

地域冷暖房システムの熱負荷予測と
短期・長期最適運転計画に関する研究

2011年3月

石丸 恵一

目次

| | |
|---|-----------|
| 1. 序論 | 1 |
| 1.1. 背景と目的 | 1 |
| 1.2. 論文の構成 | 4 |
| 2. 地域冷暖房システムのデータ特性を考慮したニューラルネットワークによる熱負荷予測 | 7 |
| 2.1. はじめに | 7 |
| 2.2. 地域冷暖房プラントにおける熱負荷データの特徴 | 9 |
| 2.2.1. 熱負荷データの特徴 | 9 |
| 2.2.2. 1週間分の熱負荷データ | 9 |
| 2.3. 階層型ニューラルネットワークによる熱負荷予測 | 11 |
| 2.4. データ特性を考慮したリカレントニューラルネットワークによる熱負荷予測 | 14 |
| 2.4.1. データ特性を考慮したリカレントニューラルネットワーク | 14 |
| 2.4.2. エポックごと通時的逆伝播法 | 16 |
| 2.5. 数値例 | 17 |
| 2.6. おわりに | 19 |
| 3. 契約違反を考慮した地域冷暖房プラントの短期運転計画 | 23 |
| 3.1. はじめに | 23 |
| 3.2. 地域冷暖房プラントの短期運転計画 | 24 |
| 3.2.1. プラント構成 | 24 |
| 3.2.2. ガス・電力会社との契約 | 25 |
| 3.2.3. 運転計画問題の定式化 | 27 |
| 3.3. 戦略的振動タブー探索法による短期運転計画 | 34 |
| 3.3.1. タブー探索法 | 35 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.2. | タブーリストの構成 | 36 |
| 3.3.3. | 戦略的振動タブー探索法による運転計画 | 39 |
| 3.4. | 数値例 | 42 |
| 3.5. | おわりに | 43 |
| 4. | 契約違反を考慮した地域冷暖房プラントの多目的短期運転計画 | 45 |
| 4.1. | はじめに | 45 |
| 4.2. | 多目的短期運転計画問題の定式化 | 45 |
| 4.3. | 対話型ファジィ満足化手法 | 46 |
| 4.4. | 数値例 | 51 |
| 4.5. | おわりに | 52 |
| 5. | 契約違反を考慮した地域冷暖房プラントの長期運転計画 | 55 |
| 5.1. | はじめに | 55 |
| 5.2. | 地域冷暖房プラントの運転計画 | 56 |
| 5.2.1. | プラント構成 | 56 |
| 5.2.2. | 運転計画問題の定式化 | 56 |
| 5.2.3. | 契約違反を考慮した長期運転計画 | 62 |
| 5.3. | 数値例 | 65 |
| 5.4. | おわりに | 67 |
| 6. | 負荷の連続性と運転の継続性を考慮した地域冷暖房システムの実用的短期運転計画 | 69 |
| 6.1. | はじめに | 69 |
| 6.2. | 熱負荷の予測 | 70 |
| 6.3. | 運転計画対象 | 73 |
| 6.4. | 運転計画問題の定式化 | 74 |
| 6.5. | 可能な運転組合せとコストのモデル化 | 75 |
| 6.6. | 運転計画の機器切り替えの考慮 | 77 |
| 6.6.1. | 切替コストのモデル化 | 78 |
| 6.6.2. | 比較対象（実プラント）の運転 | 78 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 6.6.3. 定常運転コストのみの最適化結果 | 79 |
| 6.6.4. 切替最短時間の考慮結果 | 80 |
| 6.6.5. 切替コスト考慮案 I | 81 |
| 6.6.6. 切替コスト考慮案 II | 81 |
| 6.6.7. 切替コスト考慮案 III | 82 |
| 6.6.8. 切替コスト考慮案 IV | 84 |
| 6.6.9. 切替コスト考慮案 V | 84 |
| 6.7. 検証 | 85 |
| 6.8. おわりに | 86 |
| 7. 結 論 | 87 |
| 謝辞 | 91 |
| 参考文献 | 93 |
| 引用既発表論文 | 101 |

第1章

序 論

1.1. 背景と目的

人や施設が密集する都市部を中心に、環境保全、省エネルギー、省スペースを目的として、地域冷暖房 (District Heating and Cooling: DHC) システムの導入が進められている。地域冷暖房システムは地域の冷暖房用の熱源設備を集約し、効率化を図る目的で、冷暖房に利用する熱エネルギーを冷水、蒸気、温水等の形で生成し、地域の各施設にパイプラインを通じ循環供給するシステムである。このシステムの導入により、各施設で個別に熱源設備を用意する必要がなくなるため、初期コストの削減やスペースの有効活用ができる。また、熱源設備への大規模な投資ができるため、高効率で安定的な冷暖房が可能になる。

従来、地域冷暖房プラントでは、高効率化、省エネルギー化、CO₂削減等のため、大小複数の熱源機器を導入し、さらに深夜電力を利用した蓄熱システムや、コージェネレーションシステム（発電時に出る廃熱を地域供給用の蒸気として有効利用するシステム）等の導入を進めきた。複雑化するプラントを高効率に運用するには、オペレータの勘と経験に加え、プラントの運転管理を支援するシステムの重要性が高くなってきている。

地域冷暖房プラントには、起動時間の長い、大型の冷凍機やボイラ等の熱源機器が含まれており、システムの効率的な運用のためには、熱負荷の予測値に基づき、稼働させる最適な熱源機器の組合せを決定し、熱源機器の起動時間を考慮して運転管理することが望ましい。そのため、地域冷暖房プラントの熱負荷の予測手法および、予測負荷に応じた熱源機器の最適な運転計画の立案方法が、地域冷暖房プラントの運転支援システムの基本技術となる。

これまでに地域冷暖房システムに対する負荷予測手法として、時系列解析

(ARIMA モデル) [57], カルマンフィルタ [60], 重回帰分析 [12], ファジィ推論 [56], ニューラル・ネットワーク [8] などを用いた手法が提案されてきた. これらの研究は, 各時点での運転支援向けに 30 分~2 時間先の負荷予測を対象としたものと, 運転計画支援向けに翌日一日分の負荷予測を対象とするものの 2 種類に分類される. 蓄熱槽等を含む熱源システムを効率よく運転するためには後者が, 計画外の状況が発生した際などその時々状況に応じた最適な運転方法を決める際には前者が重要になる.

近年, 地域冷暖房システムにおける熱負荷予測手法の発展 [19, 37, 38, 43, 44, 16, 12, 20, 49] とともに高い精度の熱負荷予測が可能となっており, 地域冷暖房プラントの運転計画問題の数理計画問題としての定式化及びその最適化に対する期待が高まっている [21]. 本論文で考察の対象とするプラントでは, まず翌日の 0 時 ~ 23 時の冷水, 温水及び蒸気の 1 時間ごとの熱負荷予測値を求め, それらに基づいて実行可能かつできるだけ低コストの翌日の運転計画を立案することが求められている.

伊東ら [14, 58] は, 従来の地域冷暖房プラントと同様なコジェネレーションシステムにおけるプラントの運転計画問題を数理計画問題として定式化し, 数理計画法により最適運転計画が求められることを示している. 彼らの手法では, 1 時間ごとの運転計画問題を混合 0-1 計画問題として定式化し, 列挙に基づく解法により 1 時間分の最適運転計画を求め, それらをつなぎあわせて 1 日の運転計画としていた.

しかし, 現実のプラントにおいては, 機器の起動・停止に伴う費用や夜間電力の使用などを考慮する必要があるため, 数時間分をまとめて最適化した運転計画が望ましいと考えられる. このような観点から, 坂和ら [46, 54] は, 従来の地域冷暖房プラントに対して, 数時間分の機器の切り替えを考慮した運転計画問題を混合 0-1 計画問題として定式化するとともに, 遺伝的アルゴリズム [35] を用いた近似解法を提案し, その有効性を示している. また, 彼らは文献 [45, 33, 53] において, より現実の運用状況を反映させるために非線形 0-1 計画問題として再定式化するとともに, 遺伝的アルゴリズムによる解法を提案し, 実用的な計算時間で低コストで切り替え回数が少ない自然な運転計画が求められることを示している. さらに, 坂和ら [47] は, より大規模なプラントに対応

するために、地域冷暖房プラントの数時間分の運転計画問題を混合整数計画問題として定式化し、遺伝的アルゴリズムを用いた近似解法を提案してその有効性を示している。

これらの地域冷暖房システムの最適運転計画において用いられてきた熱負荷予測手法 [19, 37, 38, 43, 44, 16] は、主として階層型ニューラルネットワークに基づいていたが、現実の運用において、1日の平均熱負荷が増加傾向または減少傾向にある期間の非定常な熱負荷の予測において精度が低下するという問題点が指摘されている。このような問題点に対処するため、近年、坂和ら [39, 16] は、熱負荷のデータ特性を考慮したリカレントニューラルネットワークによる予測手法を提案し、予測精度の向上を試みて良好な結果を得ている。

このような予測手法の開発の下で、これまで考察してきた機器の燃料費のみならず、ガス会社や電力会社との契約違反に伴うペナルティをも考慮することが望まれてきた。すなわち、従来の運転計画問題ではガス会社および電力会社との契約は従量料金契約のみが考慮されているが、実際の地域冷暖房プラント運用会社は、ガス会社および電力会社と従量料金契約以外の契約も結んでいるため、地域冷暖房プラントの運転計画を考える上で、機器の燃料費だけではなく、契約違反に伴うペナルティも考慮する必要がある。このような要望に応えるため、契約違反に伴うペナルティを考慮した運転計画問題の定式化がなされ、戦略的振動に基づくタブー探索法 [7] による最適運転計画手法が提案され、実プラントのデータに基づく有用性の検証が行われた [17]。

さらに、現実のプラント運用においては、運転費用（燃料費＋ペナルティ）の最小化のみならず、環境保全のため一次エネルギー量の最小化も目指さなければならないという状況を考慮することを可能とならしめるため、坂和ら [40, 41] はこのような2目的運転計画問題を2目的非線形整数計画問題として定式化した後、各目的関数に対する意思決定者の判断のあいまい性を考慮するためのファジィ目標を導入し、各ファジィ目標に対する意思決定者の志望水準を表す基準メンバシップ値を対話的に更新しながら意思決定者の満足解を導出するという戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法を提案し、実データに基づく有効性を示した。さらに、彼らは実際のプラント運用会社がガス会社および電力会社と従量料金契約以外の契約も結んでい

るという観点から、契約違反に伴うペナルティを考慮した定式化をするとともに、比較的短期（1ヶ月）の運転計画の立案について考察している。

しかし、現実のプラント運用においては1日や1ヶ月という短期間ではなく、より長期の運転計画（年間）を立案することが求められる。しかも、現実のプラント運用を考えると実用的な時間での最適化を行うことも必要になる。このような観点から、坂和ら [42] は、実プラントのデータから各月の標準的な1日の熱負荷を設定し、その熱負荷に基づき各月ごとの運転計画を戦略的振動に基づくタブー探索法により求め、つなぎ合わせることで年間の運転計画を立案し、その有用性を検証した。

地域冷暖房プラントの短期運転計画に関するこれまでの研究では1時間単位で計画を立てている。しかし、現実のプラントにおいては朝に急激な負荷変動が存在するため、より細かな時間単位での運転計画が重要となる。一方で、過度に細かな時間を計画の単位とした場合、予測に必要な入力データ数や実施可能な計画の組合せ数が極端に増大し、計画案の導出に多大な処理時間を要するという問題が生じる。また、より現実的な運転計画を立てるためには、運転機器の切替に要する費用や時間も考慮する必要がある。このような現実の問題に対処するための実用的見地から、石丸ら [13] は、計画の単位時間の細分により処理時間が増大しない熱負荷需要の予測方法を提案するとともに、機器切替の費用と時間を考慮した多様な基準に基づく運転計画モデルをいくつか提案し、実データを用いたシミュレーション実験を通して提案モデルの有用性について比較と検討を試みた。

1.2. 論文の構成

本論文の構成と各章の概要は次のように要約される。

第1章では、本研究の背景と目的を概説した後、次章以降の各章の概要とともに本論文の構成について述べる。

本論文で考察する地域冷暖房システムにおいては、システムの効率的な運用と安定した熱供給のために、冷水負荷予測は重要である。実際に得られる冷水負荷データには、さまざまな要因により異常値や欠測値が含まれているため、

これらの影響を考慮した予測手法が望ましい。

第2章では、地域冷暖房システムの概略を述べるとともに地域冷暖房システムにおける熱負荷データの特徴について述べる。従来提案されている階層型ニューラルネットワークを用いた熱負荷予測手法を概説するとともにその問題点について触れる。本論文で新たに提案するリカレントニューラルネットワークを用いた熱負荷予測手法について詳しく述べる。提案手法と従来法を用いて、実際に得られた熱負荷データに基づく熱負荷予測を行い、予測結果を比較することにより、提案手法の有用性を検証する。

第3章では、機器の燃料費だけではなく、ガス会社と電力会社に対する契約違反に伴うペナルティも考慮するため、地域冷暖房プラントの短期運転計画問題を、契約違反に伴うペナルティを考慮した非線形整数計画問題として定式化し、戦略的振動に基づくタブー探索法による最適運転計画法を提案し、その有用性を検証する。

第4章では、現実のプラント運用においては、運転費用の最小化のみならず、環境保全のため一次エネルギー量の最小化をも目指さなければならないという観点から、地域冷暖房プラントの短期運転計画を、2目的非線形整数計画問題として定式化し、戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法を提案するとともに、意思決定者の満足解の導出を試みる。

第5章では、契約期間が長期（1年）となる契約の履行可能性を調べるための長期の運転計画の立案を目指して、1年間の1ヶ月あるいは1週間といった期間で分割し、各期間における標準的な一日に対する運転計画を求め、それらをつなぎ合わせることによって、実用的な時間内に長期（1年）の（近似的）最適運転計画を求める方法を提案する。より具体的には、地域冷暖房プラントの月単位の標準的な1日に対する運転計画問題を、従量料金契約以外の契約違反に伴うペナルティを考慮した非線形整数計画問題として定式化し、戦略的振動に基づくタブー探索法による最適運転計画手法を提案するとともに、実データによる有用性を検証する。

第6章では、現実の地域冷暖房プラントの短期運転計画問題に対する実用的見地から、計画の単位時間の細分により処理時間が増大しない熱負荷需要の予測方法を提案するとともに、機器切替の費用と時間を考慮した多様な基準に基

づく運転計画モデルをいくつか提案し、実データを用いたシミュレーション実験を通して提案モデルの有用性を様々な観点から検討する。

最後に第7章では、本論文の結論と今後の研究課題について要約する。

第2章

地域冷暖房システムのデータ特性を考慮したニューラルネットワークによる熱負荷予測

2.1. はじめに

都市環境の保全とともにエネルギー利用分野における多様化，高効率化が図られる中で，高密度都市における地域冷暖房 (District Heating and Cooling: DHC) システムへの期待が高まってきている．このような地域冷暖房システムを導入することにより，省スペース，省エネルギー並びに大気汚染や都市災害の防止といったさまざまな利点が期待できる．

地域冷暖房システムは，ある地域内の各施設の冷暖房や給湯に使用される冷水や温水または蒸気等を地域冷暖房プラントで集中的に生産し，各施設に供給するシステムであり，概略図を示すと図 2.1 のように表される．

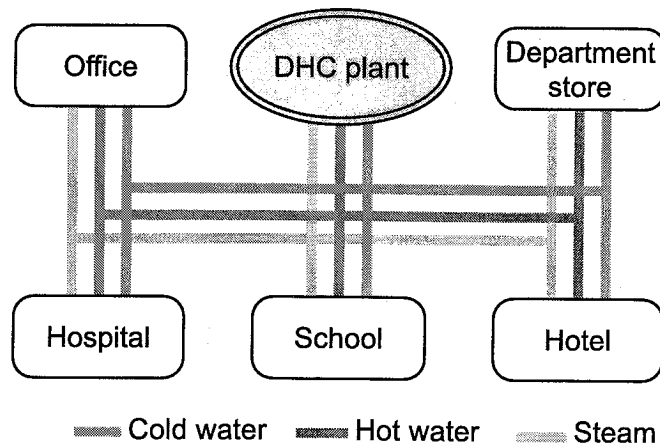


図 2.1: 地域冷暖房システム

地域冷暖房プラントには大型の冷凍機やボイラ等の熱源機器が含まれており、地域冷暖房システムの効率的な運用のためには、熱負荷の予測値に基づいて熱源の最適な運転パターンを決定し、熱源機器の立ち上がり時間を考慮した無駄のない運転制御が望ましい [46, 54, 45, 33, 53, 47, 52]。また深夜電力を利用した蓄熱システムを有したプラントでは、前日において翌日の熱負荷の値が予測できれば必要な熱量分の蓄熱運転が可能となるので熱ロスが少ない効率のよい運転ができる。このように地域冷暖房システムにおいて熱負荷予測はシステムの高効率運転において必要不可欠なものである。

しかし、実際に得られる冷水負荷データには、さまざまな要因により、観測ノイズおよび異常値や欠測値が含まれている。そのような雑音成分を取り除くアルゴリズムはフィルタリングアルゴリズムとよばれる。時系列データに含まれる異常値および欠測値の除去のために、R. E. Kalman によってカルマンフィルタ [15]、R. D. Martin らによってロバストフィルタ [22] と呼ばれるアルゴリズムが提案されている。ロバストフィルタは線形状態空間モデルに基づいているが、近年、J. T. Connor らによって、非線形状態空間モデルへの拡張もなされている [2]。

近年、地域冷暖房システムの負荷予測手法として、階層型ニューラルネットワークを用いた手法 [3, 43] やラジアル基底関数ネットワークを用いた手法 [37, 38] が坂和らにより提案されてきているが、現実の運用において、1日の平均熱負荷が増加傾向または減少傾向にある期間の非定常な熱負荷の予測において精度が低下するという問題点が指摘されている。

このような問題点に対処するため、本章では、坂和ら [43] によって提案されてきている階層型ニューラルネットワークによる予測手法に対して、熱負荷のデータ特性を考慮するために、リカレントニューラルネットワークを用いた予測手法を提案し、予測精度の向上を図る。

2.2. 地域冷暖房プラントにおける熱負荷データの特徴

2.2.1. 熱負荷データの特徴

地域冷暖房システムにおける熱負荷予測では、熱負荷データの特徴を把握することが不可欠であるといえる。このような観点から、ここでは、熱負荷データの特徴について考察する。

2.2.2. 1週間分の熱負荷データ

現実に得られた1週間分の熱負荷データの代表例を示すと、図2.2のようになる。この図から、熱負荷の波形は24時間の周期をもち、オフィスの稼働する月曜日から土曜日は昼間の振幅は大きいですが、休みとなる日曜日及び祝日は小さいといった曜日特性があることがわかる。

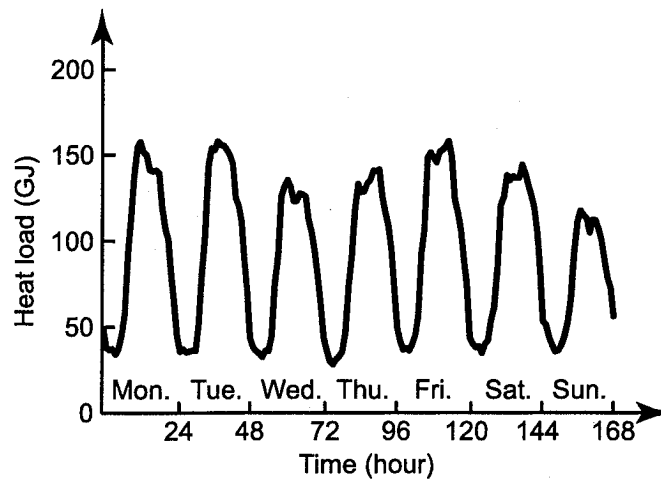


図 2.2: 1週間分の熱負荷データ

- 1日の平均熱負荷と外気温度の関係

図2.3に1日の最高外気温度と1日の平均熱負荷の関係を示す。この図から1日の最高外気温度と1日の平均熱負荷の間に密接な関係があり、1日の最高外気温度が高ければ1日の平均熱負荷が高いことがわかる。

次に1日の最高外気温度、最低外気温度と1日の熱負荷波形の関係を図2.4

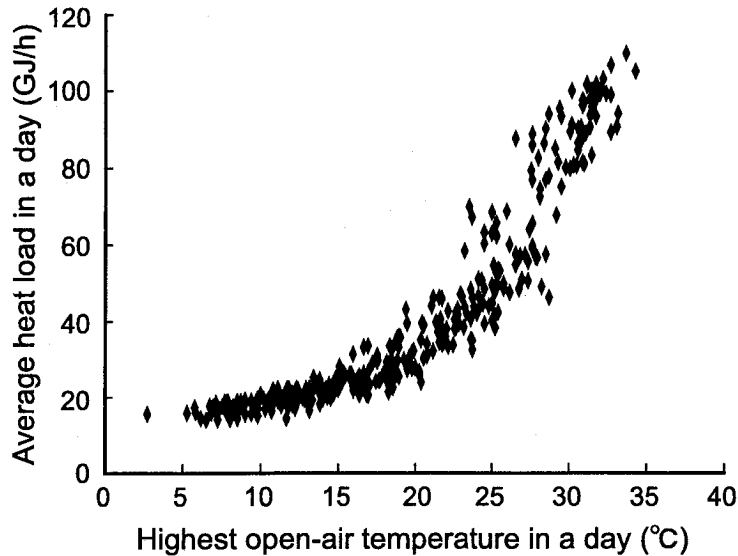


図 2.3: 1日の最高外気温度と1日の平均熱負荷の関係

に示す。この図から1日の最高外気温度が高くなると熱負荷波形は高い値をとるが、最高外気温度が前日と比べて下がっているのに同程度の熱負荷波形をとる所がある。このことにより、熱負荷波形が1日の最高外気温度だけでは説明できない部分があると考え、1日の最低外気温度を調べてみると同程度の値をとっていることがわかった。

このような熱負荷データの特徴に基づいて熱負荷波形と関係のある要因として1日の最低外気温度を含んだ新たな入力データの検討を行った。表 2.1 に1日の最高外気温度とこれに1日の最高外気温度の差、1日の最低外気温度を加えたときの1日の平均熱負荷に対する寄与率と AIC を示す。

表 2.1: 1日の平均熱負荷に対する寄与率と AIC

| 平均熱負荷の説明変数 | 寄与率 | AIC |
|---------------------------|-------|---------|
| 1日の最高外気温度 | 0.817 | 1761.17 |
| 1日の最高外気温度+ 1日の最高外気温度の差 | 0.833 | 1729.63 |
| 1日の最高外気温度+ 1日の最低外気温度 | 0.849 | 1693.48 |

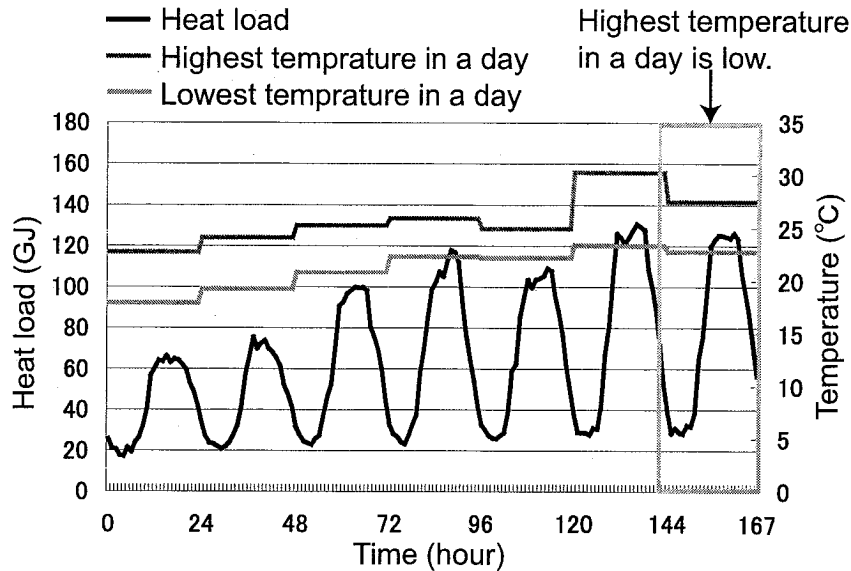


図 2.4: 最高外気温度, 最低外気温度と1日の熱負荷波形の関係

表 2.1 より, 1日の最高外気温度のみより1日の最高外気温度を加えたほうが, さらには1日の最高外気温度, 1日の最低外気温度の組のほうが寄与率, AIC ともによいことがわかった. 1日の最低外気温度は現実において例えば季節が夏で1日の最高外気温度が低くても1日の最低外気温度が高ければ, 気温の変化が少なく, 曇りや雨といった湿度が高くなる天気となりじめじめして多くの人が暑く感じ冷房を使用するというように熱負荷の値に作用する要因になると考えられる.

2.3. 階層型ニューラルネットワークによる熱負荷予測

従来のDHCプラントにおける熱負荷予測[49]には図 2.5 のような出力層に複数の出力ユニットをもった階層型ニューラルネットワーク [1, 9, 11, 23, 24, 36, 51] が用いられている.

