづく知識により決定される。以上のような使用者の選択に依存する部分の調整が、前段におけるピーク値調整という最小限の修正で可能となる。

3.5 結言

第2章にて、空調機器生産時点における制御系の性能向上について示したのに引き続いて、本章では、設置先での環境やユーザニーズにあわせて調整が必要な制御系について、制御目標を決定する機能階層とその目標達成のための実行機能の階層から構成される2自由度型制御系の考え方を活かした2階層構造制御系の中大型空調機器への応用について実験的検討を行った。まず、パッケージエアコンについて、前段の制御目標の決定階層でファジィ推論を用い、機種構成、設置条件や環境条件の変動といった非線形性に対して、常時、適応的に冷媒目標温度を設定できる可能性を示した。

つぎに、吸収式冷温水機では、前段において多様な制御目標に対して各入力の影響度に関する知識をメンバーシップ関数のピーク値として表現した。目標が変更された場合でも、ピーク値を再調整するだけでよく、制御系全体の再調整はたいてい

の場合，不要である。

第 2 章，第 3 章で示した監視制御システムにおいて，その前提となるのは，空調機器自体が正常な運転状況にあるという点である。すなわち，制御系以外の部分の性能が初期条件，すなわち出荷時点での性能に保持されるという仮定のもとに，その性能の向上方法や設置環境への適応的な制御方法について新しい方法を提案，実証してきた。つぎの第 4 章以降では，空調機器が部分的に異常を含んだ運転条件下における監視制御システムに関する課題について検討を行う。



第 4 章 静的モデルを用いた機能階層を 有する監視制御システム



第2章，第3章では，空調機器の過渡応答を含めた制御性能の向上および設置環境への適応性向上について述べた。それらは，いずれも空調機器自体が初期性能を維持し，正常に運転されていることが前提となっていた。しかしながら，実際には部分的に多少の劣化があってもフィードバック制御によって，見かけ上は故障としては発現しないまま運転される。その場合，空調機器内部では，熱交換器の性能が低下しており，COP（成績係数＝発揮される冷凍能力／投入エネルギー）が低下した状態で運転されることになる。その対策としては，定期メンテナンスにおいて，サービスマンが測定機器や過去の経験的知識によって，診断，修理することで対応するのが一般的である。時に，気づかれぬまま使用されれば，冷凍負荷が大きくなった時，始めて「冷えない」という故障として発現し，緊急停止が働くなどユーザの快適性を損なう結果となることもある。また，うまく診断できた場合でも，修理のためのサービスコストを含めたメンテナンスのタイミングには，意志決定の問題が考慮されるべきである。本章では，機能階層の観点から，これまでよりもさらに抽象度の高い知識（モデル）ベース階層を有する監視制御系について述べる。

4.1 緒言

人間の居住空間への要求が高まるなかで、ビルオートメーション分野においては、防災、セキュリティシステムと並んで空調システムに対しても、不測の停止を回避あるいは迅速な復旧のため、監視／診断システムが必要とされてきている^{[4-1] [4-2]}。システム全体の融通性や拡張性から、個別の空調機器自体で監視／診断機能を分散的に持たせることが必要と考えられるが、故障の因果関係に関する浅い知識に基づいた分類型診断エキスパートシステムが利用され始めている化学プラントや鉄鋼プラントに比較して、はるかに小規模なため、マイコンレベルのコンピュータ環境に制約されること、実用的には温度センサによる情報を最小限度に利用する程度に限定されてしまうことなど資源の制約により、従来のエキスパートシステムを適用することは実用上、困難な状況である。

また、エキスパートシステム自体の開発状況を見ても、ルールベース型エキスパートシステムでは、現状のサービスマンが経験している診断法を採用すれば可能であるが、センサにあたるものとして真空計や電導度計などの高価な計測機器が必要となる。コンパクトなシステムを実現するためには、モデルベース型エキスパートシステムが提案されている。しかし、対象の中身が明確な機械システムやデジタル回路設計での事例が示されているだけであり、本研究で対象とするような物理モデルが構成できていない場合には適用しにくいと考えられる。さらに、事例ベース型エキスパートシステムも提案されているが、これもサービスマンがすでに保有している事例を用いるとすれば、センサに課題が残るため、適用しにくいと考えられる。これら以外にも、仮説推論や常識推論などのAI的手法、さらに知識獲得の自動化をめざした機械学習などの研究が進められている^[4-3]。しかしながら、すでに述べたように現時点での実用性すなわちソフトが機器搭載できるレベルでコンパクトであ

り、付加されるセンサも搭載可能なコスト以下であるという観点からは、今一步の状況にある。したがって、何を検出すれば、どの程度の診断が実用的なレベルで可能となるか、という基本的な観点から、新たな方法を検討することにした。

そこで、本研究では吸収冷凍機を対象とし、上記の制約のなかで、モデルを用いたコンパクトな監視／診断システムを新たに提案する。

ここでは静的な運転状態モデルを異常診断用に提案するが、これは、これまでに述べた機能階層のさらに上位（抽象度の高いレベル）にあたり、それらと階層構造化することにより機能分担して使用できるものである。

まず、吸収冷凍機の故障原因を分類、各原因の兆候を診断するために、定性的知識にもとづき、構成要素である複数の熱交換器に着目した判定指標を定義する。これは、実用性の高い温度情報が主体となっている。

続いて診断のためのモデルについて検討する。機器固有の深い知識と実験データの解析から導くモデルは、監視／診断にとって必要十分な精度で推定されればよいことに留意する。いまだ開発されていない吸収冷凍機の動特性を厳密にシミュレートできるようなモデルは高精度すぎるし、あまりに単純化されたモデル、たとえば定格条件における定常運転時の関係を用いたのでは、部分負荷状態での判定精度が期待できない。そこで、定性的な知識をベースとして、各種の運転条件（部分負荷、外部冷却水温度など）下での実験データから、ある程度の線形関係を帰納的に発見し、これを数式モデルとして採用する。数式モデルを採用することで膨大なプロダクションルールを持つ必要がなくなり、小型化が期待できる。

つぎに、モデルを用いて、故障原因のひとつである「冷却水流量不足」の直接的な判定指標である冷却水流量を監視／診断にとって必要十分な精度で推定する方法について述べる。冷却水流量は、その次に述べる別の故障原因である「冷却水の汚れ」や「真空度の異常」にも影響を与える重要な指標である。これらに対する判定指標として、熱交換器の各種運転条件における対数平均温度の正常値との比を「異

常度」と定義し、これにより故障の検出と徐々に進行する故障の程度の診断を行なう。そこで用いる正常値の推定に、上記モデルおよび推定された冷却水流量が必要となる。また、複合故障への対応例について示す。いずれも実験結果とともに有効性を示す^{[4-4] [4-5] [4-6]}。

4.2 熱交換器の基本と吸収冷凍機における故障の発現

4.2.1 熱交換器の基本

本章で基本となる熱交換器における熱通過について説明を行う。

Fig.4-1 に示すように、壁の両側に温度の異なる二つの流体があるとすると、壁を通して温度の高い流体から温度の低い流体に向かって熱移動がおこる。ふたつの流体の温度は、それぞれ、 t_c °C および t_w °C に保たれており、 $t_c > t_w$ とし、面積 $A\text{m}^2$ を通過する熱流を $\Phi \text{kcal/h}$ とすると、 Φ は温度差に比例し、また、伝熱面積にも比例して

$$\Phi = K \cdot A \cdot (t_c - t_w) \quad (4-1)$$

で表される。K は比例定数であって、熱通過率と呼ばれる。単位は、 $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ である。二つの流体間の温度差 1°C 当たり、伝熱面積 1m^2 を 1 時間に通過する熱量を kcal で表すものである。

このときの熱通過抵抗Rは、

$$R = \frac{t_c - t_w}{\Phi} = \frac{1}{K \cdot A} \quad (4-2)$$

この熱抵抗は、二つの流体間に存在するすべての熱抵抗を含んでいる。

Fig.4-1 において、壁を一様な平行平板とし、壁面における熱伝達率を高温側は α_c 、低温側は α_w とし、壁面温度は高温側は t_1 に低温側は t_2 に保たれているとし、壁の

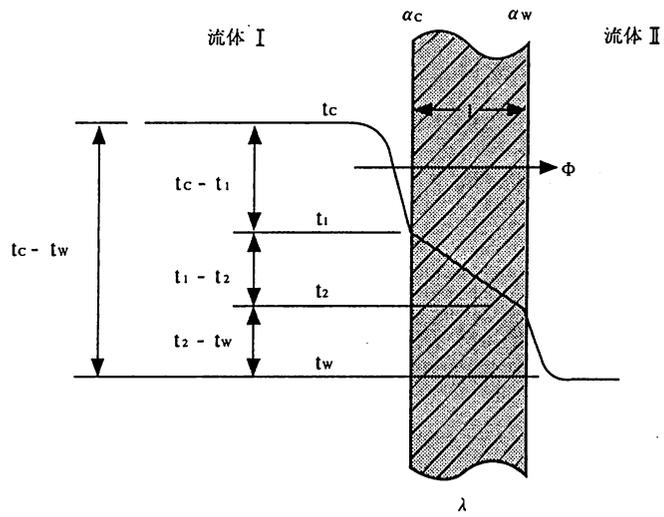


Fig.4-1 熱通過

厚さを l ，その熱伝導率を λ とする。このとき，通過する熱流は，まず，高温流体から壁面へ熱伝達で移動，ついで壁の内部では熱伝導で移動し，そして再び熱伝達で壁面から低温流体へと移動する。高温流体から壁面への熱伝達は

$$\Phi_1 = \alpha_c \cdot A \cdot (t_c - t_1) \quad (4-3)$$

壁内部の熱伝導は

$$\Phi_2 = \lambda \cdot A \cdot \frac{t_1 - t_2}{l} \quad (4-4)$$

壁面からの低温流体への熱伝達は

$$\Phi_3 = \alpha_w \cdot A \cdot (t_2 - t_w) \quad (4-5)$$

である。定常状態での熱移動では， $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi$ とおけるから

$$t_c - t_w = \left(\frac{1}{\alpha_c \cdot A} + \frac{1}{\lambda \cdot A} + \frac{1}{\alpha_w \cdot A} \right) \cdot \Phi \quad (4-6)$$

いっぽうで

$$t_c - t_w = \frac{1}{K \cdot A} \cdot \Phi \quad (4-7)$$

であるから，この場合の熱通過抵抗は，熱伝達抵抗が二つと熱伝導抵抗一つを含んでおり，二つの流体の間に存在する熱抵抗の総和であることを示している。

次に，本章の主目的である診断システムに直接関係する冷却水系の熱交換について述べる。Fig.4-2 に示す平行平板の伝熱壁を隔てて冷却水により冷媒が凝縮する場合の，熱流が通過する各過程の熱抵抗が，熱通過率に及ぼす影響を次の条件のもとで考える。吸収冷凍機では，冷媒や吸収液や蒸気などの熱交換があるが，ここでは具体的数値がよく調べられているフロンを用いた場合について示す。

- (1) フロンの凝縮熱伝達率 $\alpha_c = 2500 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
- (2) 伝熱壁は，銅として熱伝導率 $\lambda = 320 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ ，厚さ $l = 2 \text{ mm}$

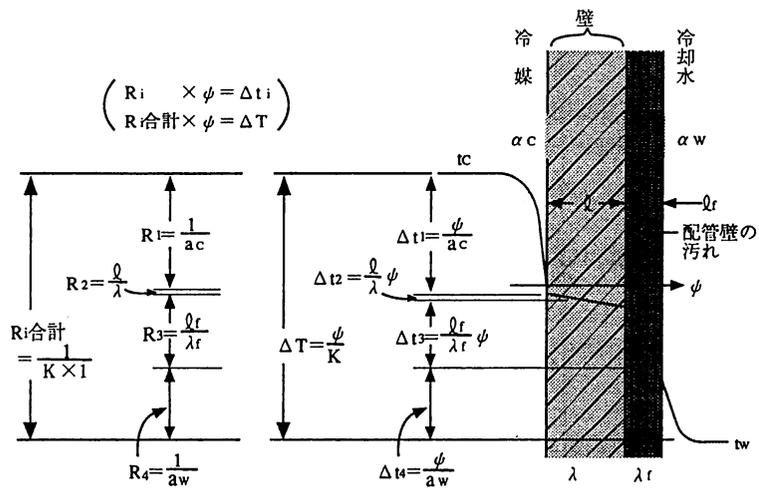


Fig.4-2 配管に汚れがある場合の熱通過

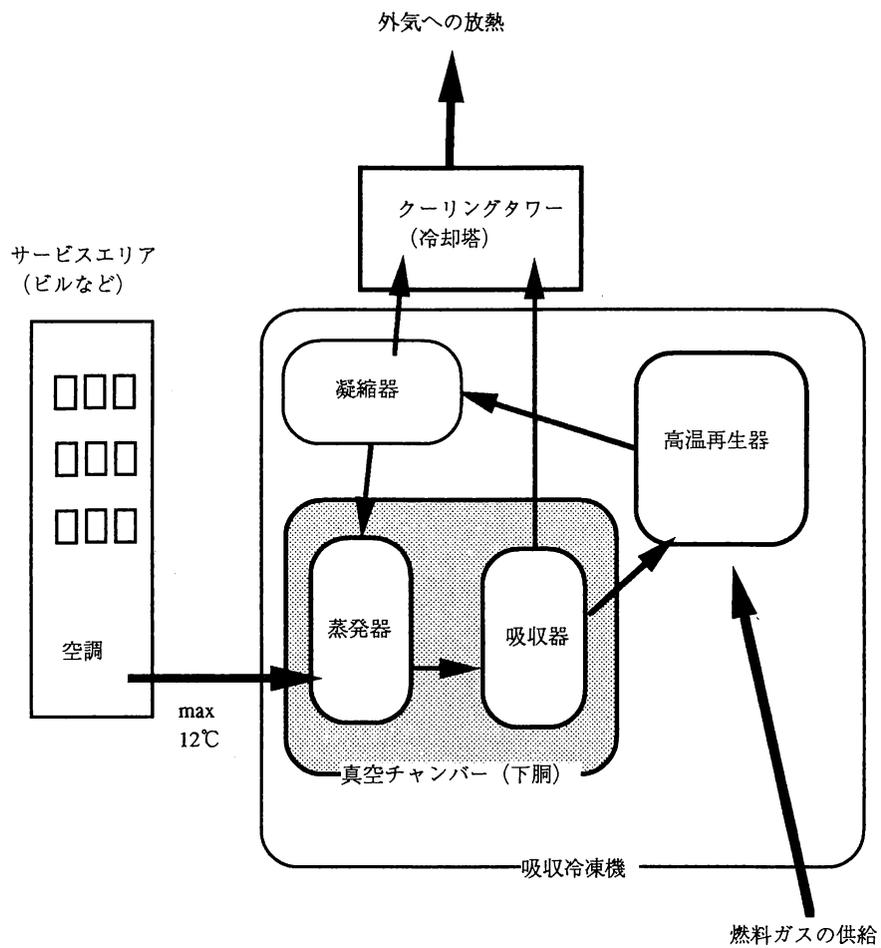


Fig.4-3 吸収冷凍機における熱移動

(3) 冷却水側の熱伝達率 $\alpha_w = 7500 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

(4) 冷却水の汚れの結果、配管壁に付着する汚れ（水あか）のために増加する熱抵抗 $f = 1_f / \lambda_f$ は、一般的な経験値 $0.0002 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ とする。

汚れがある場合、熱通過率 K は、 $1,352 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ となる。仮りに冷却水と冷媒の温度差 ΔT が、 10°C あるとすると熱流密度は、 $13,520 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ である。水あかがない場合には、それだけ熱抵抗が減少するので K が増加し、同じ温度差 (10°C) なら、熱流密度が増し、 $18,540 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ となる。もし同じ熱流密度でよいならば、温度差は、 7.3°C でよいことになる。

このように、冷却水システムの汚れは、空調機器の熱伝達性能に大きな影響を及ぼす。さらに、冷却水自体の汚れが、そのまま配管壁の汚れにはならないので、この意味で従来の「冷却水汚れ」に対する診断が、目視や電気伝導度測定で行われていたことは、間接的な診断であったといえる。提案する方法では、直接、熱交換器の性能として診断するものである。

4.2.2 潜在的異常と故障としての発現

対象とする吸収冷凍機は、ガス燃焼熱を入力として冷凍を得ることのできる機器である。エネルギー収支としては、燃焼用ガスからの入熱と2次側冷房に供される冷水からの入熱があり、冷却水へ出熱される。この間の熱エネルギーのやりとりは、Fig.4-3 に示す複数の熱交換器で行なわれる。その相互関係に関する定性的知識がモデル導出の源となっている。

