

# 未利用エネルギーのカスケード利用による 環境低負荷型地域エネルギーシステムの構築

課題番号 10680481

平成 10～11 年度科学研究費補助金  
基盤研究(C)(2) 研究成果報告書

平成 12 年 3 月

研究代表者 早川 直樹  
(名古屋大学大学院工学研究科助教授)

## はしがき

本報告書は、平成 10～11 年度の 2 年にわたって文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(2) (課題番号 10680481) の交付を受け、下記研究組織によって行った「未利用エネルギーのカスケード利用による環境低負荷型地域エネルギーシステムの構築」の研究成果報告書である。

## 研究組織

研究代表者： 早川 直樹 (名古屋大学・大学院工学研究科・助教授)  
研究分担者： 鈴置 保雄 (名古屋大学・理工科学総合研究センター・教授)  
研究分担者： 加藤 丈佳 (名古屋大学・理工科学総合研究センター・助手)

## 研究経費

平成 10 年度	2,100 千円
平成 11 年度	1,000 千円
計	3,100 千円

# 研究発表

## [ I ] 学術論文誌

- (1) N.Hayakawa, Y.Wakazono, T.Kato, Y.Suzuoki, Y.Kaya: “Minimizing Energy Consumption in Industries by Cascade Use of Waste Energy”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.14, No.3, pp.795-801, 1999
- (2) 若園, 加藤, 早川, 鈴置, 茅: 「産業排熱のカスケード利用による環境低負荷型ヒートコンビナートの有効性評価」, 電気学会論文誌 B, Vol.119, No.10, pp.1026-1034, 1999

## [ II ] 国際会議

- (1) Y.Wakazono, T.Kato, N.Hayakawa, T.Okamoto, Y.Suzuoki, Y.Kaya: “Feasibility Assessment of Cascade Use of Waste Energy among Industries in Regional Energy System”, Int. Symp. on Sustainable Development Strategies, pp.58-65, 1998
- (2) Y.Wakazono, T.Kato, N.Hayakawa, T.Okamoto, Y.Suzuoki: “Effect of Economic Incentive Considering Quality of Energy Use for Promoting Cascade Use of Waste Energy”, Int. Conf. on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspect of Energy Systems, pp.453-458, 1999

## [ III ] 口頭発表

- (1) 若園, 加藤, 早川, 岡本, 鈴置, 茅: 「ヒートカスケーディング導入促進に対するエクセルギー税の効果」, 電気関係学会東海支部連合大会, No.120, 1998
- (2) 若園, 加藤, 横水, 早川, 岡本, 鈴置: 「産業排熱の民生利用に対するエクセルギー効率を考慮した報奨金制度の適用効果」, 電気学会全国大会, No.545, 1999
- (3) 若園, 加藤, 横水, 早川, 岡本, 鈴置: 「排熱のエクセルギーを考慮したヒートカスケーディング導入インセンティブ」, エネルギー・資源学会第 15 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, pp.633-638, 1999



# 未利用エネルギーのカスケード利用による 環境低負荷型地域エネルギーシステムの構築

## 目 次

第 1 章 序論	-1-
1.1 本研究の背景	-1-
1.2 カスケード利用による省エネルギー方策	-3-
1.3 本論文の目的と構成	-6-
<1.3.1> 本論文の目的	-6-
<1.3.2> 本論文の構成	-8-
第 1 章の参考文献	-10-
第 2 章 ヒートコンビナートモデル	-13-
2.1 はじめに	-13-
2.2 主要 4 業種のエネルギー需給状況	-13-
<2.2.1> 我が国の産業部門におけるエネルギー需給	-13-
<2.2.2> 主要 4 業種における排熱エネルギー需給	-14-
2.3 ヒートコンビナートモデルの構築	-18-
<2.3.1> コンビナート内でのエネルギー需給の定式化	-18-
<2.3.2> 目的関数および評価方法	-21-
2.4 まとめ	-22-
第 2 章の参考文献	-23-
第 3 章 東海地区におけるヒートカスケードリングによる省エネルギーポテンシャル 評価	-24-
3.1 はじめに	-24-
3.2 東海 3 県の産業構造	-24-
3.3 主要 4 業種における省エネルギー効果	-25-
3.4 自動車産業とのコンビナート化の可能性	-29-
<3.4.1> 自動車産業における排熱供給量・熱需要量の算定	-29-

(3.4.2) 自動車産業と主要 4 業種とのカスケーディングによる省エネルギーポテンシャル	-31-
3.5  まとめ	-32-
第 3 章の参考文献	-33-
<b>第 4 章 既存産業を中核としたヒート カスケーディングにおける最適業種構成</b>	<b>-34-</b>
4.1  はじめに	-34-
4.2  主要 4 業種の生産量と敷地面積との相関	-34-
4.3  目的関数および評価方法	-36-
4.4  最適コンビナート構成	-36-
4.5  まとめ	-40-
第 4 章の参考文献	-41-
<b>第 5 章 異業種間ヒート カスケーディングの省エネルギー性に及ぼす熱輸送損失の影響</b>	<b>-42-</b>
5.1  はじめに	-42-
5.2  過熱蒸気の熱輸送にともなう蒸気温度低下の算定	-42-
(5.2.1) 配管中の過熱蒸気の流速の算定	-42-
(5.2.2) 蒸気輸送による蒸気温度低下の算定	-44-
(5.2.3) 蒸気輸送による比エンタルピー損失の算定	-45-
5.3  熱輸送損失の定式化	-46-
5.4  熱輸送損失を考慮した省エネルギー性評価	-48-
5.5  まとめ	-52-
第 5 章の参考文献	-53-
<b>第 6 章 民生需要を含めたヒート カスケーディングによる地域エネルギーシステムの効率化</b>	<b>-54-</b>
6.1  はじめに	-54-
6.2  民生部門のエネルギー需給モデルの構築	-54-
(6.2.1) 民生部門のエネルギー需給モデル	-54-
(6.2.2) 目的関数	-61-
6.3  省エネルギー性評価	-61-

6.4	熱輸送損失の影響	-62-
6.5	まとめ	-65-
	第6章の参考文献	-66-
<b>第7章 異業種間ヒートカスケーディングの経済性評価</b>		<b>-67-</b>
7.1	はじめに	-67-
7.2	ヒートカスケーディングの経済性	-67-
7.3	省エネルギー性・経済性の両面からみた異業種間ヒートカスケーディングの 評価	-70-
〈7.3.1〉	異業種間ヒートカスケーディングの経済性評価	-70-
〈7.3.2〉	異業種間ヒートカスケーディングの省エネルギー性評価	-71-
7.4	まとめ	-75-
	第7章の参考文献	-76-
<b>第8章 排熱のエクセルギーを考慮した経済的インセンティブの効果</b>		<b>-77-</b>
8.1	はじめに	-77-
8.2	評価モデルおよび目的関数	-77-
〈8.2.1〉	評価モデル	-77-
〈8.2.2〉	目的関数	-79-
8.3	省エネルギー性・経済性を目的関数とした評価	-80-
8.4	経済的インセンティブによるヒートカスケーディング導入促進効果	-82-
〈8.4.1〉	エネルギー税・エクセルギー税を考慮した経済性評価	-82-
〈8.4.2〉	報奨金の導入による省エネルギー促進効果	-84-
8.5	まとめ	-86-
	第8章の参考文献	-87-
<b>第9章 総括</b>		<b>-88-</b>
9.1	はじめに	-88-
9.2	本論文の総括	-88-
9.3	今後の検討事項	-91-





# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景

近年、環境問題が地球規模での重大な課題となりつつある。その中でも、大規模な化石燃料の使用による二酸化炭素の大量排出は過剰な温室効果により、地球全体での温暖化を招き、平均気温の上昇を引き起こすと指摘されている。平均気温の上昇は、海面の上昇、砂漠の拡大など人間生活に深刻な被害を及ぼすものと予想されている<sup>(1)</sup>。

このような温暖化に対する危機感から、1997 年 12 月に京都で開催された「気候変動に関する国際連合枠組み条約第 3 回締約国会議 (UNFCCC/COP3)」では、「先進国全体で 2008 年から 2012 年までに二酸化炭素をはじめとする 6 種類の温室効果ガスを 1990 年に比べ少なくとも 5 %削減する」という要旨の議定書が採択された。また、日本国内でも 1990 年比 6 %の温室効果ガス排出削減目標が設定された。この目標値を達成するには、これまで以上の省エネルギー・化石燃料消費の抑制が必要になる。

図 1.1は、日本国内の最終エネルギー消費動向を示したものである<sup>(2)</sup>。産業分野は全最終エネルギー消費の約半分を占めており、産業分野における省エネルギーは重要である。図 1.2は、産業における業種別エネルギー消費原単位の動向を示したものである。エネルギー消費原単位とは、製品 1 単位を製造するために必要なエネルギー量であり、この値が小さいほど、効率的なエネルギー消費で製品が製造されていることになる。1970 年代には、2 度の石油危機を契機にして、効率化・省エネルギー技術の導入によって大幅なエネルギー消費原単位の削減が達成された。しかし、1980 年代後半以降、エネルギー価格が低下したこと、可能な省エネルギー技術の導入がほぼ完了したことにより、エネルギー消費原単位は下げ止まりや逆に上昇の傾向を示している。