ここで, 時刻 t の熱負荷を $y(t)$, 曜日データを d_1, \dots, d_7 , 翌日の予想最高気温を \hat{T}_{\max} とすると, 入力ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{32})^T$ は

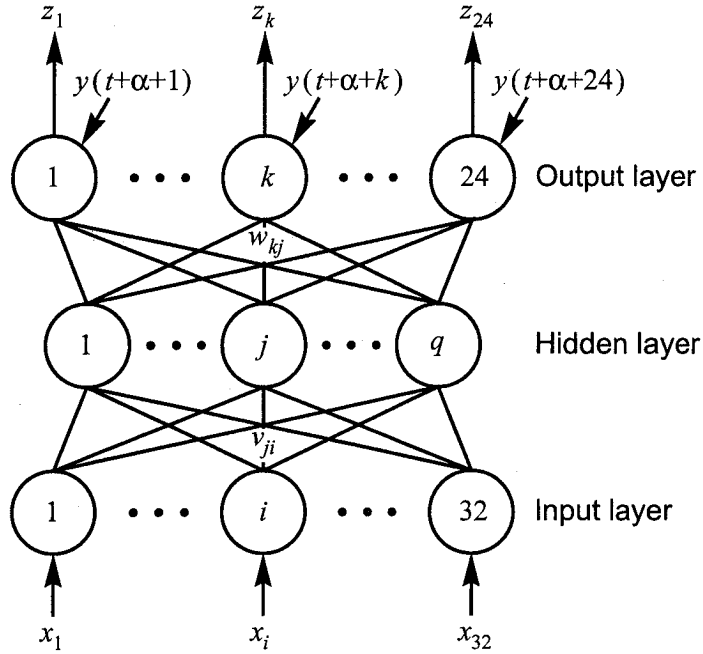


図 2.5: 32 入力 24 出力 3 層ニューラルネットワーク

$$\mathbf{x} = (y(t-23), \dots, y(t), d_1, \dots, d_7, \hat{T}_{\max})^T \quad (2.1)$$

と表される。また、隠れ層及び出力層の各ユニットの出力関数をシグモイド関数

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2.2)$$

とし、隠れ層の第 j 番目のユニットの出力を g_j とすれば、出力ベクトル $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_{24})^T$ は

$$g_j = S\left(\sum_{i=1}^{32} v_{ji}x_i + \theta_j\right), \quad j = 1, \dots, q \quad (2.3)$$

$$z_k = S\left(\sum_{j=1}^q w_{kj}g_j + \eta_k\right), \quad k = 1, \dots, 24 \quad (2.4)$$

と表される. ここで, θ_j は隠れ層の第 j 番目のユニットのしきい値, η_k は出力層の第 k 番目のユニットのしきい値を表す. このとき, 教師信号は $\mathbf{y} = (y(t + \alpha + 1), \dots, y(t + \alpha + 24))^T$ である.

また, ネットワークの重み係数 w_{kj} , v_{ji} は誤差逆伝播法に基づく学習によりネットワーク出力と教師信号の平均 2 乗誤差 E

$$E = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P \|z^p - \mathbf{y}^p\|^2 \quad (2.5)$$

を最小にするように決定される.

この手法を用いて季節の変わり目 1 週間の熱負荷を予測した結果を図 2.6 に示す. このような階層型ニューラルネットワークを用いた熱負荷予測手法では, 1 日の平均熱負荷があまり変化しない定常な期間における熱負荷に対しては, 高精度な予測を行うことができたが, 図 2.6 のような 1 日の平均熱負荷が増加傾向または減少傾向にある期間の非定常な熱負荷の予測において精度の低下が見られるという問題点が残されていた.

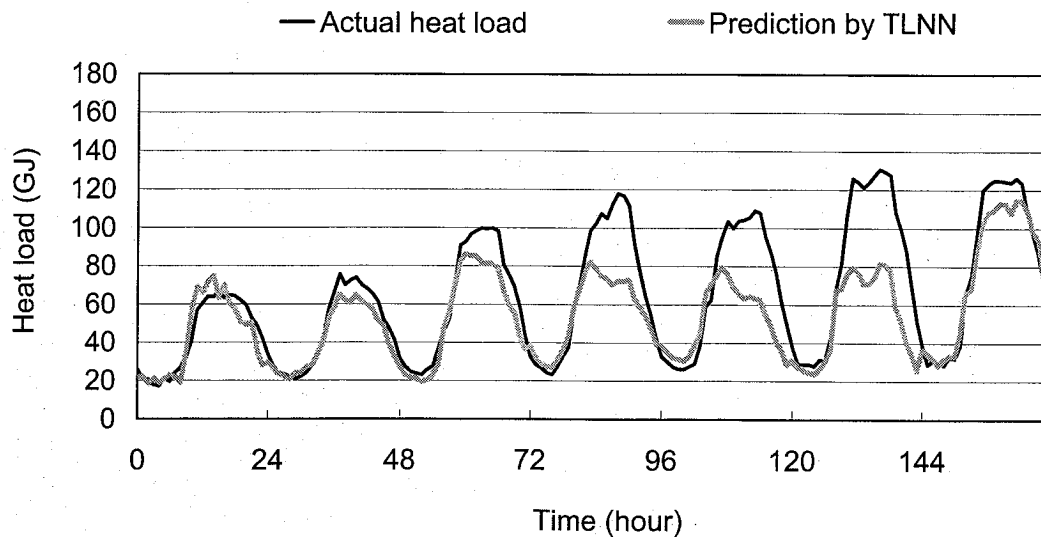


図 2.6: 非定常の熱負荷データ

実際, この図より, 1 日の平均熱負荷が増加するにつれて予測誤差が増加し

ていることがわかる。このような予測結果になるのは、ネットワークの構造が階層型ニューラルネットワークであることから、入力パターンとそれに対応する教師信号の組を、時系列のデータとしてではなく、入出力のパターンとしてみているので、全体的な熱負荷の変動に対応しにくいためであることが考えられる。

2.4. データ特性を考慮したリカレントニューラルネットワークによる熱負荷予測

これまで述べてきた従来の予測手法の問題点に対して、本章では、非定常な熱負荷の基線の変化をとらえるためのデータ特性を考慮したリカレントニューラルネットワーク [25, 55] を用いた予測手法を提案する。

2.4.1. データ特性を考慮したリカレントニューラルネットワーク

本章で提案するデータ特性を考慮したリカレントニューラルネットワークは図 2.7 のような 33 入力 24 出力のリカレントニューラルネットワークである。階層型ニューラルネットワークでは 1 日分の熱負荷データしか予測の入力に利用しないので熱負荷の増加・減少の傾向をとらえるのが難しいが、ここで提案するリカレントニューラルネットワークは連続した数日分の熱負荷データを予測の入力に利用するので熱負荷の傾向をとらえることができると考えられる。

リカレントニューラルネットワークにおける離散時刻 τ での入力ベクトル $\mathbf{x}(\tau) = (x_1(\tau), \dots, x_{33}(\tau))^T$ は、時刻 t の熱負荷を $y(t)$ 、曜日データを d_1, \dots, d_7 、翌日の予想最高外気温度を \hat{T}_{\max} 、翌日の予想最低外気温度を \hat{T}_{\min} としたとき

$$\mathbf{x}(\tau) = (y(t_\tau - 23), \dots, y(t_\tau), d_1, \dots, d_7, \hat{T}_{\max}, \hat{T}_{\min})^T \quad (2.6)$$

とする。また、隠れユニット及び出力ユニットの出力関数をシグモイド関数

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2.7)$$

とする。このとき、離散時刻 $\tau + 1$ での出力ベクトル $\mathbf{z}(\tau + 1) = (z_1(\tau + 1), \dots, z_{24}(\tau + 1))^T$ 及び、隠れユニットの出力ベクトル $\mathbf{g}(\tau + 1) = (g_1(\tau + 1), \dots, g_{24}(\tau + 1))^T$ とする。

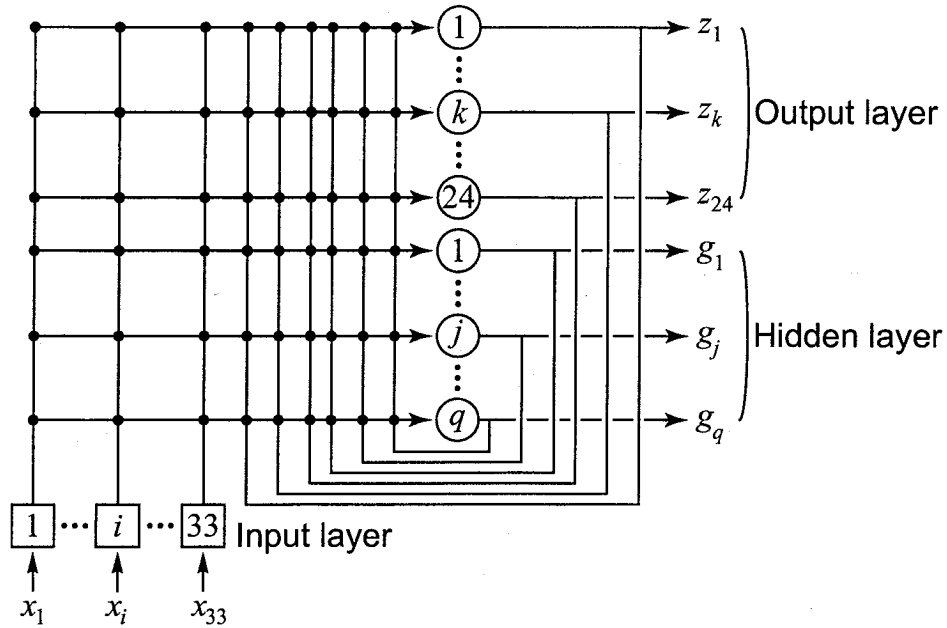


図 2.7: 33 入力 24 出力リカレントニューラルネットワーク

$1), \dots, g_q(\tau + 1))^T$ は

$$g_j(\tau + 1) = S\left(\sum_{i \in I} w_{ji}x_i(\tau) + \sum_{l \in H} w_{jl}g_l(\tau) + \sum_{k \in O} w_{jk}z_k(\tau) + \theta_j\right), j \in H \quad (2.8)$$

$$z_k(\tau + 1) = S\left(\sum_{i \in I} w_{ki}x_i(\tau) + \sum_{j \in H} w_{kj}g_j(\tau) + \sum_{l \in O} w_{kl}z_l(\tau) + \eta_k\right), k \in O \quad (2.9)$$

と表される. I, H, O は, それぞれ, 入力ユニット, 隠れユニット, 出力ユニットの添え字の集合を表している. この時, 教師信号は $\mathbf{d}(\tau + 1) = (y(t_\tau + \alpha + 1), \dots, y(t_\tau + \alpha + 24))^T$ である.

このネットワークを用いた予測の概念図を図 2.8 に示す. つまり, 予測前日, 前々日に得られた 24 時間分の熱負荷データを用いて, 予測当日の 24 時間分の熱負荷を各時刻ごとに出力ユニットで出力する.

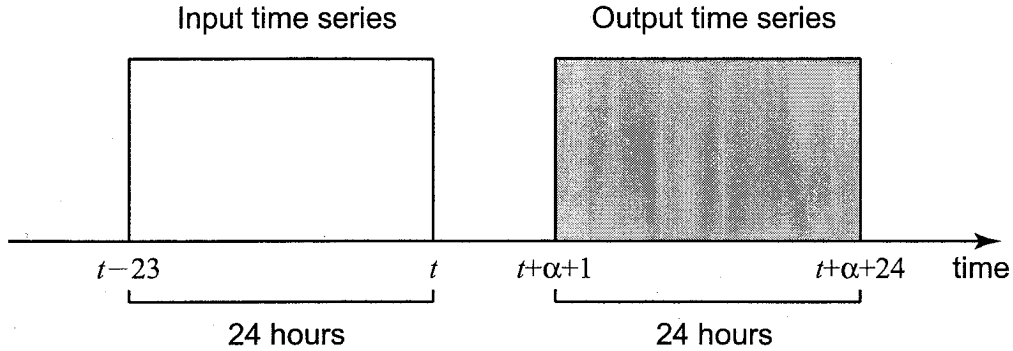


図 2.8: 提案手法における熱負荷予測の概念図

2.4.2. エポックごと通時的逆伝播法

図 2.8 のリカレントニューラルネットワークを時間展開したものを図 2.9 に示す。入出力の組の数を N とし、離散時刻 $u, u+1, \dots, u+N-1$ において、それぞれ入力 $x_i(u), x_i(u+1), \dots, x_i(u+N-1)$ を与え、時刻 $u+1, \dots, u+N-1, u+N$ において、それぞれ教師信号 $d_i(u+1), \dots, d_i(u+N-1), d_i(u+N)$ を与えたときのネットワーク全体の誤差関数は、各時刻における誤差の総和

$$J(u, u+N) = \frac{1}{2} \sum_{\tau=u+1}^{u+N} \sum_{i \in O} (d_i(\tau) - y_i(\tau))^2 \quad (2.10)$$

で与えられ、ネットワークの重み係数 w_{ij} はこれを最小にするように決定される。このとき、学習における重み係数の更新量 Δw_{ij} は

$$\Delta w_{ij} = -\eta \sum_{\tau=u}^{u+N-1} \delta_i(\tau+1) z_j(\tau) \quad (2.11)$$

$$w_{ij} = w_{ij} + \Delta w_{ij} \quad (2.12)$$

と表される。ここで、 $\delta_i(\tau)$ は $\tau = u+N$ のとき

$$\delta_i(u+N) = (y_i(u+N) - d_i(u+N)) y_i(u+N) (1 - y_i(u+N)) \quad (2.13)$$

$u + 1 \leq \tau \leq u + N - 1$ のとき

$$\delta_i(\tau) = y_i(\tau)(1 - y_i(\tau)) \left((y_i(\tau) - d_i(\tau)) + \sum_{l \in HUO} w_{li} \delta_l(\tau + 1) \right) \quad (2.14)$$

である。

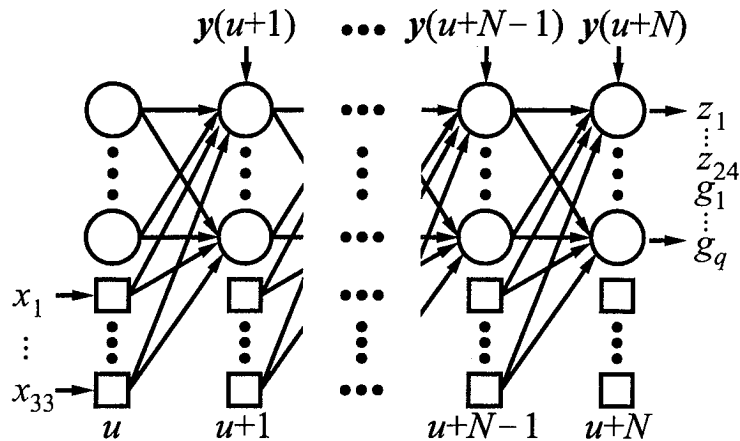


図 2.9: リカレントニューラルネットワークの時間展開

2.5. 数値例

実際の地域冷暖房システムにおいて記録された 2002 年 5 月 31 日から 7 月 7 日までのデータを用いて、データ特性を考慮したリカレントニューラルネットワークによる熱負荷予測の有効性を検証して行こう。ここで、用いるデータには、異常値や欠測値は含まれていないので、これまでの研究で使用してきたロバストフィルタの不安定さを取り除いた簡略型ロバストフィルタは、使用しないことにする。

さて、2002 年 5 月 31 日から 7 月 7 日までの実際の地域冷暖房システムにおいて記録されたデータを、最初の 4 週間分の熱負荷データ、最高外気温度及び最低外気温度のデータを学習用データとして、残りのデータを検証用として用いて提案手法による非定常な熱負荷の予測を行う。この時、ニューラルネットワークには予測前々日の 18 時から前日の 17 時までの熱負荷データから予測当

日の24時間分の熱負荷データを予測するように学習させる。これは、現実の地域冷暖房システムに用いる際に、予測前日の早い段階で翌日の熱負荷予測を行えば効率の良い熱源機器の最適運転計画を実現することができると考えられるからである。さらに、従来法との比較を行う。実行した結果を図2.10及び表2.2に示す。

この時期の熱負荷波形は、平均熱負荷が日毎に上がっていく非定常なものとなっているので、従来法ではトレンドがとらえられず、予測値が実測値に比べかなり小さくなってしまっている。一方、提案法は正午から夕方にかけて従来法に比べ改善されていることがわかる。また学習時間は提案した方法が従来法より大きくなるが予測前日の17時までのデータがとれたら予測当日の24時間分の予測ができるので提案した方法の学習時間でも熱源機器の運転計画がたてることができるので実用上支障はないと考えられる。

表 2.2: 非定常な熱負荷での実験結果

| | 平均二乗誤差 | 学習時間 (秒) |
|--------|--------------------|----------|
| 従来法 | 21.05 ² | 72.3 |
| 提案した方法 | 11.82 ² | 122.5 |

熱負荷が非定常となる期間における予測では従来法に比べ、予測精度が改善されているのが確認された。しかし、実際の熱負荷データはこのようなものばかりであるとは限らないため、できるだけ多くのデータに対して有効なネットワークであることが必要となる。また従来法は振幅の安定している定常な熱負荷データにおいては高精度の予測を行うことから提案した方法が定常な熱負荷データにおける予測精度が従来法より低下していたら改善されたとはいえないので定常な期間を含んだ熱負荷データに対しても提案した方法を適用してみなければならない。

定常な期間を含んだ熱負荷データに対する提案法と従来法の実行した結果を表2.3及び図2.11に示す。他の熱負荷データでも提案した方法が従来法より改善されていることがわかる。

表 2.3: 2002年2月から11月までの各月に対する実験結果.

| | 平均二乗誤差 (GJ^2) | | 正規化した二乗平均平方根誤差 (%) | |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| | 従来法 | 提案法 | 従来法 | 提案法 |
| 2002/02 | 2.53 ² | 2.24 ² | 13.00 | 11.51 |
| 2002/03 | 4.38 ² | 3.54 ² | 17.17 | 13.88 |
| 2002/04 | 5.83 ² | 6.20 ² | 17.67 | 18.79 |
| 2002/05 | 9.60 ² | 8.43 ² | 24.00 | 21.08 |
| 2002/06 | 10.37 ² | 7.91 ² | 19.54 | 14.90 |
| 2002/07 | 16.76 ² | 11.44 ² | 17.25 | 11.78 |
| 2002/08 | 24.69 ² | 16.57 ² | 25.28 | 16.97 |
| 2002/09 | 17.20 ² | 12.43 ² | 25.97 | 18.76 |
| 2002/10 | 8.74 ² | 6.63 ² | 19.94 | 15.13 |
| 2002/11 | 3.78 ² | 3.55 ² | 15.52 | 14.57 |

2.6. おわりに

地域冷暖房システムでは、一括して作られた冷水、温水が各施設に供給されるので、運転効率を高め安定した供給を行うためには熱負荷予測は必要不可欠である。これまでの手法では、熱負荷が非定常となる期間における予測精度の低下という問題があった。

本章では、地域冷暖房システムにおけるこのような問題に対して熱負荷データの特性を考慮することにより1日の最低外気温度を入力データに加えたりカレントニューラルネットワークによる予測手法を提案した。また、数値実験を行うことで提案手法の有効性が示された。

今後の課題として熱負荷データと関係のある要因を調べ、より多くの実データを用いて検証を行い、安定したシステムの構築をすることがあげられる。

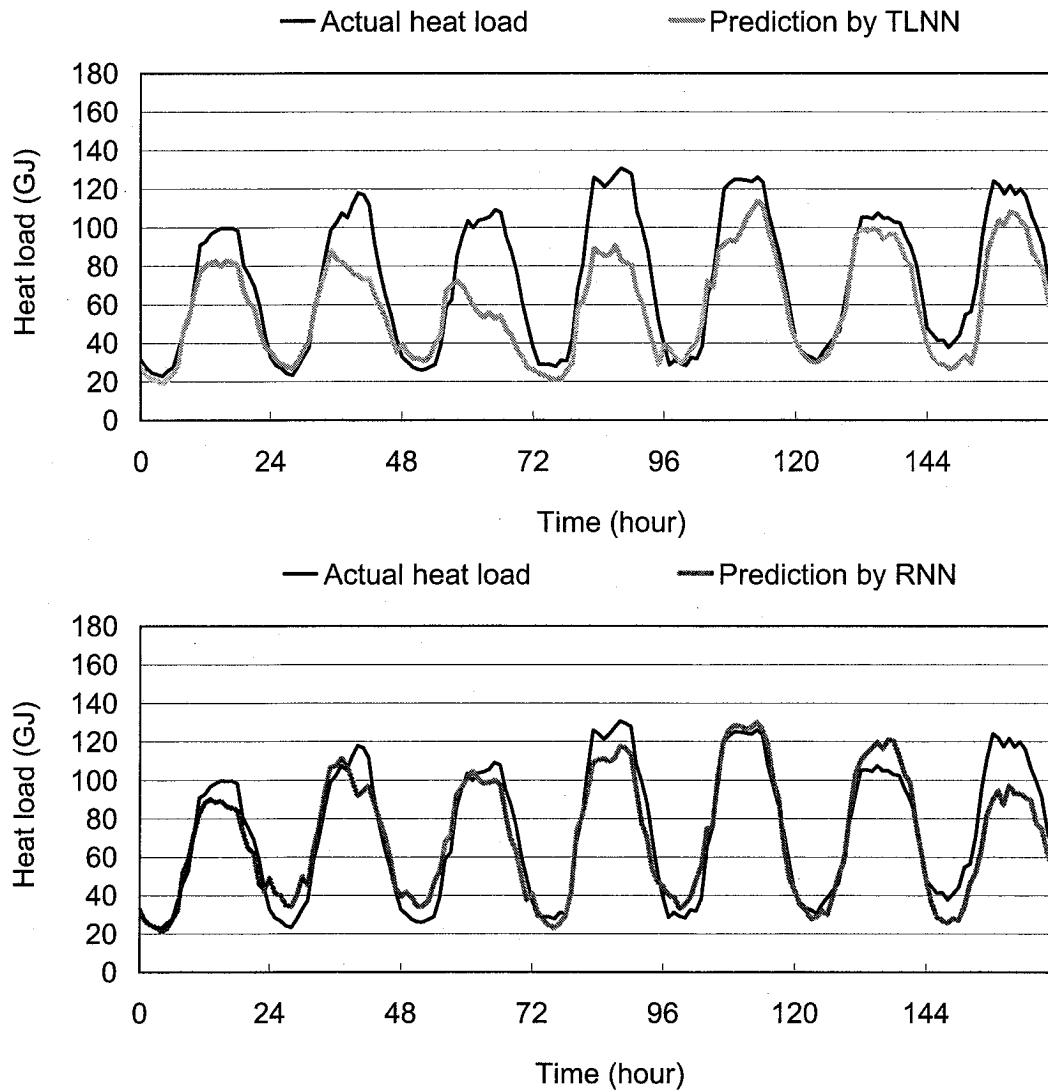


図 2.10: 非定常な熱負荷データでの予測結果 (7月1日~7月7日)

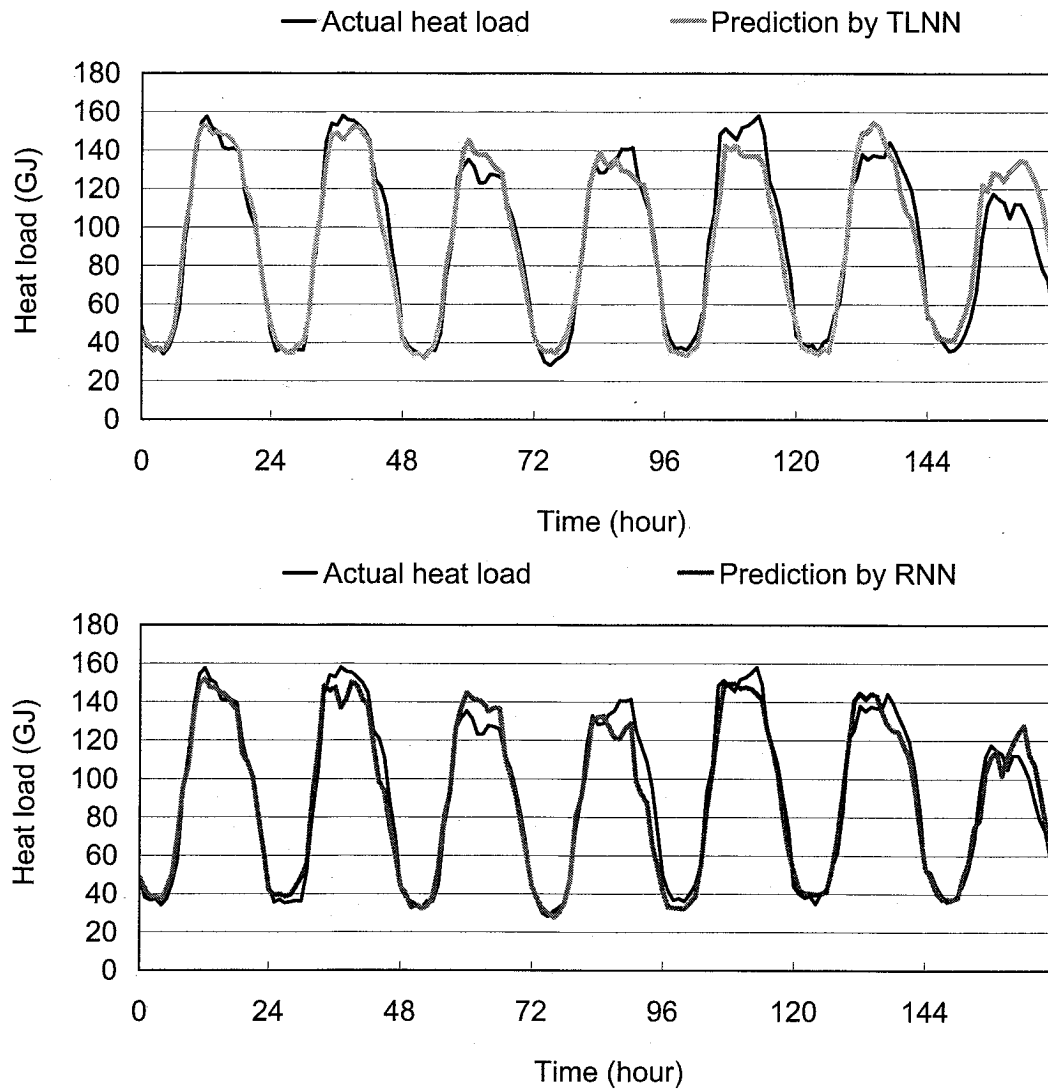


図 2.11: 定常な期間を含んだ熱負荷データでの予測結果(7月22日~7月28日)