基本的な制御としては、負荷により2次側から流入する温度の上昇した冷水を、吸収冷凍機内で冷却し、2次側へ供給される冷水出口温度を一定にするよう燃焼ガスをフィードバック制御^[4.7]している。そのため、故障が徐々に進行しても部分負荷状態では故障として顕在化してこない（部分負荷での必要な冷凍能力は発揮される）。負荷が定格付近になって、初めて冷凍能力不足（冷えない）という故障として発現する。あるいは、吸収式冷凍機の熱作用に関わる異常は、ほとんどがCOP低

下につながるためガスインプットが増大する方向に制御が働き、最終的には、入力熱源である高温再生器の温度が異常に高いという故障となり、リミッタにより強制停止される。（ユーザは、ここでサービスコールを行なう）

4.3 機能に関する知識にもとづく異常診断

4.3.1 故障原因となる異常の分類

最終的には、高温再生器におけるバーナ停止として顕在化するものの、内部状態を監視していると以下の典型的な故障原因がある。これらは、部分負荷状態では故障としては表面化しない。（潜在的故障）

F1：冷却水流量の減少

（クーリングタワーで大気中に熱を放出するが、冷却水流量が不足すると吸収器と凝縮器における熱交換効率が低下する）

F2：冷却水の汚れ

（すでに述べた通りで吸収器と凝縮器における熱交換効率が低下する）

F3：真空度の劣化

（蒸発器と吸収器がある容器内の真空度が低下すると蒸発器における冷媒の蒸発が鈍くなり冷水温度が下がらなくなる）

F4：冷媒への吸収液の混入

（原理においてデューリング線図により説明したように蒸発しにくくなるため冷水温度が下がらなくなる）

F5：吸収液の循環量の過不足

（吸収液が不足すると吸収器における冷媒蒸気の吸収が悪くなる）

F6：吸収液の結晶化

（冷却水の低温化などによって吸収液の結晶化がおこる。これは故障

原因というよりも結果とも言える)

従来、サービスマンが行っていた診断方法では、F1やF5は流量計、F2は電気電導度、F3は真空計、F4やF6は液抜き取りと比重計によるものである。これらを用いることができれば、主要な故障の因果関係を1:1で捕捉することができるため、ソフトは非常に簡単化される。しかし、自動化やコストなど本システムの狙いからは採用できないものである。

そこで、熱エネルギー収支に関する定性的知識を用いる以下の方法を検討する。

4.3.2 熱エネルギー収支に関する知識を用いた異常診断方法と判定指標

すでに述べたように吸収冷凍機は、基本的に6つの熱交換器から構成されているが、機器内部で発生する故障原因は、いずれかの熱交換器における熱移動に影響を与えることが考えられる。そのため故障の「判定指標」として主に、以下の各熱交換器の対数平均温度差を採用することで、診断が可能かを検討した。

$\Delta T_{\text{HEX}1}$: 蒸発器対数平均温度差

$\Delta T_{\text{HEX}2}$: 吸収器対数平均温度差

$\Delta T_{\text{HEX}3}$: 凝縮器対数平均温度差

他の判定指標も含めて、Fig.4-4 に示す。

熱交換器における熱移動量 Φ ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) は、

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (4-8)$$

で表される。ただし

A : 伝熱面積 (m^2)

k : 熱交換器の熱通過率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)

ΔT : 対数平均温度差 ($^\circ\text{C}$)

ΔT は、熱交換器の出入口4箇所に設けた温度センサにより容易に得られる温度差から

異常停止、冷房能力不足

高温再生器温度高
濃液濃度高 など

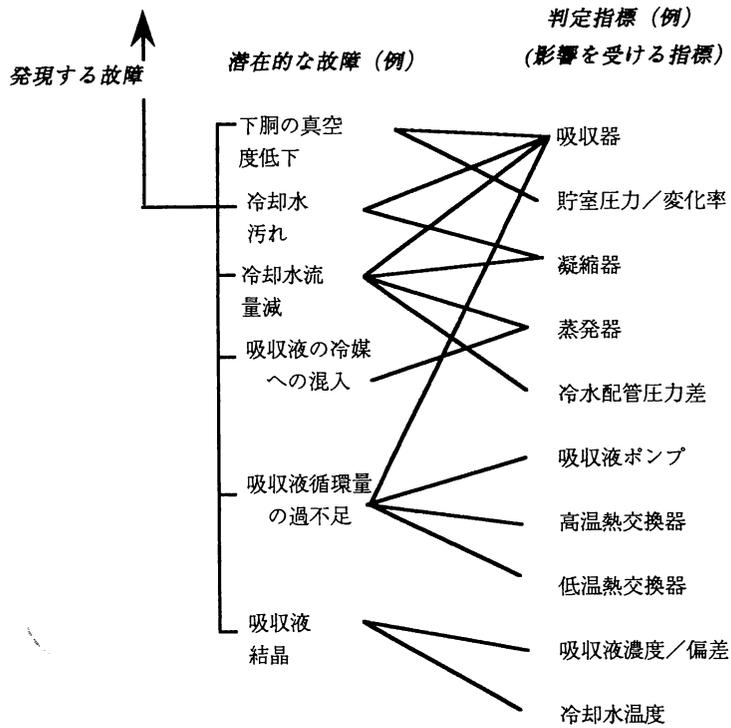


Fig.4-4 典型的な異常原因と判定指標との関係

$$\Delta T = (\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln (\Delta T_2 / \Delta T_1) \quad (4-9)$$

で計算できる。(Fig.4-5)

故障が発生していると、正常時に比べて、 k が小さくなるが、すでに述べたようにフィードバック制御によって Φ は一定に保たれるため、 ΔT が大きくなる。よってその時点での ΔT を正常値と比較することによって、その熱交換器での異常の有無および程度がわかる。

しかしながら ΔT は、運転条件によって変化するため、その各種の運転条件における「正常値」を何らかの方法で得られれば、以下の式で求めた「異常度」 F から異常の有無や程度の判定を行うことができる。

$$\text{def.: } F = (\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T \quad (4-10)$$

ΔT_m : 測定値

ΔT : 推定された正常値

分布定数系を正確にモデル化することの困難さがある一方で、単純に

$$\Phi = C \cdot L \quad (4-11)$$

C : 比例定数

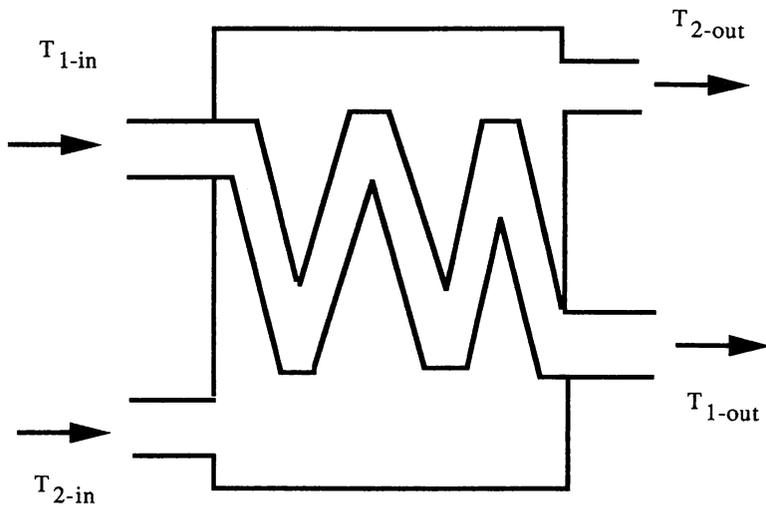
とすれば、推定誤差が大きくなり、実用性が低くなると予想される。

すなわち、ここで提案するモデルは、監視／診断に必要な精度で、できるだけコンピュータやセンサへの負担を軽くすることを狙ったものである。

4.4 運転状態の静的モデルの抽出と異常診断

4.4.1 診断システムの開発フロー

Fig.4-6に示すように、運転データベースを用いて故障診断システムの妥当性を検証するためのシミュレータを作成した。運転実験データから正常時データと異常時



$$\Delta T_1 = T_{1-out} - T_{1-in}$$

$$\Delta T_2 = T_{2-out} - T_{2-in}$$

Fig.4-5 対数平均温度差算出のための測定点

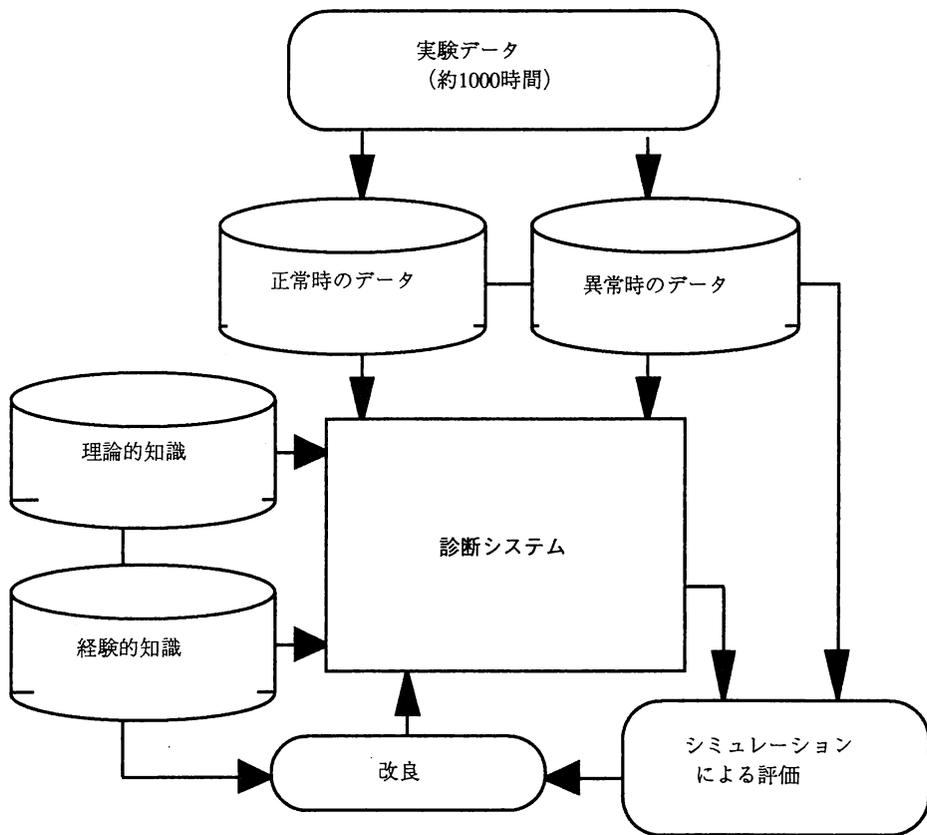


Fig.4-6 診断システムの開発ツール

データを抽出し、正常時データからは知識ベースとなるモデルの抽出を行った。それをもとにして故障診断システムを構築し、異常時データを用いてその判定が妥当であるか否かを繰り返し検討し、診断方法の精度を高めていった。

4.4.2 冷却水流量の推定

冷却水流量 V は、故障原因 $F1$ を直接診断する判定指標であるとともに、他の故障原因 $F2$, $F3$ でも対数平均温度差の正常値を推定するために必要となる重要な値である。しかしながら、測定のための流量計は一般に設置されていない。

そこで、以下に述べる冷却水流量の推定方法を提案する。

(1) 正常時の冷却水流量の推定

熱エネルギー収支に関する定性的知識として、各熱交換器における熱移動量 Φ は、運転条件（冷却水温度、冷却水流量など）に依存するものの、2次側に供給される冷水の温度差 ΔT と流量 V の積に比例する冷凍負荷 L （蒸発器における放出熱量）にほぼ比例することがあげられる。そこで各熱交換器における熱移動量 Φ をそれらの簡単な関数で表現することができないかを考える。

$$L = \rho \cdot C \cdot V \cdot \Delta T \quad (4-12)$$

C : 比熱, ρ : 密度

$$\Phi = \Phi (L, T_{co}, V_{co}, \dots) \quad (4-13)$$

正常な運転状態において、冷却水流量 V_{co} が一定の場合に行った実験から、導出した結果を Fig.4-7 に示し、モデルとして以下の近似式を導く。

$$\begin{aligned} \Phi / L = & 5.8 \times 10^{-5} \times L^2 - 9.1 \times 10^{-3} \times L + 0.125 \times (T_{co} - 32) \\ & + 1.6 \end{aligned} \quad (4-14)$$

この式をモデルとすることにより、運転条件（蒸発器出入口圧力差と温度差による冷凍負荷、冷却水入口、中間、出口温度）が与えられれば、吸収器、凝縮器が正常な場合の熱移動量が推定できる。

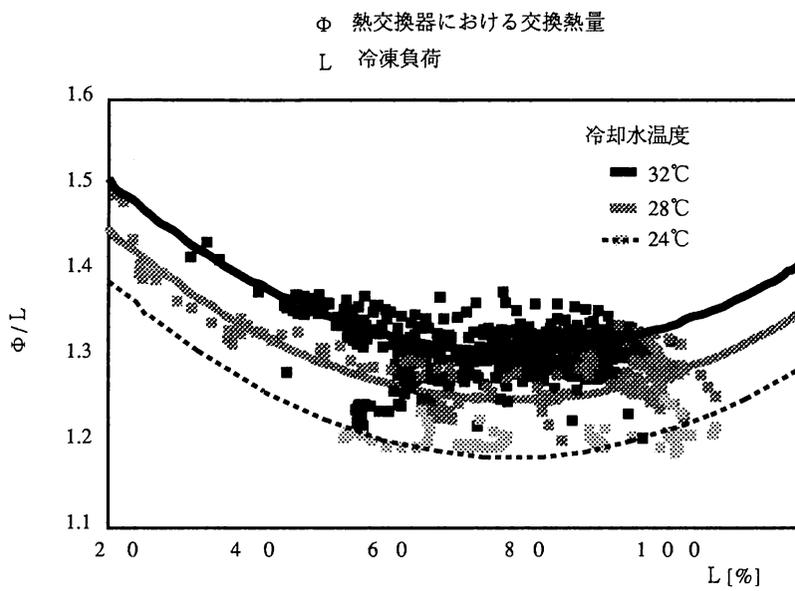


Fig.4-7 正常な状態における冷凍負荷 L と交換熱量 Φ の関係

冷凍負荷は、蒸発器の圧力差の測定から得られる流量と測定される温度差から

$$L_c = \rho \cdot C_w \cdot V_c \cdot (T_{c-in} - T_{c-out}) \quad (4-15)$$

ρ, C_w ; 流体の密度, 比熱

で求められることから Φ が求められる。

また、 Φ は、推定しようとしている冷却水流量 V_{co} を用いて、凝縮器出入口温度差と比熱から

$$\Phi = \rho_{cw} \cdot C_{cw} \cdot V_{co} \cdot (T_{co-out} - T_{co-mid}) \quad (4-16)$$

としても表わされる。このようにして、 Φ を媒介として、冷却水の流量 V_{co} が推定できるので故障原因F1：冷却水流量の減少についての診断が温度情報主体で可能となる。

したがって、これを用いて行った監視／診断が妥当な精度であれば、それ以外の意味、たとえば熱エネルギー収支や動特性などで精度が不足していたとしても、ここでの診断という特定の機能における目的（サブゴール）に対しては、上記のモデル化方法が実用性を持つことが示される。

(2) 故障時の冷却水流量の推定

Φ/L 比を変化させる故障としては、直接、吸収器における水蒸気の吸収作用に影響を与える故障原因として、次節で述べる「F2：冷却水の汚れ」「F3：真空度の劣化」がある。