このような現状から、産業分野では新たな省エネルギー技術・方策が提案・検討されて

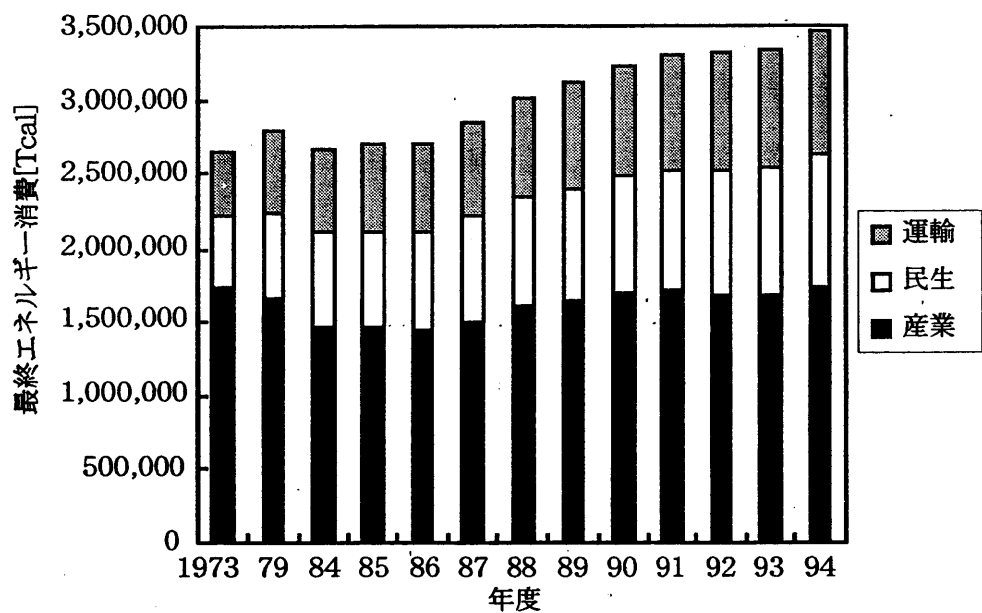
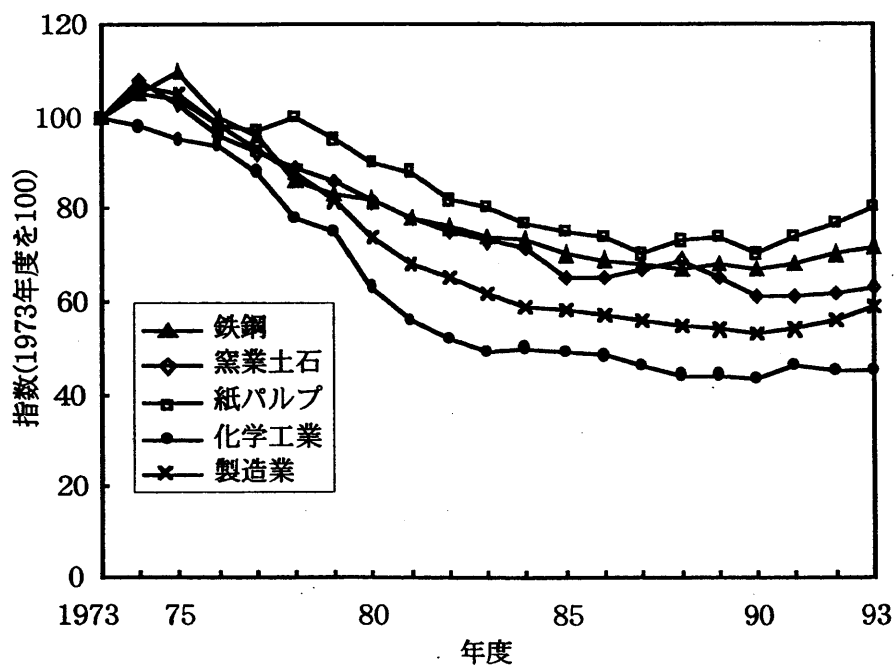


図 1.1 我が国の最終エネルギー消費動向<sup>(2)</sup>



(注) 鉱工業生産指数は付加価値ウェイトを使用

図 1.2 我が国の産業部門におけるエネルギー消費原単位の推移<sup>(3)</sup>

いる。本論文ではそれらの省エネルギー方策の一つである「産業排熱の多段階利用 (ヒートカスケーディング)」に着目し、ヒートカスケーディング導入による省エネルギー化の可能性について評価を行っている。

## 1.2 カスケード利用による省エネルギー方策

カスケード (cascade) とは、「小さな滝、段々になった滝」を意味している。熱エネルギーのカスケード利用とは、ちょうど図 1.3 のように高温熱需要から低温熱需要へと温度に応じて順序よくエネルギーを取り出すことである。熱エネルギーのカスケード利用を導入し、高効率を実現しているシステムの例を以下に示す<sup>(3)</sup>。

### コンバインドサイクル

コンバインドサイクルは図 1.4(a) のようにガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた熱サイクルである。従来の火力発電所では、効率改善のため、蒸気温度を高温にする努力がなされてきた。しかし、ボイラー伝熱管の使用温度の制限から、蒸気温度は約 570°C に抑えられ、熱効率は 40 % が上限であった。また、ガスタービンによる発電では、高効率実現のために、ガスタービン入口温度を上昇させてきた。しかし、入口温度の上昇とともに、ガスタービン出口温度が 590°C~600°C と高温になり、熱エネルギーが有効に活用されずに廃棄されることになる。このため、コンバインドサイクルでは、まず、ガスタービンを用いて電氣的出力を取り出し、次に、高温のガスタービンの排熱で従来の蒸気タービンを駆動させ、総合的な高効率化を実現している。近年の新技术の開発で、ガスタービン入力温度は約 1300°C まで上昇しており、発電端効率は 47 % にまで達している。

### コージェネレーションシステム

コージェネレーションシステムとは、一般に「単一のエネルギーから 2 つ以上の有効なエネルギーを得るシステム」のことをいう。近年では、電力・熱を併せて供給

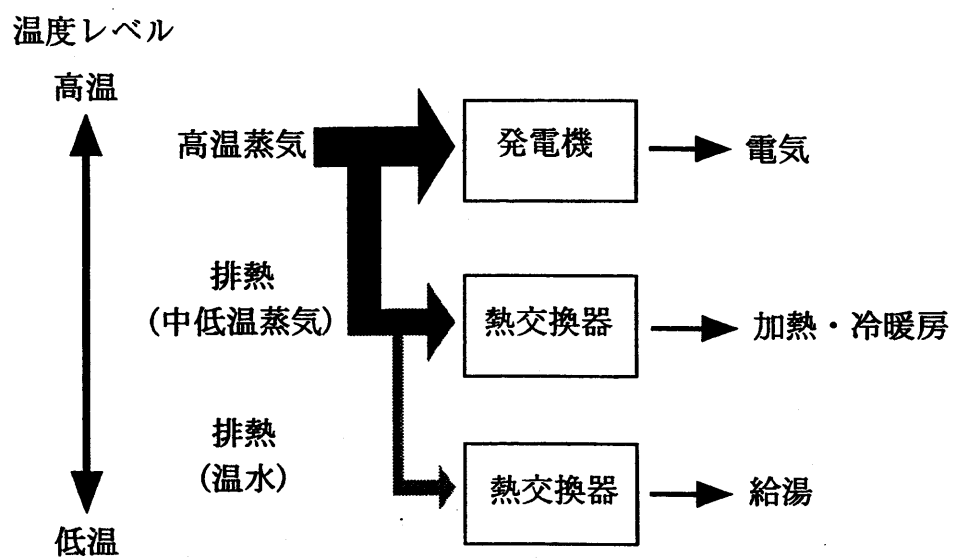
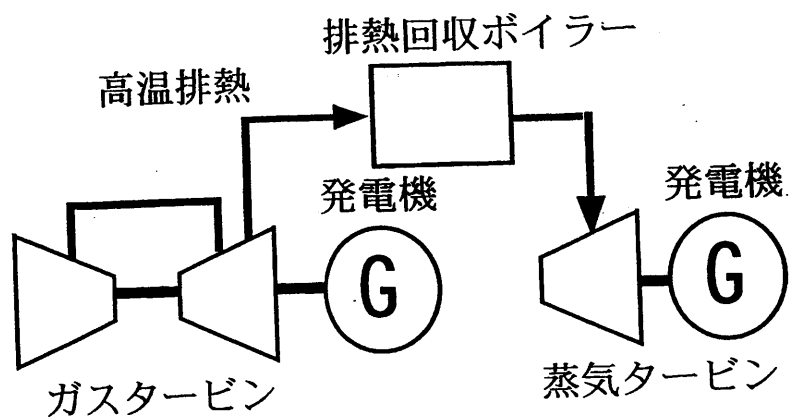
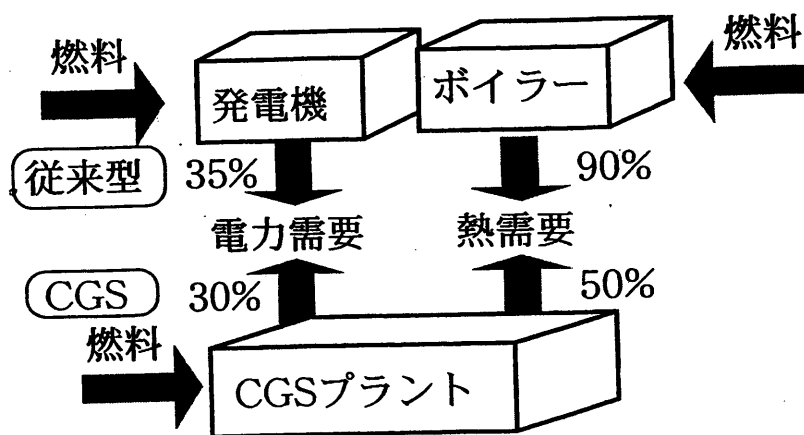