第3章

契約違反を考慮した地域冷暖房プラントの短期運転計画

3.1. はじめに

地域冷暖房 (District Heating and Cooling: DHC) システムは、ある地域内の各施設の冷暖房に使用される冷水、温水あるいは蒸気を地域冷暖房プラントで集中的に生成し、各施設に供給するシステムである [63]。地域冷暖房プラントには、大型の冷凍機やボイラ等の熱源機器が含まれており、システムの効率的な運用のためには、熱負荷の予測値に基づいて熱源の最適な運転パターンを決定し、熱源機器の立ち上がり時間を考慮した運転制御が望ましい。

近年、地域冷暖房システムにおける負荷予測手法の発展とともに高い精度の需要予測が可能となっており [37, 38, 43, 44]、地域冷暖房プラントの運転計画問題の数理計画問題としての定式化及びその最適化に対する期待が高まっている。本章で考察の対象とするプラントでは、まず翌日の0時～23時の冷水と蒸気の1時間ごとの需要量予測値を求め、それらに基づいて実行可能かつできるだけ低コストの翌日の運転計画を立案することが求められている。伊東ら [14] は、従来の地域冷暖房プラントと同様なコジェネレーションシステムにおけるプラントの運転計画問題を数理計画問題として定式化し、数理計画法により最適運転計画が求められることを示している。彼らの手法では、1時間ごとの運転計画問題を混合0-1線形計画問題として定式化し、列挙に基づく解法により1時間分の最適運転計画を求め、それらをつなぎあわせて1日の運転計画としていた。しかし、このような方法では、時間帯ごとの各機械の運転状態の切り替えが頻繁に起こるような、不自然な運転計画となってしまう。また、現実のプラントにおいては、機器の起動・停止に伴う費用や夜間電力の使用な

などを考慮する必要があるため、1時間ごとに最適化された運転計画よりは、むしろ、数時間分をまとめて最適化した運転計画が望ましいと考えられる。

このような観点から、坂和ら [46, 54] は、従来の地域冷暖房プラントに対して、数時間分の機器の切り替えを考慮した運転計画問題を混合 0-1 計画問題として定式化するとともに、遺伝的アルゴリズムを用いた近似解法を提案し、その有効性を示している。また、彼らは文献 [45, 33, 53] において、より現実の運用状況を反映させるために非線形 0-1 計画問題として再定式化するとともに、遺伝的アルゴリズムによる解法を提案し、実用的な計算時間で低コストで切り替え回数が少ない自然な運転計画が求められることを示している。さらに、坂和ら [47] は、より大規模なプラントに対応するために、地域冷暖房プラントの数時間分の運転計画問題を混合整数計画問題として定式化し、遺伝的アルゴリズムを用いた近似解法を提案してその有効性を示している。

しかし、これらの従来の運転計画問題ではガス会社および電力会社との契約は従量料金契約のみが考慮されているが、実際の地域冷暖房プラント運用会社は、ガス会社および電力会社と従量料金契約以外の契約も結んでいるため、地域冷暖房プラントの運転計画を考える上で、機器の燃料費だけではなく、契約違反に伴うペナルティも考慮する必要がある。このような要望に応えるため、本章では、契約違反に伴うペナルティを考慮した運転計画問題の定式化を行い、近年有効性が示されてきている戦略的振動に基づくタブー探索法 [7] による最適運転計画手法を提案するとともに、実プラントのデータに基づく有用性の検証を試みる。

3.2. 地域冷暖房プラントの短期運転計画

3.2.1. プラント構成

地域冷暖房システムにおける地域冷暖房プラントには、図 3.1 に示すように、大型の冷凍機やボイラ等の熱源機器が含まれており、システムの効率的な運用のためには、熱負荷の予測値に基づいて熱源の最適な運転パターンを決定し、熱源機器の立ち上がり時間を考慮した運転制御が望ましい。

図 3.1 に示した地域冷暖房プラントは、電力とガスを入力として、プラン

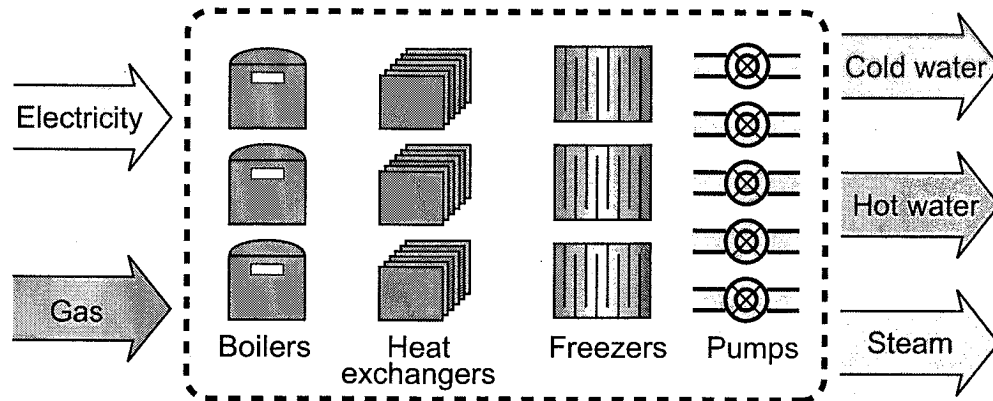


図 3.1: 地域冷暖房プラントの概念図

ト内の多くの機器を動作させることにより、冷水、温水及び蒸気を生成している。これらの機器の多くは、互いに連動しているため、機器の従属関係を考慮して独立して動作する機器だけに注目すれば、本章で対象とする地域冷暖房プラントについては、図 3.2 のように表される。

本章で考察する地域冷暖房プラントは、図 3.2 に示したように、ガスを燃料として蒸気を生成する p 種類 N_{BW} 台のボイラ、蒸気と電力を用いて冷水を生成する q 種類 N_{DAR} 台の吸収式冷凍機、電力のみを用いて冷水を生成する r 種類 N_{ER} 台のターボ冷凍機、 s 種類 N_{CEX} 台の冷水熱交換器から構成されている。ここで、ポンプと冷却塔は対応する冷凍機の稼動状況に応じて稼動するものとする。

このような地域冷暖房プラントにおいて、ボイラ、吸収式冷凍機、ターボ冷凍機、温水熱交換機、蓄熱放熱熱交換機を必要な分だけ動作させて予測される需要を満たす冷水、温水及び蒸気を生成するという条件の下で、運転費用（燃料費＋ペナルティ）を最小化するという運転計画問題を考える。

3.2.2. ガス・電力会社との契約

一般に、地域冷暖房プラントの運用会社は、地域冷暖房プラントにおいて使用するガス、電力に関して、ガス会社、電力会社と従量料金契約を結んでいる。さらに、従量料金契約以外に、次のような条件を満たすことを条件に、従量料金割引等の優遇を受ける契約が存在する。

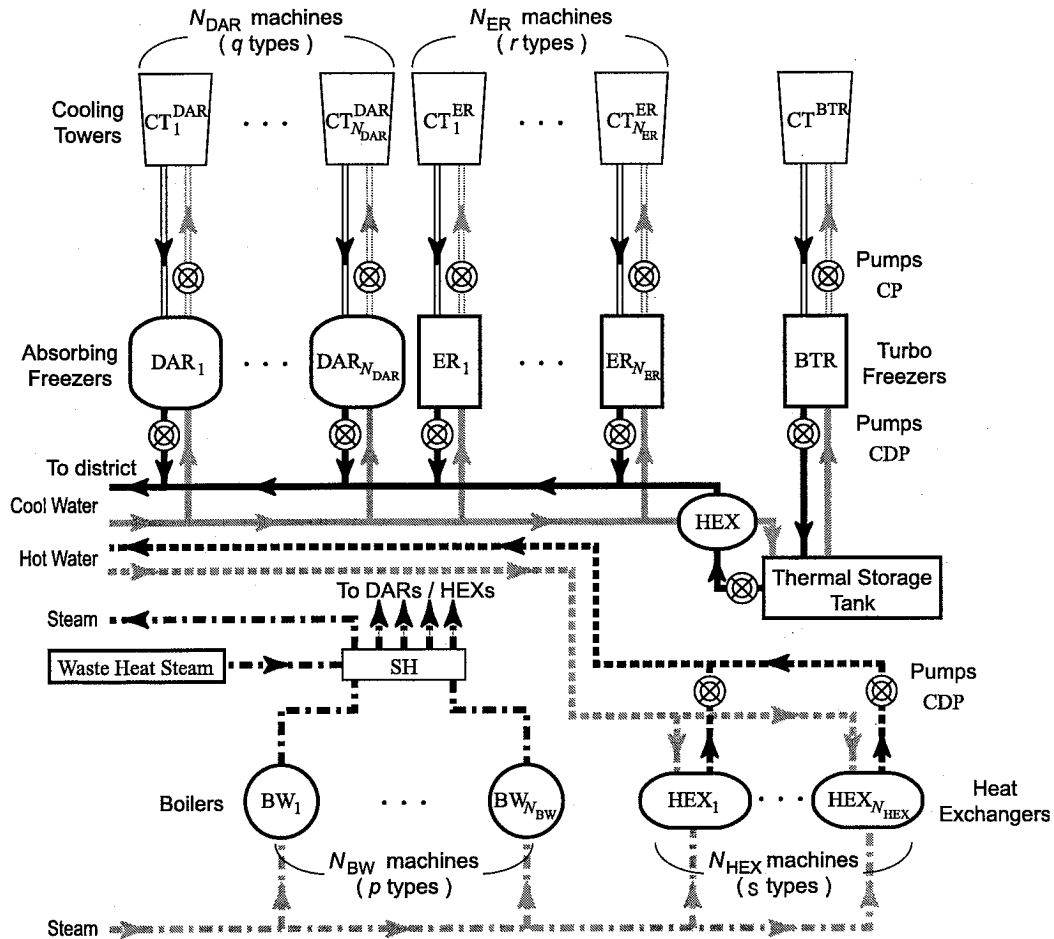


図 3.2: プラント構成

最低ガス使用量契約

ガス会社との契約で、年間でガスを一定量（最低ガス使用量）以上の使用することを約束する契約。

最大電力契約

電力会社と結ぶ契約で、各時刻で使用できる電力の上限（最大電力）を予め設定しておく契約。

ピークカット契約

電力会社と結ぶ契約で、地域の電力消費がピークとなる時間帯（午後1時から午後4時まで）に利用する電力を、最大電力より低い電力に抑制する契約。

これらの契約は、契約違反に対する罰則規定が含まれており、契約に対する違反があれば、違約金等のペナルティが発生する。

3.2.3. 運転計画問題の定式化

いま、時刻 $t, t = 1, 2, \dots, 24$ の地域における冷水需要量 C_{load}^t 、温水需要量 W_{load}^t 、蒸気需要量 S_{load}^t が与えられるならば、プラントの運転計画問題は、地域内の各施設の冷水、温水、蒸気の需要を満たすように各機器を動作させるときに、運転費用（燃料費＋ペナルティ）を最小化する時刻 t における運転計画を求める問題として次のようにまとめられる。

- (I) 運転する冷凍機の総出力 $C^t = \sum_{i=1}^{q+r} a_i x_i^t$ に対する冷水需要量の割合を表す冷凍機運転負荷率 $P = C_{\text{load}}^t / (C^t - C_{TS}^t)$ が 1.0 以下でなければならない。すなわち、

$$C^t \geq C_{\text{load}}^t - C_{TS}^t \quad (3.1)$$

ここで、 a_i は i 番目の冷凍機の定格能力（100% 運転時の定格出力）を表し、 C_{TS}^t は自動運転される蓄熱槽からの冷水供給量を表す。この制約は、運転する冷凍機の総出力が冷水需要量以上でなければならないことを意味する。

- (II) 冷凍機運転負荷率 $P = C_{\text{load}}^t / (C^t - C_{TS}^t)$ が 0.2 以上でなければならない。すなわち、

$$0.2 \cdot C^t \leq C_{\text{load}}^t - C_{TS}^t \quad (3.2)$$

この制約は運転する冷凍機の総出力が冷水需要量の 5 倍以下でなければならないことを意味する。

- (III) 運転する温水熱交換機の総出力 $W^t = \sum_{i=q+r+1}^{q+r+s} w_i x_i^t$ に対する温水需要量の割合を表す温水熱交換機運転負荷率 $P = W_{\text{load}}^t / W^t$ が 1.0 以下でなければならない。すなわち、

$$W^t \geq W_{\text{load}}^t \quad (3.3)$$

ここで、 a_i は i 番目の温水熱交換機の定格能力（100%運転時の定格出力）を表す。この制約は、運転する冷凍機の総出力が温水需要量以上でなければならないことを意味する。

- (IV) 温水熱交換機運転負荷率 $P = W_{\text{load}}^t / W^t$ が 0.2 以上でなければならない。すなわち、

$$0.2 \cdot W^t \leq W_{\text{load}}^t \quad (3.4)$$

この制約は運転する温水熱交換機の総出力が温水需要量の 5 倍以下でなければならないことを意味する。

- (V) 運転するボイラの総出力 $S^t = \sum_{j=1}^p f_j y_j^t$ に対する必要蒸気量の割合を表すボイラ運転負荷率 $Q = (S_{\text{DAR}}^t + S_{\text{HEX}}^t + S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t) / S^t$ が 1.0 以下でなければならない。すなわち、

$$-S_{\text{DAR}}^t - S_{\text{HEX}}^t + S^t \geq S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t \quad (3.5)$$

であり、この制約は、運転するボイラの総出力が必要蒸気量以上でなければならないことを意味する。ここで、 f_j は j 番目のボイラの定格能力（100%運転時の定格出力）を表し、 S_{WHS}^t は排熱蒸気からの蒸気供給量を表す。また、 S_{DAR}^t と S_{HEX}^t は時刻 t における吸収式冷凍機と温水熱交換機の総蒸気使用量を表し、具体的には次のように表される、

$$S_{\text{DAR}}^t = \sum_{i=1}^q \theta(P) \cdot S_i^{\text{max}} \cdot x_i \quad (3.6)$$

$$S_{\text{HEX}}^t = W_{\text{load}}^t / 0.95 \quad (3.7)$$

ここで、 S_i^{max} は i 番目の吸収式冷凍機の最大蒸気使用量を表す。また、 $\Theta(P)$ は冷凍機運転負荷率 P に依存する吸収式冷凍機の蒸気使用率を表し、一般に P の非線形関数となるが、本研究では、次のように線形近似を行う。

$$\Theta(P) = \begin{cases} 0.8775 \cdot P + 0.0285, & P \leq 0.6 \\ 1.1125 \cdot P - 0.1125, & P > 0.6 \end{cases} \quad (3.8)$$

- (VI) ボイラ運転負荷率 $Q = (S_{\text{DAR}}^t + S_{\text{HEX}}^t + S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t) / S^t$ が 0.2 以上でなければならない。すなわち、

$$-S_{\text{DAR}}^t - S_{\text{HEX}}^t + 0.2 \cdot S^t \leq S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t \quad (3.9)$$

この制約は、運転するボイラの総出力が必要蒸気量の 5 倍以下でなければならないことを意味する。

- (VII) 最小化目的関数は、プラント全体で必要なガス G^t と電力 E^t の料金の和であるエネルギーコストであり、

$$J(t) = G_{\text{cost}} \cdot A_{\text{G}}^t + E_{\text{cost}}^t \cdot A_{\text{E}}^t + PE_{\text{de}}^t + PE_{\text{pc}}^t \quad (3.10)$$

と表される。ただし、 G_{cost} と E_{cost}^t は、それぞれ、ガスと電力の単価を表す。ここで、 A_{G}^t は、ボイラの定格能力時のガス消費量 g_j とボイラ運転負荷率 Q を用いて

$$A_{\text{G}}^t = \left(\sum_{j=1}^p g_j y_j \right) \cdot Q \quad (3.11)$$

と表される。一方、 A_{E}^t は、ターボ冷凍機と付随する冷却塔及び 2 種類のポンプの電力量の和として

$$\begin{aligned} A_{\text{E}}^t &= E_{\text{ER}}^t + E_{\text{CT}}^t + E_{\text{CP}}^t + E_{\text{CDP}}^t \\ &= \sum_{i=q+1}^{q+r} \Xi(P) \cdot E_i^{\text{max}} \cdot x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CT}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CP}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r+s} c_i^{\text{CDP}} x_i^t \end{aligned} \quad (3.12)$$

と表される。ここで、 E_i^{max} は i 番目のターボ冷凍機の最大電力使用量、 c_i^{CT} 、 c_i^{CP} 、 c_i^{CDP} は i 番目のターボ冷凍機に付随する冷却塔及び 2 種類のポンプの電力量である。また、 $\Xi(P)$ は冷凍機運転負荷率 P に依存するターボ冷凍機の電力使用率を表し、一般に P の非線形関数となるが、本章では、次のような線形近似を行う。

$$\Xi(P) = \begin{cases} 0.6 \cdot P + 0.2, & P \leq 0.6 \\ 1.1 \cdot P - 0.1, & P > 0.6 \end{cases} \quad (3.13)$$

PE_{de}^t, PE_{pc}^t はそれぞれ最大電力契約, ピークカット契約の違反に伴うペナルティを表す.

$$PE_{de}^t = \begin{cases} M_{de}, & A_E^t > B_{de} \\ 0, & A_E^t \leq B_{de} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$PE_{pc}^t = \begin{cases} M_{pc}, & A_E^t > B_{pc}, \quad t = 13, 14, 15, 16 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

ここで, B_{de}, B_{pc} はそれぞれ最大電力契約及びピークカット契約の最大電力, M_{de}, M_{pc} はそれぞれの契約を違反した際に電力会社に支払わなければならない金額を表す. したがって, 次のような非線形整数計画問題として定式化される.

問題 $P(t)$

$$\text{minimize } J(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{z}^t) = G_{\text{cost}} \cdot A_G^t + E_{\text{cost}}^t \cdot A_E^t + PE_{de}^t + PE_{pc}^t \quad (3.16)$$

$$\text{subject to } -(1 - z_1^t) \cdot (C^t - (C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t)) \leq 0 \quad (3.17)$$

$$z_1^t \cdot (0.2 \cdot C^t) + (1 - z_1^t) \cdot (0.6 \cdot C^t) \leq C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t \quad (3.18)$$

$$-z_1^t \cdot (0.6 \cdot C^t - (C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t)) \leq 0 \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} z_1^t \cdot \Theta_1(P) + (1 - z_1^t) \cdot \Theta_2(P) + S_{\text{HEX}}^t - S^t \\ \leq -S_{\text{load}}^t + S_{\text{WHS}}^t \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} -z_1^t \cdot \Theta_1(P) - (1 - z_1^t) \cdot \Theta_2(P) - S_{\text{HEX}}^t + 0.2 \cdot S^t \\ \leq S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$-(1 - z_2^t) \cdot (W^t - W_{\text{load}}^t) \leq 0 \quad (3.22)$$

$$z_2^t \cdot (0.2 \cdot W^t) + (1 - z_2^t) \cdot (0.6 \cdot W^t) \leq W_{\text{load}}^t \quad (3.23)$$

$$-z_2^t \cdot (0.6 \cdot W^t - W_{\text{load}}^t) \leq 0 \quad (3.24)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{DAR}_i}\}, \quad i = 1, \dots, q \quad (3.25)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{ER}_i}\}, \quad i = q + 1, \dots, q + r \quad (3.26)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{HEX}_i}\}, \quad i = q + r + 1, \dots, q + r + s \quad (3.27)$$

$$y_j^t \in \{0, 1, \dots, N_{BW_i}\}, \quad j = 1, \dots, p \quad (3.28)$$

$$z_1^t \in \{0, 1\}, z_2^t \in \{0, 1\} \quad (3.29)$$

ただし,

$$C^t = \sum_{i=1}^{q+r} a_i x_i^t \quad (3.30)$$

$$W^t = \sum_{i=q+r+1}^{q+r+s} w_i x_i^t \quad (3.31)$$

$$S^t = \sum_{j=1}^p f_j y_j^t \quad (3.32)$$

$$P = \frac{C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t}{C^t} \quad (3.33)$$

$$\Theta_1(P) = \sum_{i=1}^q (0.8775 \cdot P + 0.0285) \cdot S_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (3.34)$$

$$\Theta_2(P) = \sum_{i=1}^q (1.1125 \cdot P - 0.1125) \cdot S_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (3.35)$$

$$\Xi_1(P) = \sum_{i=q+1}^{q+r} (0.6 \cdot P + 0.2) \cdot E_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (3.36)$$

$$\Xi_2(P) = \sum_{i=q+1}^{q+r} (1.1 \cdot P - 0.1) \cdot E_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (3.37)$$

$$Q = \frac{z_1^t \cdot \Theta_1(P) + (1 - z_1^t) \cdot \Theta_2(P) + S_{\text{HEX}}^t + S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t}{S^t} \quad (3.38)$$

$$A_G^t = \left(\sum_{j=1}^p g_j y_j^t \right) \cdot Q \quad (3.39)$$

$$A_E^t = z_1^t \cdot \Xi_1(P) + (1 - z_1^t) \cdot \Xi_2(P) + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CT}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CP}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r+s} c_i^{\text{CDP}} x_i^t \quad (3.40)$$

$$\text{PE}_{\text{de}}^t = \begin{cases} M_{\text{de}}, & A_E^t > B_{\text{de}} \\ 0, & A_E^t \leq B_{\text{de}} \end{cases} \quad (3.41)$$

$$PE_{pc}^t = \begin{cases} M_{pc}, & A_E^t > B_{pc} \\ 0, & A_E^t \leq B_{pc} \end{cases} \quad (3.42)$$

であり、 $z_1^t = 1, z_1^t = 0$ は、それぞれ冷凍機運転負荷率 $P \leq 0.6, P > 0.6$ 、 $z_2^t = 1, z_2^t = 0$ は、それぞれ、温水熱交換機運転負荷率 $P \leq 0.6, P > 0.6$ に対応する。以下では、 $\lambda^t = \left((x^t)^T, (y^t)^T, (z^t)^T \right)^T$ とし、この問題の制約領域を Λ^t で表す。

ところで、実際のプラントの運用においては複数期間まとめた運転計画の導出が求められるため 24 時間分をまとめた問題を考察する。

ここで、年間ガス使用量契約量の違反に伴うペナルティを考慮するために次のようにする。 m 月 d 日 ($m = 1, 2, \dots, 12, d = 1, 2, \dots, d_{max}$) の運転計画の導出に対して、まず年間ガス使用量契約の契約量 B_{ga} と各月のガス使用量の割合 α_m (図 3.3) より、各月の (一ヶ月あたり) の (月) 契約量 $B_{ga,m}$ を設定する。

$$B_{ga,m} = B_{ga} \cdot \alpha_m \quad (3.43)$$

また、年間ガス使用量契約の違反に伴うペナルティ PE_{ga} と α_m より、各月 (一ヶ月あたり) の (月) ガス使用量契約のペナルティ $PE_{ga,m}$ を設定する。

$$PE_{ga,m} = PE_{ga} \cdot \alpha_m \quad (3.44)$$

現在までのガス使用量 $A_G(d)$ と残りの日数 $d_{max} - d + 1$ より、次の日 (1日あたり) の (日) 契約量 $B_{ga,m}(d)$ を設定する。

$$B_{ga,m}(d) = \frac{B_{ga,m} - A_G(d-1)}{d_{max} - d + 1} \quad (3.45)$$

ただし、

$$A_G(d) = \sum_{\tau=1}^{(d-1) \cdot 24} \left(\sum_{j=1}^p g_j y_j^\tau \right) \cdot Q \quad (3.46)$$

この (日) 契約量の違反に対して、残りの日数に応じた (日) ペナルティ $PE_{ga,m}(d)$ を考慮する.

$$PE_{ga,m}(d) = \frac{PE_{ga,m}}{d_{max} - d + 1} \quad (3.47)$$

また各時刻 t で独立に $P(t)$ を解き、それらをつなぎ合わせて一日分の運転計画を作ると、機器の運転の切り替えが頻繁に発生するような不自然な計画となる場合がしばしば見受けられる. 実際、機器の起動・停止には連続動作中より多くの電力や労力を必要とするため、機器の運転の切り替えには燃料のコストとは別の費用がかかると考えられる.

そこで、地域冷暖房プラントの運転計画問題に対して、運転の効率化を目指して前後のつながりを考慮した次のような 24 時間分をまとめた問題 $P(t, 24)$ を考察の対象とする.