定性的知識にもとづいた実験により、冷却水流量の定格値と測定値によって熱移動量は、Fig.4-8のように得られる。

これより

$$\Delta T = \Delta T_m \cdot (V / V_{max})^\delta \quad (4-17)$$

$$\delta = 0.25$$

が導かれる。 ΔT_m は測定された対数平均温度差、 V_{max} は定格流量である。

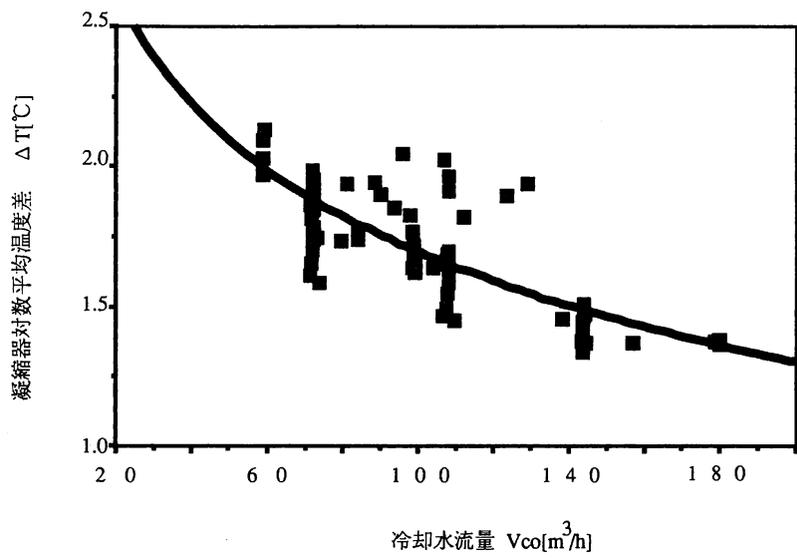


Fig.4-8 凝縮器対数平均温度差と冷却水流量の関係

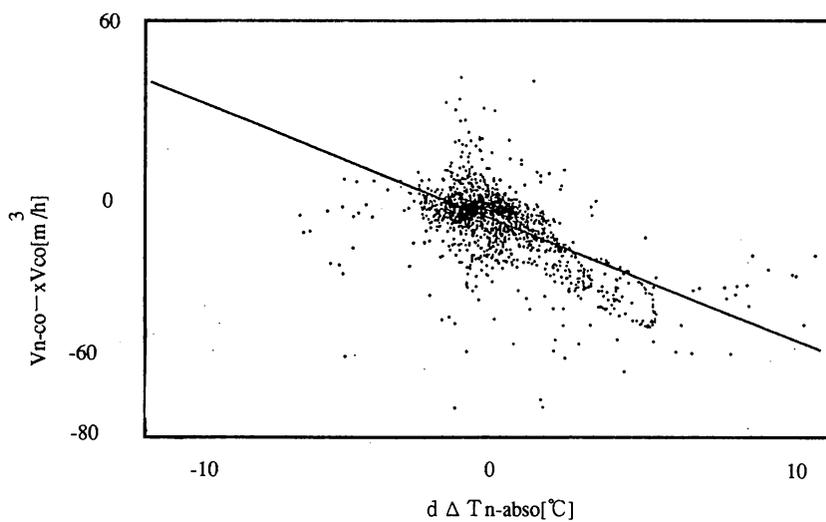


Fig.4-9 吸収器対数平均温度差と冷却水流量の偏相関

これを知識として踏まえて、以下の推定方法を提案する。

ΔT_{abso} : 吸収器対数平均温度差

$\Delta T_{\text{abso-n}}$: ΔT_{abso} の正常時の値

V_{co} : 正しい冷却水流量 (真値. 実験では流量計で求めている)

$V_{\text{co-max}}$: 冷却水流量の定格値

$$(= 100 \text{ m}^3/\text{h})$$

とおき、 ΔT_{abso} を冷却水流量で正規化してやる。

$$\Delta T_{\text{n-abso}} = \Delta T_{\text{abso}} \cdot (V_{\text{s-co}}/V_{\text{co-max}})^{\delta} \quad (4-18)$$

$$\delta = 0.25$$

V_{co} は計測されないため、正常時の推定方法で求めた値 $V_{\text{s-co}}$ を用いている。

ここで対数平均温度差の偏差と冷却水流量偏差の関係を実験から求めると

$$V_{\text{n-co}} - V_{\text{co}} = 4.4 \times (\Delta T_{\text{n-abso}} - \Delta T_{\text{abso-n}}) + 0.37 \quad (4-19)$$

が得られた。これを Fig.4-9 に示す。

ここで用いた考え方、すなわち冷却水流量が対数平均温度差に及ぼす影響を、それらの偏差どうしの相関でモデル化する方法は、重回帰分析における因果関係を考慮した偏相関係数を用いる方法と同じ考え方である。

これを用いて、故障時の冷却水流量推定値は

$$V_{\text{x-co}} = V_{\text{co}} \quad (4-20)$$

であることから

$$V_{\text{x-co}} = V_{\text{n-co}} + 4.4 \times d \Delta T_{\text{n-abso}} + 0.37 \quad (4-21)$$

で求めることができる。

途中、 $V_{\text{s-co}}$ を用いていることもあり、実験で精度を確認した結果を Fig.4-10 に示す。

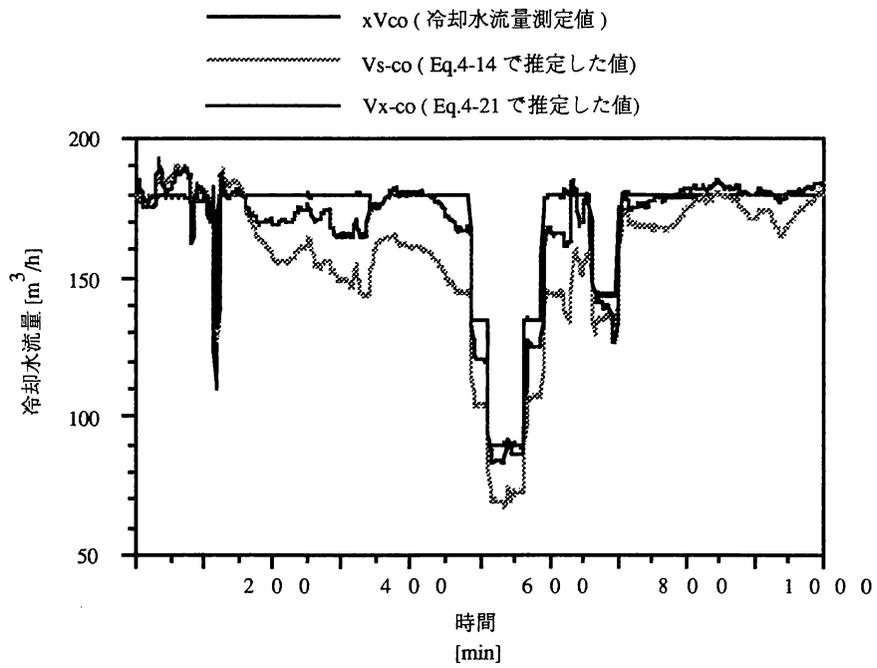


Fig.4-10 真空異常が発生している状態での冷却水流量の推定方法による差

以上から冷却水流量は、流量計を使用せず実用性の高い温度情報により必要十分な精度で推定できることが示された。

4.4.3 「冷却水汚れ」「真空異常」の状態推定

典型的な異常のひとつである「冷却水汚れ」は、水冷式空調機器におけるクーリングタワーで、冷却水が外気に放熱する際に塵を混入し、しだいに汚れが進行する現象である。冷却水汚れによる熱通過率の低下は、配管内壁に付着するスケールのためである。従来、この対策としては、定期点検時に冷却水の電気伝導度を測定、冷却水の入れ替えや配管清掃を行っており自動化できていないものであった。

以下で、この「冷却水汚れ」を取り上げて、前述したモデル化手法を用いて監視／診断する方法を検討する。

凝縮器対数平均温度差 ΔT に対して、異常度 F を定義する。

$$F = (\Delta T - \Delta T_n) / \Delta T_n \quad (4-22)$$

正常値 ΔT_n は、前節で示した冷房負荷と凝縮器熱交換器における熱移動量の関係式

$$\Phi / L = f(L) + 0.125 \times (T - 32) \quad (4-23)$$

$$\Phi = \rho \cdot C \cdot V \cdot \Delta T \quad (4-24)$$

より ΔT の正常値を推定する。

Fig.4-11 に実験結果を示す。ここでは、異常の進行度合を便宜上、「正常」「注意」「異常」の3段階に分けているが、この基準の決定や異常度として算出された数値の扱い方には、サービスのタイミングをどう設定するかという意志決定の問題が絡んでくる。たとえば、冷却水配管の汚れ度合いを異常度の数値から同定することはもとより、これ以外の故障原因でも算出される異常度の数値も含めて、サービスコストや夏期のピークシーズン前に修復してしまうか、あるいは修復のために運転を一時休止させることが可能か、などといった問題が、より高いレベルでの最適化、すなわち従来、個別に最適化が計られてはきているが、ここであげているレベルでの最適化はより総合的な見地が必要な問題となってくる。ここでは、過去の経験か

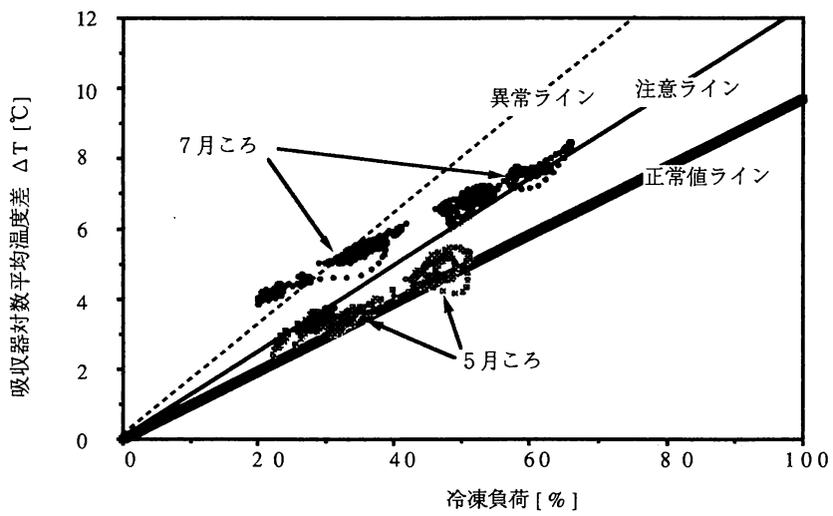


Fig.4-11 冷却水汚れに対する異常診断の結果

ら値を設定するにとどめたが、このような意志決定問題が今後の課題として残った。

また、別の事例として、長期の使用によって外気の漏れ込みや高温水蒸気の分解ガスが原因となって下胴の真空度が劣化することで発生する「真空異常」については、吸収器の異常度を用いて同様に診断できた。吸収器は、蒸発器と同じく減圧雰囲気下に設置されている熱交換器であり、その真空度が異常となれば蒸発器で発生する水蒸気が減少し、従って吸収器における吸収作用にも影響するという定性的な知識から、真空度の異常に関する判定指標として選択されている。さて、Fig.4-12には、故意に異常を発生させるために、300cc/minで窒素ガスを注入、その結果を示した。吸収器の異常度が判定指標として使用可能であることがわかる。もちろん吸収器異常度は、冷却水流量や冷却水汚れといった他の異常の影響も受けるため、複合異常としての扱いを行い、他の異常の影響を取り除くことが必要である。

4.5 ルールにもとづく異常診断

これまでは静的モデルを介して状況を解析し、その運転状況における各熱交換器における熱交換量の冷凍負荷に対する比率として正常値を推定した。異常原因のなかには、モデルによる推定を介さずに直接指標となるものがある。たとえば、吸収液の濃度が高くなって結晶化することによって、パイプが閉塞するといった異常がある。この場合、濃度は温度と圧力からデューリング線図を用いた計算により求められ、これは運転状況には依存しない値である。この場合には、その濃度値に対して閾値を設定し、これをルールとして異常診断を行う。

また、静的モデルにおけるパラメータは実機実験により得られるが、そのモデル曲線をいくつかの代表点を用いて階段状に直線で近似したモデルで代用することを考えると、それは、その階段ごとの値を閾値とするルールへと簡略化される。すなわち、抽象度の高い静的モデルのパラメータが実機によって同定されると、それは

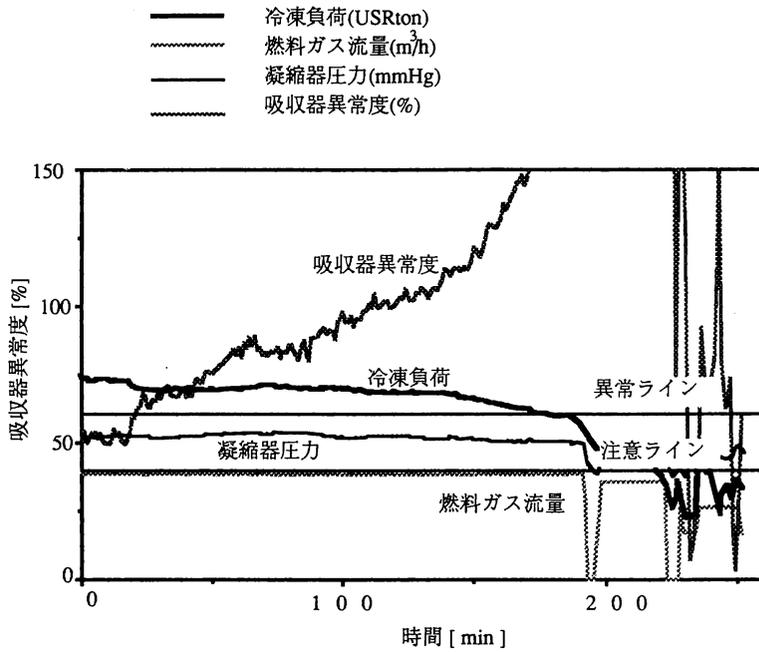


Fig.4-12 故意に真空度を劣化させた場合の判定指標：吸収器異常度

近似的にルールへと展開される。

4.6 復旧制御

監視制御システムにおいては、上記の診断が行われた後、いくつかの方策が考えられる。ひとつはサービスマンによる復旧作業である。これはすでに原因が診断されているため、原因除去がきわめて容易である。この部分を自動化するためには、すでに述べたいくつかの原因除去のため、冗長システム化による方法が考えられる。たとえば、冷却水汚れに対しては、当該冷却水の廃棄と新しい冷却水の供給のための配管および自動バルブを用意しておくことが考えられるが、空調システム程度の規模では、非現実的と言える。これらの原因除去型の対応の前に、急に停止に至ることを避けるため、異常の進行を遅らせてサービスのタイミングを図る、停止回避制御が重要である。現状では、単に出力をあるレベル以上には上がらないように設定しておく程度である。このような停止回避制御においては、同時になるべく冷凍能力は低下させないことがユーザの快適性の観点から必要である。現状では、このようなきめこまかな制御方策については、精密な動的モデルがないことを原因として不可能と考えられている。

4.7 結 言

本章では、第2章、第3章よりも、さらに広い意味での適応性能、すなわち空調機器が部分的に劣化している状態を対象とした検討を行った。まず、吸収冷凍機の内部に劣化がある場合について、その監視／診断／復旧制御を特に、Rasmussenの行為の3階層モデルで述べられているところの知識ベースの行動にもとづく診断／復旧を行うための検討を行った。特に従来は明確に捕らえられていなかった部分負

荷運転における各熱交換器における熱交換量の正常値を推定する静的モデルを抽出する方法を提案した。また、吸収冷凍機の主要な構成要素である熱交換器の対数平均温度差を判定指標として、各種運転条件下でも、その正常値を推定、それを用いて時々刻々の測定値との比（異常度）により、十分な精度を以て、潜在的な故障の監視／診断を行なう方法を提案、実証した。また、複合故障については、一方が他方に及ぼす影響を偏相関として捕らえ、これを用いて正常値や測定値を補正する方法を提案した。提案の方法は以下の点で実用性が高いと考えられる。

- (1) 温度情報主体でセンサ管理を含めたメンテフリーの可能性がある。
- (2) 数式モデルをルールに併用したのでルールベース型エキスパートシステムに比べてソフトがコンパクトになる。

提案の方法により、部分負荷状態であっても、潜在的な故障を発見できるため、冷凍負荷の大きさが、季節に応じた変化をする、たとえば春から夏にかけては、部分負荷状態からのちに最大負荷にいたるので、通常サービスコールが集中する夏を避けて修復に必要な時間的余裕を持って故障を「予知」できることにもつながった。

また、採用したモデルのパラメータを能力の異なる種々の機種に対して調整することによって、それをルールのレベルに落とし込めることを示唆した。さらに、復旧制御や停止回避制御の必要性についても示した。

しかしながら静的モデルは定常運転時の情報から得られているため、過渡状態に対しては誤った診断を行わないように別途工夫が必要となってくる。これは、既に述べたように精密な動的モデルを使用できないことに原因があり、現状では避けることができない。

本章では、第2章および第3章で提案した、正常な運転状況における制御性能の向上方法よりも、さらに広い範囲における適応性能をめざして、空調機器内部の異常の監視／診断／復旧制御、停止回避制御と空調システムにおけるマンマシンシステムとしての位置づけについて検討した。つぎの第5章では、動的モデルを従来の

物理的，数理的考察により得る方法とは別の方法について検討する。そして，出力をなるべく低下させないための停止回避制御を中心として，また快適性の客観的評価など，マンマシンシステムとしての将来的な要素技術として，カオス理論を用いた取り組みについて述べる。

(1) 空調機器の動特性解析

空調機器における数理的、物理的な観点からのアプローチが主としておこなわれているが、その非線形性ゆえに汎用的で精度のよい方法は確立されておらず、また、ましてやその計算が容易なものはないのが現状であることをすでに述べた。ここではもう少し具体的に現状を補足説明する。