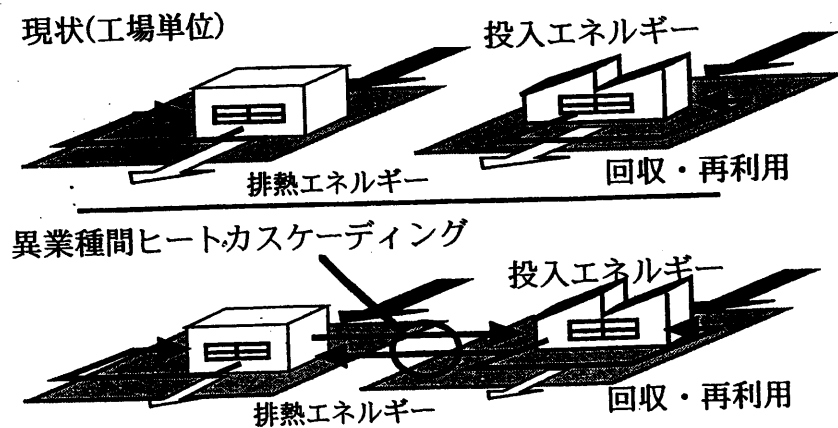
図 1.3 熱エネルギーのカスケード利用



(a) コンバインドサイクル



(b) コージェネレーションシステム



(c) 産業排熱のカスケード利用 (ヒートカスケーディング)

図 1.4 カスケード利用による省エネルギー方策

するシステムを指して言われることが多い。図 1.4(b) に示すように、都市ガスなどの燃料により、原動機を駆動して発電を行うと同時に原動機の排熱を回収して熱を供給する。コージェネレーションシステムは、適切な電力需要と熱需要が存在する場合には、従来の電力・熱を別々に供給するシステムに対して入力エネルギーが削減できる効率的なシステムである。

### 産業排熱のカスケード利用

産業排熱のカスケード利用は、図 1.4(c) のように工場の各工程で発生する排熱・余剰熱を回収し、高温域から低温域にかけて段階的に利用することで省エネルギーを実現するシステムである。一次エネルギー消費量削減の必要性から、石油危機以降、排熱のカスケード利用は工場単体を対象としたものを中心に積極的に導入がなされてきた。単一工場内では排熱利用に関しては、すでに最適化が行われており、従来技術によるこれ以上の排熱の有効活用による省エネルギー化は困難である。しかし、未だに有効に活用されずに捨てられている排熱も多い。このため、近年では単一業種内・単一工場内の制約を取りはらい、対象を異業種間に拡大させた異業種間ヒートカスケードリングによる排熱の有効利用が検討されている。本論文では、この産業排熱のカスケード利用に着目し、省エネルギー性評価を行っている。

## 1.3 本論文の目的と構成

### 〈1.3.1〉 本論文の目的

これまで産業分野での排熱のカスケード利用に関する研究としては、シミュレーションによる省エネルギーポテンシャルの評価<sup>(4)-(12)</sup>や、実在のコンビナート・工場からの利用可能排熱量の算定<sup>(13)-(19)</sup>がある。また、エネルギーのカスケード利用による地域的な省エネルギーポテンシャルの評価を行ったもの<sup>(20)-(25)</sup>がある。その中で、代表的なものを以下に示す。

R.Kümmel の研究<sup>(4) (5)</sup>では、ドイツ・オランダ・日本などの国単位で、ヒートカスケーディングによる消費エネルギーの削減量を評価している。その結果、どの国においても、現状から 60 %程度の消費エネルギー削減が可能としている。しかし、省エネルギー評価にあたっては、ヒートポンプによって排熱が 1450°C まで昇温可能であるとしている点など、現実とあまりにもかけ離れた仮定をしている点が多く、再検討が必要である。

新エネルギー財団の研究<sup>(13)-(15)</sup>は、特定の工場地区を対象としてヒアリングにより、排熱の賦存量や熱需要の調査を行ったものである。しかし、現実の工場配置にとらわれ過ぎており、新たな省エネルギーの可能性を見いだしたものではない。

中田らの研究<sup>(6) (7)</sup>は、エネルギー多消費型産業(鉄鋼、窯業土石、紙パルプ、化学工業)を対象として仮想的にコンビナート化を行い、省エネルギー効果の全国ポテンシャルが試算されている。その結果、最大で 3 %の省エネルギーが達成できるとしている。また、秋澤らの研究<sup>(8)-(11)</sup>は、中田らの研究を拡張し、将来的な排熱回収技術を考慮して、-50°C~1500°C までの排熱利用を取り扱い、熱駆動ヒートポンプ、アンモニア冷凍機等のエネルギー設備を設定し、コンビナート化により、約 37 %の燃料エネルギー消費量が削減可能であることを指摘している。しかし、省エネルギーポテンシャルの評価にあたっては、いずれの場合も熱輸送時のエネルギー損失を考慮しない理想的な条件を設定している。

従来のヒートカスケーディングに関する省エネルギー性評価では、主要産業を仮想的にコンビナート化し、省エネルギー効果の全国ポテンシャルが試算されている。しかし、ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果は、コンビナートを構成する業種構成に依存する。したがって、ヒートカスケーディングをある地域において実施する際には、その地域の産業構造の特徴を考慮する必要がある。また、新規の産業立地や地域の再開発等を計画する場合には、ヒートカスケーディングがより効果的となるように配慮することが望ましい。

本研究では、ヒートカスケーディングを評価するにあたって、文献<sup>(6)</sup>に基づいた一般モデルを用いてシミュレーションモデルを作成した。その上で、より現実的な評価を行うため、地域産業構造の特徴や熱輸送損失、カスケーディングに要するコストを順次考慮した上で、ヒートカスケーディング導入による省エネルギー性、コンビナート内での最適業種構成を評価している。また、産業－民生間のエネルギー融通による都市の総合的な省エネルギーの可能性についても検討している。特に、本研究の特徴として各業種の生産量(=排熱需給規模)と敷地面積の相関を求め、カスケード導入を想定した新規コンビナート建設に対して、省エネルギー性の面から有効な業種構成についても評価を行っている。

### 〈1.3.2〉 本論文の構成

本論文は9章からなる。2章以下の内容は以下の通りである。

第2章では、産業分野を対象としたヒートカスケーディングを検討するために、現在の我が国の産業におけるエネルギー需給の状況について言及する。次に、本論文で用いたヒートカスケーディングのシミュレーションモデルの内容、構成方法について述べる。

第3章では、ヒートカスケーディングについて、従来までの全国規模ではなく、カスケーディング導入の対象として、東海3県(愛知、岐阜、三重)を例として、各県の地域産業構造を考慮して省エネルギー性の評価を行う。その結果、カスケーディングによる省エネルギー効果は対象としている地域の主要産業構造に大きく依存することを確認している。

第4章では、既存の地域産業を中核とした新規産業立地や地域の再開発によるコンビナート建設の際のヒートカスケーディング導入を想定し、省エネルギー効果が最大となるような最適コンビナート業種構成を求めている。本研究では、各業種の生産量(=排熱需給規模)と敷地面積の相関を求め、シミュレーションモデルに制約条件として加えることで、コンビナート業種構成と省エネルギー性との関連性を考慮している。その結果、コン



ビナートの中核業種を含む最適な業種構成を選択することにより、熱利用設備の燃料エネルギーを約 90 %削減しうることを指摘している。

第 5 章では、従来の研究では考慮されていなかった熱輸送時の損失が、ヒートカスケーディングの省エネルギー性に及ぼす影響について検討する。本研究では、熱輸送損失が著しく生じる場合には、エネルギー輸送形態を電力に変換したカスケーディングを実施することで、高い省エネルギー性が維持可能であることを明らかにしている。

第 6 章では、民生の熱需給を新たにヒートコンビナートモデルに加えることで、産業のみを対象としたカスケーディングでは廃棄されていた低温排熱の有効活用による省エネルギーの可能性について評価を行っている。その結果、コンビナートの業種構成の最適化により、高いエネルギー削減率の実現が可能であることを明らかにしている。

第 7 章では、省エネルギー性のみではなく経済性の観点も考慮して、ヒートカスケーディングの有効性の評価を行っている。検討においては、敷設形態によって大きく変動する熱配管コストをパラメータとしてコンビナート内部での排熱利用状況を評価している。本研究では、熱配管コストに応じて排熱利用と、エネルギー輸送の形態を適切に選択することで、異業種間ヒートカスケーディングが省エネルギー性・経済性の両面から有効であることを指摘している。

第 8 章では、ヒートカスケーディングの導入促進に対する経済的インセンティブの効果について評価を行っている。その結果、エネルギー税、エクセルギー税、報奨金制度のような経済的インセンティブの導入を行うことにより、ヒートカスケーディングの導入が促進され、コンビナート内部においてエネルギーの効率的な利用が促進されることを明らかにしている。