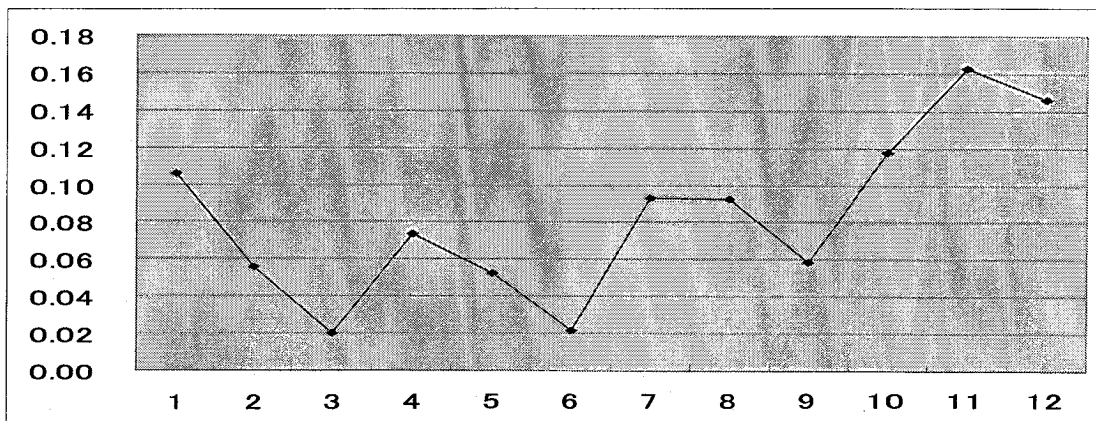


図 3.3: 各月のガス使用量の割合 α_m

24 期間運転計画問題 $P(t, 24)$

$$\text{minimize } J(\boldsymbol{\lambda}(t, 24)) = \sum_{\tau=t}^{t+24-1} \left[J(\boldsymbol{\lambda}^\tau) + \sum_{j=1}^{p+q+r+s} \phi_j |\lambda_j^\tau - \lambda_j^{(\tau-1)}| \right] + \text{PE}_{\text{ga}}(\boldsymbol{\lambda}(t, 24)) \quad (3.48)$$

$$\text{subject to } \boldsymbol{\lambda}(t, 24) \in \Lambda(t, 24) \quad (3.49)$$

ここで、 $\boldsymbol{\lambda}(t, 24) = \left((\boldsymbol{\lambda}^t)^T, (\boldsymbol{\lambda}^{t+1})^T, \dots, (\boldsymbol{\lambda}^{t+23})^T \right)^T$, $\Lambda(t, 24) = \Lambda^t \times \Lambda^{t+1} \dots \times \Lambda^{t+23}$, ϕ_j は j 番目の機器の一回のスイッチの切り替えに必要な費用である。

さらに

$$\text{PE}_{\text{ga}}(\boldsymbol{\lambda}(t, 24)) = \begin{cases} \text{PE}_{\text{ga},m}(d) & \left(\sum_{\tau=t}^{t+23} A_G^\tau < B_{\text{ga},m}(d) \right) \\ 0 & \left(\sum_{\tau=t}^{t+23} A_G^\tau \geq B_{\text{ga},m}(d) \right) \end{cases} \quad (3.50)$$

である。

この問題は、元の問題 $P(t)$ の 24 倍の変数を含む大規模な非線形整数計画問題になるため、完全列挙では計算に要する時間が膨大になり、実用的ではないと考えられるとともに、非線形性のために線形整数計画問題に対する分枝限定法のような一般的な解法は存在しない。そこで、本章においては、戦略的振動に基づくタブー探索法を用いて運転計画の導出を試みる。

3.3. 戦略的振動タブー探索法による短期運転計画

タブー探索 (tabu search) 法は Glover[4, 5, 6] によって考案された近似解法で、目的関数と制約式の係数より後逸を求め、探索を行うという勾配法のアルゴリズムを発展させたものであると言える。その大きな特徴としては、決定変数とそれに対応する係数に対してタブーとペナルティーという概念を導入している点である。

本章では、まず、一般的なタブー探索法の概念について述べた後、戦略的振動とその特性を利用して拡張された様々なアルゴリズムについて考察する。

3.3.1. タブー探索法

● タブー探索法の概要

タブー探索法は、現在の解 \mathbf{x} の近傍 $N(\mathbf{x})$ 全体 ($N(\mathbf{x})$ の要素数 $|N(\mathbf{x})|$ が大きい場合は一部に限定することもある) の中で、 \mathbf{x} 以外の最良の解を次の解として選ぶという基本的な考えに基づいている。このような規則により、現在の解 \mathbf{x} が局所最適解であっても他の解への移動を強制することが可能となる。

ここで、現在の解 \mathbf{x} が局所最適解である場合、 \mathbf{x} から他の解 $\mathbf{x}' \in N(\mathbf{x})$ に移った後に同様の操作で $N(\mathbf{x}')$ 内の最良の解を求めると、再びもとの \mathbf{x} に戻る可能性が高い。一般に、探索がいくつかの解を経由して、もとに戻ることを巡回と呼ぶ。タブー探索法ではこのような望ましくない巡回を回避するため、タブーリスト (短期メモリ) と呼ばれる解の遷移に関する情報の集合 T を用意し、このリストに含まれる遷移を禁止する。したがって、 $N(\mathbf{x}) \setminus (\{\mathbf{x}\} \notin T)$ 内の最良の解への移動が可能となるわけである。

このようなタブー探索法の基本的な手順は次のように要約される。

タブー探索法の基本アルゴリズム

手順1 解 \mathbf{x} の初期値を生成して暫定解とし、タブーリスト T を初期化する。

手順2 $N(\mathbf{x}) \setminus (\{\mathbf{x}\} \notin T)$ の中で、 \mathbf{x} 以外の最も望ましいと考えられる解を求めて次の解とし、更新条件を満たせば暫定解とする。

手順3 終了条件がみたされれば暫定解を出力して探索を終了する。そうでなければ、タブーリスト T を更新して手順2に戻る。

ここで、タブーリスト T は最近の遷移情報が含まれるように動的に制御されることになる。タブーリスト T の構成法、および手順2における暫定解の更新条件の詳細については次節で考察するが、タブー探索法の手順3の終了条件は次のような規則が用いられる。

1. あらかじめ定められた反復回数で終了する。
2. あらかじめ定められた反復回数の間に暫定解の更新がなければ終了する。

タブー探索法ではさらに、特定の変数を変更した頻度や特定の変数がある値を取り続けた期間の長さなど、探索解の特徴を長期間にわたり記憶しておくことにより、未探索の領域へ探索を方向付けようとする手法を組み合わせる用いることが多い。このような探索履歴は短期メモリに対して長期メモリと呼ばれる。タブー探索法は短期メモリ（タブーリスト）に基づく基本構成に加えて長期メモリを利用することによって、探索の集中化と多様化の両方を組み合わせる手法が有効とされている。しかし、タブー探索法の名前がタブーリストによって逆戻りの動作を「禁止する」ところに由来するため、タブー探索法というタブーリストに基づく基本的な構成を指すことが多い。そこで、長期メモリに基づく様々な手法を特に適応メモリ戦略 (adaptive memory programming) と呼ぶこともある。

3.3.2. タブーリストの構成

タブーリスト T の構成方法としては、最近探索した解を直接記憶するという単純な方法も考えられるが、この場合、データ構造をとくに工夫しなければ、生成した解が T に含まれるかどうかの確認に多大な時間が必要とされる。また、巡回を防ぐ効果が十分に得られない場合も存在する。そこで、通常では解をそのまま記憶するのではなく、最近の近傍操作において移動の前後で値の変わった変数や、変数とその値のペアなどを記憶しておき次のような規則が用いられる。

- T 内の変数の値を変更することを禁止する。
- T 内の変数が変更前の値に戻ることを禁止する。

このような規則に用いられる移動の特徴を属性と呼ぶ。属性の具体的な決定方法は、後でいくつかの例を与える。

なお、このような禁止規則を探索の間中保持し続けると、移動できる解がいずれなくなってしまうので、タブー期間と呼ばれるパラメータ t_{tabu} を用意し、一つの属性がタブーリストに入ってから t_{tabu} 回反復すると、その属性をリストから取り除くようにしている。ただし、手順2の解の移動を1回行い、手順3においてタブーリストの更新を行うまでを1反復と数える。属性に基づくタ

ブーリストは、問題や近傍の構造をよく考えて構成する必要がある。

決定変数が 0-1 値をとる問題に対してタブーリストを構成する場合は、次のような規則が考えられる。

禁止規則例 移動の前後で変数 x_j の 0-1 割当が変更された場合は、添字 j をタブーリストに記憶する。タブーリストに含まれる全ての j について、 x_j の値の変更を禁止する。

● タブー探索の移動戦略

タブー探索法の移動法の中で、最も基本的な方法は、

- $N(\mathbf{x}) \setminus (\{\mathbf{x}\} \notin T)$ の中で最も望ましいと考えられる解 \mathbf{x}' を見つけ、 $\mathbf{x} := \mathbf{x}'$ とする。

というものである。多くのタブー探索法はこの規則を採用しているが、細部については様々な工夫が加えられる。

その一つは、タブーリストによって禁止されている解 $\mathbf{x}' \in N(\mathbf{x}) \cup T$ でも、

- 解 \mathbf{x}' を採択しても巡回が起こらない、
- 解 \mathbf{x}' を採択することに十分意味がある、

と判断される場合には、(タブーを無視して) その解への移動を実行するというものである。このような規則を願望 (aspiration) 水準と呼ぶ。願望水準として最も簡単な次の規則はしばしば利用されている。

- \mathbf{x}' は実行可能解でしかも目的関数値 $f(\mathbf{x}')$ が暫定値より良い。

次に、1 回の移動に必要とされる時間を短縮するための工夫について述べる。まず、近傍を全て調べたのち最良解を得る場合を考える。問題が大規模になればなるほど近傍内のすべての解を調べるにはかなりの時間を必要となるため、この部分に対する工夫はきわめて重要である。この部分の高速化に有効であるとされる汎用的な方法の例としては、候補リスト戦略と呼ばれる、 $N(\mathbf{x}) \setminus (\{\mathbf{x}\} \notin T)$ 全体ではなく、その中の見込みのありそうな候補解に探索を絞りその中の最良解に移動するというものがあるが、近傍探索の高速化は局

所探索法の構成に関わる一般的な問題であるので、ここではこれ以上触れないことにする。

● 適応メモリ戦略

タブー探索法の枠組みに組み合わせて利用される適応メモリ戦略のアイデアを紹介する。適応メモリ戦略は過去の探索で得られた情報をいろいろな形で保存しておき、将来の探索に利用する手法の総称である。これらの手法で利用される探索の履歴情報は、総称して長期メモリと呼ばれる。長期メモリは、探索の集中化と多様化を実現するための幅広い情報を提供する。

● 長期メモリ

長期メモリの代表例として頻度メモリがある。ある変数が解の移動において変更された情報や、ある変数が特定の値をとっていた頻度を保存しておくのである。これらの情報は、タブー探索の最中に利用したり、タブー探索が一旦終了した後、再スタートする際に利用可能である。代表的な例としては次のようなものがある。

利用法1 ある特定の変数の値が過去の探索で頻繁に変更されている場合は、長い周期での巡回が起こっていると判断し、その変数の値を変更することに対してペナルティを与える。

利用法2 初期解をランダムに、または山登り法を用いて生成する。その際、これまでの探索においてある変数が特定の値をとっていたときの解の平均精度が高い（低い）と判断された場合、あるいは、ある変数が特定の値をとっていた期間が短い（長い）と判断された場合には、そのような割当が選ばれやすく（選ばれにくく）なるように、山登り法の局所評価に変更を加える。

利用法1は多様化を目的としており、通常、解の評価値にそのような変数のペナルティを重み付きで加えることで実現されるが、ペナルティが大きすぎると良い解を探索する能力がかえって低くなってしまうので、注意を要する。その場合には、ペナルティの重みを小さくするか、探索の多様化が必要であると考えられるとき（局所探索解からの脱出を行うときや暫定解が比較的長い間更新

されないときなど) のみにペナルティを与える等の方法がとられる. 利用法2は探索の集中化と多様化の両方に利用できるアイデアである.

3.3.3. 戦略的振動タブー探索法による運転計画

1998年に, Hanafiら [7]は, 多次元0-1 ナップサック問題に対して, 戦略的振動 (strategic oscillation) に基づくタブー探索法を提案した. 彼らの提案した戦略的振動は, タブー探索法における移動を全体的な視点から制御するという方法である. 一般に, 単一目的で制約のある最適化問題では, 実行可能領域と実行不可能領域の境界付近に望ましい解が存在する 경우가多いが, 戦略的振動はそのような境界周辺の集中的探索を実現するため, 境界の内側と外側を交互に行き来するように, タイプの異なる近傍操作を探索の状況に応じて使い分けて制御する方法である.

非線形整数計画問題の場合, 決定変数の増減と目的関数値及び実行不可能性の増減が一致せず, 有望領域も境界付近にあるとは限らない. そこで, 本章では, 探索の方向の決定の判断に目的関数値だけでなく制約の充足度も利用するために, 次のような制約式の超過分の総和を示す $\delta(\lambda(t, 24))$ と余裕分の総和を示す $\epsilon(\lambda(t, 24))$ を探索方向の決定のための指標として導入する.

$$\begin{cases} \delta(\lambda(t, 24)) \triangleq \sum_{\tau=t}^{t+23} \sum_{i \in I^+} g_i^\tau(\lambda^\tau), & I^+ = \{i \mid g_i^\tau(\lambda^\tau) > 0, i \in \{1, \dots, 8\}\} \\ \epsilon(\lambda(t, 24)) \triangleq \sum_{\tau=t}^{t+23} \sum_{i \in I^-} -g_i^\tau(\lambda^\tau), & I^- = \{i \mid g_i^\tau(\lambda^\tau) \leq 0, i \in \{1, \dots, 8\}\} \end{cases}$$

ここで, I^+ は $g_i^\tau(\lambda^\tau) \leq 0$ を満たしていない制約式の添字の集合を表し, I^- は $g_i^\tau(\lambda^\tau) \leq 0$ を満たしている添字の集合を表す.

このような $\delta(\lambda(t, 24))$ と $\epsilon(\lambda(t, 24))$ を導入すれば, 対象とする非線形整数計画問題に対する戦略的振動タブー探索法のアルゴリズムは次のように示される.

手順0.

初期解 $\lambda(t, 24)$ をランダムに発生させ, タブーリストと頻度リストを初期化し, $\lambda(t, 24)$ が実行可能ならば, 手順4へ行く. 実行不可能ならば, 手順1へ行く.

手順 1. TS_PROJECT

目的) : 実行不可能領域から有望領域へ制約の超過分 $\delta(\lambda(t, 24))$ を減らしつつ、山登り的な探索を行い、有望領域内へ解を移動する。

$\delta(\lambda(t, 24))$ が 0 でない間 (解が実行不可能である間), 1 個の変数を変更して新たな解とする。変更する変数は、値の変更により $\delta(\lambda(t, 24))$ が減少する変数の中で、タブー (禁止されている変更) でなく、目的関数値が最良となる変数とする。もしも、 $\delta(\lambda(t, 24))$ を減らす変数がないときはタブーを無視してランダムに 1 つの変数を変更し、 $\delta(\lambda(t, 24))$ を改悪して探索を進める。 $\delta(\lambda(t, 24)) = 0$ となり実行可能領域に達し、より目的関数値を改善する変数がなくなれば終了し、手順 2 へ行く。

手順 2. COMPLEMENT

目的) : 有望領域内の解の近傍を局所探索し、有望領域内の解を得る。

現在の解 $\lambda(t, 24)$ に対し、新しい解候補 $\lambda(t, 24)'$ を、 $\lambda(t, 24)' := \lambda(t, 24)$ とし、 $\lambda(t, 24)'$ に関してランダムに 1 個から 7 個までの変数を変更して作成する。解候補 λ' に対して $\delta(\lambda(t, 24)') = 0$ (実行可能) であれば手順 4 を行い、 $\delta(\lambda(t, 24)') > 0$ (実行不可能) であれば手順 1 を行い、 λ' から有望領域内の解候補 λ'' を求める。得られた解候補 λ'' が $J(\lambda(t, 24)'') < J(\lambda(t, 24))$ を満たせば $\lambda(t, 24) := \lambda(t, 24)''$ とする。これを任意の回数繰り返して終了すれば、手順 3 もしくは手順 5 へ行く。この繰り返しの回数を CN とする。

手順 3. TS_DROP

目的) : 有望領域内の解 $\lambda(t, 24)$ から実行可能領域外部へ深さ (depth) と呼ばれるパラメータに相当する回数分の探索を行い、実行可能領域内部へ解を移動する。

値を変更しても $\lambda(t, 24)$ が実行可能となる変数の中で、タブーでなく、最も制約式の余裕分 $\epsilon(\lambda(t, 24))$ が大きくなる変数を選択し、変更する。それを規定回数続けるか、もしくは $\epsilon(\lambda(t, 24))$ を改善する変数がなくなれば終了し、手順 4 へ行く。

手順 4. TS_ADD

目的) : 実行可能領域内部から有望領域内へ解を移動。

$\delta(\lambda(t, 24))$ が 0 である間 (すなわち実行可能である間), 値を変更すると目的関数値が改善される変数の中で, タブーでなく, 変更後も $\lambda(t, 24)$ が実行可能な変数のうち, 目的関数値が最良となる変数を選択する. そのような変数がなくなれば, 手順 2 へ戻る.

手順 5. TS_INFEASIBLE_ADD

目的): 有望領域内から実行可能領域外部へ深さ (depth) と呼ばれるパラメータに相当する回数分の探索を行い, 実行可能領域外部へ解を移動する.

値を変更すると目的関数値が改善される変数の中で, 変更後も $\lambda(t, 24)$ が実行可能な変数のうち, 目的関数値が最良となる変数を選択する. それを規定回数繰り返す. もしくは, そのような変数がなくなれば終了し, 手順 1 へ戻る.

このような戦略的振動によるタブー探索の進行過程は, 図 3.4 のように示される.

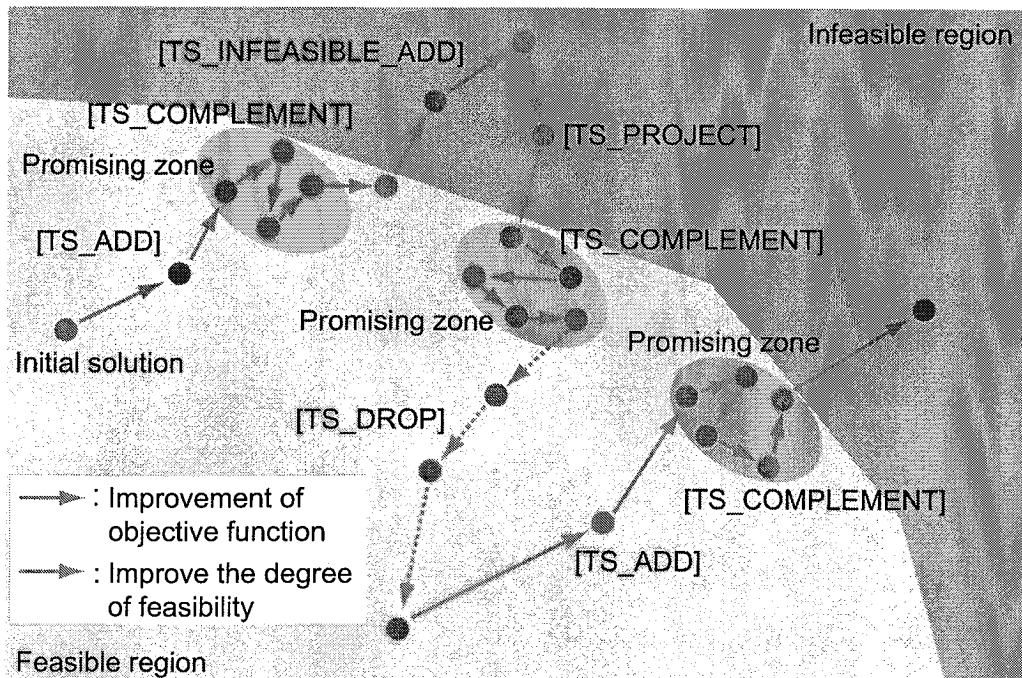


図 3.4: 戦略的振動による探索の進行

3.4. 数値例

本節では、これまでの運転計画問題と、本章で提案した契約違反に伴うペナルティを考慮した運転計画問題 $P(t, 24)$ に対して戦略的振動に基づくタブー探索法を適用し、ペナルティを含めた運転費用を比較する。さらに、一ヶ月の運転計画問題として定式化された 24×31 期間運転計画問題 $P(1, 24), P(25, 48), \dots, P(454, 477)$ に対して、従来の運転計画問題を解いて得られる運転計画と、本研究の運転計画問題を解いて得られる運転計画の、ペナルティを含めた運転費用を比較する。ここで、本数値例では 24 期間運転計画問題 $P(1, 24)$ は 456 個の変数を含む非線形整数計画問題となっている。このような問題に対して、戦略的振動に基づくタブー探索法のパラメータは $CN = 250$ と設定して探索を実行した。

CPU: Intel Pentium IV Processor 2.40GHz, Memory: 512MB, C-Compiler: Microsoft Visual C++ 6.0 なる計算機環境で行った数値実験により得られた 24 期間運転計画問題シミュレーション結果表 3.1 に示す。ここで、数値実験は同一条件で 10 回試行を行い、目的関数値、切替回数については、得られた試行結果の範囲と平均値を示した。この表から、従来の運転計画問題を解いて得られる運転計画より、安価な運転計画が得られていることがわかる。

表 3.1: 24 期間運転計画問題に対するシミュレーション結果

| | 目的関数値 (円) | 切替回数 | 計算時間 (秒) |
|-----------|----------------|------|--------------------|
| (従来) 運転計画 | 4508455.1 (最良) | 70 | 23.1×10^2 |
| | 4527280.3 (平均) | 67.2 | |
| | 4555423.4 (最悪) | 66 | |
| (提案) 運転計画 | 4173620.1 (最良) | 68 | 23.4×10^2 |
| | 4195661.4 (平均) | 64.1 | |
| | 4249137.0 (最悪) | 69 | |

さらに、同一環境で行った数値実験により得られた一ヶ月の運転計画問題のシミュレーション結果を表 3.2 に示す。また、一ヶ月のガス使用量の推移を図

3.5 に示す.

表 3.2: 24 × 31 期間運転計画問題に対するシミュレーション結果

| | 目的関数値 (円) | 計算時間 (秒) |
|-----------|------------------|--------------------|
| (従来) 運転計画 | 157320559.1 (最良) | 73.9×10^3 |
| | 158563782.2 (平均) | |
| | 160082039.2 (最悪) | |
| (提案) 運転計画 | 150878375.0 (最良) | 72.6×10^3 |
| | 152100698.6 (平均) | |
| | 153944627.8 (最悪) | |

表 3.2 から, 従来の運転計画問題を解いて得られる運転計画に比べて, より安価な運転計画が得られるとともに, 最低ガス使用量契約の契約量を満たす運転計画が得られていることがわかる.

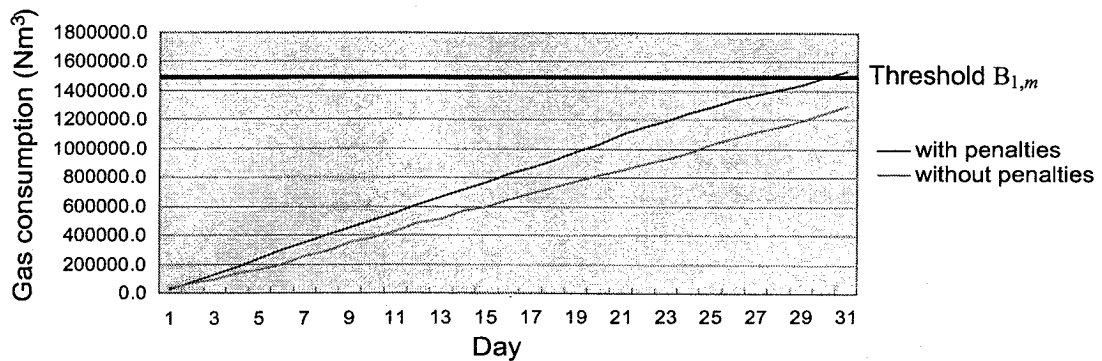


図 3.5: 24 × 31 期間運転計画問題に対するガス使用量

3.5. おわりに

本章では, 従量料金契約以外の契約に着目して, 地域冷暖房プラントの運転計画問題をより実態を反映した非線形整数計画問題として定式化した. このよ

うに契約違反に伴うペナルティを考慮して定式化された最適化問題に対して、戦略的振動に基づくタブー探索法による最適運転計画手法を提案した。さらに、実プラントのデータに基づいて、従来の従量料金契約以外の契約違反に伴うペナルティを考慮しない運転計画問題を解いて得られた解との比較を行った結果、提案した運転計画問題による解の方がより実用的で安価な運転費用となる運転計画が求められることが示された。

第4章

契約違反を考慮した地域冷暖房プラントの多目的短期 運転計画

4.1. はじめに

前章では、地域冷暖房プラントの短期運転計画問題を、契約違反に伴うペナルティを考慮した非線形計画問題としての定式化を行い、戦略的振動に基づくタブー探索法による最適運転計画の導出を試みてきた。

本章では、現実のプラント運用において求められる、複数の要求（運転費用（燃料費＋ペナルティ）の最小化及び、環境保全のための一次エネルギー量の最小化）を満足するような運転計画を実現するため、この問題（2目的短期運転計画問題）を、2目的非線形整数計画問題として定式化した後、各目的関数に対する意思決定者の判断のあいまい性を考慮するためのファジィ目標を導入し、意思決定者の志望水準を表す基準メンバシップ値を対話的に更新しながら意思決定者の満足解を導出するという戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法の提案と実データに基づく有効性を試みる。

4.2. 多目的短期運転計画問題の定式化

前章で定式化してきた契約違反を考慮した短期運転計画問題に対して、プラントの運転における省資源あるいは環境汚染の抑制といった要求をも考慮すれば、エネルギー費用と機器の運転状況の切り替え費用の和である運転費用 J_1 とともに運転で使用されるエネルギーから換算される一次エネルギーの量 J_2 の最小化を同時に目指すという多目的（2目的）24期間運転計画問題 $MOP(t, 24)$ は次のように定式化される。

多目的 (2 目的) 24 期間運転計画問題 $MOP(t, 24)$

minimize

$$J_1(\lambda(t, 24)) = \sum_{\tau=t}^{t+24-1} \left[J_1(\lambda^\tau) + \sum_{j=1}^{p+q+r+s} \phi_j |\lambda_j^\tau - \lambda_j^{\tau-1}| \right] + PE_{ga}(\lambda(t, 24))$$

minimize

$$J_2(\lambda(t, 24)) = \sum_{\tau=t}^{t+24-1} [G^\tau \cdot \alpha_g + E^\tau \cdot \alpha_e]$$

subject to $\lambda(t, 24) \in \Lambda(t, 24)$

ここで, $\lambda(t, 24) = \left((\lambda^t)^T, (\lambda^{t+1})^T, \dots, (\lambda^{t+23})^T \right)^T$, $\Lambda(t, 24) = \Lambda^t \times \Lambda^{t+1} \dots \times \Lambda^{t+23}$, ϕ_j は j 番目の機器の一回のスイッチの切り替えに必要な費用で,

$$PE_{ga}(\lambda(t, 24)) = \begin{cases} PE_{ga,m}(d) & \left(\sum_{\tau=t}^{t+23} A_G^\tau < B_{ga,m}(d) \right) \\ 0 & \left(\sum_{\tau=t}^{t+23} A_G^\tau \geq B_{ga,m}(d) \right) \end{cases} \quad (4.1)$$

である. さらに, α_g と α_e はそれぞれガスと電力の一次エネルギー換算係数で, 目的関数 $J_1(\lambda(t, 24))$ と $J_2(\lambda(t, 24))$ は, それぞれ運転費用 (燃料費 + ペナルティ) と一次エネルギー消費量を表す.