空調関係では、室内気流の3次元シミュレーションにより時間経過とともに進展する温度、風速（さらに圧力、塵芥など）の空間分布を数値計算で求めようとする研究が盛んである。乱流解析のために偏微分方程式を数值的にスーパーコンピュータで繰り返し収束計算で求めるものである。偏微分方程式そのものは、おおむね連続の式、エネルギー式などから構成されるが、解を発散させないで求めることにノウハウがある。最近では、コンピュータの普及によって幅広く研究されているが、統一的には方法論は得られておらず、対象ごとに類似の方法がとられている。成果としては、たとえば、林立するビル街で各階設置の空調室外機からの排気が、たとえば冷房シーズンでは大気より高温の排気がでるが、それが上層階の室外機に吸引されてしまい、その階での空調機器の冷房能力が低下してしまうショートサーキット現象が問題になっている。これを設置以前にシミュレーションにより最適配置を決定するために用いられている。もちろん、シミュレーション初期には、実験も行ってパラメータの調整が必要となる。したがって類似の問題では同様の解法が使用できそうであるが、汎用性には乏しい。

(2) 吸収式冷温水機の動特性解析

吸収冷凍サイクルの動特性解析については、制御方法の検討のためのツールとし

て分きざみの解析が可能な単効用吸収冷凍サイクルのモデルが示されている。このモデルは、吸収式冷温水機の各構成要素を熱や物質の移動部と作動流体の滞留部に分割して集中定数系としたものである。

また、各構成要素内で反復収束計算を行い、要素間を連結してサイクルを構成するモデルも提案されている。そのような計算にあたって、装置の持つ熱容量を考慮することにより解析精度が向上することも報告されている。ところが、これらのモデルは、冷水や冷却水が蒸発器と吸収器を通過するのに数秒～数十秒を要しているのに対して、この応答遅れが考慮されていない。冷房負荷の急な変動、冷水や冷却水の流量制御に対する応答を秒単位で解析する場合には無視できない。

このような状況のなかで、最近ではこのような時間遅れ（流体の移動や伝熱によるもの）や温度分布を考慮した解析が検討されはじめている^[4-8]。

(3) 偏相関係数

変数間の内部相関を考慮しながら、外的基準変数の値をもっとも効率的に予測できる重みを求め、それによって予測式を定める方法が、重回帰分析と呼ばれる方法である。例として入社試験を考える。経理関係を志望するとしても経済関係の成績だけで、その人の能力を評価しようとするのは正しくない。最も望ましい評価方法は、志望先によって必要とされる教科科目を重視するように重みづけすることである。この重みを決定するとき、志望先に関係が深いからといって単純に経済関係の科目の重みを大きくしてはいけない。科目間の内部相関係数を考える必要がある。入社後の成績というような外的基準変数の値を最も効率よく予測するためには、数学と物理を選んだほうが、生物と数学を選ぶより予測効率が高くなることがあるからである。

さて、生物の成績と物理の成績を入社後の成績の予測指標とする場合、志望者に数学の成績がよい人が多くいるかどうかで、かなり異なってくる。

このようにある変数 x と y の相関を求める場合に、 x にも y にも影響を与える第3の変数 z が存在すれば、 x 、 y から z の影響を取り除いてやらねばならない。

このような z の影響を取り除いた x と y の相関係数が偏相関係数と呼ばれるものである。



第 5 章 観測量からの動的モデルの抽出 と停止回避制御

---- カオス理論の応用



これまでの章では、空調機器の最終目標である「省エネルギー性」と「快適性」の向上をめざして、正常な運転状況下における過渡応答を含めた制御性能の向上や設置環境への適応性能の向上、異常な運転状況下における監視／診断システムとしての基礎検討を行ってきた。その結果、動的モデルの必要性およびそれに基づく停止回避制御に課題があることが示された。本章では、近年、空調システムとのかかわりが多くなってきたカオス理論の応用可能性について検討する。しかしながら、この分野は、これまで述べた研究に比べて緒についたばかりであり、必ずしも実際の空調システムへの応用には至っていない。本分野の研究の最終的な目標として、従来の方法では動的モデル化の困難な非線形プラントに対して、まず、その温度時系列から再構成されるアトラクタの幾何学的形状や計算される相関次元を用いて当該システムの状態（健全度）を識別することが挙げられる。さらに、そのようなプラントを安定させるために出力を大きく低下させることはユーザの快適性を損なうため、少なくとも振る舞いの予測が不可能な発散状態から周期軌道状態、すなわち、なるべく出力を低下させずに停止を回避させる制御へと展開していくことを想定している。

5.1 緒 言

まず、本分野の現状について述べる。上記した「ユーザの快適性」に関連して、人間にとって快適といわれている自然の風のパワースペクトルが $1/f$ (f は周波数) 分布となっていることから、空調される室内環境の制御において、開ループ制御で石油ファンヒータによるヒータ温度の $1/f$ ゆらぎを、低次元カオスの一種である間欠カオスを用いて、人工的に簡易に作る方法が提案されている^[1-9]。また、人間にとって快適か否かの評価を、従来の自己申告ではなく、客観的に評価するための指標として、被験者実験における人間の脳波や心拍R-R間隔のゆらぎのカオス性を用いる方法が検討されている^[1-10]。このような人間の感性を扱う研究分野については、本研究では深くは立ち入らないが、方法論的には、ブラックボックスであるシステムから得られる一見ランダムな1次元の時系列信号から、システム全体を表現する力学系を再構成する、いわゆるターケンスの埋め込み定理を基礎とする同定手法において^[1-9]、複雑大規模な非線形システムの同定への適用が期待されている。この方法では、系を表現する数式を得るのではなく、幾何学的構造をアトラクタとして、あるいは、リアプノフ指数として系の状態を得る。最近、エアコンの冷媒温度の動特性においてカオス的変動が測定されたことが報告されている^[5-11]。

従来、システムを同定する手法としては、系が線形構造であること、および、その次数を仮定した同定法が一般的であった。本研究では、複雑なシステムが発散してしまわない程度に制御するという観点から、これまではエノンマップ^[1-11]やローレンツアトラクタ^[1-11]といった比較的簡単な構造のカオスにしか適用されていなかった新しい制御方法 (OGY制御)^[1-13]をより複雑な非線形システムにも適用可能か？を検証する。システムから得られる時系列信号から、当該システムが安定状態、周期振動状態、あるいはカオス性を有する状態かを判定する方法である分岐図やポア

ンカレ断面図の作成などのカオスを取り扱うにあたっての基礎的な検討，さらにそのカオスを所望の周期軌道に閉じ込めるOGY制御について検討する．従来の制御方法が，安定平衡点への収束を目的としたのとは異なり，ここで扱う方法は，カオス状態から周期運動へ閉じこめるという制御である．本分野への取り組みは，いまだ基礎的な検討の段階にあり，具体的な空調機器に適用できる段階にはない．そこで，非線形性を示す基本的プラントの一つである強制振動系を対象として，制御手法としての可能性を検討することにした．

さて，非線形力学系におけるカオス現象を制御しようとする取り組み^{[5-2] [5-3] [5-4]}のなかでも，わずかな外力を加えることで所望の周期運動に閉じ込めることができる方法として，Ott, Grebogi, YorkeによるOGY法が注目されている^[5-4]．既に，エノンマップやローレンツアトラクタに対しては，その有効性が示され，また，レーザ発振周波数のゆらぎに対して適用し安定させたことが報告されている^[5-5]．ローレンツアトラクタは，よく知られているようにカオスとしては簡単な構造をしており，OGY法のアルゴリズムに含まれるポアンカレ断面上での周期軌道中心点の探索や鞍点まわりの状況解析も比較的容易であると考えられる．そこで，OGY法が，より複雑なカオスを示す力学系に対してもローレンツアトラクタ等と同じように簡単に適用できるのかを調べておくことは，今後，より複雑な実際のシステムに適用することを考えると価値があると思われる．ローレンツアトラクタよりも複雑なカオスに対しては，従来，ファンデルポール方程式やダフィング方程式など数値解析のみならず各種の実システムにおけるカオスの発生状況については詳しく調べられている^{[5-6] [5-7]}．しかしその制御への展開は見られない．

本研究では，ローレンツアトラクタよりも複雑な様相を示す非線形力学系の例として，水平方向に周期的外力の加わる強制振子を対象として，OGY法を適用する．まず，強制振子におけるカオス発生領域について分岐図やリアプノフ指数を用いて詳しく調べた後，OGY法で制御するために必要となる，周期軌道の目標中心点にお

ける課題などについて示す^{[5-8] [5-9]}.

5.2 観測量からの動的モデルの抽出

ローレンツアトラクタは、エノンマップやダフィング方程式のストレンジアトラクタなどとならんで有名なカオスアトラクタである。それは、流体に関するナビエーストークス方程式から導かれた以下の方程式の解を数値的に求めたものをプロットすることによって得られる。

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -a \times X + a \times Y \\ \frac{dY}{dt} &= -X \times Z + c \times X - Y \\ \frac{dZ}{dt} &= X \times Y - b \times Z\end{aligned}$$

Fig.5-1 に、 $a = 10$ 、 $b = 8/3$ 、 $c = 28$ の場合についてルンゲ・クッタ法で計算した結果をプロットしたものを示すが、対称な薄い形をしたアトラクタである。この平面に近い形をしていることが、このシステムを表現するのに必要な空間が 3 次元ではあるものの 2 次元に近く、次元数が小さいという意味で、あとで述べるように”比較的簡単な”非線形システムと言える。

実際、ローレンツアトラクタにおけるフラクタル次元を計算された結果からは、きわめて 2 次元に近い 3 次元であることが示されている^[5-10]。

さて、本研究では、空調システムがある種の非線形システムであるとして、ここで示すカオス分野の手法でその運転状態を同定したり、制御したりすることを将来的な目標としている。すなわち、はじめに微分方程式が与えられるのではなく、何

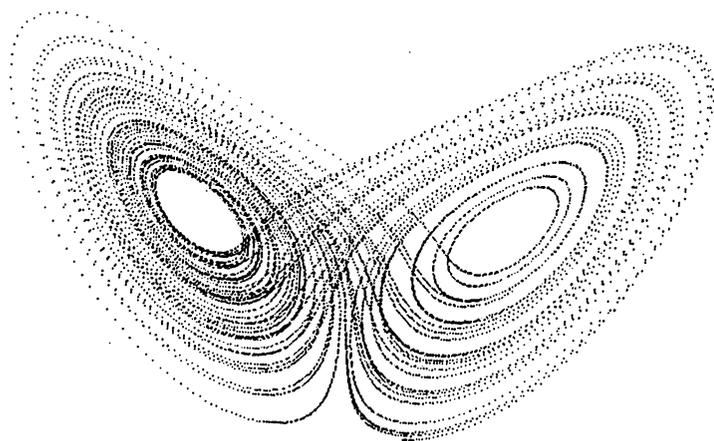


Fig.5-1 ローレンツアトラクタ

らかの時系列信号が与えられる場合に、そこからアトラクタを再構成したり、カオス性を数値的に判定する指標であるリアプノフ指数を算出することが必要となる。ここでは、まずアトラクタ形状が既知なローレンツアトラクタから得られる時系列信号を用いて、ターケンスの埋め込み定理に従って、アトラクタの再構成を実際に行った結果を示す。そして位相幾何学的に両者が同相であることを確認する。

今述べた方法に関連して、前述した快適性評価のために人間の心拍R-R間隔の時系列からターケンスの埋め込み定理によってカオス性を調べる方法が研究されており、その例を用いて、手法のイメージを Fig.5-2 に示す。同様の方法で、実システムから得られる温度や圧力などの1次元時系列信号からアトラクタが再構成できれば、それはそのシステムをアトラクタという形で同定したことになり、その幾何学的形状によってシステムの診断ができるのではないかと期待される。例示したような生体分野におけるカオスの発見、応用に関する報告が、最近、非常に多く見られるようになってきた。前述の心臓の鼓動に関連したカオスの発見とそれを健常か否かの診断に用いるという報告^[5-10]、心拍の非線形性から不安感情を評価する報告^[5-11]、など人間のメンタルな面との関わりをカオスの側面からアプローチする動きが活発である。これらのうち、神経系におけるカオスの発見は、これを（人工）ニューラルネットワークの性能向上に用いようとする研究がある。これは人間のすぐれた脳神経系をコンピュータプログラムとしてモデル化しようとする取り組みであり期待される。

さて、ローレンツアトラクタは3変数であることが既知であり、埋め込み次元数は3とした。次元が未知な一般の場合には、各種の埋め込み次元で相関次元を計算し、それが飽和する埋め込み次元数であれば対象システムを被覆できるとする方法をとる。つぎに、埋め込みの遅れ時間については、試行錯誤により $\tau = 7$ とした場合、 $\tau = 10$ とした場合の計算結果を $X(t) - X(t + \tau)$ 平面へプロットしたものを Fig.5-3 に示した。このように、先ほど薄い形状と述べたアトラクタであるが、再

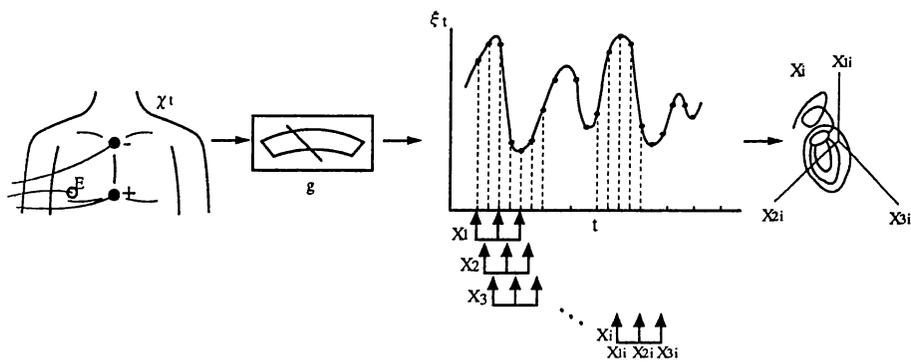


Fig.5-2 心電図R-R間隔時系列信号による
ターケンスの埋め込み定理の解釈

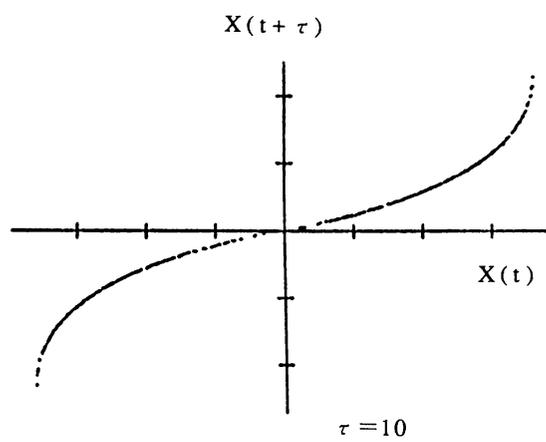
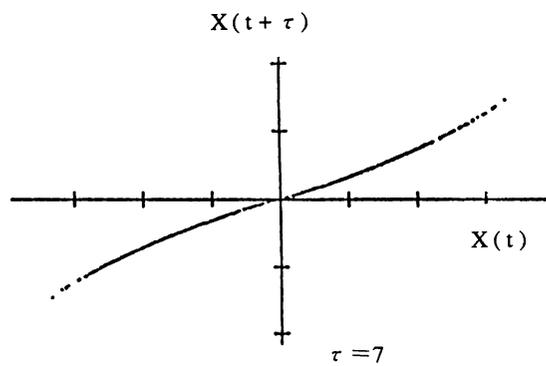


Fig.5-3 遅れ時間の影響

構成されたアトラクタ形状が $\tau = 10$ の場合にはゆがみがあり， $\tau = 7$ の場合には直線状であることが読みとれる．このことは，あとで述べるOGY法を用いた制御では，重要なポイントとなるが，ここでは，これ以上は言及しない．

さて，このようにして再構成したローレンツアトラクタの $X(t) - X(t+2\tau)$ 平面へのプロットを微分方程式を数値的に解いたものをプロットしたものとあわせて Fig.5-4 に示す．両者が幾何学的に同相であることの意味が見て取れる．

以上のようにターケンスの埋め込み定理によって非線形システムのアトラクタが再構成されることがわかったが，このような方法を実システムでなくても少し複雑な非線形システムに適用することは，その再構成されたアトラクタの複雑さからして，非常に難しいことが予想される．以下で述べるOGY制御においても，最終的には1次元の時系列信号のみから制御を行うことが狙いであるが，現時点では，ローレンツアトラクタを微分方程式から得られる数値解によって構成したのと同様にし，まず，制御対象を表現する微分方程式の数値解として得られる時系列を用いて，主として制御手法面からの検討を行うことにした．

5.3 予測不可能状態の回避のための制御法（OGY法）

従来の制御法はシステムの状態をより短い過渡時間で，与えられた目標値（安定平衡点，ポイントアトラクタ）に収束させることが目的である．すなわち対象の力学系に制御器を結合して，平衡点の全ての不安定方向を強引に安定化させる方法であった．ここで述べるOGY法は，非常に長い過渡時間を要するとしても与えられた条件をほどほどに満足するサドル型周期軌道を見つけだし，システムの状態をその近傍へ捕捉することを目的とする．相空間における摂動を周期的に加えてサドル型周期軌道の安定多様体上にシステムの状態を乗せて，周期軌道に漸近させるため，システムの構造や機能を損なわずにカオス状態を回避することが可能になる．