第 9 章は総括であり、本論文の内容をまとめるとともに、ヒートカスケーディング関する今後の検討課題について述べている。

## 第 1 章の参考文献

- (1) Meyer Steinberg and John Lee, "An Assessment of CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Mitigation Technologies", Department of Applied Science, Brookhaven National Laboratory, 1991
- (2) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編, 「総合エネルギー統計 (平成 7 年度版)」, 通商産業研究社, 1996
- (3) 柏木, 岡本, 二階, 「エネルギーシステムの法則」, 産調出版, 1996
- (4) H.-M.Groscurth, R.Kümmel and W.van Gool, "Thermodynamic limits to energy optimization", Energy, Vol. 114 No.5, pp. 241-258, 1989
- (5) H.-M.Groscurth and R.Kümmel, "The cost of energy optimization: A analysis of national energy systems", Energy, Vol. 114 No.11, pp. 685-696, 1989
- (6) 中田, 「温暖化対策としてのエネルギーシステム技術に関する研究」, 東京大学大学院工学研究科電気工学専攻修士学位論文, 1994
- (7) 中田, 茅, 「ヒートコンビナートモデルによるエネルギー多消費型産業の省エネルギーの基礎的な評価」, 電学論 B, Vol.115, No.2, pp.149-155, 1995
- (8) 秋澤, 伊藤, 柏木, 「熱の多段階利用による省エネルギー可能性評価手法」, エネルギー・資源学会第 12 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, pp.453-458, 1996
- (9) A.Akisawa, R.Ito and T.Kashiwagi, "Effect of Cascade Use of Heat on Energy Conservation in Japan", Joint IEW/JSER International Conference of Energy, Economy and Environment, Osaka, pp.83-87, 1996
- (10) 田中, 秋澤, 柏木, 「熱電併給を含めた熱の多段階利用による省エネルギー可能性評価手法」, エネルギー・資源学会第 13 回エネルギーシステム・経済コンファレンス

講演論文集, pp.93-98, 1997

- (11) 島崎, 秋澤, 柏木, 「エネルギーカスケードモデルの開発 -エネルギーカスケードバランス表の提案-」, エネルギー・資源学会第 16 回研究発表会講演論文集, pp.95-100, 1997
- (12) 繁在家, 松橋, 石谷, 「業種間熱フローを明示化した最適多段利用に関する研究」, エネルギー・資源学会第 13 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, pp.105-110, 1997
- (13) (財) 新エネルギー財団, 「地域エネルギー導入促進調査 (2) 工場排熱の有効利用可能性調査 (平成 2 年度通商産業省資源エネルギー庁委託業務成果報告書)」, 1991
- (14) (財) 新エネルギー財団, 「地域エネルギー導入促進調査 (2) 工場排熱の有効利用可能性調査 (平成 3 年度通商産業省資源エネルギー庁委託業務成果報告書)」, 1992
- (15) (財) 新エネルギー財団, 「地域エネルギー導入促進調査 (6) 地域におけるエネルギーの有効利用に関する調査 (平成 3 年度通商産業省資源エネルギー庁委託業務成果報告書)」, 1992
- (16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「排熱エネルギー・カスケード利用システム導入可能性調査 (平成 4 年度調査報告書 NEDO-P-9223 )」, 1993
- (17) (財) 省エネルギーセンター, 「排熱及び熱需要等実態の調査研究 平成 7 年度成果報告書」, 1996
- (18) 岡本, 「化学工業及び紙パルプ工場における排エネルギーの実態調査」, エネルギー・資源, Vol.18, No.4, pp.82-86, 1997
- (19) 窪田, 「紙パルプ産業におけるサーマル・リサイクル技術」, エネルギー・資源, Vol.18, No.6, pp.55-60, 1997
- (20) 朴, 鈴木, 「新しい都市ごみ処理利用システムの提案とその総合的評価」, 電学論 B, Vol.111, pp.1343-1352, 1991

- (21) 柏木, 「未利用エネルギーの活用技術とその課題」, エネルギー・資源, Vol.13, No.2, pp.31-37, 1992
- (22) 朴, 鈴木, 「CO<sub>2</sub>回収無公害地域冷暖房用コージェネレーションシステムの構成と特性」, 電学論 B, Vol.112, pp.523-530, 1992
- (23) 渡邊, 河中, 市川, 外岡, 「コージェネレーション等による省エネルギー対策推進地区の抽出」, オペレーションズ・リサーチ, 1997 年 1 月号, pp.26-32, 1997
- (24) 秋澤, 藤田, 柏木, 「都市への人工集中がコージェネレーション導入量および電源構成に与える影響」, エネルギー・資源学会第 16 回研究発表会講演論文集, pp.231-236, 1997
- (25) 長谷川, 石谷, 松橋, 吉岡, 「熱輸送媒体に着目した各種排熱輸送システムの分析」, エネルギー・資源, Vol.18, No.1, pp.85-91, 1997

## 第2章 ヒートコンビナートモデル

### 2.1 はじめに

本章では、我が国の産業部門での業種別エネルギー需給状況について述べる。また、本研究でヒートカスケード導入の対象としている主要4業種(鉄鋼、窯業土石、紙パルプ、化学工業)の排熱供給量、熱・電力需要量モデル、本研究で用いたヒートカスケードのシミュレーションモデルについて述べる。

### 2.2 主要4業種のエネルギー需給状況

#### (2.2.1) 我が国の産業部門におけるエネルギー需給

1994年における我が国全体での最終エネルギー消費量は  $3.4 \times 10^6$  Tcal であり、そのうち産業部門は 50 % の  $1.7 \times 10^6$  Tcal である<sup>(2)</sup>。図 2.1は、産業部門における最終エネルギー消費量を業種別に示したものである。同図から明らかなように、産業部門において最もエネルギーを消費する業種は化学工業であり、産業全体の 26 % を占めている。さらに、

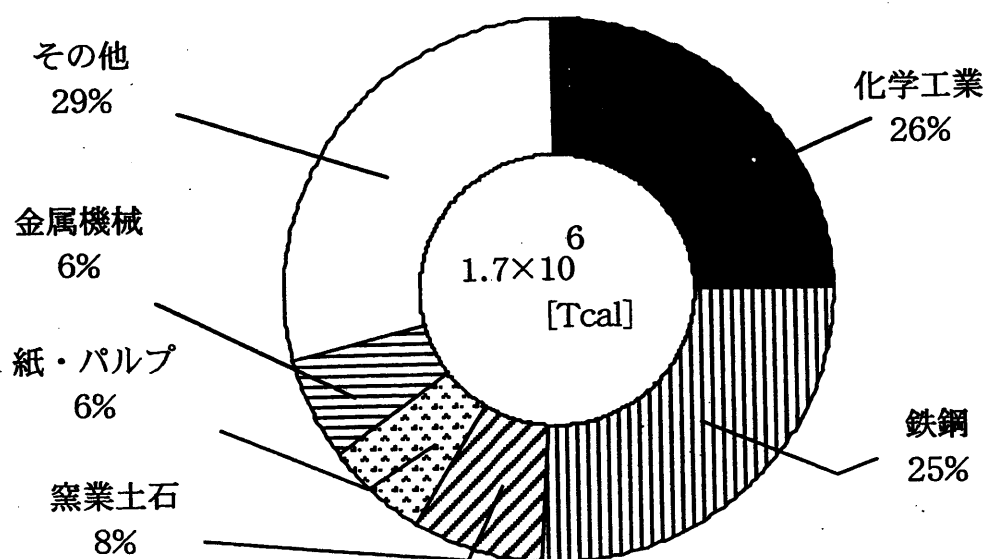


図 2.1 我が国の産業分野での業種別最終エネルギー消費量

鉄鋼、窯業土石、紙パルプと続いており、上位4業種で産業部門における最終エネルギー消費量の総量の約3分の2を占めていることがわかる。これら4業種は、産業分野でも特に「エネルギー多消費型産業」と言われる。エネルギー消費量が多いことから、これら4業種を対象とした省エネルギー方策によって、産業全体におけるエネルギー削減に対して十分有効であると考えられる。本論文では上述のエネルギー多消費型主要4業種をヒートカスケーディング対象業種として取り上げ、異業種間ヒートカスケーディングによる省エネルギー性の評価を行った。

#### 〈2.2.2〉 主要4業種における排熱エネルギー需給

ヒートカスケーディング導入に関する基本的な事項については、すでに数多くの調査が行われている。本研究では、文献<sup>(2)</sup>に示されている主要4業種での製品 ton あたりの排熱需給量の数値を参照し、1990年の日本全国での主要4業種の生産量を乗じることで、全国の主要4業種における排熱需給量とした。1990年における日本国内の主要4業種の実生産量および本研究で用いた全国の主要4業種における排熱需給量をそれぞれ表2.1、表2.2、図2.2に示す。本研究では、エネルギー需給を7温度帯(500°C、300°C、200°C、150°C、100°C、60°C、30°C)および電力需要に区分した。ここでの排熱エネルギー供給量とは、現在の工場プロセスで回収可能な排熱量であり、熱・電力需要量とは回収された排熱で賄われているか、もしくは外部からのエネルギー購入で賄われている需要を指している。これらのエネルギー需給モデルは、ヒアリングに基づいて作成されたものであり、各業種の特徴を反映した一般的なモデルであると考えられている。なお、エネルギー供給量・需要量を示す場合に、供給熱量・需要熱量そのもので計上する場合(2次換算)と、熱発生機器の効率を考慮し、需要熱量を得るために必要な投入熱量(1次換算)で計上する場合がある。本研究では、排熱供給量・需要量は1次換算、電力は2次換算で計上している。

図2.2に基づいて、主要4業種のエネルギー需給の概要について述べる<sup>(2)</sup>。

表 2.1 主要 4 業種の日本全体での生産量 (1990 年)

業種	生産量 [Mton/year]
鉄鋼	70.455
窯業土石 (セメント製造)	75.287
紙パルプ	16.429
化学工業 (エチレン製造)	6.131

#### (a) 鉄鋼

工程全体で高温熱を扱っていることから、積極的な排熱回収・再利用が行われている。また、コークス炉から発生する副生ガスを用いて発電を行い、電力としてエネルギー回収が行われている。