4.3. 対話型ファジィ満足化手法

一般に, 人間の判断のあいまい性を考慮すれば, 多目的 (2 目的) 24 期間運転計画問題 $MOP(t, 24)$ として定式化された問題に対して, 意思決定者は各目的関数に対して「だいたいある値以下にしたい」というようなファジィ目標をもつものと考えられる. 各目的関数に対する意思決定者のファジィ目標を規定するメンバシップ関数の決定に際して, 制約領域における各目的関数の個別の最小値 \underline{J}_l と最大値 \bar{J}_l , $l = 1, 2$ が計算され, 意思決定者は各目的関数の個別の最小値と最大値の範囲内で, 自己の満足度の変化率を考慮して, 強意単調減少関数のメンバシップ関数を評価することになる.

このような各目的関数に対する意思決定者のファジィ目標を規定するメンバシップ関数の一例として、線形メンバシップ関数

$$\mu_i(J_i(\lambda(t, 24))) = \begin{cases} 1 & , J_i(\lambda(t, 24)) < \underline{J}_i \\ \frac{J_i(\lambda(t, 24)) - \bar{J}_i}{\underline{J}_i - \bar{J}_i} & , \underline{J}_i \leq J_i(\lambda(t, 24)) \leq \bar{J}_i \\ 0 & , J_i(\lambda(t, 24)) > \bar{J}_i \end{cases} \quad (4.2)$$

がしばしば用いられる [61, 62]. このような線形のメンバシップ関数を図示すると図 4.1 のようになる.

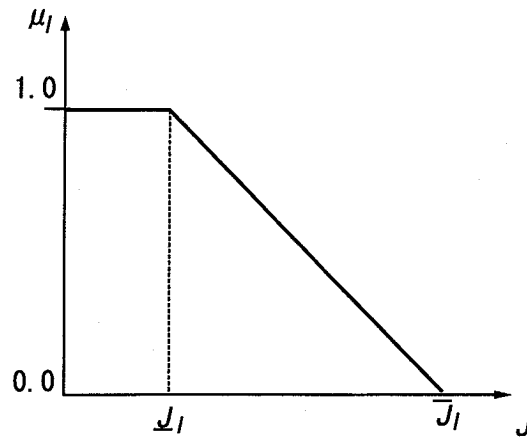


図 4.1: メンバシップ関数

多目的 (2 目的) 24 期間運転計画問題 $MOP(t, 24)$ の各目的関数に対する意思決定者のファジィ目標を対応するメンバシップ関数 $\mu_i(J_i(\lambda(t, 24)))$, $i = 1, 2$ で規定すれば, 解くべき問題は次のようなファジィ多目的 (2 目的) 意思決定問題に変換される.

$$\left. \begin{array}{l} \text{maximize } \mu_1(J_1(\lambda(t, 24))) \\ \text{maximize } \mu_2(J_2(\lambda(t, 24))) \\ \text{subject to } \lambda(t, 24) \in \Lambda(t, 24) \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

このようなファジィ多目的 (2 目的) 意思決定問題に対して, 目的関数の代りにメンバシップ関数の大小関係に基づいて定義されるパレート最適解の概念

が導入され、特に M-パレート最適解とよばれている [50, 34, 28, 31].

定義 4.1 (*M-パレート最適解*)

$\lambda^*(t, 24) \in \Lambda(t, 24)$ に対して $\mu_l(J_l(\lambda(t, 24))) \geq \mu_l(J_l(\lambda^*(t, 24)))$, $l = 1, 2$ となるような $\lambda(t, 24) \in \Lambda(t, 24)$ が存在せず、ある j について $\mu_j(J_j(\lambda(t, 24))) > \mu_j(J_j(\lambda^*(t, 24)))$ となるような $\lambda(t, 24) \in \Lambda(t, 24)$ が存在しないとき、 $\lambda^*(t, 24)$ を *M-パレート最適解*であるという。

一般に、複数個 (2 個) の相競合するメンバシップ関数に対して、いわゆる統合関数とでもよぶべき関数

$$\mu_D(\mu(\mathbf{J}(\lambda(t, 24)))) = \mu_D(\mu_1(J_1(\lambda(t, 24))), \mu_2(J_2(\lambda(t, 24)))) \quad (4.4)$$

を導入すれば、次のようなファジィ多目的 (2 目的) 意思決定問題が形式的に定義できる。

$$\underset{\lambda(t, 24) \in \Lambda(t, 24)}{\text{maximize}} \quad \mu_D(\mu(\mathbf{J}(\lambda(t, 24)))) \quad (4.5)$$

ここで、統合関数 $\mu_D(\mu(\mathbf{J}(\lambda(t, 24))))$ の値は、複数個 (2 個) のファジィ目標に対する意思決定者の全体としての満足度を表していると解釈することができる。意思決定者の統合関数 $\mu_D(\mu(\mathbf{x}))$ の関数形を大域的に同定することができる。後は単に一目的の最適化問題を解くことに帰着され、話は簡単である。しかし、一般には意思決定者の統合関数の関数形を大域的に同定することは非常に困難な作業であると思われる。したがってこのような場合には、意思決定者の陰に存在する統合関数を大域的に陽に同定することなく、意思決定者との対話により、局所的な選好情報を引き出し、最終的に意思決定者が満足できる解、すなわち満足解 (satisficing solution) を求めるという対話型手法が、坂和らにより提案され、発展してきている [50, 34, 28, 31, 26, 27, 29, 30, 32].

多目的 (2 目的) 24 期間運転計画問題 $MOP(t, 24)$ の目的関数に対する意思決定者のメンバシップ関数が決定された後、各メンバシップ関数に対して意思決定者の志望水準を反映させる基準点 $\bar{\mu} = (\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2)^T$ が、意思決定者により主観的に設定されたとしよう。このとき、もし、基準点の設定がひかえめすぎて達成可能であれば、その基準点よりも望ましい M-パレート最適解を求める一

方, もし基準点の設定が達成不可能であれば, 基準点にできるだけ近い M-パレート最適解を求めることが望まれる. このような M-パレート最適解は, 次のような拡張ミニマックス問題を解くことにより求められる.

$$\underset{\lambda(t,24) \in \Lambda(t,24)}{\text{minimize}} \max_{l=1,2} \left\{ \left(\bar{\mu}_l - \mu_l(J_l(\lambda(t,24))) + \rho \sum_{i=1}^2 \left(\bar{\mu}_i - \mu_i(J_i(\lambda(t,24))) \right) \right) \right\} \quad (4.6)$$

ただし, ρ は十分小さい正の数である.

ここで, 基準点 $\bar{\mu} = (\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2)^T$ は, Wierzbicki [59] の目的関数空間での基準点の考えをメンバシップ関数空間に拡張したもので, 基準メンバシップ値とよばれる.

坂和らにより提案されてきている対話型ファジィ満足化手法 [50, 34, 28, 31] では, 意思決定者は設定した基準点に対して得られる自己の要求に近い M-パレート最適解の目的関数の達成レベルに満足できなければ, 満足のできる M-パレート最適解が得られるまで, 対話的に次々と基準点を更新することになる.

このような意思決定者の M-パレート最適性の保証された満足解を求めるための多目的 (2 目的) 24 期間運転計画問題 $MOP(t, 24)$ に対する対話型アルゴリズムは, 次のように構成することができる.

- 手順 1** 各目的関数の個別の最小値 \underline{J}_l と最大値 \bar{J}_l , $l = 1, 2$ を求める.
- 手順 2** 手順 1 で求められた各目的関数の個別の最小値と最大値を考慮して, 意思決定者は各目的関数に対するファジィ目標を規定するメンバシップ関数 $\mu_l(J_l(\lambda(t, 24)))$, $l = 1, 2$ を決定した後, 初期の基準メンバシップ関数値 $\bar{\mu}_l$, $l = 1, 2$ を設定する.
- 手順 3** 設定された基準メンバシップ関数値 $(\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2)$ に対応する拡張ミニマックス問題を解く.
- 手順 4** 手順 3 で得られた解に満足ならば終了. そうでなければ, 現在のメンバシップ関数値と目的関数値を考慮して, 基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_l$, $l = 1, 2$ を更新し, 手順 3 に戻る.

このような対話型ファジィ満足化手法のアルゴリズムにおいて、M-パレート最適解を求めるために解かれる拡張ミニマックス問題(4.6)は、大規模な非線形整数計画問題になるため、完全列挙では計算に要する時間が膨大になり実用的ではなく、しかも、問題に含まれる非線形性のため分枝限定法のような一般的な解法も存在しない。このような状況に対処するため、本章では、前章で考察した戦略的振動に基づくタブー探索法[7]を適用する。これまで述べてきた多目的(2目的)K期間運転計画問題に対する戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法のアルゴリズムは図4.2で表される。

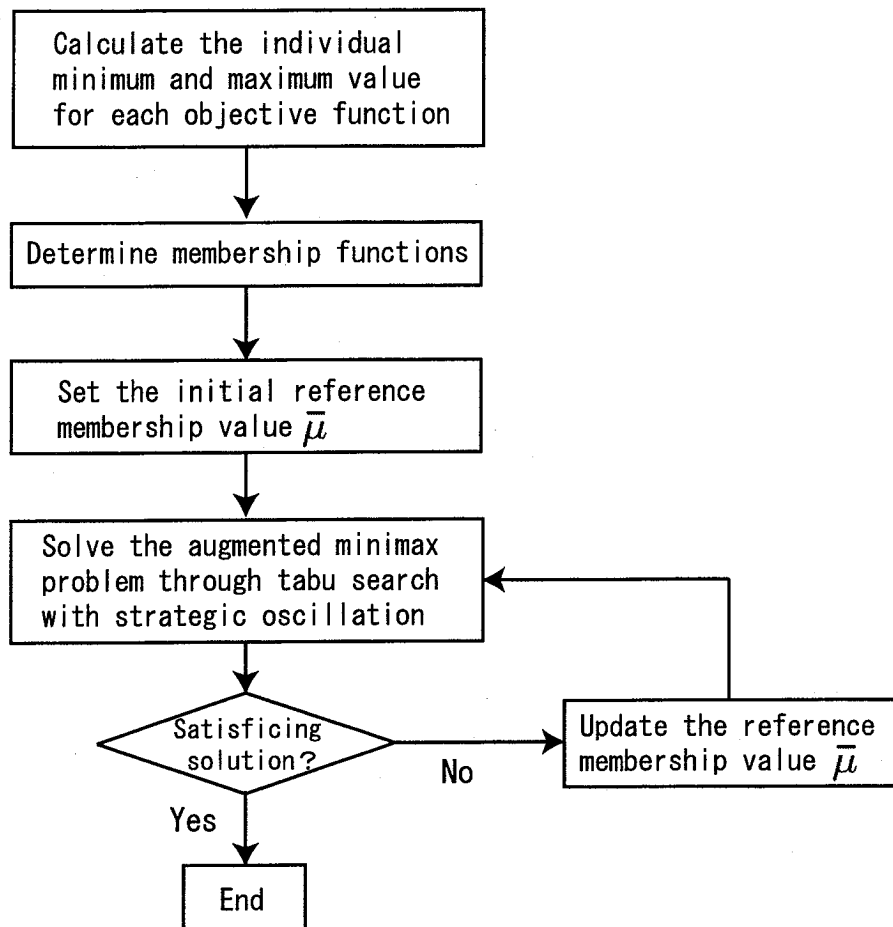


図 4.2: 戦略的振動タブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法

4.4. 数値例

本章では，東京都内地域（18 需要家，総床面積約 $6.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ ）で稼働している実地域冷暖房プラントの運転計画に対して，戦略的振動タブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法を適用し，その有効性を検証する．ここで，数値実験を行う計算機環境は，CPU: Intel PentiumIV Processor 2.40GHz, Memory: 512MB, C-Compiler: Microsoft Visual C++ 6.0 である．

定式化された多目的（2 目的）744 期間運転計画問題 $MOP(1, 744)$ に対して，戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法を適用してみよう．

まず，表 4.1 に示されているように，各目的関数の個別の最小値 J_l と最大値 \bar{J}_l , $l = 1, 2$ が計算される．

表 4.1: 各目的関数の個別の最小値 J_l と最大値 \bar{J}_l , $l = 1, 2$

| 目的関数 | J_l | \bar{J}_l |
|-------|-------------|-------------|
| J_1 | 465294344.9 | 150878375.0 |
| J_2 | 329818346.2 | 120242558.1 |

計算された各目的関数の個別の最小値と最大値を用いて，意思決定者は図 4.1 に示される線形のメンバシップ関数 (4.2) を決定したものとしよう．

次に，初期の基準メンバシップ値をすべて 1.0 ($\bar{\mu}_1 = 1.00$, $\bar{\mu}_2 = 1.00$) に設定して対応する拡張ミニマックス問題を戦略的振動に基づくタブー探索法で解いて得られた結果が，表 4.2 の 1 列目に示されている．意思決定者は得られた解に満足できず，メンバシップ関数 $\mu_2(\cdot)$ の満足度を犠牲にしてもメンバシップ関数 $\mu_1(\cdot)$ の満足度を改善したいと判断して， $\mu_1(\cdot)$ に対する基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_1$ は 1.00 のままで $\mu_2(\cdot)$ に対する基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_2$ を 1.00 から 0.95 に更新している．このように更新された意思決定者の基準メンバシップ値 (1.00, 0.95) に対応する拡張ミニマックス問題を解いて得られた結果が，表 4.2 の 2 列目に示されているが，意思決定者の要求を反映させて， $\mu_2(\cdot)$ の満足度を

若干犠牲にして $\mu_1(\cdot)$ の満足度を少し改善した解が得られていることがわかる。しかし、意思決定者は得られた解に満足できずメンバシップ関数 $\mu_2(\cdot)$ の満足度をさらに犠牲にしてもメンバシップ関数 $\mu_1(\cdot)$ の満足度をより改善したいと判断して、 $\mu_1(\cdot)$ に対する基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_1$ は 1.00 のままで $\mu_2(\cdot)$ に対する基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_2$ を 0.95 から 0.90 に更新している。このように更新された意思決定者の基準メンバシップ値 (1.00, 0.95) に対応する拡張ミニマックス問題を解いて得られた結果が、表 4.2 の 3 列目に示されている。本例の意思決定者は、表 4.2 に示されている対話過程のように、得られたメンバシップ関数 $\mu_1(\cdot)$ 0.71, $\mu_2(\cdot)$ の満足度 0.61 と対応する目的関数値 $J_1(\cdot) = 219563349.5$, $J_2(\cdot) = 213127596.4$ に満足して、3 回目の対話で満足解が得られている。

表 4.2: 対話過程

| 対話 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| $\bar{\mu}_1$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| $\bar{\mu}_2$ | 1.00 | 0.95 | 0.90 |
| μ_1 | 0.63 | 0.66 | 0.71 |
| μ_2 | 0.65 | 0.64 | 0.61 |
| J_1 | 263358375.0 | 248088543.1 | 219563349.5 |
| J_2 | 185391644.7 | 195669214.1 | 213127596.4 |

4.5. おわりに

本章では、前章で考察してきた地域冷暖房プラントの短期運転計画問題を、運転費用の最小化のみならず、環境保全のため一次エネルギー量の最小化をも考慮すべきとの立場から、2 目的非線形整数計画問題として定式化した。このように定式化された 2 目的計画問題の各目的関数に対する人間としての意思決定者の判断のあいまい性をファジィ目標で規定した後、意思決定者の志望水準を表す基準メンバシップ値を対話的に更新しながら意思決定者の満足解を導出

するという戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法を提案した。さらに、東京都内地域で稼働している実地域冷暖房プラントの運転計画に適用して、その有効性を検証した。

第5章

契約違反を考慮した地域冷暖房プラントの長期運転計画

5.1. はじめに

地域冷暖房 (District Heating and Cooling: DHC) システムは、冷暖房に必要な冷水、温水及び蒸気の供給を地域毎に一括して行うためのシステムであり、地域冷暖房プラントはその冷水、温水及び蒸気を生成するプラントである [63].

このような地域冷暖房システムに対するニューラルネットワークに基づく熱負荷予測手法の発展 [3, 43, 37, 38, 44, 16, 39] とともに、地域冷暖房プラントの最適運転計画に関する研究が盛んに行われている [46, 54, 45, 33, 53, 47, 52] 本論文の第3章や第4章で考察してきたように、これらの最適運転計画に関する研究では、1日あるいは長くても1ヶ月というような比較的短期の運転計画の立案に主眼が置かれてきている。その主な理由は、現実の実規模プラントに対して、1日の運転計画を立案するために定式化される最適運転計画問題は、数百の変数を含む大規模な問題となり、望まれる制限時間内で、最適解あるいは近似解を求めることが困難となることがあげられる。

しかし、現実には、契約期間が長期（1年）となる契約も存在するため、このような契約の履行可能性を調べるためには、長期の運転計画の立案が必要となる。このような要望に対処するため、本章では、1年間の1ヶ月あるいは1週間といった期間で分割し、各期間における標準的な一日に対する運転計画を求め、それらをつなぎ合わせることによって、実用的な時間内に長期（1年）の（近似的）最適運転計画を求める方法を提案する。さらに、現実の地域冷暖房プラントのデータを用いた数値実験を行なうことにより、提案手法の有用性を

検討する.

5.2. 地域冷暖房プラントの運転計画

5.2.1. プラント構成

本章で考察する地域冷暖房プラントは、第3章や第4章で考察してきたものに v 種類 N_{CEX} 台の冷水熱交換器と u 種類 N_{IEX} 台の氷蓄熱熱交換器を付加したより一般的な構成になっている. すなわち、図 5.1 に示されているように、ガスを燃料として蒸気を生成する p 種類 N_{BW} 台のボイラ、蒸気と電力を用いて冷水を生成する q 種類 N_{DAR} 台の吸収式冷凍機、電力のみを用いて冷水を生成する r 種類 N_{ER} 台のターボ冷凍機、 v 種類 N_{CEX} 台の冷水熱交換器、 u 種類 N_{IEX} 台の氷蓄熱熱交換器、これらに付属する冷却塔と冷水運搬用ポンプ、および蒸気を用いて温水を生成する s 種類 N_{HEX} 台の温水熱交換器から構成されている. ここで、ポンプと冷却塔は対応する冷凍機の稼動状況に応じて稼動するものとする.

このように本章では、基本的には第3章や第4章で考察したものと同様ではあるものの、図 5.1 のように、若干一般的な地域冷暖房プラントに対して、ボイラ、吸収式冷凍機、ターボ冷凍機、冷水熱交換器、氷蓄熱熱交換器、温水熱交換機を必要な分だけ動作させて予測される需要を満たす冷水、温水及び蒸気を生成するという条件の下で、運転費用を最小化するという運転計画問題を考察する.

5.2.2. 運転計画問題の定式化

いま、時刻 $t, t = 1, 2, \dots, 24$ の地域における冷水負荷量 C_{load}^t 、温水負荷量 W_{load}^t 、蒸気負荷量 S_{load}^t が与えられるならば、プラントの運転計画問題は、地域内の各施設の冷水、温水及び蒸気の負荷を満たすように各機器を動作させるときに、運転費用（燃料費+ペナルティ）を最小化する時刻 t における運転計画を求める問題として次のようにまとめられる.

(I) 運転する冷凍機の総出力 $C^t = \sum_{i=1}^{q+r+u+v} a_i x_i^t$ に対する冷水需要量の割合

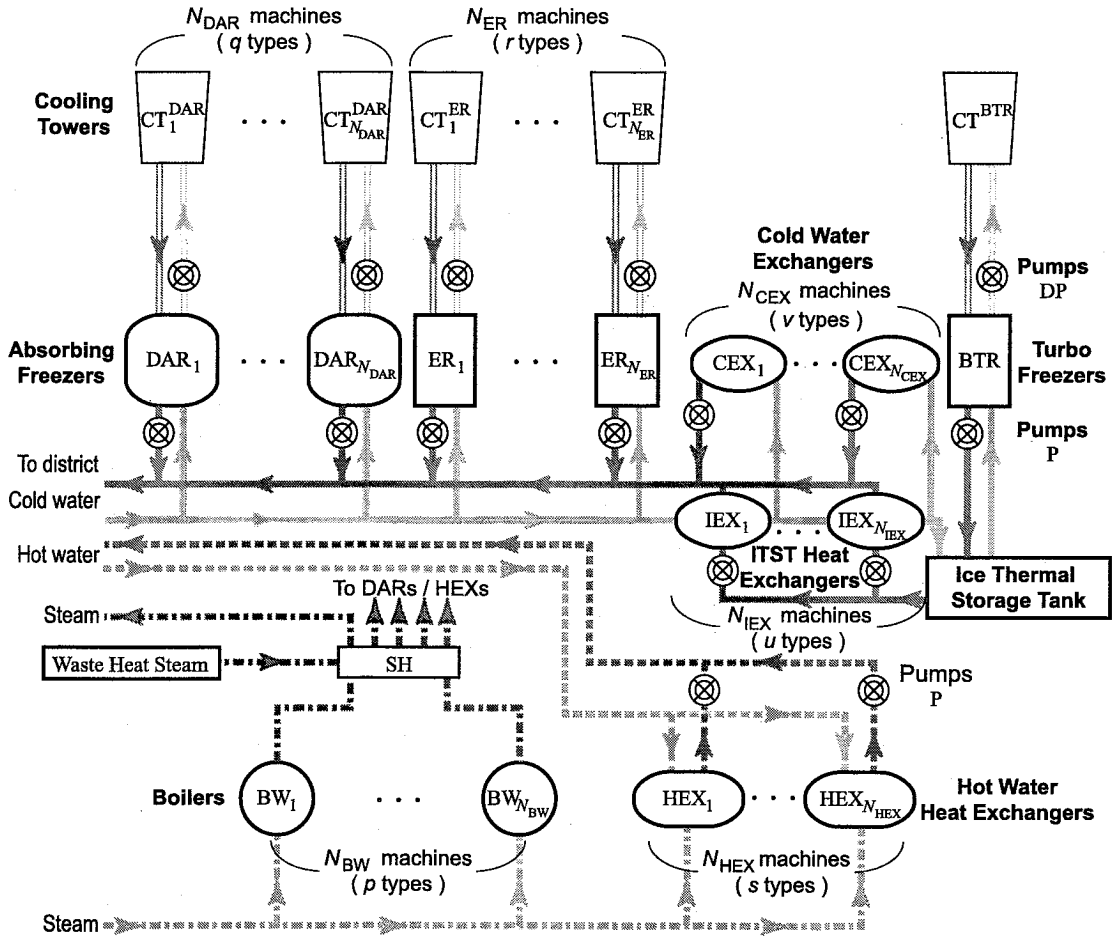


図 5.1: プラント構成

を表す冷凍機運転負荷率 $P = C_{load}^t / (C^t - C_{TS}^t)$ が 1.0 以下でなければならない。すなわち,

$$C^t \geq C_{load}^t - C_{TS}^t \quad (5.1)$$

ここで, a_i は i 番目の冷凍機の定格能力 (100% 運転時の定格出力) を表し, C_{TS}^t は自動運転される蓄熱槽からの冷水供給量を表す。この制約は, 運転する冷凍機の総出力が冷水負荷量以上でなければならないことを意味する。

(II) 冷凍機運転負荷率 $P = C_{load}^t / (C^t - C_{TS}^t)$ が 0.2 以上でなければならな

い. すなわち,

$$0.2 \cdot C^t \leq C_{\text{load}}^t - C_{TS}^t \quad (5.2)$$

この制約は運転する冷凍機の総出力が冷水負荷量の 5 倍以下でなければならないことを意味する. また, C_{load}^t が微小なとき, (5.1) と (5.2) を同時に満たすことができなくなるため, 本研究では, C_{load}^t が冷凍機の最小定格能力の 1/5 未満の場合は冷水ポンプの動作のみで対応するものとする.

- (III) 運転する温水熱交換機の総出力 $W^t = \sum_{i=q+r+u+v+1}^{q+r+s+u+v} w_i x_i^t$ に対する温水需要量の割合を表す温水熱交換機運転負荷率 $P = W_{\text{load}}^t / W^t$ が 1.0 以下でなければならない. すなわち,

$$W^t \geq W_{\text{load}}^t \quad (5.3)$$

ここで, a_i は i 番目の温水熱交換機の定格能力 (100%運転時の定格出力) を表す. この制約は, 運転する温水熱交換機の総出力が温水負荷量以上でなければならないことを意味する.