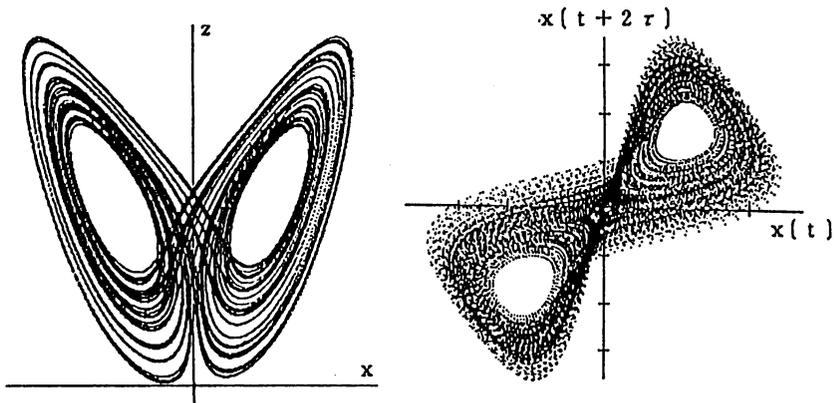


Fig.5-4 位相幾何学的に同相なアトラクタ

以下に、OGY法のアルゴリズムについてまとめておく。

- (1) ポアンカレ断面上でカオスアトラクタから任意の周期軌道を抽出，その周期軌道の中心点を探索する。
- (2) ポアンカレ断面上で周期軌道の中心点近傍の固有値，固有ベクトルを推定する。
- (3) 制御パラメータを変化させた時の周期軌道の中心点の変化量を計算する。
- (4) カオスのエルゴード性にしたがってアトラクタがポアンカレ断面を通過する時，次式により制御パラメータに摂動を与え，アトラクタを制御する。

$$\Delta P_n = \frac{\chi_u}{\chi_u - 1} \cdot \frac{\xi_n \cdot f_u}{g \cdot f_u} \quad (5-1)$$

ΔP_n ：制御パラメータに与える摂動量

χ_u ：周期軌道中心点付近の固有値

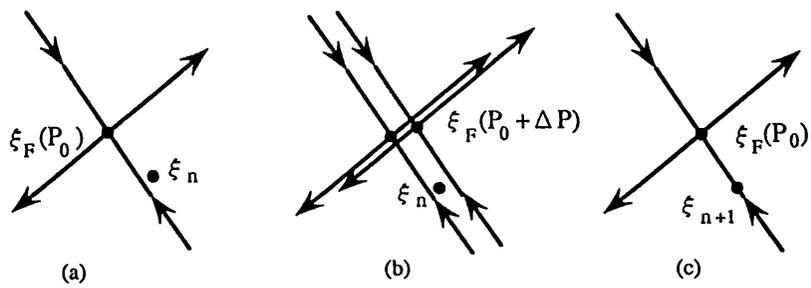
ξ_n ：周期軌道中心点を原点としたポアンカレ断面上の点の座標

f_u ：周期軌道中心点付近の写像行列の転置行列の固有ベクトル

g ：制御パラメータに摂動を与えた時の周期軌道中心点の移動量

Fig.5-5でOGY法のアルゴリズムを図式的に説明する^[5-5]。図に対応させて，OGY法のアルゴリズムは，以下のようになる。

- (1) n 回目の通過点 ξ_n は，鞍点 $\xi_F(P_0)$ 近傍を通過する。
- (2) 不安定方向に沿って鞍点を移動させるように，パラメータ P を摂動させる。



P_0 は、制御パラメータ P のある時点での値を示す。
 $\xi_F(P_0)$ は、アトラクタの鞍点で目標点である。
 矢印は、鞍点近傍における安定、不安定方向を示す。

Fig.5-5 OGY法のアプローチ

(3) (n+1) 回目の通過点 ξ_{n+1} は, 安定多様体近傍を通過する.

(4) 以上の操作を繰り返す.

OGY法の特徴としては,

- ・ システムに関する方程式など解析的な知識が不要
- ・ わずかな外力 (摂動) で制御可能
- ・ 周期軌道中心点近傍にくるまで制御されないため, 実際に制御が始まるまでの過渡時間が不定 (長い)

が考えられる.

5.4 非線形プラントにおけるカオス発生とその周期運動への制御

5.4.1 対象とする非線形プラント

ローレンツアトラクタやエノンマップよりも複雑な様相を示すカオスの例として, 本論文では, Fig.5-6 に示すような, 支点を水平方向に周期振動させるタイプの強制振動を具体的に数値計算を行う対象とした. 基礎式は, 減衰項を有するもので以下の式で表される.

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{C}{M \cdot L} \cdot \frac{d \theta}{dt} + \frac{g}{L} \sin \theta = \frac{A}{L} \omega^2 \sin \phi \cos \theta \quad (5-2)$$

A : 強制振動の振幅

ω : 強制振動の角速度 ($d \phi / d t$)

ϕ : 強制振動の位相

M : 振子の質量

L : 振子の支点から重心までの距離

θ : 振子の鉛直となす角

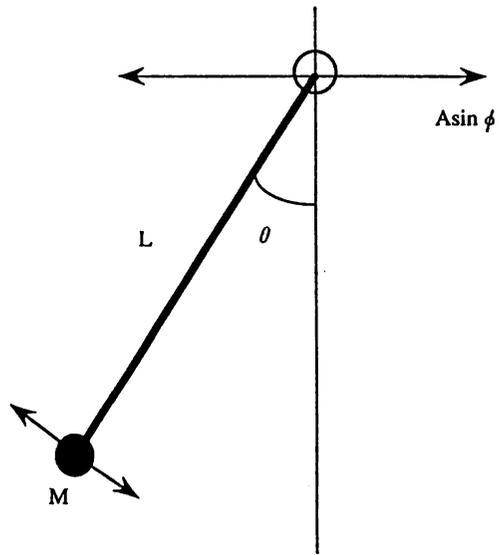


Fig.5-6 強制振動系のモデル

g : 重力加速度

C : 減衰係数

5.4.2 強制振動系のカオス

前述の強制振子の挙動をシミュレーションにて観察した。積分計算は、4次のルンゲ・クッタ法を用いた。詳しい方法は付録に述べる。まず、非線形挙動解析の基本となる分岐図を作成した。横軸としては挙動に影響しそうなものとして、

強制振動の角速度 : ω [rad/s]

強制振動の振幅 : A [m]

振子の長さ : L [m]

減衰係数 : C [N·s]

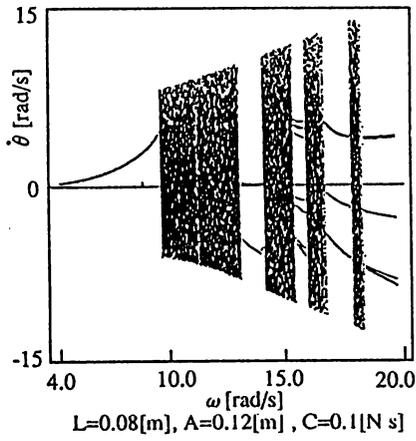
を選んだ。作成した分岐図をFig.5-7 (a)~(d)に示す。

この結果から、次にOGY法を適用していくことを考慮すれば、おおよそ以下の特徴が読み取れる。

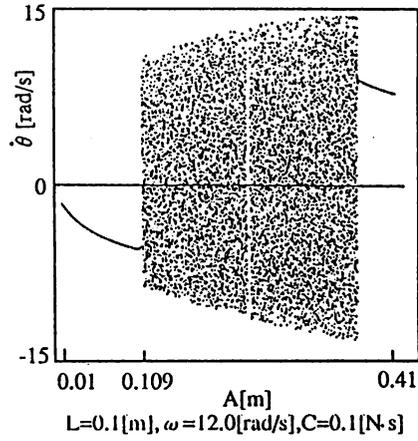
- ・ ω , L: 「カオスの窓」が多くカオスの発生と消滅に微妙な影響を与える。
- ・ A: 安定的にカオスを発生する領域がある。
- ・ C: あまり影響しない。(値によらずカオスが発生)

以上より、微妙な摂動を与える制御パラメータとしては、強制外力の周波数 ω が適当であると考え、後ほどOGY法を適用する際の制御パラメータ ΔP として使用することにした。さらに、 ω の各種の値に対するリアプノフ指数 λ の値を求め、窓の有無を調べた。Fig.5-8(a)(b)にそれぞれ $\omega = 4.0 \sim 20.0$ の場合、さらにその中の $\omega = 10.5 \sim 11.5$ の部分拡大してプロットしたものを示す。

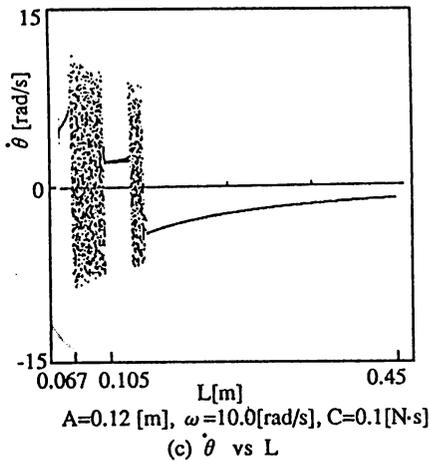
このようにして「カオスの窓」の無い ω の値の範囲を調べた。OGY法は、カオス状態のなかに存在する周期運動に対象システムを閉じ込める方法であるため、制御パラメータにわずかな摂動を与えても、窓などのカオス以外の領域の周期運動や安



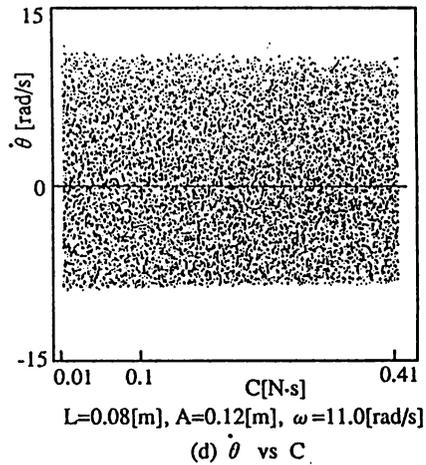
(a) $\dot{\theta}$ vs ω



(b) $\dot{\theta}$ vs A

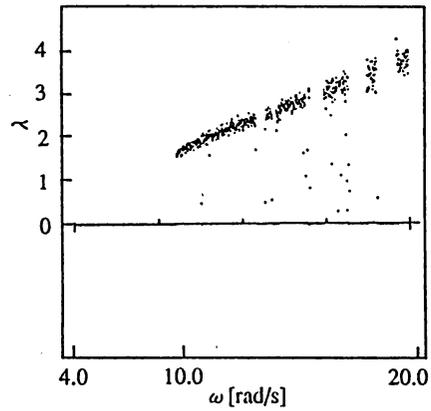


(c) $\dot{\theta}$ vs L



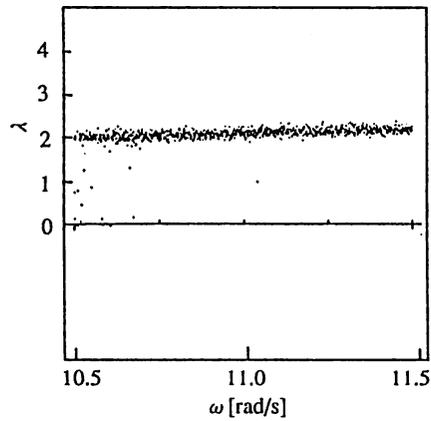
(d) $\dot{\theta}$ vs C

Fig.5-7 各パラメータに対する分岐図



$L=0.08[m]$, $A=0.12[m]$, $C=0.1[N\cdot s]$

(a) $\omega = 4.0\sim 20.0[\text{rad/s}]$



$L=0.08[m]$, $A=0.12[m]$, $C=0.1[N\cdot s]$

(b) $\omega = 10.5\sim 11.5[\text{rad/s}]$

Fig.5-8 角周波数に対するリアプノフ数

定状態に遷移せずにカオス状態を維持できるシステムであることが必要なためである。

5.4.3 周期軌道の抽出

カオスアトラクタから任意の周期軌道を抽出する方法としては、D.Auerbachらによる方法^[5-12]を採用した。そのアルゴリズムは、

- (1)抽出したい周期軌道の周期Nを定める。
- (2)ポアンカレ断面上でN回離れた二つの点がある距離 r 以内であることを求める。
- (3)それらの点が、一定距離 s 以内のものを一つのグループとしてグループ分けする。
- (4)そして、同一グループの座標の平均値をN周期の中心点とする。

ローレンツアトラクタにおいては、2周期、3周期などの周期軌道は、この方法により容易に発見できた。同じ要領で、上記の強制振子についても周期軌道の抽出を試みたが、成功しなかった。カオス性が強すぎることを考えられたので、減衰係数 C を大きくしていったが、やはり不成功に終わった。その様子を計算結果からプロットしたものをFig.5-9(a)~(d)に示す。

そこで、あまりにも複雑な状態を避けるため、分岐図をさらにくわしく作成し、カオスの発生初期の比較的カオス性の弱い領域を解析することにした。Fig.5-10(a)~(c)にそれぞれ $\omega = 10.8, 10.9, 11.0$ [rad/s] の場合について計算した結果から作成した分岐図を示す。OGY制御を行うためには、制御のためにパラメータを摂動させても、常にカオスが発生していなければならない。 ω の可変範囲として、 ± 0.1 [rad/s]程度は必要であると想定し、Fig.5-5より具体的な数値として

$$\omega = 10.9 \pm 0.1 \text{ [rad/s]}$$

$$A = 0.1255 \text{ [m]}$$

$$L = 0.08 \text{ [m]}$$

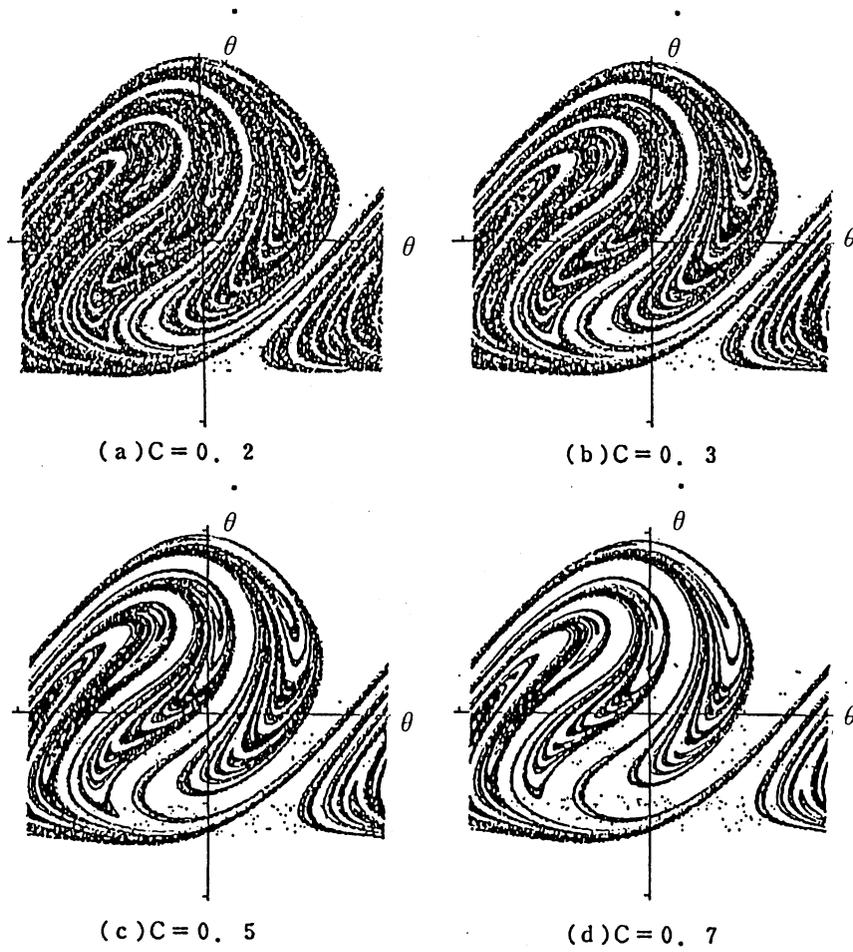


Fig.5-9 ポアンカレ断面図と減衰係数

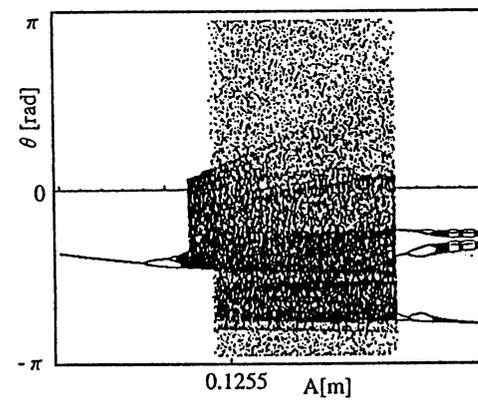
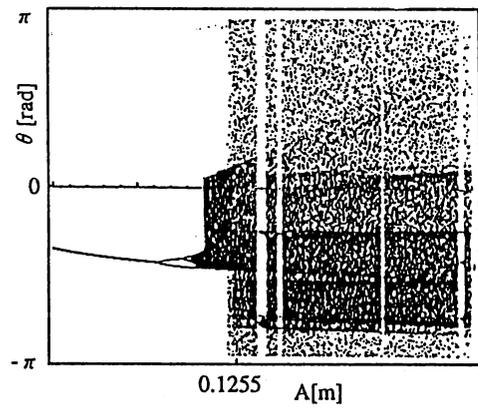
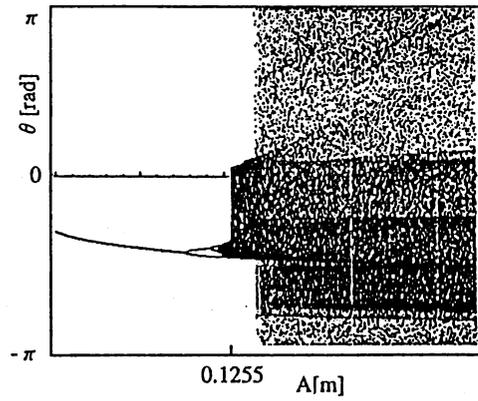
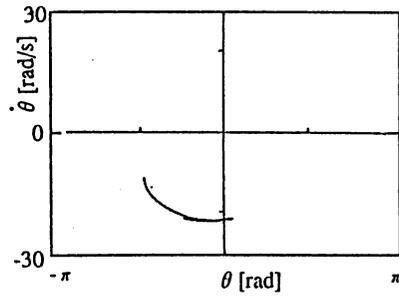
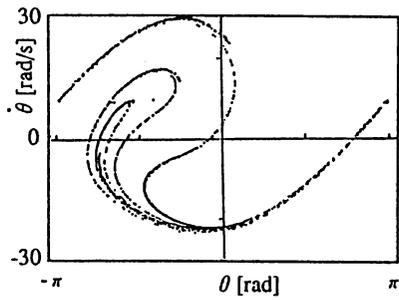