#### (b) 窯業土石

エネルギー需給状況の調査対象をセメント製造業としている。焼成工程で発生する排熱を回収し、発電を実施し、省エネルギー化が実施されている。

#### (c) 紙パルプ

抄紙工程でのパルプ乾燥工程に用いられる中低温蒸気需要が多い。原料のチップから繊維質を抽出した後に回収される黒液が燃料として活用されている。黒液をボイラで燃焼して得られた高温蒸気は、工程中の蒸気需要・電力需要に活用されている。

#### (d) 化学工業

石油化学製品の基礎となるエチレン製造工程をエネルギー需給状況の調査対象とした。全般として、化学反応促進のため高温熱が利用されている。製品のエチレン・プロピレン冷凍のため、冷凍熱源が必要である。冷凍熱源として、LNG 気化熱による代替が可能であると考えられている。このため、LNG 気化熱による冷熱需要の代替が行われたとして、冷凍機動力として消費されている 500°C 蒸気を排熱として計上している。

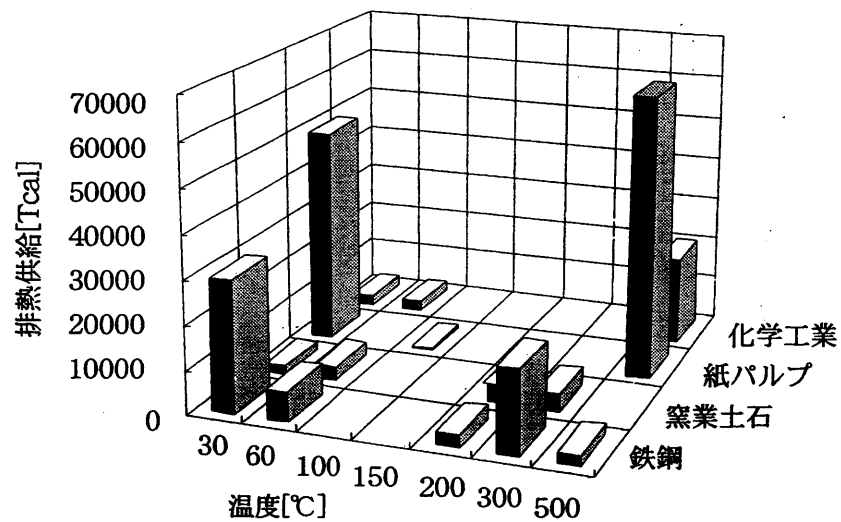
表 2.2 本モデルで設定する主要 4 業種の日本全体での排熱需給量 [Tcal]  
(a) 排熱供給量

温度帯 [°C]	鉄鋼	窯業土石	紙パルプ	化学工業
500	2465.925	0	64709.231	20232.3
300	18952.395	4140.785	0	0
200	2959.11	4216.072	0	0
150	0	0	0	0
100	0	0	612.8017	0
60	6904.59	3372.8576	0	3065.5
30	30084.285	1897.2324	50108.45	2452.4

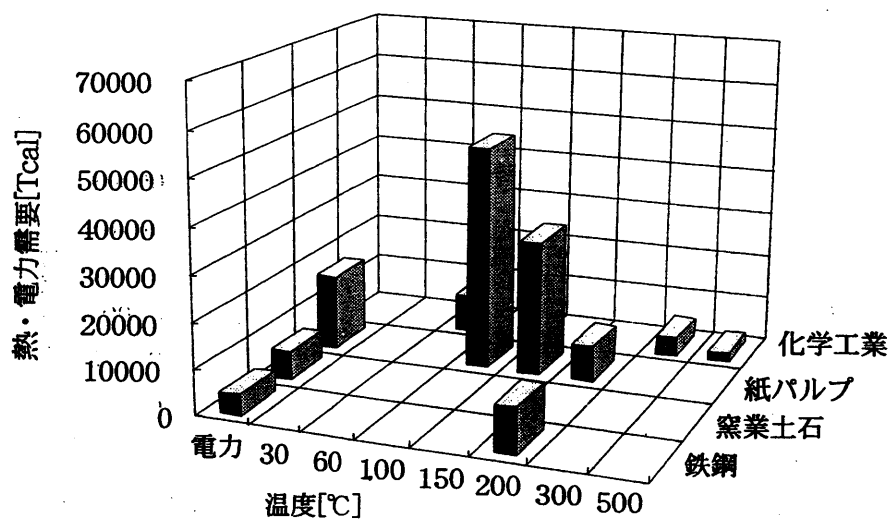
(b) 熱・電力需要量

温度帯 [°C]	鉄鋼	窯業土石	紙パルプ	化学工業
500	0	0	0	2084.54
300	0	0	0	4291.7
200	10075.065	0	8025.5665	0
150	0	0	29904.0658	0
100	0	0	49871.8724	0
60	0	0	0	8399.47
30	0	0	0	0
電力	4551.393	6414.4524	16810.1528	0





(a) 排熱供給



(b) 熱・電力需要

図 2.2 エネルギー多消費型主要4業種のエネルギー需給

## 2.3 ヒートコンビナートモデルの構築

### 〈2.3.1〉 コンビナート内でのエネルギー需給の定式化

本論文では、前述のエネルギー多消費型主要4業種（鉄鋼、窯業土石、紙パルプ、化学工業）をヒートカスケーディング対象業種として取り上げ、エネルギー需給を7温度帯（500°C、300°C、200°C、150°C、100°C、60°C、30°C）および電力需要に区分し、シミュレーションモデルを作成した。主要4業種はいずれも素材型産業であることから、一定時間操業を仮定し、モデル内では1時間帯モデルで表現した。

コンビナート内の熱利用設備としては、背圧タービン、復水タービン、減圧器、蒸気・温水回収設備、また将来技術を含めてスーパーヒートポンプ（SHP）を想定した。さらに、熱供給・電力供給の不足分を補うために、500°Cの蒸気を発生する重油焚きボイラをモデルに組み込んだ。本モデルでは、業種 $i$ 、温度帯 $T_1$ から業種 $j$ 、温度帯 $T_2$ へ移動する熱量 $e(i, T_1, j, T_2)$ 、コンビナート内における各業種の敷地面積 $S_i$ を変数として、以下の制約条件を設けた。

#### ・排熱供給に関する制約

$$\sum_j \sum_{T_2} e_1(i, T_1, j, T_2) + \sum_j e_3(i, T_1, j) + \sum_j \sum_{T_2} e_5(i, T_1, j, T_2) = E_s(i, T_1) \quad (2.1)$$

#### ・熱需要に関する制約

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_{T_1} \alpha(T_1, T_2) \times e_1(i, T_1, j, T_2) + \sum_k \alpha('500', T_2) \times e_2(k, j, T_2) \\ = E_d(j, T_2) (k: \text{ボイラ重油の用途 (電力供給, 熱供給)}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

#### ・電力需要に関する制約

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_{T_1} \sum_{T_2} \beta(T_1, T_2) \times e_1(i, T_1, j, T_2) + \sum_k \sum_{T_2} \beta('500', T_2) \times e_2(k, j, T_2) \\ + \sum_i \sum_{T_1} \xi(T_1) \times e_3(i, T_1, j) + \sum_k \xi('500') \times e_4(k, j) = E_e(j) + \text{SHP 電力} \end{aligned} \quad (2.3)$$

#### ・重油消費量に関する制約

$$\frac{\sum_k \sum_j \sum_{T_2} e_2(k, j, T_2) + \sum_k \sum_j e_4(k, j)}{\kappa} = oil \quad (\kappa: \text{ボイラー効率}) \quad (2.4)$$

・コンビナート敷地面積に関する制約

$$\sum_i S_i = S_{total} \quad (2.5)$$

ここで、 $E_s(i, T_1)$ 、 $E_d(j, T_2)$  は業種  $i$ 、温度帯  $T_1$  での排熱供給量、熱需要量であり、 $S_{total}$  は、カスケーディングを想定しているコンビナート全体の敷地面積である。

モデル内でのエネルギーフローは熱利用設備・エネルギー供給源別に  $e_1(i, T_1, j, T_2) \sim e_5(i, T_1, j, T_2)$  に大別される。

$e_1(i, T_1, j, T_2)$

工場排熱をエネルギー源として、入力温度帯  $T_1 \rightarrow$  出力温度帯  $T_2$  の熱利用設備 (背圧タービン、減圧器、SHP) へ供給されるエネルギーフロー。

$e_2(k, j, T_2)$

ボイラーから出力温度帯  $T_2$  へ供給されるエネルギーフロー。ここで、 $\alpha, \beta, \gamma$  は、熱利用設備別にみた、入力熱エネルギーに対する出力エネルギー比 (熱、電力、損失) である。これらの数値は、各設備の性能によって決定されるものである。表 2.3 に本研究で想定した  $\alpha, \beta, \gamma$  の数値を示す。

$e_3(i, T_1, j)$ 、 $e_4(k, j)$

工場排熱もしくはボイラーからの復水タービンへ供給されるエネルギーフロー。その際の発電効率は、入力温度に応じて  $\xi(T_1)$  で与えられる。表 2.4 にモデル内で想定した  $\xi(T_1)$  の値を示す。

$e_5(i, T_1, j, T_2)$

どの工程でも使用されずに廃棄される排熱のエネルギーフロー。

SHP 電力は、SHP 駆動のために必要な電力量である。本研究で想定した SHP の COP を表 2.5 に示す。また、 $oil$  は、ヒートコンビナート内の排熱不足分を賄うためにボイラー