- (IV) 運転するボイラの総出力 $S^t = \sum_{j=1}^p f_j y_j^t$ に対する必要蒸気量の割合を表すボイラ運転負荷率 $Q = (S_{\text{DAR}}^t + S_{\text{HEX}}^t + S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t) / S^t$ が 1.0 以下でなければならない. すなわち,

$$-S_{\text{DAR}}^t - S_{\text{HEX}}^t + S^t \geq S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t \quad (5.4)$$

であり, この制約は, 運転するボイラの総出力が必要蒸気量以上でなければならないことを意味する. ここで, f_j は j 番目のボイラの定格能力 (100%運転時の定格出力) を表し, S_{WHS}^t は排熱蒸気からの蒸気供給量を表す. また, S_{DAR}^t と S_{HEX}^t は時刻 t における吸収式冷凍機と温水熱交換機の総蒸気使用量を表し, 具体的には次のように表される,

$$S_{\text{DAR}}^t = \sum_{i=1}^q \theta(P) \cdot S_i^{\text{max}} \cdot x_i \quad (5.5)$$

$$S_{\text{HEX}}^t = W^t / 0.95 \quad (5.6)$$

ここで、 S_i^{\max} は i 番目の吸収式冷凍機の最大蒸気使用量を表す。また、 $\Theta(P)$ は冷凍機運転負荷率 P に依存する吸収式冷凍機の蒸気使用率を表し、一般に P の非線形関数となるが、本研究では、次のように線形近似を行う。

$$\Theta(P) = \begin{cases} 0.8775 \cdot P + 0.0285, & P \leq 0.6 \\ 1.1125 \cdot P - 0.1125, & P > 0.6 \end{cases} \quad (5.7)$$

- (V) ボイラ運転負荷率 $Q = (S_{\text{DAR}}^t + S_{\text{HEX}}^t + S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t) / S^t$ が 0.2 以上でなければならない。すなわち、

$$-S_{\text{DAR}}^t - S_{\text{HEX}}^t + 0.2 \cdot S^t \leq S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t \quad (5.8)$$

この制約は、運転するボイラの総出力が必要蒸気量の 5 倍以下でなければならないことを意味する。

- (VI) 最小化目的関数は、プラント全体に必要なガス G^t と電力 E^t の料金の和であるエネルギーコストであり、

$$J(t) = G_{\text{cost}} \cdot A_G^t + E_{\text{cost}}^t \cdot A_E^t \quad (5.9)$$

と表される。ただし、 G_{cost} と E_{cost}^t は、それぞれ、ガスと電力の単価を表す。ここで、 A_G^t は、ボイラの定格能力時のガス消費量 g_j とボイラ運転負荷率 Q を用いて

$$A_G^t = \left(\sum_{j=1}^p g_j y_j \right) \cdot Q \quad (5.10)$$

と表される。一方、 A_E^t は、ターボ冷凍機、吸収式冷凍機、温水熱交換器、冷却塔及び 2 種類のポンプの電力量の和として

$$\begin{aligned} A_E^t &= E_{\text{ER}}^t + E_{\text{DAR}}^t + E_{\text{HEX}}^t + E_{\text{CT}}^t + E_{\text{CP}}^t + E_{\text{P}}^t \\ &= \sum_{i=q+1}^{q+r} \Xi(P) \cdot E_i^{\max} \cdot x_i^t + \sum_{i=1}^q e_i^{\text{DAR}} \cdot x_i^t + \sum_{i=q+r+u+v+1}^{q+r+s+u+v} e_i^{\text{HEX}} \cdot x_i^t \\ &\quad + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CT}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CP}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r+s+u+v} c_i^{\text{P}} x_i^t \end{aligned} \quad (5.11)$$

と表される. ここで, E_i^{\max} は i 番目のターボ冷凍機の最大電力使用量, e_i^{DAR} は i 番目の吸収式冷凍機の電力使用量, e_i^{HEX} は i 番目の温水熱交換器の電力使用量, c_i^{CT}, c_i^{CP} はそれぞれ i 番目の冷凍機に付随する冷却塔の電力量および冷却水ポンプの電力量, c_i^P は冷凍機および温水熱交換機に付属するポンプの電力量である. また, $\Xi(P)$ は冷凍機運転負荷率 P に依存するターボ冷凍機の電力使用率を表し, 一般に P の非線形関数となるが, 本章では, 次のような線形近似を行う.

$$\Xi(P) = \begin{cases} 0.6 \cdot P + 0.2, & P \leq 0.6 \\ 1.1 \cdot P - 0.1, & P > 0.6 \end{cases} \quad (5.12)$$

これまでの考察により, 本章で考察する運転計画問題は次のような定式化非線形整数計画問題として定式化されることになる.

問題 $P(t)$

$$\text{minimize } J(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, z^t) = G_{\text{cost}} \cdot A_G^t + E_{\text{cost}}^t \cdot A_E^t \quad (5.13)$$

$$\text{subject to } -(1 - z^t) \cdot (C^t - (C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t)) \leq 0 \quad (5.14)$$

$$z^t \cdot (0.2 \cdot C^t) + (1 - z^t) \cdot (0.6 \cdot C^t) \leq C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t \quad (5.15)$$

$$-z^t \cdot (0.6 \cdot C^t - (C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t)) \leq 0 \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} z^t \cdot \Theta_1(P) + (1 - z^t) \cdot \Theta_2(P) + S_{\text{HEX}}^t - S^t \\ \leq -S_{\text{load}}^t + S_{\text{WHS}}^t \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} -z^t \cdot \Theta_1(P) - (1 - z^t) \cdot \Theta_2(P) - S_{\text{HEX}}^t + 0.2 \cdot S^t \\ \leq S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$-W^t \leq -W_{\text{load}}^t \quad (5.19)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{DAR}_i}\}, \quad i = 1, \dots, q \quad (5.20)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{ER}_i}\}, \quad i = q + 1, \dots, q + r \quad (5.21)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{CEX}_i}\}, \quad i = q + r + 1, \dots, q + r + v \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{IEX}_i}\}, \quad i = q + r + v + 1, \dots, \\ q + r + u + v \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$x_i^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{HEX}_i}\}, \quad i = q + r + u + v + 1, \dots, \\ q + r + s + u + v \quad (5.24)$$

$$y_j^t \in \{0, 1, \dots, N_{\text{BW}_j}\}, \quad j = 1, \dots, p \quad (5.25)$$

$$z^t \in \{0, 1\} \quad (5.26)$$

ただし,

$$C^t = \sum_{i=1}^{q+r+u+v} a_i x_i^t \quad (5.27)$$

$$W^t = \sum_{i=q+r+u+v+1}^{q+r+s+u+v} w_i x_i^t \quad (5.28)$$

$$S^t = \sum_{j=1}^p f_j y_j^t \quad (5.29)$$

$$P = \frac{C_{\text{load}}^t - C_{\text{TS}}^t}{C^t} \quad (5.30)$$

$$\Theta_1(P) = \sum_{i=1}^q (0.8775 \cdot P + 0.0285) \cdot S_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (5.31)$$

$$\Theta_2(P) = \sum_{i=1}^q (1.1125 \cdot P - 0.1125) \cdot S_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (5.32)$$

$$\Xi_1(P) = \sum_{i=q+1}^{q+r} (0.6 \cdot P + 0.2) \cdot E_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (5.33)$$

$$\Xi_2(P) = \sum_{i=q+1}^{q+r} (1.1 \cdot P - 0.1) \cdot E_i^{\text{max}} \cdot x_i^t \quad (5.34)$$

$$Q = \frac{z_1^t \cdot \Theta_1(P) + (1 - z_1^t) \cdot \Theta_2(P) + S_{\text{HEX}}^t + S_{\text{load}}^t - S_{\text{WHS}}^t}{S^t} \quad (5.35)$$

$$A_{\text{G}}^t = \left(\sum_{j=1}^p g_j y_j^t \right) \cdot Q \quad (5.36)$$

$$A_{\text{E}}^t = z^t \cdot \Xi_1(P) + (1 - z^t) \cdot \Xi_2(P) + \sum_{i=1}^q e_i^{\text{DAR}} \cdot x_i^t + \sum_{i=q+r+u+v+1}^{q+r+s+u+v} e_i^{\text{HEX}} \cdot x_i^t \\ + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CT}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r} c_i^{\text{CP}} x_i^t + \sum_{i=1}^{q+r+s+u+v} c_i^{\text{P}} x_i^t \quad (5.37)$$

であり、 $z^t = 1, z^t = 0$ は、それぞれ冷凍機運転負荷率 $P \leq 0.6, P > 0.6$ に対応する。

以下の議論において、記号の煩雑さを避けるため、この問題の決定変数を $\lambda^t = \left((x^t)^T, (y^t)^T, z^t \right)^T$ 、制約領域を Λ^t と表す。

ここで、各時刻 t において独立に $P(t)$ を解き、それらをつなぎ合わせて一日分の運転計画を作成すると、機器の運転の切り替えが頻繁に発生するような不自然な計画となる場合がしばしば見受けられる。実際、機器の起動・停止には連続動作中より多くの電力や労力を必要とするため、機器の運転の切り替えには燃料のコストとは別の費用がかかると考えられる。

このような状況を踏まえて、より実際の運転の効率化を目指して、地域冷暖房プラントの運転計画問題に対して、数時間分をまとめて前後のつながりを考慮した定式化を試みる。具体的には、次のような 24 時間分をまとめた問題 $P(0, 24)$ を考察の対象とする。

24 期間運転計画問題 $P(0, 24)$

$$\text{minimize } J(\lambda(0, 24)) = \sum_{\tau=0}^{23} \left[J(\lambda^\tau) + \sum_{j=1}^{p+q+r+s+u+v} \phi_j |\lambda_j^\tau - \lambda_j^{(\tau-1)}| \right] \quad (5.38)$$

$$\text{subject to } \lambda(0, 24) \in \Lambda(0, 24) \quad (5.39)$$

ここで、 $\lambda(0, 24) = ((\lambda^0)^T, \dots, (\lambda^{23})^T)^T, \Lambda(0, 24) = \Lambda^0 \times \dots \times \Lambda^{23}, \phi_j$ は第 j 種の機器の一回のスイッチの切り替えに必要な費用である。

5.2.3. 契約違反を考慮した長期運転計画

第 3 章や第 4 章で考察してきたように、地域冷暖房プラントの運用会社は、地域冷暖房プラントにおいてガスと電力を使用するため、ガス会社や電力会社と従量料金契約を結んでいる。また、この従量料金契約以外の契約として次のような契約がある。

1. 最低ガス使用量契約

年間で一定量以上のガスを使用するという最低ガス使用量契約をガス会社と

結んでいる。

2. 最大電力契約

各時刻で使用できる最大の電力を予め設定しておくという最大電力契約を電力会社と結んでいる。

3. ピークカット契約

電力消費のピーク時間（午後1時から午後4時まで）の最大電力を制限するというピークカット契約を電力会社と結んでいる。

このような契約があるため、契約に対する違反に対してはペナルティが生じることになる。これらのペナルティを考慮することにより、実際のプラント運用に近づけることを考察する。

まず、最大電力契約とピークカット契約の違反に伴うペナルティ PE_{de}^t と PE_{pc}^t は、それぞれ、次のように表される。

$$PE_{de}^t = \begin{cases} M_{de}, & A_E^t > B_{de} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.40)$$

$$PE_{pc}^t = \begin{cases} M_{pc}, & A_E^t > B_{pc}, t = 13, 14, 15, 16 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.41)$$

ここで、 B_{de}, B_{pc} はそれぞれ最大電力契約及びピークカット契約の最大電力、 M_{de}, M_{pc} はそれぞれの契約を違反した際に電力会社に支払わなければならない金額を表す。

第3章や第4章では、考察の対象が1日あるいは1ヶ月という比較的短期の運転計画であった。そのため、ガス会社との契約の一つである、年間で一定量以上のガスを使用するという最低ガス使用量契約について考慮する際に、現在までのガス使用量と残りの日数より、次の日（1日あたり）の（日）使用目標量を設定して、運転計画の立案を行っていたため、ガスの使用量が比較的増加し、コストが増加する傾向が見られた。本章では契約期間が長期（1年間）となる最低ガス使用量契約の履行可能性を調べるために長期運転計画を考察の対象とし、従来、日単位で行われていた年間最低ガス使用量の違反に伴うペナルティ

の考慮を月単位で行うことにより効率よく最低ガス使用量契約を履行する運転計画を立案する。そこで、月単位で年間最低ガス使用量契約の違反に伴うペナルティを考慮するため、契約違反に伴うペナルティ M_{ga} と図 5.2 に示されている各月のガス使用量の割合 α_m から各月のペナルティ $M_{ga,m}$ を $M_{ga,m} = M_{ga} \cdot \alpha_m$ のように設定する。ここで、 d_ν を ν 月の日数とすると、 ν 月の平均的な 1 日当たりガス使用量 $A_{G,\nu}$ を次のように設定する。

$$A_{G,\nu} = \frac{\sum_{t=0}^{24d_\nu-1} A_G^t}{d_\nu} \quad (5.42)$$

年間ガス使用量契約の契約量 B_{ga} と現在 (m 月) までのガス使用量 $\sum_{\nu=1}^{m-1} (d_\nu \cdot A_{G,\nu})$ から、 m 月のガス使用目標量 $B_{ga,m}$ を次のように設定する。

$$B_{ga,m} = B_{ga} \cdot \alpha_m + \frac{\sum_{\nu=1}^{m-1} (B_{ga,\nu} - d_\nu \cdot A_{G,\nu})}{12 - m + 1} \quad (5.43)$$

ただし、 $A_{G,m} = \sum_{\tau=t}^{t+23} \left(\sum_{j=1}^p g_j y_j^\tau \right) \cdot Q$ である。そして、日数 d_m から 1 日あたりの契約違反に伴うペナルティ $M_{ga,m}(d_m)$ とガス使用目標量 $B_{ga,m}(d_m)$ を次のように設定する。

$$M_{ga,m}(d_m) = \frac{M_{ga,m}}{d_m} \quad (5.44)$$

$$B_{ga,m}(d_m) = \frac{B_{ga,m}}{d_m} \quad (5.45)$$

これらのことから、最低ガス使用量契約の違反に伴うペナルティを PE_{ga} は次のように表される。

$$PE_{ga}(\lambda(0, 24)) = \begin{cases} M_{ga,m}(d_m) & , \quad \sum_{t=0}^{23} A_G^t < B_{ga,m}(d_m) \\ 0 & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.46)$$

これらのことから、ペナルティを考慮した m 月の標準的な 1 日 (各時刻 t , $t = 0, 1, \dots, 23$ の熱負荷を m 月の各時刻の平均熱負荷としたもの) の運転計画問題は以下のようになり、この問題を考察の対象とする。

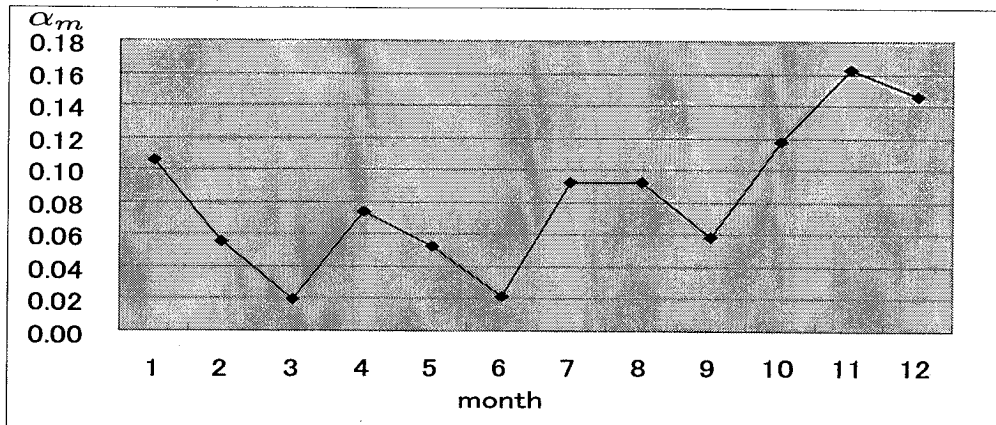


図 5.2: 各月のガス使用量の割合 α_m

m 月の標準的な 1 日の運転計画問題 $P_m(0, 24)$

$$\begin{aligned} \text{minimize } J'_{0,24}(\lambda(0, 24)) = & J_{0,24}(\lambda(0, 24)) + \text{PE}_{\text{ga}}(\lambda(0, 24)) \\ & + \text{PE}_{\text{de}}(\lambda(0, 24)) + \text{PE}_{\text{pc}}(\lambda(0, 24)) \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$\text{subject to } \lambda(0, 24) \in \Lambda(0, 24) \quad (5.48)$$

この問題は、元の問題 $P(t)$ の 24 倍の変数を含む大規模な非線形整数計画問題になるため、完全列挙では計算に要する時間が膨大になり、実用的ではないと考えられるとともに、非線形性のために線形整数計画問題に対する分枝限定法のような一般的な解法は存在しない。このような状況に対処するため、本章では第 3 章や第 4 章と同様に、戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた長期運転計画の導出を試みる。

5.3. 数値例

本節では、提案手法の有用性を検討するために、3 種類のボイラ、4 種類の吸収式冷凍機、4 種類のターボ冷凍機、4 種類の冷水熱交換器、3 種類の温水熱交換器から構成される実際の地域冷暖房プラントにおけるデータに基づいて各月の標準的な 1 日の運転計画問題 $P_m(0, 24)$, $m = 1, 2, \dots, 12$ を定式化し、こ

表 5.1: シミュレーション結果 (年間運転計画問題)

| | 運転費用 (億円) | 切替回数 | 計算時間 (秒) |
|----------|-----------|------|-------------------|
| 実績 | 1.34 | | |
| 日単位 (従来) | 1.24 (最良) | 2818 | $2.08 \cdot 10^4$ |
| | 1.28 (平均) | 3148 | |
| | 1.34 (最悪) | 3440 | |
| 月単位 (提案) | 1.16 (最良) | 2656 | $2.11 \cdot 10^3$ |
| | 1.19 (平均) | 2710 | |
| | 1.22 (最悪) | 2980 | |

の問題に対して戦略的振動に基づくタブー探索法を適用して得られた12ヶ月分の計画をまとめたものを年間計画とし、ペナルティを含めた年間の運転費用(提案)を算出する。また、1日単位の運転計画問題から得られた運転計画を365日分まとめたものを年間計画として算出したペナルティを含めた年間の運転費用(従来)と比較する。このとき、これらの運転計画問題は456個の整数変数を含む問題となる。さらに、実際のプラントの年間の運転費用(実績)とも比較する。

実験を行う計算機環境は、CPU: Intel Pentium IV Processor 2.40GHz, Memory: 512MB, C-Compiler: Microsoft Visual C++ 6.0 である。

表 5.1 から、提案手法や従来手法により得られた運転計画に対する運転費用は、実際の運転費用(実績)よりも安くなっていることがわかる。これは、実績は、将来の熱負荷が未知な状態で運転しており、不足が発生しないように安全よりの運転しているためと考えられる。一方、提案手法や従来手法では、熱負荷が既知である状態で運転計画を立案しており、無駄の少ない運転計画が得られているためと考えられる。このことから、十分に高い精度で将来の熱負荷の予測が可能ならば、提案手法あるいは従来手法で考察されている運転計画問題を解くことにより、現状の運転計画よりも低コストな運転計画が得られると考えられる。また、提案手法は、従来手法に対して、計算時間が1/10程度に抑えられており、望ましい結果となっている。

5.4. おわりに

本章では、地域冷暖房プラントの年間運転計画を月単位の運転計画に分割することに着目して、地域冷暖房プラントの月単位の標準的な1日の運転計画問題を非線形整数計画問題として定式化した。さらに定式化された運転計画問題に対して戦略的振動に基づくタブー探索法を適用し、年間の運転計画の立案および年間の運転費用の算出を行った。さらに、実際のプラントの年間の運転費用及び日単位の分割に基づく年間の運転費用との比較を行い、提案手法の有用性を検討した。

第6章

負荷の連続性と運転の継続性を考慮した地域冷暖房システムの実用的短期運転計画

6.1. はじめに

これまで考察してきたように、近年、都市部において、エネルギー利用の効率化と地域環境の保全及び都市災害の防止等を目的として、図6.1に示されているような地域冷暖房 (District Heating and Cooling: DHC) システムの導入が進められてきている。地域冷暖房システムは、ある地域内の冷暖房に使用される冷水や蒸気等をプラントで集中的に生産し、パイプラインを通じ各施設に循環供給するシステムである。プラントには大型の冷凍機やボイラ等の熱源機

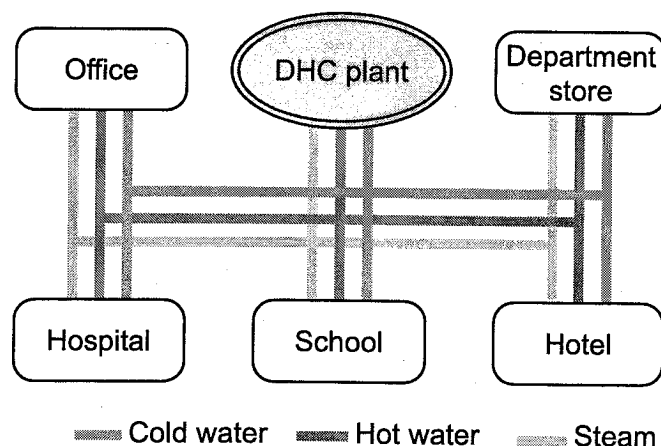


図 6.1: 地域冷暖房システム

器が含まれており、システムの効率的な運用のためには、熱負荷の予測値に基づいて熱源の最適な運転パターンを決定し、熱源機器の立ち上がり時間を考慮した無駄のない運転制御が望ましい。そこで、プラントの高効率運転を支援す

る技術としての熱負荷予測手法 [16, 37, 38, 43, 44] および予測負荷に基づく熱源機器の最適運転計画手法の研究がなされてきている [58, 10, 48, 17].

しかし、これらの研究は、1時間単位で運転計画の最適化問題を取り扱っており、現実のプラントにおいては朝の急激な負荷変動に合わせて適切な運転を行っていることを考慮すれば、必ずしも現実的な計画になっているとは言い難い。しかも、従来の手法 [48, 17] を直接より細かな時間単位で適用した場合、実行可能な計画の組合せ数が増大し、最適解を得るのに多大な処理時間を要するため実用的ではない。さらに、より現実的な運転計画を立てるためには、運転機器の切替に要する費用や時間も考慮する必要がある。本章では、計画の単位時間の細分により処理時間が増大しない熱負荷需要の予測方法を提案するとともに、機器切替の費用と時間を考慮した多様な基準に基づく運転計画モデルをいくつか提案し、実データを用いたシミュレーション実験を通して提案モデルの有用性について比較と検討を行う。

6.2. 熱負荷の予測

地域が必要とする蒸気、冷水等の需要を本論文では熱負荷と呼ぶ。地域冷暖房プラントでは、吸収型の冷凍機がボイラで生成した蒸気を使って冷水を生成するなど、相互に依存しているため、運転計画の最適化には、地域供給している熱負荷全ての需要の予測値が必要となる。ここでは冷水熱量、冷水流量、蒸気流量の3種類の熱負荷を例に、予測方法について述べる。

図 6.2 に関東地方の地域冷暖房プラントの 2009 年の、土日祝祭日を除いた 1 日の熱負荷と平均気温の関係を示す。図 6.2 に示すように、熱負荷は気象条件に大きく影響を受け、平均気温と曲線的な相関が見られることがわかる。次に、図 6.3 に 1 週間の熱負荷および気温の推移を示す。図 6.3 に示すように、各熱負荷は 1 日単位の周期性を持ち、土日とそれ以外で、様相が異なることがわかる。また周期変動のパターンは、振幅がほぼ一定で気温変動の振幅の変化にあまり影響を受けて気温変動の影響をあまり受けていないことがわかる。

この結果を基に、1 日の熱負荷について、日単位の熱負荷と 1 日の変動パターンを別々に予測し、日単位の熱負荷を 1 日の変動パターンで按分する形で

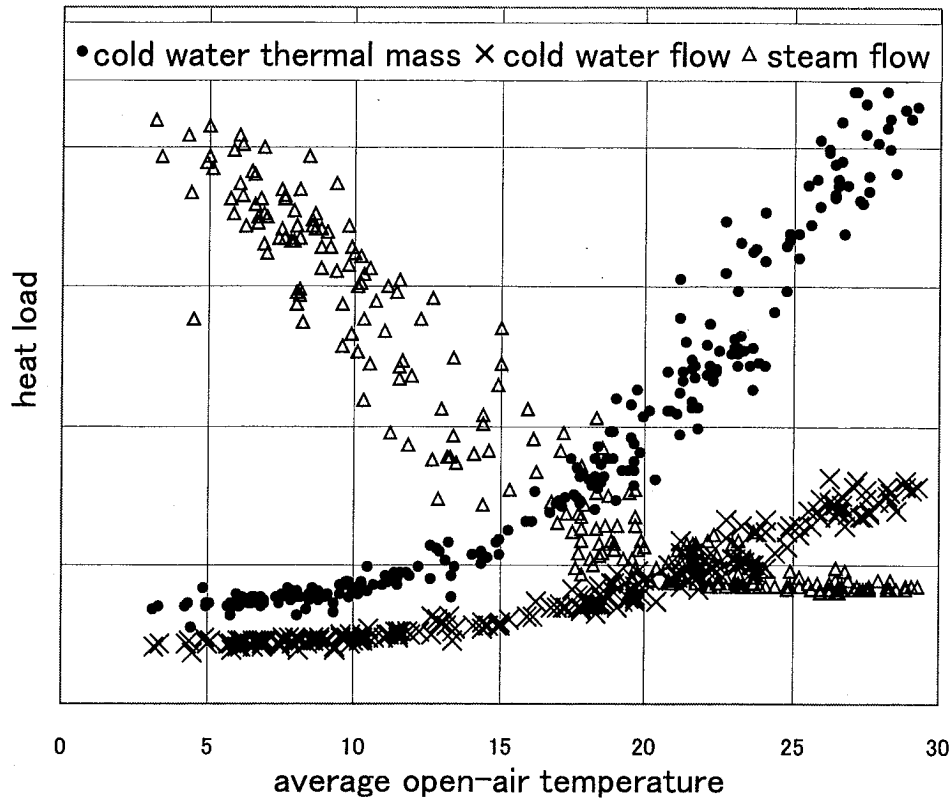


図 6.2: 熱負荷と平均気温との相関グラフ (1/1-12/31)

熱負荷を予測する。日単位の熱負荷は、土日祝祭日と平日に分け、気象情報及び直近実績を説明変数とした重回帰分析によりモデル化し、そのモデルに気象予報値を当てはめて求める。ただし、重回帰に用いる説明変数は、気象庁より入手可能な地域別の平均気温、最高気温、最低気温、相対湿度の予報値を用いることとし、図 6.2 の曲線的な傾向を加味するため平均気温の二乗項および、湿度と平均気温から計算した絶対湿度を加え、ステップワイズ法 [18] により最適化した。表 6.1 に各熱負荷の予測に採用された説明変数を示す。ここで、モデル化のための説明変数として実績値ではなく予報値を用いる理由は、表 6.2 に示すように、相対湿度と絶対湿度は、切片 $\cong 0$ 、傾き $\cong 1$ となっておらず、傾向があるため、モデル化にその要因を加味するためである。