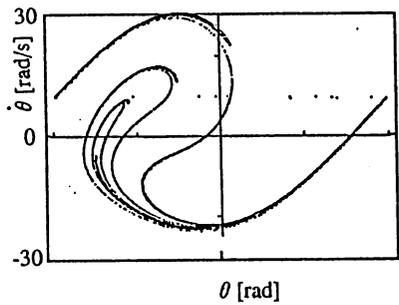
Fig.5-10 各パラメータに対する θ の分岐図



(a) $\omega = 10.8$ [rad/s]



(b) $\omega = 10.9$ [rad/s]



(c) $\omega = 11.0$ [rad/s]

Fig.5-11 角周波数に対するポアンカレ断面

$$C=4.0 \text{ [N} \cdot \text{s]}$$

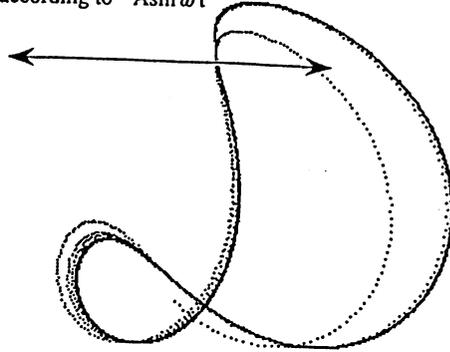
の場合のカオスについて以下で述べる OGY 制御の対象とすることにした。参考のため、Fig.5-11 (a)~(c)に、各 ω についての計算結果をプロットしたポアンカレ断面図を示す。

5.4.4 強制振動系への OGY 法の適用と課題

上記の強制振子について、OGY 法を適用した。

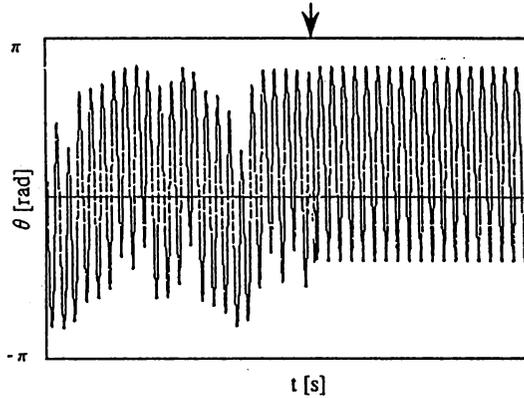
Fig.5-12 (a)(b)に、2周期軌道への OGY 制御に成功した場合の振子先端の軌跡をプロットしたもの、および制御の ON/OFF における θ の時系列を計算した結果を示す。シミュレーションによって、制御パラメータの摂動量は、 $\Delta P = 0.0005 \text{ [rad/s]}$ 程度であれば、うまく制御できることがわかった。ところで、周期軌道がうまく発見できた場合においても、制御に成功する場合としない場合とがあったが、このような違いが生じる原因について、もともと鞍点を探索する方法として用いてきた方法、つまり写像をベクトル表示してベクトルの方向が変化する部分を探す方法により考察した。そのベクトルを線で表示したものを Fig.5-13(a)(b)に示す。制御に成功した中心点付近は、安定方向と不安定方向とがほぼ直交しており、また、失敗した中心点付近では、安定方向と不安定方向のなす角度が 90° から大きく外れており、OGY 法の基本的な方法から考えても、このことが制御の可否の原因と考えられる。このような場合の対策として、ポアンカレ断面を変更して、このふたつの方向がなるべく 90° に近くなるものを探索することが考えられる。また、OGY 法はアトラクタ上の軌道が制御仕様としている周期軌道中心点近傍にくるまで具体的な制御動作、つまり ΔP の摂動を加えないため、初期状態によっては実際に制御されるまでの過渡時間が長くなることがある。これは制御の応答性からは欠点でありこの解消に向けての研究も行われている。

A pivot point is moved
according to " $A \sin \omega t$ "



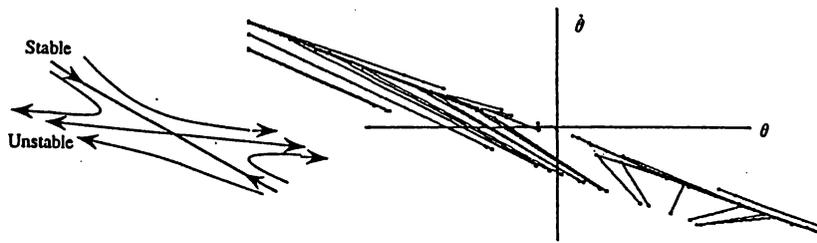
(a) OGY制御における振り先端の軌跡

Control start

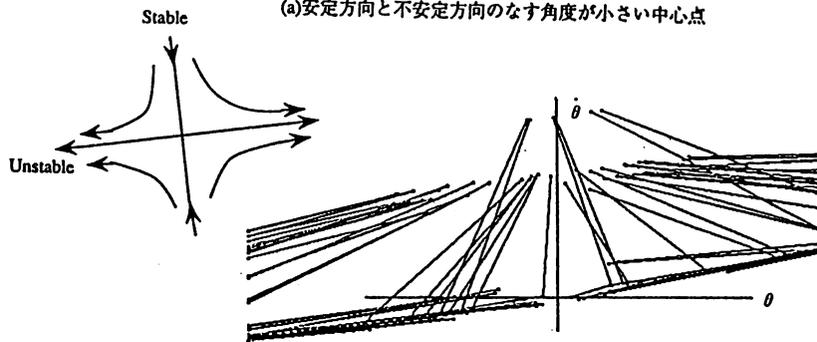


(b) OGY制御におけるθの時系列

Fig.5-12 強制振動系に対するOGY法の適用



(a)安定方向と不安定方向のなす角度が小さい中心点



(b)安定方向と不安定方向のなす角度が大きい中心点

Fig.5-13 サドル近傍での写像ベクトル

5.5 OGY制御の耐ノイズ性

すでに ω に摂動を与えた場合のOGY法について述べたが、実システムで適用する場合を考えると、いづれのパラメータを摂動するパラメータとして採用するにせよ、各々のパラメータが外部ノイズにさらされる状況下で、いかに周期軌道にシステムを捕捉し続けることができるか、という課題を検討しておく必要がある。

すでに述べた強制振り子のモデルにおける各定数（強制振動の振幅、角速度、減衰係数）、各変数（振り子の角度、角速度、強制振動の位相）にコンピュータ上で発生させる疑似乱数を用いたノイズを加えて、耐ノイズ性を調べた。ノイズは、まず非線形加法フィードバック法による乱数ジェネレータを使用して作成し、

$$0 \sim 2^{31}-1$$

の範囲の疑似乱数を発生させる。周期は

$$\text{約 } 16 \times (2^{31}-1) = \text{約 } 320 \text{億}$$

である。これは十分大きな値とみなせる。ノイズの周波数特性もフラットであることを確認して用いた。またノイズの最大値については、定数についてはノイズなしのときの値を採用した。

$$A \leq 0.1255, \quad \omega \leq 10.9, \quad C \leq 4.0$$

変数については加えることができる最大値とした。

$$\theta \leq 3.14, \quad \dot{\theta} \leq 30.0, \quad \phi \leq 3.14$$

耐ノイズ性を調べる方法としては、各定数、変数に加えるノイズを徐々に大きくしてOGY制御パラメータの変化量が可変範囲（ $\omega=0.1$ ）内に収まらなくなり制御不能となるか否かで判断した。ノイズの大きさは最大値に対するパーセント表示とした。

シミュレーションで得られた結果を Table 5-1 に示す。

パラメータ	OGY制御可能な範囲
A	± 1.0 % (± 0.001255 m)
ω	± 0.1 % (± 0.0109 rad/sec)
C	± 1.0 % (± 0.044)
θ	± 0.2 % (± 0.36°)
$\dot{\theta}$	± 21.0 % (± 6.3 rad/sec)
ϕ	± 0.2 % (± 0.36°)

Table 5 - 1 各パラメータの耐ノイズ性

Table 5 - 1に示すように、耐ノイズ性は、 θ が非常に強く、次がAとCであって他は非常に弱いという結果であった。今回、OGY制御されている軌道は、すでに図示し

たように不安定方向がほぼ θ 軸方向であり、安定方向が θ 軸方向である。このことが θ と θ の耐ノイズ性の極端な違いとなっているのではないかと類推される。これを調べるため、別の不安定周期軌道でOGY制御した場合の耐ノイズ性を検討する。

ここでは以下で示す6種類（同じ周期軌道で2種類のポアンカレ断面を用いて制御した場合1ペアを含む）の周期軌道の抽出とOGY制御に成功したものをを用いて、耐ノイズ性を調べた。周期軌道についてはたとえば2周期軌道を考えると位相面の中心に関して対称位置にもうひとつの2周期軌道が発見できた。このような場合、仮に「右側の2周期軌道」「左側の2周期軌道」などと呼んで区別することにした。今回のシミュレーションで用いたポアンカレ断面と制御した周期軌道の種類としては、

ポアンカレ断面 $\phi = 0^\circ$ では、右側の2周期軌道、右側の3周期軌道

ポアンカレ断面 $\phi = 90^\circ$ では、中央の1周期軌道、右側の2周期軌道

ポアンカレ断面 $\phi = 180^\circ$ では、左側の2周期軌道、左側の3周期軌道

であるが、すでに述べた他意ノイズ性の極端な違いを調べるためのものは、右側の2周期軌道であって、 0° と 90° のふたつを用いた。ノイズを加える方法などはすでに

述べたものと同じである。各周期軌道について θ 、 θ に対する耐ノイズ性およびそれらのなす角度については、Table 5 - 2 のようであった。

ポアンカレ断面を変えて比較した結果からは、やはり周期軌道中心点の安定方向が変化した影響が耐ノイズ性の違いとなってあらわれていると考えられる。

また、摂動するパラメータである強制振動の角速度 ω については、どの周期軌道の場合も耐ノイズ性は悪かった。制御用パラメータはわずかな摂動でシステム全体に影響を与えるような性質をもともと持っているもので、ノイズに敏感であるのは当

周期軌道	パラメータの OGY制御可能な範囲		安定多様体と不安定多様体 のなす角度
中央1周期	0.2	0.1	57°
右側2周期 ($\phi = 0^\circ$)	0.3	0.5	26°
左側2周期	0.3	0.6	25°
右側3周期	0.1	0.1	36°
左側3周期	0.1	0.1	36°
右側2周期 ($\phi = 90^\circ$)	0.6	0.1 以下	39°

Table 5 - 2 各パラメータの耐ノイズ性と鞍点での安定多様体と不安定多様体のなす角度

然かもしれない。実システムの制御にあたっては、摂動を与えるパラメータに対するノイズの混入には十分な注意が必要であることがわかった。

また、ここでは5つの異なる周期軌道を探査しOGY制御に成功したが、特に制御において、たとえば1周期軌道のものはOGY制御における吸引領域へのトラップが難しい場合があった。実験結果から言うと、耐ノイズ性の比較において強制振動の角速度以外のパラメータでは、1周期軌道における強制振動の位相の耐ノイズ性が悪かった。これは吸引領域が狭いからであって、より高次の周期軌道ではさらにせまくなっていくことが予想される。結果として、仮に高次の周期軌道中心点が発見できたとしても、その吸引領域がせまければOGY制御は非常に難しくなることが予想される。

5.6 結 言

異常時における停止回避制御において、なるべくユーザの快適性を損なわないために出力をできるだけ低下させないでシステムの発散を防ぐことを目的として、振る舞いが予測不可能なカオス状態から周期運動状態に収束させるための制御方法について基礎検討を行った。また、動的モデル化のアプローチとして、物理的考察にもとづく動的モデル化方法は現在確立されていないことを踏まえて、本研究では、現象論的、ビヘービアベースでの方法について言及した。

ローレンツアトラクタを対象として有効性が示されているOGY法について、より実際的で複雑な系である強制振子への適用を数値シミュレーションにより試み、課題の抽出を行った。

本章で得られた結果として、OGY法で強制振動のカオスが周期運動へ制御可能となるためには、複雑なカオスアトラクタにおいて所望の周期軌道をより簡単に発見する方法や周期軌道の中心点において制御できるための安定・不安定方向のなす角

度についての条件が必要になるといった課題が明らかとなった。また、実システムへのOGY制御適用に向けての各パラメータの変動やノイズに対する制御の安定性についての検討も行った結果、安定、不安定方向のなす角度が耐ノイズ性との相関を持つこと、ならびに摂動に用いたパラメータ、すなわち強制振動の角速度は、わずかな変化でシステム全体に影響を与えるかわりに耐ノイズ性という点では非常に脆いことが示された。そのため、実システムにおけるOGY制御では、摂動用パラメータに対するノイズの混入には十分に配慮する必要があることが示された。

今後の課題としては、以下のことが考えられる。

今回は調べなかったカオス性の強い領域で周期軌道や中心点の探索のための実用的な方法の検討を行う必要がある。

また、方法の特徴として、具体的な制御動作にはいるまでの過渡的な時間が不定であり、いっばんに長いものとなっている。これは制御の応答性という観点からは欠点とも考えられるため、改良が必要である。

また、カオスに関連して、ここでは扱わなかった人間の感性に関する研究については、別途、研究されており我々にとっても理想的な空調システムを考える上で最終的な評価尺度に関連するものとして興味深い。また、はじめに述べたように、実プラントから得られた時系列信号からアトラクタを再構成、対象の運転状況を同定するというアイデアについても、次なる課題として検討を行いたい。

*** 付 録 ***

(1) ポアンカレ断面 ^[5-13]

カオスで代表されるようなアトラクタの性質を解析するのに多次元空間における軌道全体を対象として取り扱うのはたいへんである。そこで、ある断面をとって、その断面上でアトラクタの交点がどのように動くかを解析する。断面との交点は、軌道が上向きに通過する時と下向きに通過する時があるが、一方だけをプロットして解析する。この断面をポアンカレ断面と呼ぶ。1周期軌道では、ポアンカレ断面上に点が1個だけ存在し、2周期軌道では2個だけ存在する。何回かの繰り返しのうちに元の点を再度通過すれば周期軌道であり、そうでなければカオスであると言える。模式図をFig.5 - A1 に示す。

(2) 分岐図 ^[5-13]

分岐図作成の手順について説明する。まず、スキャンするパラメータを選定する。たとえばここでは強制振動の各周波数 ω を選んだ。次にそのパラメータに値を入力してアトラクタを作成する。強制振り子のシミュレーションではアトラクタは強制振動の位相 ϕ 、振り子の角度 θ 、およびその角速度 $\dot{\theta}$ の3変数で各軸が構成される。次にポアンカレ断面図を作成する。たとえば ω を一定にして $\phi = 0$ の断面図を作成する。そして、パラメータを少しずつ変化させて上記の作業を行い、各パラメータごとのポアンカレ断面図を作る。