表 2.3 熱利用設備での熱・電力出力比

	熱利用温度帯 ( $T_1, T_2$ )	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
背 圧 タ ー ビ ン	500°C → 300°C	0.81	0.09	0.1
	500°C → 200°C	0.76	0.14	0.1
	500°C → 150°C	0.743	0.157	0.1
	500°C → 100°C	0.719	0.181	0.1
	300°C → 200°C	0.843	0.057	0.1
	300°C → 150°C	0.825	0.075	0.1
	300°C → 100°C	0.798	0.102	0.1
減 圧 器	200°C → 150°C	0.97	0	0.03
	200°C → 100°C	0.94	0	0.06
	150°C → 100°C	0.97	0	0.03
S H P	30°C → 60°C	1.139	0	0
	60°C → 100°C	1.139	0	0
	60°C → 150°C	1.458	0	0
	100°C → 150°C	1.247	0	0
	150°C → 300°C	0.805	0	0
	200°C → 100°C	0.812	0	0

表 2.4 復水タービン発電効率 $\xi(T_1)$

入力温度 ( $T_1$ )	$\xi(T_1)$
500°C	0.338
300°C	0.275

表 2.5 本研究で想定した SHP の COP

温度帯	COP
30°C → 60°C	8.0
60°C → 100°C	8.0
60°C → 150°C	3.0
100°C → 150°C	5.0
150°C → 300°C	3.0
200°C → 100°C	6.0

に投入されるエネルギー量を示している。本モデルでは、ボイラー効率  $\kappa = 0.8$  とした。

熱エネルギーは  $500^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  の温度帯では水蒸気、 $60^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  の温度帯では温水の形態を想定した。

### (2.3.2) 目的関数および評価方法

目的関数は、異業種間ヒートカスケーディングを実施する前後での、コンビナートの単位敷地面積当たりの熱利用設備の燃料 (ボイラ重油) エネルギー削減量とし、それが最大化されるようにコンビナート内部の業種構成、エネルギーフローを最適化した。

$$\frac{E_1 - E_2}{S_{total}} \quad [\text{Tcal} / \text{km}^2] \rightarrow \text{Max} \quad (2.6)$$

$$\text{ただし、} E_1 = \sum_i E_i(i) \times \text{ratio}(i), \quad E_2 = \text{oil}$$

$E_2$  は最適コンビナートにおいて、異業種間ヒートカスケーディングを実施した場合の燃料エネルギー消費量 (一次換算) である。 $E_i(i)$  は、業種  $i$  について全国規模の生産量を賄う工場を仮想的に建設し、単一工場内でカスケーディングを実施し最適化を行った場合に必要な燃料エネルギー量を示している (表 2.6)。また、 $\text{ratio}(i)$  は、コンビナート内部での業種  $i$  の生産規模の全国比を示している。つまり、 $E_1 = \sum_i E_i(i) \times \text{ratio}(i)$  は、求解された最適コンビナート業種構成に対する比較基準として、異業種間ヒートカスケーディングを行わなかった場合の燃料エネルギー消費量 (一次換算) である。

また、カスケーディングによる省エネルギー効果を表す指標として、エネルギー削減率  $\varepsilon$  を  $E_1$ 、 $E_2$  を用いて以下のように定義した。

表 2.6 単一工場内で最適化を行った場合に必要な燃料エネルギー量  $E_i(i)$

業種	燃料エネルギー量 $E_i(i)$ [Tcal]
鉄鋼	1280
窯業土石 (セメント製造)	19510
紙パルプ	61190
化学工業 (エチレン製造)	8540

$$\varepsilon = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

本研究では、上述の定式化・制約条件に基づいて、Sun Ultra-1(64MB)にて数理計画問題求解汎用ソフト”GAMS” (General Algebraic Modeling System, boyd & fraser publishing company) を用いてシミュレーションモデルを構築し、最適化計算を行った。

## 2.4 まとめ

本章では、我が国の産業部門でのエネルギー需給状況を述べるとともに、本研究で用いた主要4業種の排熱エネルギー需給モデル、ヒートカスケーディングのシミュレーションモデルについて述べた。

## 第2章の参考文献

- (1) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編,「総合エネルギー統計(平成7年度版)」,通商産業研究社, pp.336-337, 1996
- (2) 中田,「温暖化対策としてのエネルギーシステム技術に関する研究」、東京大学大学院工学研究科電気工学専攻修士学位論文, pp.70-90, 1994

## 第3章 東海地区におけるヒートカスケーディングによる省エネルギーポテンシャル評価

### 3.1 はじめに

ヒートカスケーディングに関する従来の研究では、我が国全体の主要4業種を仮想的にコンビナート化し、省エネルギー効果の全国ポテンシャルが試算されている<sup>(1)</sup>。しかし、ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果は、コンビナートを構成する業種構成に依存すると考えられる。したがって、ヒートカスケーディングをある地域において実施する際には、その地域の産業構造の特徴を考慮する必要がある。本章では、東海3県(愛知、岐阜、三重)を対象として、各県の業種構成の特徴を考慮することでヒートカスケーディングによる省エネルギー効果の地域産業構造依存性の評価を行う。

### 3.2 東海3県の産業構造

地域産業構造の特徴を把握するために、東海3県での産業部門における業種別最終エネルギー消費量の推定を行った。各県・各業種のエネルギー消費量は、全国の業種別エネルギー消費量<sup>(2)</sup>を各県・各業種の工業製造品年間出荷額<sup>(3)</sup>によって比例換算することで算定した。東海3県の各業種の工業製造品年間出荷額を表3.1に、また、産業部門におけ

表 3.1 東海3県での工業製品年間出荷額(1992年)

	鉄鋼	紙・パルプ	窯業土石	化学工業	金属機械	全工業製品
全国 [億円]	156399	85733	106360	235791	480278	3104843
愛知 [億円]	20826	4931	9735	9531	160438	365390
岐阜 [億円]	1133	2640	6789	2304	6458	52837
三重 [億円]	1389	923	3907	8854	16734	72271
東海3県計 [億円]	23348	8494	20431	20689	183630	490498



る最終エネルギー消費量を図 3.1に示す。図 3.1から、エネルギー消費量の観点からみた東海 3 県の特徴として、主要 4 業種が全体の 57 %を占めるとともに金属機械産業(自動車産業を含む)が 16 %を占め、化学工業に匹敵する程多いことがわかる。さらに、県別にみた最終エネルギー消費量を図 3.2に示す。図 3.2より、県別に見れば、愛知県では鉄鋼と金属機械、岐阜県では窯業土石、三重県では化学工業の割合が高いという地域産業構造の特徴を見出すことができる。

図 3.3は、愛知県の主要 4 業種と金属機械産業における (a) 排熱供給量、(b) 熱・電力需要量を業種別・温度帯別に示す。同図の主要 4 業種については、文献<sup>(1)</sup>における単位生産量当たりの回収・再利用可能な排熱供給および熱・電力需要モデルと、図 3.2における愛知県と全国とのエネルギー消費量の比率から求めた。岐阜県、三重県についても同様に、排熱供給および熱・電力需要モデルを作成した。両県での業種別・温度帯別にみた排熱供給量、熱・電力需要量モデルを図 3.4、図 3.5に示す。

### 3.3 主要 4 業種における省エネルギー効果

東海 3 県における主要 4 業種について、ヒートコンビナートモデルを用いて、ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果を算定した。目的関数としては、燃料エネルギー(ボイラ重油)消費量  $E_2$ の最小化を用い、エネルギーフローの最適化を行った。本章のように、業種構成を所与として敷地面積制約を考慮しない評価の場合には、カスケーディング前のエネルギー消費量  $E_1$ およびコンビナート全敷地面積  $S_{total}$ が既知となる。したがって、本章におけるカスケード後のエネルギー消費量  $E_2$ の最小化は、(2.6)式に示したヒートカスケーディングによる単位敷地面積当たりのエネルギー削減量の最大化と等価である。

まず、金属機械産業を除くエネルギー多消費型主要 4 業種について、ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果を図 3.6、表 3.2に示す。図 3.6の縦軸は、熱利用設備の

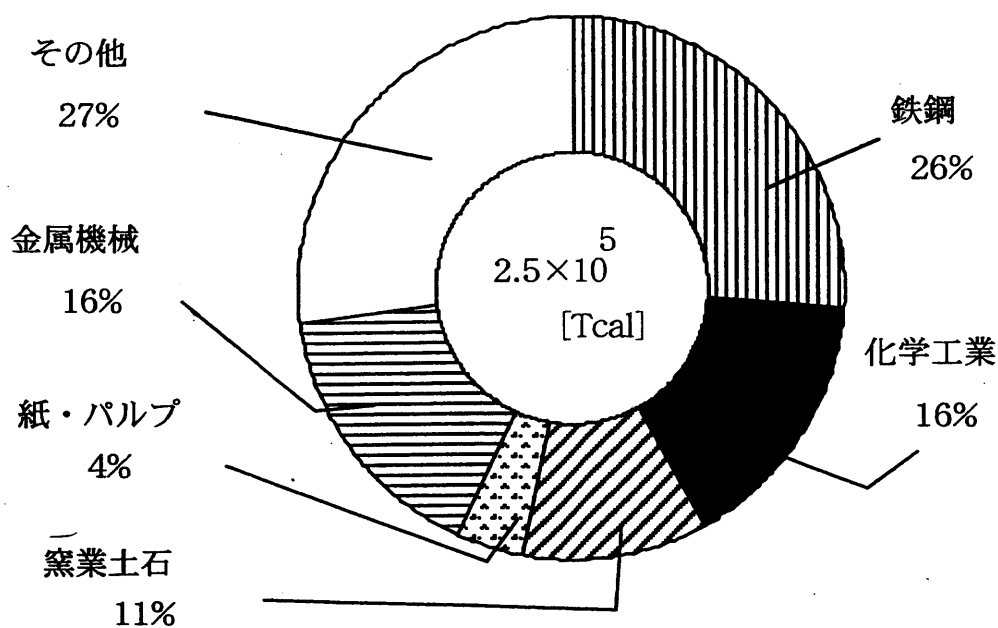


図 3.1 東海 3 県の産業部門における最終エネルギー消費量 (1992 年)