1 日の需要パターンの実績は、1 日の熱負荷を日平均値で割って正規化して求め、予測値は、直近同一曜日の平均値とした。

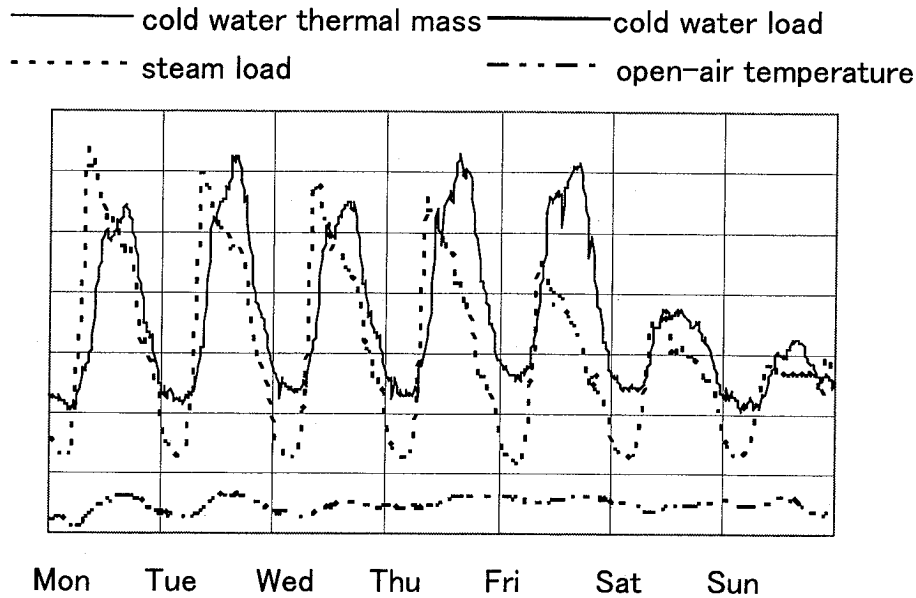


図 6.3: 1 週間の熱負荷推移 (1/26-2/1)

表 6.1: 熱負荷説明変数最適化結果

| | 冷水熱量 | 冷水流量 | 蒸気流量 |
|--------|--------|--------|--------|
| 切片 | ○ | ○ | ○ |
| 最高気温 | | ○ | |
| 最低気温 | | | |
| 平均気温 | ○ | ○ | ○ |
| 平均気温二乗 | ○ | ○ | ○ |
| 相対湿度 | ○ | ○ | ○ |
| 絶対湿度 | ○ | ○ | ○ |
| 直近実績 | | ○ | ○ |
| R^2 | 0.9681 | 0.9696 | 0.9815 |

気象予報値と実績から重回帰により日単位の熱負荷を予測した後、直近のパターンで按分する予測方法により得られた結果を図 6.4 に示す。気象予報及びモデルの誤差によりピーク時の負荷の値が実際と少し異なる場合も観察されるが、全体としてほぼ実績に近い熱負荷の値を予測可能であることがわかる。

表 6.2: 気象予報値と実績の関係

| | 平均気温 | 最高気温 | 最低気温 | 相対湿度 | 絶対湿度 |
|-------|------|------|------|-------|-------|
| 切片 | 0.04 | 0.30 | 0.13 | -4.18 | -0.13 |
| 傾き | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.91 | 0.87 |
| R^2 | 0.98 | 0.95 | 0.97 | 0.72 | 0.96 |

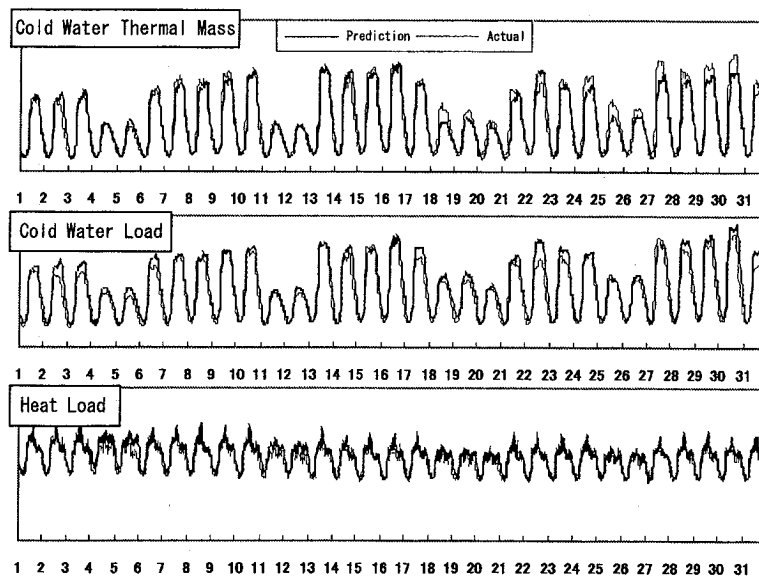


図 6.4: 熱負荷予測結果 (7/1-7/31)

6.3. 運転計画対象

次に、熱負荷の予測値を用いて運転計画を最適化することを考える。最適化により立案された運転計画が現実的かどうかを判断するために、ここでは、実際のプラントのデータを用いて検討を行う。

図 6.5 に用いる地域冷暖房プラントの模式図を示す。本プラントは 4 台のボイラと、10 台の吸収式冷凍機、2 台のコージェネ、及びその付帯設備から構成される。本プラントのボイラは、全て高圧蒸気を生成し、地域供給用の蒸気は減圧して作成する。冷凍機 10 台中 9 台は高圧蒸気を用いて冷水を生成する。内 2 台は排蒸気を地域用の蒸気として再利用できる。2 台のコージェネ中 1 台

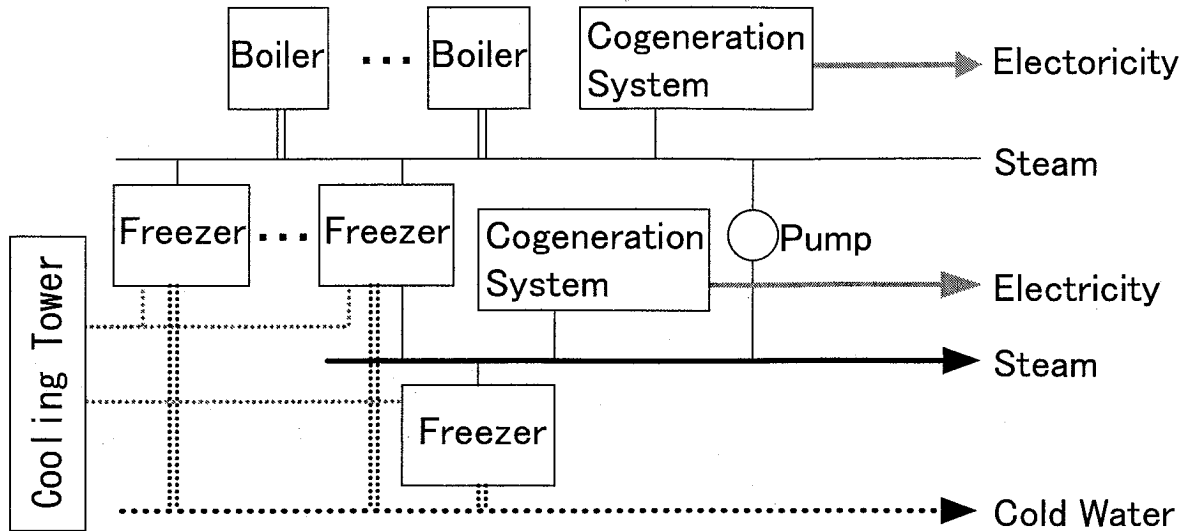


図 6.5: 1 週間の熱負荷推移 (1/26-2/1)

は顧客への顧客への電力供給用で 10K 蒸気を生成するタイプで、もう 1 台は地域冷暖房プラントへの電力供給用で高圧蒸気を生成するタイプである。いずれも電力会社への売電は行わない形の契約となっており、需要を満たす範囲内で発電を行う。

6.4. 運転計画問題の定式化

1 日の単位時間毎の冷水熱量予測値 $L_r(t)$, $t = 1, 2, \dots$, 冷水流量予測値 $L_{fr}(t)$, 蒸気流量予測値 $L_s(t)$, 地域が利用する電力量予測値 $L_e(t)$, 及び直前の運転状況に関する条件の下で、コスト最小化を目的として、各単位時間毎の冷凍機 (r_1, r_2, \dots, r_{10}), ボイラ (b_1, b_2, \dots, b_4), およびコージェネ (G_1, G_2) の運転の有無を最適化対象 (決定変数) とする運転計画問題を考える。

6.5. 可能な運転組合せとコストのモデル化

まず冷凍機の運転組合せ $\delta r_i(t)$ (時点 t に冷凍機 r_i が運転中の場合 1, それ以外の場合 0 となる値) を考える. 可能な組合せは冷水熱量の負荷率,

$$R_r(t) = \frac{L_r(t)}{\sum_{i=1}^{10} \delta r_i(t) \cdot M_{r_i}} \quad (6.1)$$

と冷水流量の負荷率

$$R_{fr}(t) = \frac{L_{fr}(t)}{\sum_{i=1}^{10} \delta r_i(t) \cdot M_{fr_i}} \quad (6.2)$$

が以下の範囲になるものである.

$$\delta r_i(t) \cdot R_{r_i}^{\min} \leq R_r(t) \leq 1 - Y_r \quad (6.3)$$

$$\delta r_i(t) \cdot R_{fr_i}^{\min} \leq R_{fr}(t) \leq 1 - Y_{fr} \quad (6.4)$$

ここで, M_{r_i}, M_{fr_i} はそれぞれ冷凍機 r_i の冷水熱量および冷水流量の定格容量, $R_{r_i}^{\min}, R_{fr_i}^{\min}$ は同じく冷凍機 r_i の最低負荷率, Y_r, Y_{fr} は熱負荷変動に対し冷水の品質を維持するための余裕率である.

冷凍機の運転組合せが決まると冷凍機の蒸気消費量 $S_r(t)$ と消費電力量 $E_r(t)$ はそれぞれ,

$$S_r(t) = \sum_{i=1}^{10} \delta r_i(t) \cdot F_{r_i}(R_r(t)) \quad (6.5)$$

$$E_r(t) = \sum_{i=1}^{10} \delta r_i(t) \cdot F_{er_i}(R_r(t)) \quad (6.6)$$

で計算される. ここで, $F_{r_i}(R_r(t)), F_{er_i}(R_r(t))$ は, それぞれ冷凍機 r_i の負荷率 $R_r(t)$ 時の蒸気消費量, 消費電力量を求める関数であり, 実績から同定する.

さらに, 冷凍機を構成する冷却系の設備は自動運転されるため, それらの消費

電力量 E_{fun} は、次のような冷水熱量負荷とその日の気象条件の関数 $F_{fun}(L_r(t))$ として実績から求められる。

$$E_{fun}(t) = F_{fun}(L_r(t)) \quad (6.7)$$

K_{G_1} を電気が逆流しないための定数, M_{G_1} を定格容量, H_{G_1} を補機の消費電力量とすると、地域用のコージェネ G_1 の運転時の発電量は次のように表される。

$$E_{G_1}(t) = \min(L_e(t) + H_{G_1} - K_{G_1}, M_{G_1}) \quad (6.8)$$

その際、コージェネ G_1 の生成蒸気量は、次のような発電量の関数として実績から求められる。

$$S_{G_1}(t) = F_{G_1}(E_{G_1}(t)) \quad (6.9)$$

運転中のボイラの消費電力量 $E_b(t)$ は、

$$E_b(t) = \sum_{i=1}^4 \delta_{b_i}(t) \cdot F_{eb_i}(R_b(t)) \quad (6.10)$$

で表すものとする。 $\delta_{b_i}(t)$ は、ボイラ b_i が運転中の場合 1, それ以外の場合 0 となる値, $F_{eb_i}(R_b(t))$ は、ボイラ b_i の消費電力量を負荷率でモデル化した関数, $R_b(t)$ はボイラの負荷率で, hp を高圧蒸気を減圧弁での低圧蒸気にする際の増加率, M_{b_i} をボイラ b_i の容量とすると、

$$R_b(t) = \frac{S_b(t)}{hp \sum_{i=1}^4 \delta_{b_i}(t) \cdot M_{b_i}} \quad (6.11)$$

となる。ただし, $S_b(t)$ は運転中のボイラ全体の生成蒸気量であり, K_t を脱気器用蒸気の効果を表す定数, $S_{G_2}(t)$ をプラント用のコージェネ G_2 の生成蒸気量として、

$$S_b(t) = S_r(t) + (1 + K_t)L_s(t) - S_{G_1}(t) - S_{G_2}(t) \quad (6.12)$$

で表される。

したがって、プラント全体の消費電力量は、

$$E(t) = E_0 + E_{fun}(t) + E_r(t) + E_b(t) + \delta_{G_2}(t)F_{e_{G_2}}(R_{G_2}(t)) \quad (6.13)$$

で表される。ここで、 E_0 は熱源機器以外でプラント稼働に必要な電力量、 $\delta_{G_2}(t)$ はプラント用のコージェネ G_2 が運転中の場合1、それ以外の場合0となる値、 $F_{e_{G_2}}(R_{G_2}(t))$ はコージェネ G_2 の負荷率と消費電力量の関数である。また、 K_{G_2} を電気が逆流しないための安全値、 M_{G_2} をコージェネ G_2 の定格容量とすると、 G_2 の発電量は

$$E_{G_2}(t) = \delta_{G_2}(t) \min(E(t) - K_{2G}, M_{2G}) \quad (6.14)$$

で表され、コージェネ G_2 の生成蒸気量 $S_{2G}(t)$ は次のような発電量の関数として実績から求められる。

$$S_{G_2}(t) = hpF_{G_2}(E_{G_2}(t)) \quad (6.15)$$

さらに、 $\delta b_i(t), \delta_{G_2}(t)$ が決まれば、式(6.10)~(6.15)から $R_b(t), E(t), E_{G_2}(t)$ が得られるため、プラント全体の消費ガス量 $G(t)$ は、実績から求めた定数 Hb_i, H_{G_1}, H_{G_2} を用いて

$$G(t) = \delta b_i(t)Hb_iR_b(t) + \delta_{G_1}(t)H_{G_1}R_{G_1}(t) + \delta_{G_2}(t)H_{G_2}R_{G_2}(t) \quad (6.16)$$

となる。

以上により、消費電力量 $E(t)$ 、ガス量 $G(t)$ が決まり、プラントの運転にかかるコスト $C_0(t)$ は、

$$C_0(t) = (E(t) - E_{G_2}(t))C_E + G(t)C_G \quad (6.17)$$

となる。ここで、 C_E, C_G はそれぞれ電気及びガスの従量料金である。

6.6. 運転計画の機器切り替えの考慮

前節のモデル化により得られるコストは、定常運転時のコストである。実際には、1日の熱負荷が昼夜で倍以上の差があることに対応して、運転する機器

を切り替えていく必要があり、切替コストを含めて最適化する必要がある。通常、日単位の問題として、1日の定常運転コストに切替コストを加算することにより考慮される。しかし、日単位の問題として扱うと、計画の単位時間の細分により、計画の場合の数が増大し、処理時間が増大するため、現実的な時間で計画を得るには、計画の単位時間の細かさに限界が生じる。そこで、単位時間毎または、それと同等の最適化問題として定式化することを考え、幾つかの方法案を実際のプラントのデータに適用することにより、優劣比較を行う。

6.6.1. 切替コストのモデル化

切替コスト C_M は以下の式でモデル化する。

$$C_M = C'_0(t)dt + \sum_{j=1}^{10+4+2} \delta_j(t)(1 - \delta_j(t-1))E_{0j}T_{0j} \quad (6.18)$$

ここで、前項は切替過渡状態のコスト（機器の切替を同時に行うことは困難であるため、停止する機器と運転開始する機器が重複して稼働する状態が切替え中に発生する。その過渡状態で必要となる運転コスト）を表現したもので、 $C'_0(t)$ は過渡状態の運転コスト、 dt は過渡期間である。第2項は、機器の起動時のコストをモデル化したもので、 E_{0j} は熱源機器 j の起動時の消費電力、 T_{0j} は起動時間である。起動時間は、待機状態により変化する機器があり、起動開始時点の状態の関数となる。

6.6.2. 比較対象（実プラント）の運転

次に、比較検討を行う実プラントの実際の熱負荷及び運転パターンを図6.6、6.7に示す。比較検討のための日は予測精度の要因を排除するため、図6.6に示すように計画に用いる熱負荷（予測値）と実績がほぼ等しい日とした。図6.7は、熱源機器（ $R_1 \sim R_{10}$: 冷凍機、 $B_1 \sim B_4$: ボイラ、 G_1, G_2 : コージェネ）の1日の運転の有無を示したガントチャートで、縦方向が時間である。朝夕の負荷変動に対し、比較的少ない回数の機器の切替で1日の運転を行っていることがわかる。

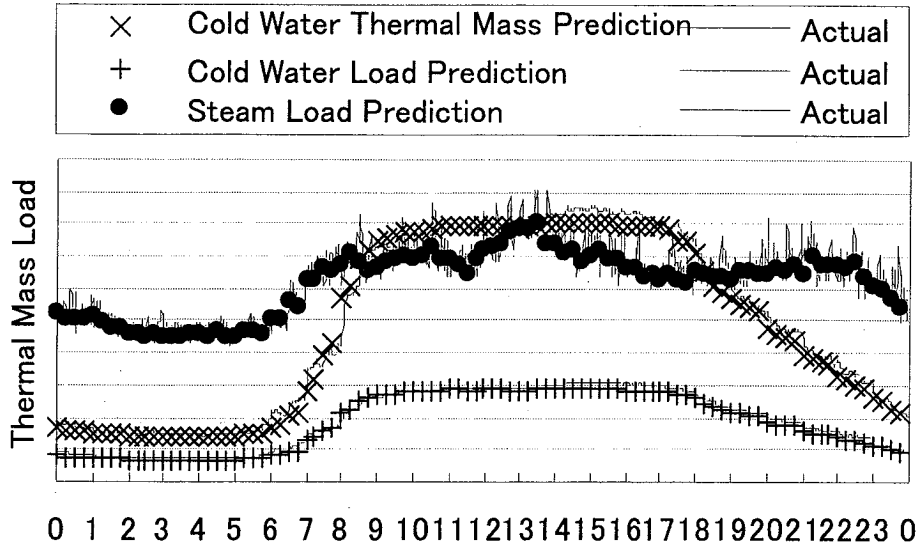


図 6.6: 計画対象日の熱負荷

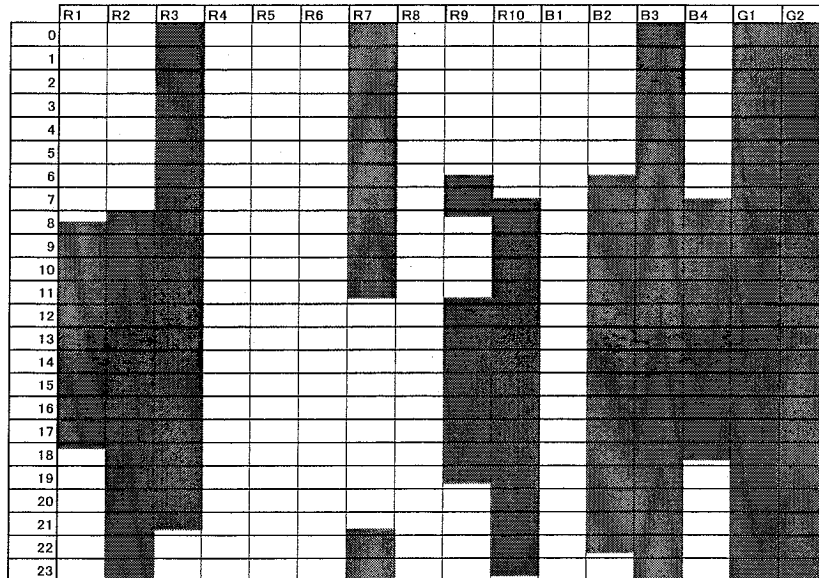


図 6.7: 実運転パターン

6.6.3. 定常運転コストのみの最適化結果

これに対し、切替に特に制限を設けずに、単位時間毎に負荷に対するコスト最適な運転パターンを計算した結果を図 6.8 に示す。コストは実績より小さ

くなつたが、朝7時や18時を中心に各所に短時間で機器の運転、停止を変化させる箇所がみられ、機器の起動に必要な時間が確保できない箇所もあり、現実には実行できない計画となっている。

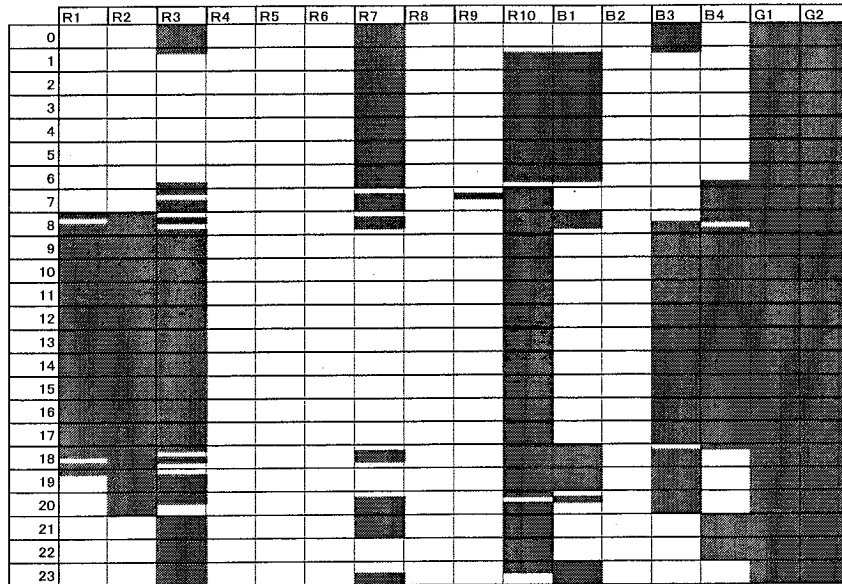


図 6.8: 切替無制限での最適化結果（コスト実績比：88.85%）

6.6.4. 切替最短時間の考慮結果

短期間の運転切替を抑制するため、以下の切替最短時間の制限の導入し、計画を最適化した結果図 6.9 に示す。

- 1) 停止後、起動に必要な時間以内での再起動禁止
- 2) 起動後、起動に必要な時間以内での停止禁止

上記の1)および2)は、実際の機器において運転や停止に時間がかかることを考慮しており、妥当な制限となっている。結果として、冷凍機の切替はある程度抑制されたが、比較的短期間に起動が可能なボイラの切替は抑制されなかった。(B1の20時、B3の18時)

| | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | B1 | B2 | B3 | B4 | G1 | G2 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| 2 | | | | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| 3 | | | | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| 4 | | | | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| 5 | | | | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| 6 | | | | | | | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| 7 | | | ■ | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 8 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 9 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 10 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 11 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 12 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 13 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 14 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 15 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 16 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 17 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 18 | ■ | ■ | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 19 | | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 20 | | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 21 | | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 22 | | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 23 | | ■ | ■ | | | | | ■ | ■ | | | | | | | |

図 6.9: 切替最短時間制限結果 (コスト実績比 : 88.78%)

6.6.5. 切替コスト考慮案 I

各単位時間において、直前に必要となる切替のコストと定常運転コストを加えたコストを最小化することを試みた場合の結果を図 6.10 に示す。切替が過度に抑制された計画となっており、実際の運転とほぼ同等のコストが必要な計画となった。これは、より良い運転パターンが存在しても、切替コストが単位時間の運転コストに比べ大きく、負荷の変動に追従して運転を移行できなかったためと考えられる。

6.6.6. 切替コスト考慮案 II

切替により、より低コストの運転が可能になれば、そのメリットはその状態が継続する間享受することが可能である。そこで、切替コストを、同一運転を継続させる期間で按分考慮することを考える。ただし、同一運転を継続させる期間はこの時点では決まらないため、そのままでは、単位時間での最適化は不可能になる。そこで、「切替直後とほぼ同じ負荷（負荷比が一定範囲内）である間は、同じ運転状態が最適な運転となる」という仮定を導入し、各単位時間において、直前に必要となる切替のコストをその時点とほぼ同じ負荷の期間で按

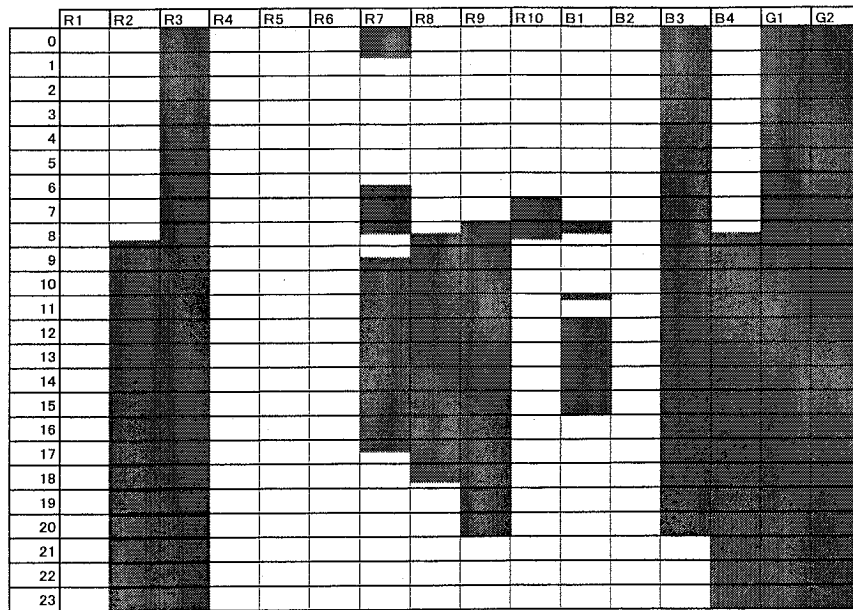


図 6.10: 切替コストを直後の切替に考慮した結果（コスト実績比：98.92%）

分した値と定常運転コストを加えたコストを最小化することを考える。その結果を図 6.11 に示す。ただし、「ほぼ同じ」の判断基準は負荷変動±5%以内とした。

必要以上に切替が抑制されることは無くなったが、朝の負荷が急増する時期に、無駄な切替が計画された。これは、切替コストの按分期間中の切替を抑制しなかったため、想定より短い間隔で次の切替を計画してしまったためと考えられる。