最後にパラメータを横軸にとってポアンカレ断面図を重ねていく。

ポアンカレ断面は2次元なので、 ω に対して変化する3次元の分岐図が作成できるが、通常はポアンカレ断面の1変数のみを採用して、2次元の図を作る。

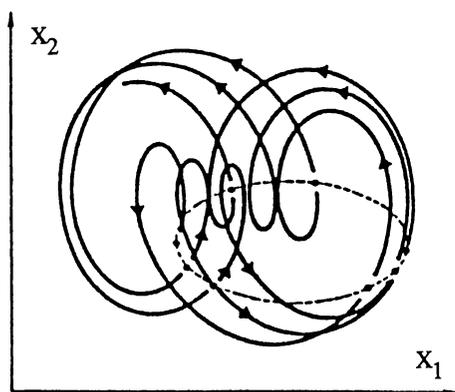


Fig.5-A1 アトラクタとポアンカレ断面の模式図

(3) ルンゲクッタ法 ^[5-13]

すでに述べたローレンツアトラクタの場合を意識して説明する。

まず、 dx/dt , dy/dt , dz/dt を x , y , z の関数として定める。

次にある時刻 t の x , y , z の値を $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ として次式の計算を行う。

$$x = x(t)$$

$$f_1 = \Delta t \times (dx/dt)$$

$$x = x + 0.5 \times f_1$$

$$f_2 = \Delta t \times (dx/dt)$$

$$x = x + 0.5 \times f_2$$

$$f_3 = \Delta t \times (dx/dt)$$

$$x = x + 0.5 \times f_3$$

$$f_4 = \Delta t \times (dx/dt)$$

$$x(t+1) = (f_1 + 2 \times (f_2 + f_3) + f_4) / 6$$

同様にして、

$$y(t+1) = (f_1 + 2 \times (f_2 + f_3) + f_4) / 6$$

$$z(t+1) = (f_1 + 2 \times (f_2 + f_3) + f_4) / 6$$

として求める。 Δt は、適当な値を設定する。

(4) 埋め込みにより再構成されたローレンツアトラクタに対するOGY制御の適用

すでにローレンツアトラクタの再構成については述べた。ここではその再構成されたアトラクタに対してOGY方を適用した結果を示す。Fig.5-A2には、再構成されたアトラクタとOGY制御によって閉じこめられた1周期軌道(実線で示す)を示す。また、Fig.5-A3には制御の有無による違いを時系列信号として比較したものを示す。

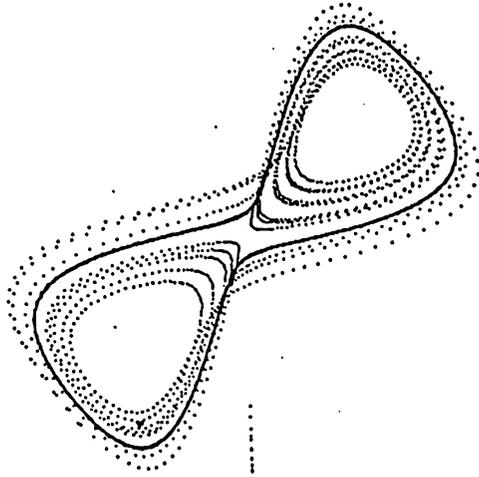


Fig.5-A2 再構成されたローレンツアトラクタにおける
OGY制御の適用

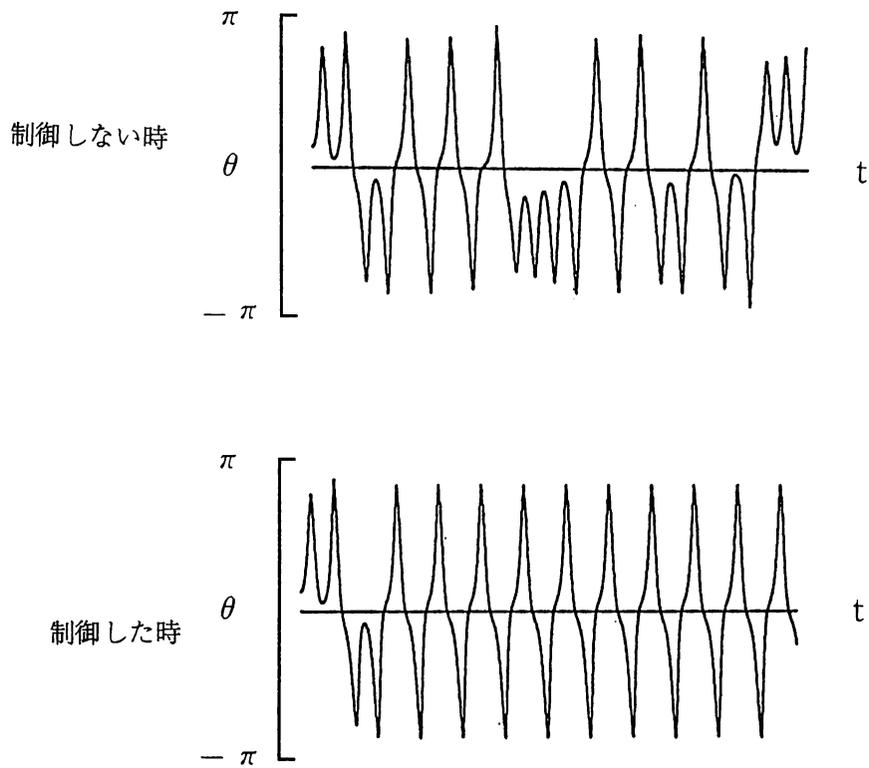


Fig.5-A3 再構成されたローレンツアトラクタにおける
OGY法の適用（時系列における比較）

(5) フラクタル次元 ^[5-13]

フラクタルの初歩的な例としてカントール集合がある。カントール集合はFig.5-A4に示すような、単位長さの線分への単純な操作の繰り返しによって生成される。その操作とは、前段階の各線分要素を3当分して中央の1/3を取り去ることである。この操作の反復数を増していくと、分離した線分要素の数は無限大になるが、それぞれの長さは0に近づく。さらに、この集合の一部を拡大してみると、その構造は拡大しないもとのものと本質的に区別がつかない。スケール変化の下での不変性というこの特徴は、自己相似性と呼ばれ多くのフラクタルに共通している。

無数の点からなり有限な長さを持つ線分とは対照的に、カントール集合は無数の点からなるが長さは0である。従って、カントール集合の次元は、1より小さいが点の有限集合の次元である0よりは大きいであろう。非整数次元の可能性には通常の線や面、立体の集合よりも高度な次元の概念が必要である。これをふまえて以下に述べる。

容量次元：集合Aの次元 $d(A)$ を定義する方法は数多くある。そのひとつが容量次元 d_c である。1次元的な図形、たとえば長さLの線分または曲線を考えよう。このような線分は一辺が ϵ の(1次元)ボックス $N(\epsilon)$ 個で覆うことができる。もしLが、この長さならば

$$N(\epsilon) = L(1/\epsilon)$$

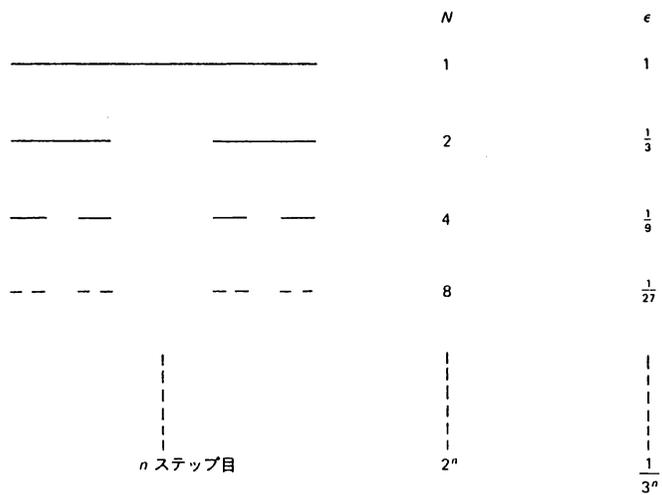
である。同様に、一辺Lの(2次元)正方形は、

$$N(\epsilon) = L^2(1/\epsilon)^2$$

個のボックスで覆うことができる。立体では現れる指数が3となる。

高次元でも同じように考えられ、一般に

$$N(\epsilon) = L^d(1/\epsilon)^d$$



$$\begin{aligned}
 d &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\log N}{\log (1/\epsilon)} \right) \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\log 2^n}{\log 3^n} \right) \\
 &= \frac{\log 2}{\log 3} < 1
 \end{aligned}$$

Fig.5-A4 カントール集合

となる。上式の対数を取ると

$$d = \frac{\log N(\epsilon)}{\log L + \log(1/\epsilon)}$$

が得られ、 ϵ の小さい極限でLを含む項が省略できるようになる。このようにして容量次元の定義は以下のようなになる。

$$d_c = \lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)}$$

これと等価な方法は、 d_c を $\log N$ 対 $\log(1/\epsilon)$ 曲線の $\epsilon \rightarrow \infty$ での傾きと見なすことである。カントール集合は容量次元 $d_c = \log 2 / \log 3 = 0.63$ である。

相関次元：実験データや高次元力学系に対しては、別の次元が容量次元よりも計算の効率がよい。それは相関次元 d_G である。多くの点が1つの集合にわたって散在しているとしよう。もし、その集合の次元が高ければ、ある与えられた点の近くの点の典型的な数は、その点からの距離につれて急激に変化する。相関次元は

$$C(R) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{N^2} \sum_{i, j=1}^N H(R - |x_i - x_j|) \right]$$

で定義される相関関数 $C(R)$ から計算される。ここで x_i, x_j はアトラクタ上の点を表し、 $H(y)$ はヘビサイド（階段）関数（ $y \geq 0$ で1、 $y < 0$ で0の値をとる）、 N はデータ点全体からランダムに選んだ点の数である。

ヘビサイド関数は単に x_i で表された点のまわりの半径 R 以内にある点の数を数えているのであり、 $C(R)$ は R 以内の点の平均的な割合を与える。

各点を中心に半径 R の円を描くと、描いた全ての円の内部にある全ての点が $C(R)$ に寄与する。集合の次元を求めるこの方法は計算機のメモリや計算時間が少

なくてすむという利点を持つ。

相関次元は、 $C(R)$ の R による変化として

$$C(R) \sim R^{d_G} \quad (R \rightarrow 0)$$

によって定義される。したがって、相関次元 d_G は、 $\log C(R)$ 対 $\log R$ のグラフの傾きである。

(6) リアプノフ指数^[1-13]

近い距離にある2点が時間の経過とともに、どう変化するかを示すものである。

最大分離方向あるいは収縮方向は、アトラクタ上の場所によって変化する性質である。その変化は軌道に沿った各点でモニタしなければならない。そこで、アトラクタ上の与えられた点に中心を持つ小さな球を定義する。その球の中心点や表面点が時間とともに移動するにつれて、球は収縮と伸長の方向に主軸を持つ楕円体になる。この楕円体の時間発展を考えてみる。主軸に沿っての平均伸長あるいは収縮率がリアプノフ指数である。

i 番目の主軸について、対応する指数は

$$\chi_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{t} \log \frac{L_i(t)}{L_i(0)} \right]$$

と定義される。 $L_i(t)$ は時間 t での楕円体の i 番目の主軸の半径である。

1次元関数では、微小時間 τ ごとに2点間の距離を

$$d_1(0) = |d_0(0)| \frac{d_0(\tau)}{|d_0(\tau)|}$$

で規格化しなおして、次式のごとく2点間の距離の比の対数を合計すれば計算できる。

$$\chi_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{n \tau} \sum_{i=0}^{n-1} \log \frac{|d_i(\tau)|}{|d_i(0)|}$$

成長率は常に*i* 番目の主軸に沿って測定するのであるが、位相空間内でその方向が固定されているわけではない。はじめごく近くにあった点でもすぐに離れてしまい、局所的な分離率や収縮率がとらえられなくなるので、定義によって示されているような計算を実行することは実際的ではない。

多次元関数では、独立したリアプノフ指数は次元の数だけ存在するが、2点間の距離が拡大縮小する方向は、時間とともに回転する。これは一般にカオスではパイコネ変換として引き伸ばし折り畳みがおこなわれ、この折り畳みのときに回転するのである。このため、リアプノフ指数を計算する方向も時間とともに回転しなければならず、そのため計算が複雑になってくる。

独立したリアプノフ指数を計算するためには、それらの軸は直交していなければならないが、回転によって軸の直交関係も崩れる。そのため軸の方向を再度直交化する必要がある。この手段として Gram-Schmidt の直交化法がある。これについては一般的な成書に委ねたい^[5-13]。

(7) カオスの窓

Fig. 5 - 7 に示す分岐図のなかで、たとえば角周波数 ω について見ると、 $\omega = 13.0 \sim 14.0$ あたりなど数カ所に稠密でない部分がある。これをカオスの窓と呼んでいる。

(8) エアコンにおけるカオス

第3章でも取り上げたコンプレッサ、電子膨張弁を使用するフロンを冷媒とする冷凍サイクルにおいてカオスが発生することがシミュレーションでの結果として報告されている。

すでに述べたようにこの種のエアコンでは、コンプレッサ周波数、膨張弁開度、室内ファン速度の制御パラメータによって得られる不安定な冷媒挙動（過熱度の変動）にカオス性が見いだされた。過熱度とは冷房の場合、室内側熱交換器出口近傍において、室内空気から吸熱することによって気化した冷媒フロンと液状冷媒フロンとが混在する場所であって、サーミスタによる検出温度も変動がはげしく、これまでは制御用検出値としては使いずらいため、間接的な検出点ではあるが安定した温度を示す四方弁出口温度やコンプレッサ出口温度を代用していた。

報告^[5-1]によると過熱度変動に関するリアプノフ指数、相関次元の計算結果から埋め込み次元が6次元において相関次元が約1.2～1.5次元という非整数値を示す。

(9) カオス理論と工学応用^[5-14]

カオスについて、数学的にはいまだ厳密な定義はない。決定論的力学系において生じる、複雑で、初期値に対する鋭敏な依存性を有する解の総称である。決定論的カオス (deterministic chaos) とも呼ばれる。

カオスは、エネルギーについての保存系、散逸系、時間についての離散系、連続系のいずれにおいても見られる非線形現象で、散逸系のカオスは、特にストレンジアトラクタと呼ばれる。

カオスが発生するために必要な最小限度の状態変数の数は、差分方程式の場合には1、微分方程式の場合には3である。

カオスの特徴づけは、以下のものによって行われている。すなわち、

- ・フラクタル構造（自己相似構造）
- ・非周期性
- ・軌道不安定性
- ・長期予測不可能性

であって、数値的には、フラクタル次元、パワースペクトル、リアプノフ指数、K S エントロピで特徴づけられる。

カオスは、流体、化学反応、神経系や循環器系などの生体システム、多重振り子、電気電子回路などで観測されている。

工学の面からカオスを扱う場合、カオスが単純な式から複雑な現象を発生させることができるという面からのアプローチと複雑な現象を取り扱う時に上記のカオスの特徴づける方法で解析していこうという面とがある。このようなカオスやその幾何学的構造を表すフラクタルと関連した工学基礎理論の構築およびその工学応用の開発を目指す学問領域をカオス工学と呼ぼうという動きがある。

第 6 章 結 論

本研究は、近年、人間の居住空間におけるアメニティが求められるなかで、空調システムの最終目標である「省エネルギー」「快適性」をねらって、空調機器の制御性能面から実証的に研究を行ったものである。空調機器は、その非線形性ゆえに物理的、数理的考察の積み上げによる熱力学的に厳密なモデルが得られていないことを踏まえて、機能階層化という観点から空調システムの知的制御の高度化に関して、特に、

- (1) 正常運転状況下における、特に非線形性補償による過渡応答性能の向上のためのデータ駆動型制御系、
 - (2) 同じく正常運転状況下における設置環境やユーザーニーズへの柔軟性のある制御を目的としたルール駆動型階層構造制御系、
- さらに適応性を高めるために、
- (3) 運転状況の異常を監視／診断／復旧するため、特に診断のための基本的な静的モデルの提案とそれを用いたモデル（知識）ベース型診断方法、
 - (4) 現象論的ビヘービアベースドアプローチによる非線形システムの動的モデルのカオスアトラクタとしての抽出とその予測不可能なカオス状態から周期運動への制御、

について、しだいに適応性、柔軟性が高まる方向、すなわち知的制御の高度化に向けての研究を進めてきた。以上のような階層構造における機能を整理すると最も物

理的な現象に近い機能階層であるデータ駆動型の制御系のレベルから，もっとも抽象的な機能階層に近いモデル駆動型の制御系へとしだいに研究を展開してきたと考えることができる。