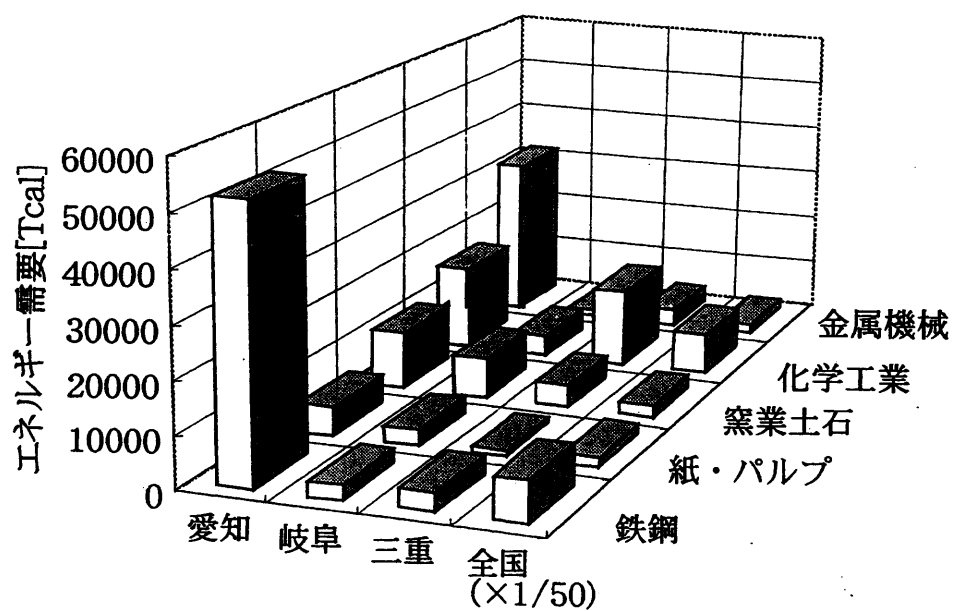
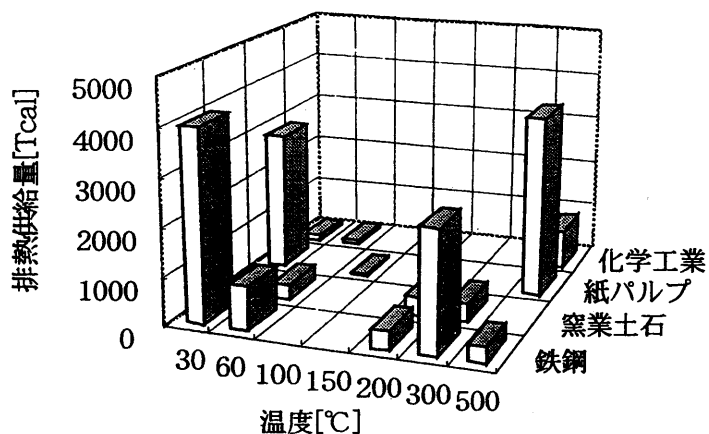
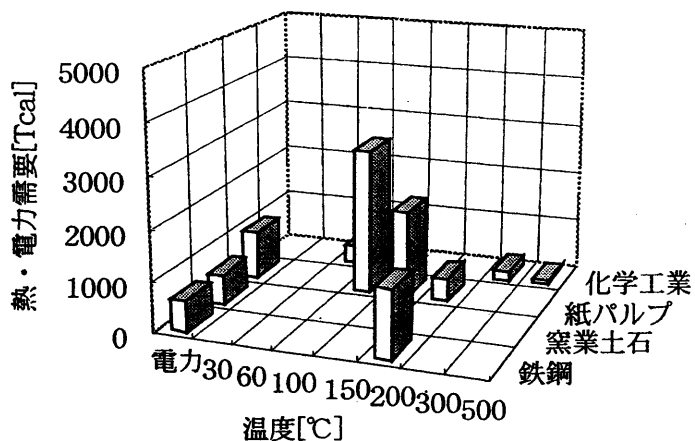


図 3.2 東海 3 県の主要産業におけるエネルギー消費量

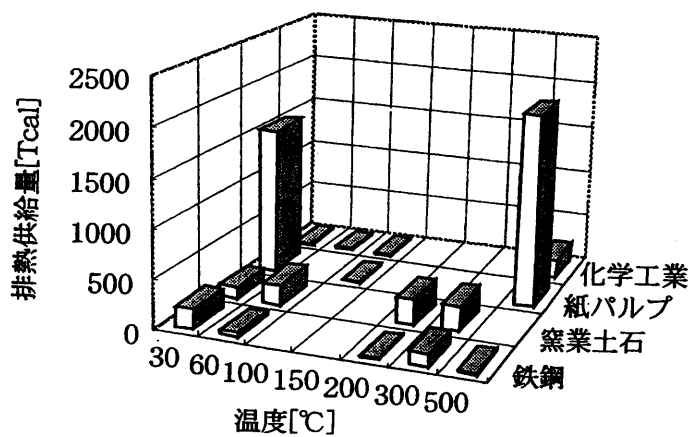


(a) 排熱供給量

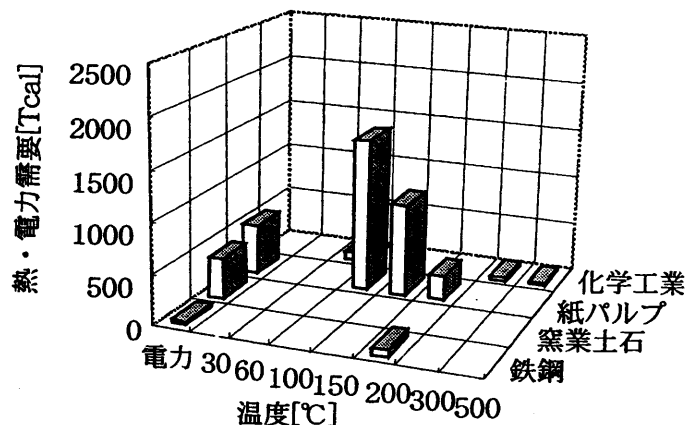


(b) 熱・電力需要量

図 3.3 愛知県の主要産業における排熱供給量、熱・電力需要

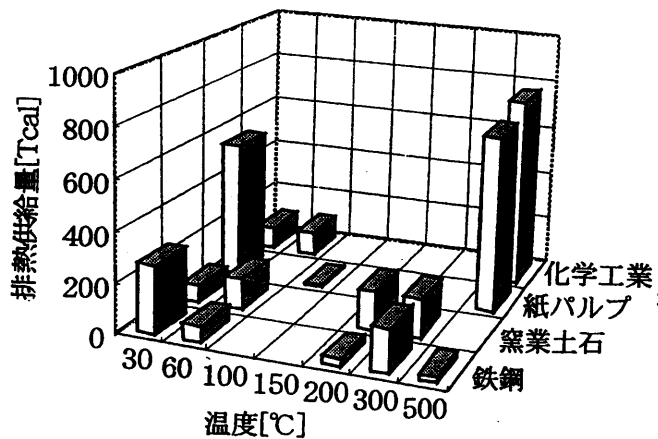


(a) 排熱供給量

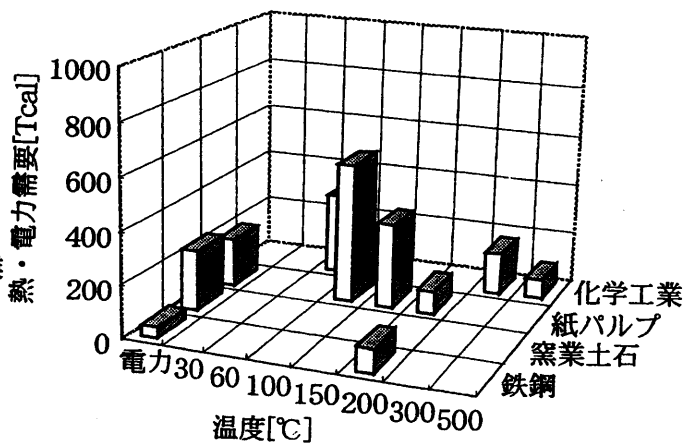


(b) 熱・電力需要量

図 3.4 岐阜県の主要産業における排熱供給量、熱・電力需要



(a) 排熱供給量



(b) 熱・電力需要量

図 3.5 三重県の主要産業における排熱供給量、熱・電力需要

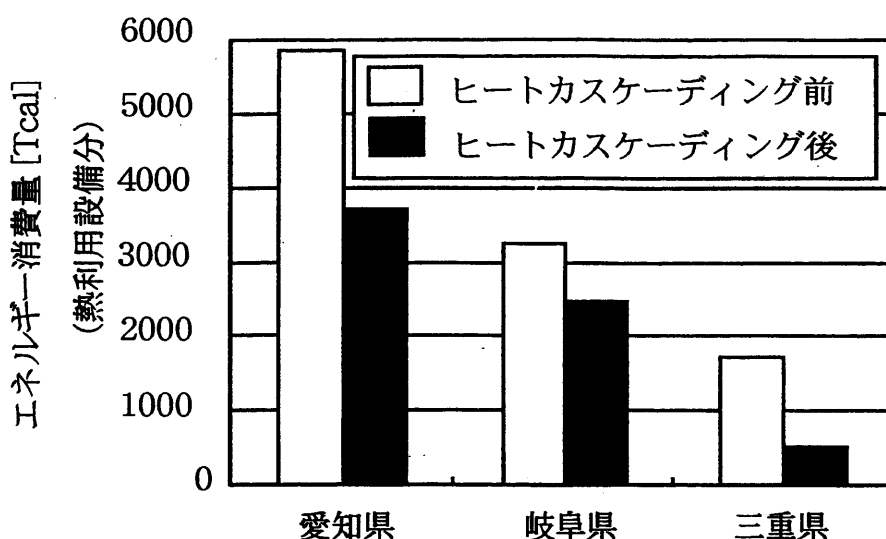


図 3.6 ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果

表 3.2 東海3県のヒートカスケーディングによる燃料エネルギー削減率(主要4業種)