6.6.7. 切替コスト考慮案 III

前方法の考え方を一歩進め、負荷がほぼ同じ期間で一日を分割し、その分割期間を最小時間単位として運転計画を最適化することを考える。その結果を図 6.12 に示す。

実際の運転と切替頻度がほぼ同程度で、且つコストは実績より削減される計画が得られた。

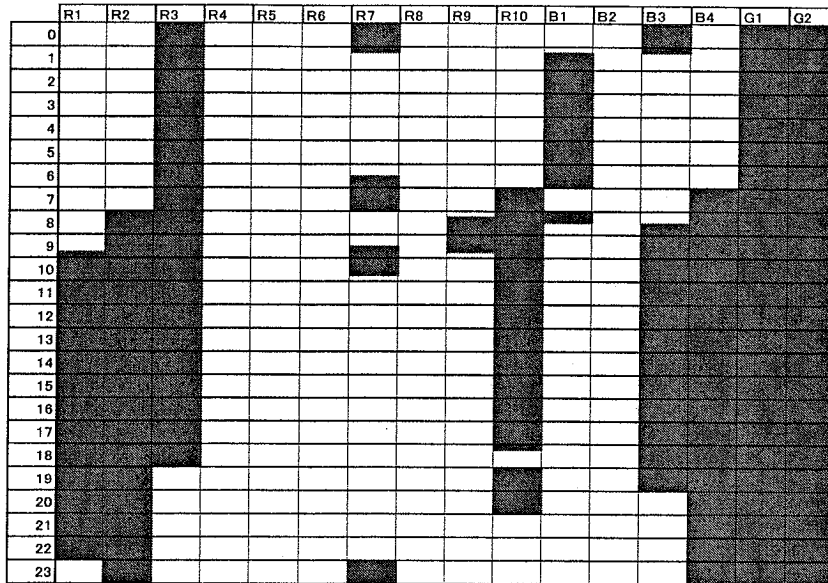


図 6.11: 切替コストを次切替迄の期間で按分考慮した結果 (コスト実績比 : 90.79%)

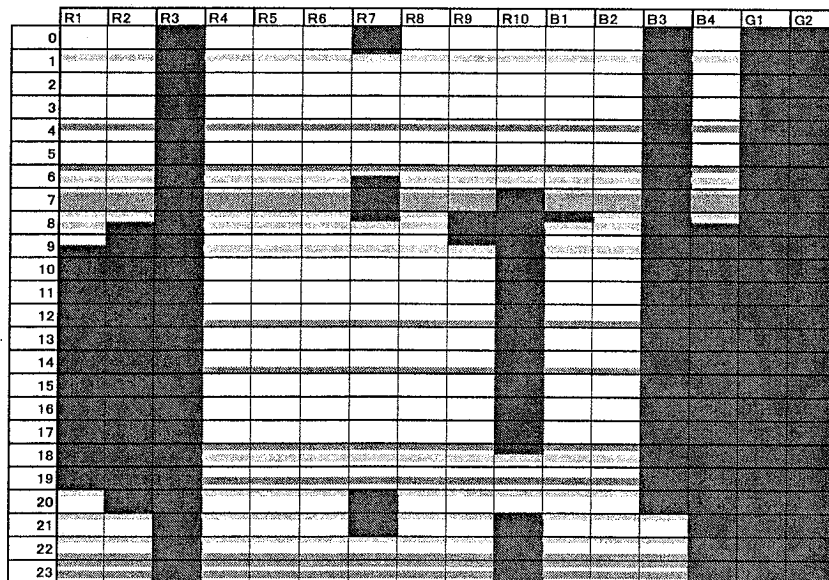


図 6.12: 切替期間固定最適化結果 (コスト実績比 : 90.09%)

6.6.8. 切替コスト考慮案 IV

図 6.12 中に分割期間の区切りを横線で示す。その内、赤線部分は、分割時点の機器切替えが無く、同一運転を継続する計画となっている。同一運転を継続している期間を最小時間単位として再度最適化を行うと、切替コストの影響が定常運転コストと比較して相対的に小さくなるため、より最適な運転が見つかる可能性がある。そこで、同一運転の継続が最適となった場合、前の期間と合わせた期間を最小時間単位として再度最適化することを考える。その結果を図 6.13 に示す。得られた運転計画はほとんど変わらず、コストの改善も誤差程度

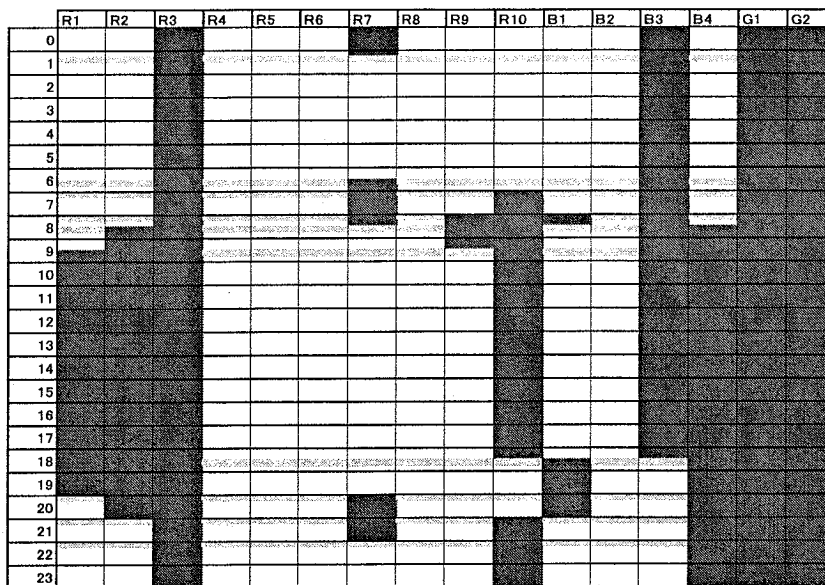


図 6.13: 切替無期間を繋げて最適化した結果（コスト実績比：90.09%）

しか見られなかった。

6.6.9. 切替コスト考慮案 V

単純に同一運転を継続している期間を結合するのではなく、同一運転の継続が最適となった場合、最小時間単位の区切りを単位時間延長して再度最適化することにより、期間の分割を最適化することを考える。さらに、一日の分割する基準を他段階に変動させて最適化を行い、その中で最適な運転計画を得る方

法を考える。この考え方で計算した結果を図 6.14 に示す。2 段階の最適化を

| | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | B1 | B2 | B3 | B4 | G1 | G2 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | |

図 6.14: 切替期間を最適化した結果（コスト実績比：90.09%）

行ったにも関わらず得られた運転計画はほぼ同じで、コストもほぼ同じ結果となった。

これらの比較検討により、切替コスト考慮案 III の方法にて、単純且つ、より複雑な最適化を行う場合とほぼ同等のコストの計画が得られることが示された。

6.7. 検証

得られた運転計画最適化方法を用いて、2009年7月の1月間の運転計画を最適化した結果を表 6.3 に示す。ただし、今回考慮外の要因を排除するため、表中の実績コストは実際の値ではなく、最適化時のコスト計算で計算した値としている。

この結果、実際の運転よりコストを抑えた運転計画が立案されることが確認された。

表 6.3: 1 月間の運転計画最適化結果

| 月コスト | 日改善率 (%) | | |
|---------|----------|-------|-------|
| | 月最大 | 月最小 | 月平均 |
| 対実績 (%) | 88.69 | 25.56 | 3.76 |
| | | | 14.28 |

6.8. おわりに

地域冷暖房システムの運転計画最適化問題に対し、計画の単位時間の細分により処理時間が増大しない形での実現方法として、運転計画の基になる地域熱負荷の予測について、1日単位の値を気象予報値及び直近実績を説明変数とした重回帰により求め、その値を直近の1日の平均変動パターンで按分する方法を提案した。また、実際の地域冷暖房システムのデータに適用し、利用する気象情報の特性も加味することによりほぼ実績に近い形で予測可能であることを示した。

次に、運転計画の最適化について、幾つかの方法を実システムのデータに適用し、結果を比較することにより、1日を熱負荷が一定範囲内である期間で分割し、それぞれの期間内で、前区間からの運転機器切替コストを含めてコスト最小化する方法で、コスト最適化が可能であることを示した。最後に、1月間の実データを用いて実運転よりコストを抑制した計画が立案されることを示した。

第7章

結 論

都市環境の保全とともにエネルギー利用分野における多様化，高効率化が図られる中で都市における地域冷暖房システム (District Heating and Cooling System : DHC) の導入が進められてきている。

近年，地域冷暖房システムは深夜電力を利用した蓄熱システムや都市ガスを使ってガスタービンによる発電を行い，その排熱も有効利用するコージェネレーションシステム (熱電併給) の導入，複数のDHCプラントと連携したシステムなど大型化かつ複雑化している。

DHCシステムにおけるソフトエアと位置付けられるシステムの運転に関しては，従来は各施設の需要熱量に応じて監視員の経験に基づく判断で熱源機器の運転を行ってきたが，近年，システムのハードウェアの複雑化や経験あるプラント運転員の不足などにより，プラント安定供給や高効率運転を支援する運転支援システムの重要性が高まっており，その為の基本技術として，冷水・蒸気負荷の負荷予測手法並びに予測負荷に対する熱源機器の最適運転計画手法が重要となっている。

負荷予測に関しては，実際に得られる冷水負荷データには，さまざまな要因により異常値や欠測値が含まれているため，これらの影響を考慮した予測手法が望ましい。このような状況の下で，本論文の第2章では，熱負荷が非定常となる期間における予測精度の低下という問題に対して熱負荷データの特性を考慮することにより1日の最低外気温度を入力データに加えたりカレントニューラルネットワークによる予測手法を提案した。また，数値実験を行うことで提案手法の有効性が示された [A-1, B-1]。

第3章では，地域冷暖房プラントの運転計画問題を現実のプラントの運用に適用するため，従量料金契約以外の契約違反に伴うペナルティを考慮した非線

形整数計画問題として定式化し、複数期間（一ヶ月）の運転計画の導出を行った [A-2, B-2].

さらに、第4章において環境保全のため一次エネルギー消費量の最小化を目的関数として導入した2目的非線形整数計画問題への拡張を行い、それらに対して戦略的振動に基づくタブー探索法を用いた対話型ファジィ満足化手法を適用し有用性を検証した [A-3, A-4, B-3].

第5章では、地域冷暖房プラントの年間運転計画をより短時間で導出するため、年間を月単位に分割することに焦点をあて、地域冷暖房プラントの月単位の分割に基づく運転計画問題として定式化し、年間運転計画の導出を行い、短時間で年間運転計画を求めた [A-5, B-4].

第6章では、地域冷暖房システムの運転計画最適化問題に対し、計画の単位時間の細分により処理時間が増大しない形での実現方法として、運転計画の基になる地域熱負荷の予測について、1日単位の値を気象予報値及び直近実績を説明変数とした重回帰により求め、その値を直近の1日の平均変動パターンで按分する方法を提案した。また、実際の地域冷暖房システムのデータに適用し、利用する気象情報の特性も加味することによりほぼ実績に近い形で予測可能であることを示した。

次に、運転計画の最適化について、幾つかの方法を実システムのデータに適用し、結果を比較することにより、1日を熱負荷が一定範囲内である期間で分割し、それぞれの期間内で、前区間からの運転機器切替コストを含めてコスト最小化する方法で、コスト最適化が可能であることを示した。さらに、機器延命や事故防止のために実システムでは行われない運転（同一機器の短期間での起動停止繰返し）が計画されるのを防ぐ制約を加え、その効果を確認した。最後に、1月間の実データを用いて実運転よりコストを抑制した計画が立案されることを示した [A-6].

今後の課題としては、最適運転計画問題に関して、主に契約違反に伴うペナルティに焦点を当てて研究を進めてきたが、扱ったペナルティは比較的簡単なもので、一般により複雑なペナルティが存在する。一般に用いられているペナルティの形を網羅する考慮方法を提案し、より適用範囲の広い最適運転手法に改善していくことが挙げられる。また、6章において、実用的見地からの最適

運転計画方法を目指したが、蓄熱槽のようなエネルギー消費と生成タイミングの異なる設備を扱わなかった。蓄熱槽等のエネルギー消費と生成タイミングの異なる設備を含むプラントにも適用可能な方法を提案し、適用可能範囲を拡大していくことが挙げられる。

謝辞

本論文作成にあたり，多大な御指導，御助言を賜りました広島大学大学院工学研究院電気電子システム数理部門教授 坂和正敏 先生に深く感謝の意を表すとともに厚く御礼申し上げます。

また，本論文作成にあたり，御指導，御助言を頂きました広島大学大学院工学研究院電気電子システム数理部門教授 西崎一郎 先生，餘利野直人 先生に心より御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり，多大の御指導と終始懇切なご鞭撻を賜った広島大学工学研究院電気電子システム数理部門准教授 片桐英樹 先生，助教 松井猛 先生に深甚な謝意を表します。

最後に，ご支援をいただいた広島大学大学院工学研究科システムサイバネティクス専攻システム最適化論研究室在学生ならびに卒業生に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] R. Beale and T. Jackson: *Neural Computing: An Introduction*, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 1990; 八名 監訳: ニューラルコンピューティング入門, 海文堂, 1993.
- [2] J.T. Connor and R.D. Martin, Recurrent neural networks and robust time series prediction, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 2, pp. 240-254, March 1994.
- [3] E. Dotzauer, Simple model for prediction of loads in district-heating systems, *Applied Energy*, Vol. 73, No. 3-4, pp. 277-284, November-December 2002.
- [4] F. Glover, Tabu search, Part 1, *ORSA Journal on Computing*, Vol. 1 No. 3, pp. 190-206, 1989.
- [5] F. Glover, Tabu search, Part 2, *ORSA Journal on Computing*, Vol. 2, No. 1, pp. 4-32, 1990.
- [6] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [7] S. Hanafi, A. Freville, An efficient tabu search approach for the 0-1 multidimensional knapsack problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 106, No. 2-3, pp. 659-675, 1998.
- [8] 橋本周司, 川口八郎: 冷温水需要負荷の決定要因の検討とニューラルネットワークを用いた適応予測, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.74, pp. 13-21, 1999.
- [9] R. Hecht-Nielsen: *Neurocomputing*, Addison-Wesley, Massachusetts,

- 1990; 袋谷訳：ニューロコンピューティング，トッパン，1992.
- [10] D. Henning, S. Amiri, and K. Holmgren, Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, No. 2, pp. 1224–1247, 2006.
- [11] J. Hertz, A. Krogh and R.G. Palmer: *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1991; 笹川，呉訳：ニューラルコンピュータ，トッパン，1994.
- [12] 井上隆，松尾陽，射場本忠彦，田中良彦：空調用エネルギー消費の予測に関する研究 その2 事務所ビルにおける気象要因との相関，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp. 1009–1010, 1991.
- [13] K. Ishimaru, M. Sakawa, H. Katagiri, and T. Matsui, Operation planning of urban district heating and cooling plants considering the continuousness of load and operation, *Scientiae Mathematicae Japonicae* (in press).
- [14] 伊東弘一，横山良平，コージェネレーションの最適計画，産業図書，1990.
- [15] R.E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, Vol. 82D, No. 1, pp. 35–45, March 1960.
- [16] K. Kato, M. Sakawa, K. Ishimaru, S. Ushiro and T. Shibano, Heat load prediction through recurrent neural network in district heating and cooling systems, *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2008)*, pp. 1401–1406, 2008.
- [17] K. Kato, M. Sakawa, K. Ishimaru and S. Ushiro, Operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent In-*

- formatics, Vol. 13, No. 3, pp. 185–192, 2009.
- [18] 君山由良, 統計解説書シリーズ A-55 重回帰分析の利用法, pp.52, データ分析研究所, 2004.
- [19] 小林主一郎, 長岩明弘, 山田幸弘, 地域冷暖房運転支援のための熱負荷予測の実用化, 電学論, Vol. 120-B, No. 10, pp. 508–516, Oct. 2000.
- [20] 馬郡英樹, 栗原茂, 木村三由, 横山隆一, 拡張 DP アルゴリズムに基づく地域冷暖房システム最適計画手法の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 6, pp. 508–516, June 1997.
- [21] 馬郡英樹, 栗原茂, 木村三由, 横山隆一, 拡張 DP アルゴリズムに基づく地域冷暖房システム最適計画手法の開発, 電気学会論文誌, Vol. 120-B, No. 10, pp. 1271–1277, October 2000.
- [22] R.D. Martin and D.J. Thompson, Robust-resistant spectrum estimation, Proceedings of the IEEE, Vol. 70, No. 9, pp. 1097–1115, September 1982.
- [23] D.E. Rumelhart, J.L. McClelland and the PDP Research Group: *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, Vol. 1: Foundations, Vol. 2: Psychological and Biological Models, The MIT Press, Cambridge 1986; 一部の論文の日本語訳, 甘利 監訳: PDP モデル — 認知科学とニューロン回路網の探索 —, 産業図書 1989.
- [24] J.L. McClelland and D.E. Rumelhart: *Explorations in Parallel Distributed Processing: A Handbook of Models, Programs, and Exercises*, The MIT Press, Cambridge 1988.
- [25] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton and R.J. Williams, Learning representations by back propagating errors, Nature, Vol. 323, No. 9, pp. 533–536, 1986.
- [26] 坂和正敏, 線形システムの最適化 <一目的から多目的へ>, 森北出版,

- 1984.
- [27] 坂和正敏, 非線形システムの最適化 <一目的から多目的へ>, 森北出版, 1986.
- [28] 坂和正敏: ファジィ理論の基礎と応用, 森北出版, 1989.
- [29] 坂和正敏: 経営数理システムの基礎 <線形計画法に基づく意思決定>, 森北出版, 1991.
- [30] 坂和正敏, 離散システムの最適化, 森北出版, 2000.
- [31] M. Sakawa, *Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization*, Plenum Press, New York, 1993.
- [32] M. Sakawa, *Large Scale Interactive Fuzzy Multiobjective Programming: Decomposition Approaches*, Physica-Verlag, Heidelberg, 2000.
- [33] M. Sakawa, *Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- [34] 坂和正敏, 石井博昭, 西崎一郎, ソフト最適化, 朝倉書店, 1995.
- [35] 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- [36] 坂和正敏, 田中雅博, ニューロコンピューティング入門, 森北出版, 1997.
- [37] 坂和正敏, 後呂智, 加藤浩介, 井上拓也, ラジアル基底関数ネットワークと簡略型ロバストフィルタによる冷水負荷予測, 日本ファジィ学会誌, Vol.11, No1, pp.112-120, 1999.
- [38] 坂和正敏, 後呂智, 加藤浩介, 井上拓也, ハイブリッド構造化学習を用いたラジアル基底関数ネットワークによる冷水負荷予測, 電子情報通信学会誌 A, Vol. J82-A, No.1, pp.31-39, 1999.
- [39] Masatoshi.Sakawa, Hideki Katagiri, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru

- and Satoshi Ushiro, Heat load prediction in district heating and cooling systems through a recurrent neural network with data characteristics, *Scientiae Mathematicae Japonicae*, Vol. e-2010, pp. 449–464 (2010).
- [40] Masatoshi Sakawa, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties, *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, Vol. 40, No. 3, pp. 198–206, 2010.
- [41] 坂和正敏, 松井猛, 石丸恵一, 契約違反によるペナルティを考慮した地域冷暖房プラントの多目的運転計画に対する対話型ファジィ満足化手法, *知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌)*, (印刷中)
- [42] Masatoshi.Sakawa, Hideki Katagiri, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, Long-term operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties, *Scientiae Mathematicae Japonicae*, Vol. 72, No. 2, pp. 185–194 (2010).
- [43] 坂和正敏, 後呂智, 加藤浩介, 大塚健文, 地域冷暖房システムにおける簡略型ロバストフィルタと3層ニューラルネットワークを用いた冷水負荷予測, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J83-A, No.2, pp.234-237, 2000.
- [44] M. Sakawa, K. Kato, S. Ushiro, Cooling load prediction in a district heating and cooling system through simplified robust filter and multi-layered neural network, *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 15, No. 7, pp. 633–643, August 2001.
- [45] M. Sakawa, K. Kato, S. Ushiro, Operation planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for nonlinear 0-1 programming, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 42, No. 10–11, pp. 1365–1378, November–December 2001.

- [46] M. Sakawa, K. Kato and S. Ushiro, Operational planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for mixed 0-1 linear programming, *European Journal of Operational Research*, Vol. 137, No. 3, pp.677–687, 2002.
- [47] M. Sakawa, K. Kato, S. Ushiro, M. Inaoka, Operation planning of district heating and cooling plants using genetic algorithms for mixed integer programming, *Applied Soft Computing*, Vol. 1, pp. 139-150, 2001.
- [48] M. Sakawa, S. Matsuoka, K. Kato, K. Ishimaru and S. Ushiro, Long-term operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties, *Proceedings of Fifth International Workshop on Computational Intelligence & Applications IEEE SMC Hiroshima Chapter*, pp. 71–76, 2009.
- [49] M. Sakawa, S. Ushiro, K. Kato and K. Ohtsuka, Cooling load prediction in a district heating and cooling system through simplified robust filter and multi-layered neural network, *Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 995–1000, 1999.
- [50] M. Sakawa, H. Yano and T. Yumine, “An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective linear-programming problems and its application,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-17, No. 4, pp. 654–661, April, 1987.
- [51] 豊田秀樹：非線形多変量解析 —ニューラルネットによるアプローチ—, 朝倉書店, 1996.
- [52] 後呂智, 地域冷暖房システムにおける冷水負荷予測と最適運転計画に関する研究, 広島大学大学院工学研究科博士論文, 2001.
- [53] 後呂智, 坂和正敏, 加藤浩介, 稲岡希, 非線形 0-1 計画問題に対する遺伝的

- アルゴリズムによる地域冷暖房プラント, 日本ファジィ学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 208-216, 2001.
- [54] 後呂智, 坂和正敏, 加藤浩介, 稲岡希, 遺伝的アルゴリズムによる地域冷暖房プラントの運転計画, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-A, No. 11, November 2001.
- [55] R. Williams and D. Zipser, A learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks, *Neural Computation*, Vol. 1, Vol. 2, pp. 270-280, 1989.
- [56] 山下礼二, 鹿又一秀: 各負荷予測システムの詳細と予測結果 ファジィ推論による負荷予測, 空気調和・衛生工学会, 第67巻 第8号, pp. 35-41, 1993.
- [57] 横山良平, 神村一幸, 伊藤弘一, 宮坂房千加: 地域冷暖房プラント最適運転支援システムの開発と評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.71, pp. 27-36, 1998.
- [58] R. Yokoyama and K. Ito, A revised decomposition method for MILP problems and its application to operational planning of thermal storage systems, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 118, pp. 277-284, Dec. 1996.
- [59] A. P. Wierzbicki, The use of reference objectives in multiobjective optimization - Theoretical implications and practical experiences, WP-79-66, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1979.
- [60] 鄭 明傑, 西谷義彦, 中原信生: カルマンフィルタを用いた空調負荷予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.72, pp. 85-93, 1999.
- [61] H.-J. Zimmermann, Fuzzy programming and linear programming with

- several objective functions, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 45–55, 1978.
- [62] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Sets, Decision-Making and Expert Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1987.
- [63] 特集 地域冷暖房プラントの冷水負荷予測, *空気調和・衛生工学*, Vol. 67, pp. 583–634, 1993.

引用既発表論文

A. 学術雑誌等掲載論文

- [A-1] Masatoshi.Sakawa, Hideki Katagiri, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “Heat load prediction in district heating and cooling systems through a recurrent neural network with data characteristics”, *Scientiae Mathematicae Japonicae*, Vol. e-2010, pp. 449–464 (2010).
- [A-2] Kosuke Kato, Masatoshi Sakawa, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “Operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties”, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 13, No. 3, pp. 185–192 (2009).
- [A-3] Masatoshi Sakawa, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties”, *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, Vol. 40, No. 3, pp. 198–206 (2010).
- [A-4] 坂和正敏, 松井猛, 石丸恵一, “契約違反によるペナルティを考慮した地域冷暖房プラントの多目的運転計画に対する対話型ファジィ満足化手法”, *知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌)*, (印刷中)
- [A-5] Masatoshi.Sakawa, Hideki Katagiri, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “Long-term operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties”, *Scientiae Mathematicae Japonicae*, Vol. 72, No. 2, pp. 185–194 (2010).
- [A-6] Keiichi Ishimaru, Masatoshi Sakawa, Hideki Katagiri and Takeshi Matsui, “Operation planning of urban district heating and cooling plants

considering the continuousness of load and driving”, *Scientiae Mathematicae Japonicae* (in press).

B. 国際学会等講演論文

- [B-1] Kosuke Kato, Masatoshi Sakawa, Keiichi Ishimaru, Satoshi Ushiro and Toshihiro Shibano, “Heat load prediction through recurrent neural network in district heating and cooling systems”, Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2008), pp. 1401–1406, Marina Bay, Singapore, October 12-15, 2008.
- [B-2] Kosuke Kato, Masatoshi Sakawa, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “Operation planning of district heating and cooling plants considering various penalties for violation of contract”, Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on advanced Intelligent Systems, pp. 1176–1179, Nagoya, Japan, September 17-21, 2008.
- [B-3] Masatoshi Sakawa, Takeshi Matsui, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective operation planning of district heating and cooling plants considering various penalties for violation of contract”, Proceedings of International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists 2010, pp. 2127–2133, Hong Kong, China, March 17-19, 2010.
- [B-4] Masatoshi Sakawa, Simpei Matsuoka, Kosuke Kato, Keiichi Ishimaru and Satoshi Ushiro, “Long-term operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties”, Proceedings of 5th International Workshop on Computational Intelligence & Applications 2009, pp. 71–76, Hiroshima, Japan, November 10-12, 2009.