今後，より一層ユーザの快適性を高めること，あるいは故障回復におけるサービスの意志決定などへと研究の対象を拡大していく場合，このような複雑な問題の枠組みに対する考え方を整理した上で解決へのアプローチに入ることが重要である。以上のような機能階層の考え方に加えて，マンマシンシステムでは，それぞれの役割分担をいかに行うか，といった協調に関する検討など，多くの研究要素があると考えられる。これらを今後の課題として研究を進めていきたい。

以下，本研究において得られた結論を各章ごとに整理しておく。

第 2 章では，従来扱われてきた制御系と同じ機能レベルにあるデータ駆動型制御系について，正常運転状況下における過渡応答性能の向上を検討した。吸収式冷水機の省エネルギー性や快適性（負荷変動に対する応答性）の向上を目的として，制御系へのファジィ推論の応用を検討した。PID制御系を比較の対象として，駆動熱源の非線形特性を知識として利用した多入力ファジィ制御系を構成し，100冷凍トン二重効用吸収式冷水機を用いて実験により比較した結果，提案した多入力ファジィ制御系は，特に，大きな負荷変動や起動特性において，エネルギー消費や整定時間において優れていることを実証した。その結果，従来は定常運転条件におけるチューニングでとどまっていた制御系を動特性を含めた最適制御系へと進展させることができた。

第 3 章では，制御の目的に依存して変化する制御系について，その目的解釈のための機能レベルを上位スーパーバイザ階層として持つ制御系について，正常運転状況下における，設置環境やユーザニーズへの適応性能の向上を検討した。まず，特性が設置環境に依存するパッケージエアコンの動作を安定に保つよう，適応的に動作

するルール駆動型制御系を提案し、実験により効果を確認した。次に、省エネルギー性と負荷変動に対する応答性を制御目標とした吸収式冷凍機について、前段で省エネルギー性、快適性（負荷変動への追従性）のいずれを重視するかを容易に変更できるような階層構造化を提案した。ここでは、空調機器の最適化が、機器単体にはとどまらず、人間を含めたシステムとしての取り扱いを必要とすることが示唆された。この観点が、次章の監視制御システムにおける設計を考えるうえで、対象とする問題全体を取り扱う枠組みづくりに大きな影響を与えた。

第4章では、運転状況の異常を監視／診断／復旧するため、未経験な異常の状況に対応するための知識（静的モデル）を用いた診断方法について検討した。Rasmussenの人間の行為に関する3階層モデルのなかで示される最上位の抽象度を持つレベルである知識（モデル）ベース行動のために、吸収冷凍機を対象とし、モデルを用いたコンパクトな監視／診断システムを提案し、実験により効果を確認した。定性的な知識をベースとして、部分負荷、外部冷却水温度など、各種の運転条件下での実験データから、ある程度の線形関係を発見し、これを静的な数式モデルとして採用した。その結果、知識ベースの特長でもあるオペレータが未経験な状況にも対応できる診断システムが、膨大なプロダクションルールを持つことなく実現できた。具体的には、まず、吸収式冷温水機の異常の原因を分類、各原因の兆候を診断するために、定性的知識にもとづき、構成要素である複数の熱交換器に着目、実用性の高い温度情報を主体とした判定指標を採用した。次に一例として、故障原因のひとつである「冷却水流量不足」の直接的な判定指標である冷却水流量を監視／診断にとって必要十分な精度で推定する方法について示した。これらに対する判定指標としては、熱交換器の各種運転条件における対数平均温度の正常値との比を「異常度」と定義し、これにより故障の検出と徐々に進行する故障の程度の診断を行なう新しい故障診断方法を提案、実証した。また、同じ熱交換器の異常度に影響を与えるという意味での複合異常についても偏相関により影響を算出できることを示し

た。

第 5 章では、動的モデル化とそれを用いた診断に続く停止回避制御のための将来的な方法として、カオス理論を応用したアプローチ、特に非線形システムの予測不可能なカオス状態から周期運動への制御方法について検討した。この分野は、実際の空調システムへの応用に必ずしも至っていない。本分野の研究の最終的な目標として、非線形システムにおける、たとえば温度時系列から再構成されるアトラクタの幾何学的形状などを動的モデルとして用いて、当該システムの状態（健全度）を診断する方法およびその場合の停止回避制御を想定している。従来制御法による安定化制御に比べると周期運動状態であれば、いくらかでも冷凍能力の低下を抑制したうえで停止回避ができると考えられる。ここでは非線形性を示す基本的プラントである強制振動系を対象として、OGY法の制御手法としての可能性を検討した。まず、当該非線形プラントが安定状態、周期振動状態、あるいはカオス性を有する状態かを分岐図やポアンカレ断面図の作成によって判定する方法を示した。さらにそのカオスを所望の周期軌道に閉じ込める新しい制御方法、OGY制御を適用してその複雑な系における課題を示した。その結果、空調システムの運転状態の診断と停止回避制御のための方法として、新しい方向付けができたと考えられる。

参考文献

第 1 章

- [1-1] 岩井ほか : RC106 「プラントエンジニアリングにおける知的統合システム化研究分科会」報告書, 日本機械学会 (1993)
- [1-2] 中原, Yingxin Zhu : 空調システムの動的シミュレーションの動向とその意義, 空気調和・衛生工学, Vol.68, No.3, pp.161 (1994)
- [1-3] Salidus, G.N. et al : Foundations of the theory of intelligent controls ; Proceedings IEEE Workshop on Intelligent Control , pp. 23 (1985)
- [1-4] Albus, J.S. et al : Hierarchical control for robots and teleoperators ; Proceedings IEEE Workshop on Intelligent Control , pp. 39 (1985)
- [1-5] Rasmussen, J : インタフェースの認知工学, 啓学出版 (1990)
- [1-6] Zadeh, L.A. : The Concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning , Information science ; Vol.8 , pp.199 (1975)
- [1-7] Mamdani, E.H. and Assilian, S. : An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller ; International journal of man-machine studies, Vol.1, No.7, pp.1 (1974)
- [1-8] 渡部, 安田, 松村, 岩井 : フライス加工に対する拘束形適応制御システムの制御特性に関する研究 ; 日本機械学会論文集 Vol.49 No.447 C編 , pp.1999 (1983)
- [1-9] 香田, 村尾 : 非有界な不変密度を有する $1/f$ 雑音の時系列解析 ; 電信学誌 Vol.J69-A No.6, pp.714 (1986)

- [1-10] 藤原, 源野, 河田: 心電図R-R間隔のカオス解析; 信学技報, MBE93-99, pp.47 (1993)
- [1-11] たとえば 長島, 馬場: カオス入門, 培風館 (1992)
- [1-12] 井上, 横山, 幸田: ニューラルネットによるプラントの同定と最適制御のシンセシス; RC106研究成果報告書, 日本機械学会, pp.325 (1993)
- [1-13] E.Ott, C.Grebogi, J.Yorke: Controlling Chaos; *Phys.Rev.Let*, 64, pp.1196. (1990)

第2章

- [2-1] 樋笠, 松村: 電力供給における需要変動とその平準化; システム制御情報, Vol.36, No11, pp.714 (1992)
- [2-2] 島田, 川田: 都市ガス供給における需要変動とその平準化; システム制御情報 Vol.36, No11, pp.722 (1992)
- [2-3] 足立, 川田, 増淵: バッチ式フェノール重合反応器のモデリングと制御; システム制御情報学会論文誌, Vol.6, No.1, pp.19 (1993)
- [2-4] 花熊: 連続プロセス制御の現状と課題; 化学工学, Vol.57, No.5, pp.332 (1993)
- [2-5] 人見, 小川, 前川, 有馬: ファジィ理論を用いたガス吸収式冷温水機制御; *Proceedings of 6th Fuzzy System Symposium*, pp.373 (1990)
- [2-6] 桂川: P I Dコントローラのオートチューニング, オートメーション; Vol.35, No.4, pp.70, 日刊工業新聞社 (1990)
- [2-7] 須田ほか: P I D制御; システム制御情報ライブラリー6, 朝倉書店
- [2-8] 太田, 福本: ゲインスケジューリング形適応制御の応用; システムと制御, Vol.27, No.5, pp.335 (1983)
- [2-9] 藤原: P I D調節器で構成された多変数制御系の調節法; システムと制御, Vol.27, No.5, pp.295 (1983)

- [2-10] 廣田：ファジィシステム, (社)計測自動制御学会, pp.88 (1990)
- [2-11] 安信ほか：Fuzzy 制御による列車定位置停止制御；計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.11, pp.873
- [2-12] 佐竹ほか：適応形ファジィコントローラによる雨水ポンプの協調制御；電気学会論文誌C編, 109-C, No.5, pp.361 (1990)

第3章

- [3-1] 須田ほか：PID制御；システム制御情報ライブラリー6, 朝倉書店
- [3-2] 米田ほか：ファジィによる圧縮機吐出温度の制御；日本冷凍協会学術講演会, 日本冷凍協会, pp.145 (1991)
- [3-3] 人見, 小川, 前川, 有馬：ファジィ理論を用いたガス吸収式冷温水機制御；Proceedings of 6th Fuzzy System Symposium, pp.373 (1990)
- [3-4] J. Rasmussen：インタフェースの認知工学, 啓学出版 (1990)
- [3-5] 安田, 小川, 小澤, 人見, 前川：吸収式冷温水機の制御系についての一検討；Proceedings of the Fourth Intelligent FA Symposium, pp.117, ISCIE (1993)

第4章

- [4-1] 柴田ほか：設備診断システムの開発；空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.993 (1990)
- [4-2] 日経インテリジェントシステム, 1993.1.11, 日経BP社 (1993)
- [4-3] 日経インテリジェントシステム別冊, 1992 Autumn, 日経BP社 (1992)
- [4-4] 黒木, 安田ほか：吸収式冷温水機の故障診断システム；日本機械学会IIP'93講演論文集, pp.84 (1993)
- [4-5] 小澤, 安田ほか：吸収式冷温水機の故障診断システム；日本機械学会第3回FANシンポジウム講演論文集, pp.89 (1993)

- [4-6] 水上, 安田ほか：吸収式冷温水機の故障診断システム；
日本機械学会全国大会講演論文集Vol.E, pp.616 (1993)
- [4-7] 安田, 小川, 小澤ほか：吸収式冷温水機のファジィ制御系に関する実験的検討
システム制御情報学会論文誌, Vol.6, No.10, pp.471 (1993)
- [4-8] 藤居, 西口, 福島, 大内, 功刀, 相沢：吸収冷温水機の動特性解析（第1報,
蒸発器と吸収器の動特性モデル）；日本機械学会論文集B編, 60巻, 572号,
pp.318 (1994)

第5章

- [5-1] 西村, 伊藤, 鳥越：遺伝的アルゴリズムとカオス理論を用いたマルチエアコン
の冷媒流量制御；第28回空気調和冷凍連合講演会, pp.25 (1994)
- [5-2] T.Kameda, K.Aihara : Control of Chaotic Dynamical Systems with TDOF
Controllers; 信学, NLP91-36, (1991), pp.37.
- [5-3] Tom.T.Hartley , Faramarz Mossayebi : A Classical Approach to Controlling
The Lorenz Equations ; *Bifurcation and Chaos*, 2-4 (1992), pp.881.
- [5-4] Edward Ott, Celso Grebogi, James A.Yorke : Controlling Chaos ; *Phys.Rev.Let*,
64 (1990), pp.1196.
- [5-5] Mingzhou Ding, J.A.Scott Kelso: *Controlling Chaos "A Selection Mechanism
For Neural Information Processing?"*, (1991), pp.17, World Scientific.
- [5-6] Y.Ueda : Survey of Regular and Chaotic Phenomina in the Forced Duffing
Oscillator; *Chaos, Solitons & Fractal*, 1-3 (1991), pp.199.
- [5-7] M.Kitano: Chaos and Period-Doubling Bifurcations in a Simple Acoustic System
Phys.Rev.Let, 50, (1983), pp.713.
- [5-8] 市川, 小川, 人見, 安田：強制振子におけるカオスと制御；
Proc.37th.Conf. ISCIE, (1993), pp.485.

- [5-9] 小川, 市川, 人見, 安田: 強制振子のOGY制御; 第36回自動制御連合講演会, (1993), pp.167
- [5-10] R.G.Turcott, M.C.Teich : Long-duration correlation and attractor topology of the heartbeat rate differ for healthy patients and those with heart failure ; SPIE, Proc.2036"Chaos in Biology and Medicine" , pp.22 , 1993
- [5-11] J.F.Thayer , B.H.Friedman : Assessment of anxiety using heart rate nonlinear dynamics ; SPIE, Proc.2036"Chaos in Biology and Medicine", pp.42, 1993
- [5-12] D.Auerbach , P.Cvitanovic, J.P.Eckmann, G.Gunaratne and I.Procaccia : Exploring Chaotic Motion Through Periodic Orbits; *Phys.Rev.Let.*, 58 (1987), pp.2387.
- [5-13] たとえば 長島, 馬場: カオス入門, 培風館 (1992)
- [5-14] 合原, 徳永: カオス応用戦略, オーム社 (1993)

~~~~~

## 著者発表論文

~~~~~

【学術論文】

- (1) 安田, 小川, 人見, 小澤, 前川「吸収式冷温水機のファジィ制御系に関する実験的検討」システム制御情報学会誌 Vol.37 No.10 1993.10
- (2) 安田, 小川, 市川, 鈴木, 大隅「強制振り子のカオスとOGY制御」日本機械学会論文集 Vol.60 No.572 C編 1994.4
- (3) 安田, 小澤, 小川, 川合, 鈴木, 大隅「空調機器の非線形性補償のための制御系に関する実験的研究」空気調和衛生工学会論文集 No.55 1994.6
- (4) 渡部, 安田, 松村, 岩井「フライス加工に対する拘束形適応制御システムの制御特性に関する研究」日本機械学会論文集 Vol.49 No.447 C編 1983.11
- (5) 小澤, 安田, 小川, 黒木, 水上, 古川
「吸収冷温水機の故障診断システム」日本機械学会, 投稿中
- (6) 小川, 安田, 小澤, 市川, 塚本
「強制振り子のOGY制御」電子情報通信学会, 投稿予定

【国際学会講演論文】

- (1) Yasuda M., Ozawa Y., Ogawa A., Hitomi K., Suzuki R., Tsukamoto K. ;
Multi-input Fuzzy Control Systems for Automating Airconditioning Devices,
ASME, SCI, JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION
(1994)

【著書】

- (1) 計測自動制御学会編 (共著) ; ニューロファジィAIハンドブック, オーム社
1994

【国内学会講演論文】

- (1) 小川, 安田他, 「ニューラルネットワークによる生活パターン学習」
第2回知能システム(FAN)シンポジウム, 日本機械学会, 1992
- (2) 川合, 安田他, 「パッケージエアコンにおける冷媒流量のファジィ制御」
第2回知能システム(FAN)シンポジウム, 日本機械学会, 1992
- (3) 市川, 安田他, 「強制振子におけるカオスと制御」
第37回システム制御情報学会学術講演発表会,
システム制御情報学会, 1993
- (4) 川合, 安田他, 「パッケージエアコンにおける冷媒流量のファジィ制御」
第37回システム制御情報学会学術講演発表会,
システム制御情報学会, 1993
- (5) 安田他, 「吸収式冷温水機の制御系に関する一検討」
第4回インテリジェントFAシンポジウム,
システム制御情報学会, 1993
- (6) 川合, 安田他, 「パッケージエアコンにおける冷媒流量のファジィ制御」
Dynamic & Design Conf.93, 日本機械学会, 1993
- (7) 黒木, 安田他, 「吸収式冷温水機の故障診断システム」
IIP93情報・知能・精密機器部門講演会, 日本機械学会, 1993
- (8) 川合, 安田他, 「パッケージエアコンにおけるファジィ冷媒制御(第2報)」
第3回知能システム(FAN)シンポジウム, 日本機械学会, 1993
- (9) 小澤, 安田他, 「吸収式冷温水機の故障診断システム」
第3回知能システム(FAN)シンポジウム, 日本機械学会, 1993
- (10) 水上, 安田他, 「吸収式冷温水機の故障診断システム」
第71期全国大会, 日本機械学会, 1993

- (11) 安田他, 「吸収式冷温水機が多入力ファジィ制御」
第36回自動制御連合講演会, 計測自動制御学会, 1993
- (12) 小川, 安田他, 「強制振子のOGY制御」
第36回自動制御連合講演会, 計測自動制御学会, 1993
- (13) 安田他, 「吸収式冷温水機用故障診断システム」
日本機械学会研究分科会RC123シンポジウム, 1994
- (14) 市川, 安田他, 「強制振り子のOGY制御シミュレーション」
第38回システム制御情報学会学術講演発表会,
システム制御情報学会, 1994
- (15) 安田他, 「吸収冷凍機における運転状態モデルと故障診断」
第38回システム制御情報学会学術講演発表会,
システム制御情報学会, 1994
- (16) 小川, 安田他, 「強制振り子のOGY制御」
ロボティクスメカトロニクス講演会, 日本機械学会, 1994