	愛知県	岐阜県	三重県
ヒートカスケーディング前 [Tcal]	5850	3230	1730
ヒートカスケーディング後 [Tcal]	3710	2460	510
燃料エネルギー削減率 [%]	37	24	71

燃料エネルギー消費量であり、本モデルではボイラ重油に相当する。同図から、東海3県の主要4業種におけるヒートカスケーディングにより、愛知県：37%、岐阜県：24%、三重県：71%の省エネルギー効果があることがわかる。三重県の場合、図 3.2 に示したように化学工業の割合が高く、主として化学工業からの高温排熱を復水タービンを介して窯業土石の電力需要へ有効利用することにより、省エネルギー効果が高くなる。愛知県、岐阜県においては、化学工業の割合が他業種と比較して相対的に低く、高温排熱供給量が少ない。このため、不足している高温排熱を賄う必要性から、燃料エネルギー消費量が増大し、省エネルギー効果が三重県よりも低くなる。

以上のように、ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果は地域産業構造に大きく依存することが、定量的に明らかになった。

### 3.4 自動車産業とのコンビナート化の可能性

次に、愛知県では金属機械産業（自動車産業を含む）の割合が高いという地域産業構造上の特徴を考慮して、自動車産業のエネルギー需給データを主要4業種のヒートカスケーディングモデルに組み入れ、ヒートカスケーディングにおける業種拡大の可能性について検討した。

#### 〈3.4.1〉 自動車産業における排熱供給量・熱需要量の算定

自動車産業におけるエネルギー需給モデルの作成にあたり、ある自動車会社(T社)を対象としてエネルギー需給に関するヒアリング調査を実施した。そのデータを基にして、T社と日本全体の自動車産業での換算台数(部品なども自動車の台数に換算した数値)を用いて比例換算を行うことで、全国の自動車産業全体でのエネルギー需給量とした。表3.3にT社と全国の自動車産業での自動車生産台数・換算台数を示す<sup>(4)</sup>。

#### 排熱供給量

表3.4は本モデルで想定した自動車産業の温度帯別年間排熱供給量を示したものである。これらの数値の算定にあたっては、まずヒアリング調査によって各生産工程で供給される排熱量を求めた。次に、本モデルの蒸気・温水の温度区分に一致するように、900°C~500°C 排熱は 500°C に、400°C~280°C 排熱は 300°C に、250°C~160°C 排熱は 200°C に、70°C~50°C 排熱は 60°C にそれぞれ区分した。排熱は、アルミ溶解炉・乾燥炉からの高温排熱、塗装工程での乾燥炉・脱臭炉からの低温排熱が中心である。

#### 熱需要量

表3.5に本モデルで想定した自動車産業の温度帯別年間熱需要を示す。自動車産業における熱需要量の算定には、T社の1次エネルギー消費量および1次エネルギー消費量に対する変換供給エネルギーの構成割合から、比例換算によって自動車産業

での温度帯別にみた年間エネルギー需要を算定した。150°C 蒸気は、乾燥工程でのスチームに用いられている。また、コンプレッサ動力を含めた電力需要が非常に多いことがわかる。

表 3.3 T 社と全国の自動車産業における自動車生産台数・換算台数(1995 年)

	生産台数 [台]	換算台数 [台]
T 社	3171277	2515000
全国	10195536	8085630

表 3.4 自動車産業における年間排熱供給量

熱温度帯 [°C]	排熱量 [Tcal] (T 社)	排熱量 [Tcal] (T 社、熱供給モデル)	排熱量 [Tcal] (全国)
900	4.80	-	-
800	25.98	-	-
730	7.32	-	-
650	84.96	-	-
600	30.13	-	-
550	43.50	-	-
500	2.34	199.03	639.88
400	200.16	-	-
340	62.52	-	-
300	4.06	379.42	1219.84
280	112.68	-	-
250	26.76	-	-
200	-	33.66	108.22
160	6.90	-	-
70	2.02	-	-
60	-	250.62	805.74
50	48.60	-	-

表 3.5 自動車産業における年間エネルギー需要

電力需要	25697Tcal
150°C 熱需要	3785Tcal

### 〈3.4.2〉 自動車産業と主要4業種とのカスケーディングによる省エネルギーポテンシャル

図 3.7に愛知県における主要4業種と自動車産業における熱需給量の概要を示す。図 3.7(a)において、主要4業種と比較すると、自動車産業の生産工程から回収可能な排熱量はどの温度帯においても少ない。これに対して、図 3.7(b)において、自動車産業におけるエネルギー需要の大半は電力需要であり、その需要量は主要4業種のヒートカスケーディングにおける熱・電力需要よりも非常に多い。愛知県の自動車産業と主要4業種とのコンビナート化による省エネルギー効果を算定した結果を表 3.6に示す。燃料エネルギー削減率は6%となり、省エネルギー効果は主要4業種を対象とした場合に比べて小さいことがわかる。これは、自動車産業の電力需要を満たすために、ほぼその需要量に相当する分だけ熱利用設備の燃料エネルギー消費量を増大しなければならないためである。

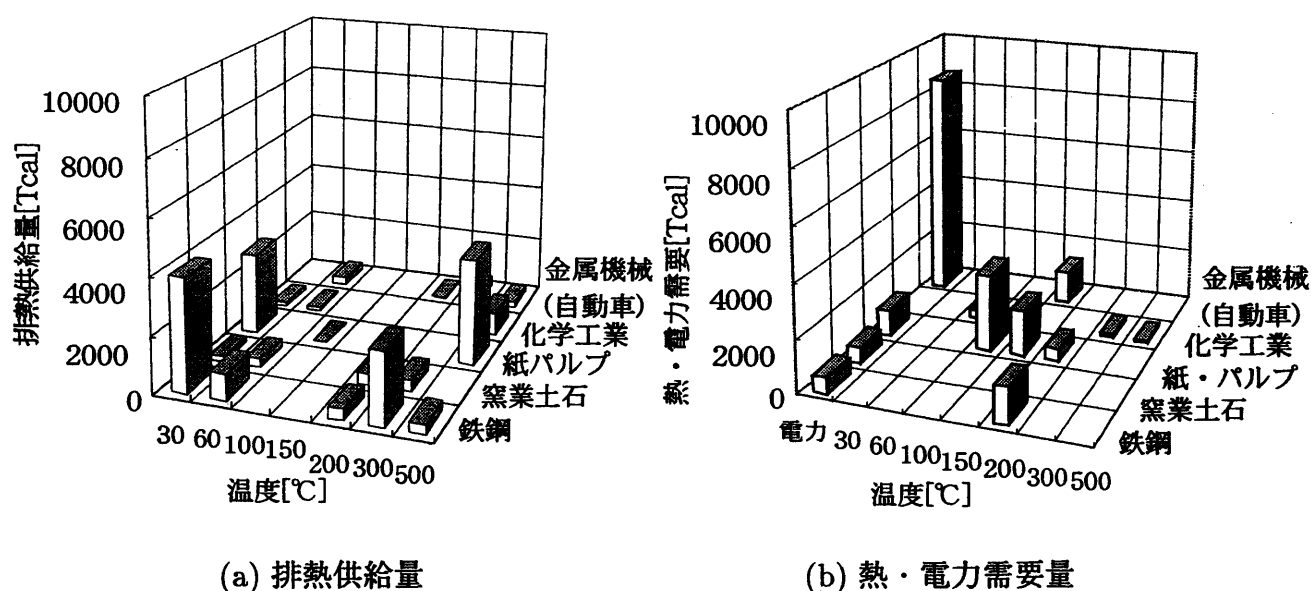


図 3.7 愛知県の主要4業種と自動車産業における排熱供給量、熱・電力需要

表 3.6 愛知県のヒートカスケーディングによる燃料エネルギー削減率 (主要4業種+自動車産業)

	愛知県
ヒートカスケーディング前 [Tcal]	38054.4
ヒートカスケーディング後 [Tcal]	35917.2
燃料エネルギー削減率 [%]	6

以上の理由により、愛知県における主要4業種と自動車産業とはエネルギー消費量が大  
きいという共通点はあるものの、消費構造の相違により、ヒートカスケーディングの観点  
からは、コンビナート化のメリットは小さい。

### 3.5 まとめ

本章では、異業種間ヒートカスケーディングについて、カスケーディング導入の対象と  
している地域の産業構造を考慮した場合の省エネルギー性について評価を行った。本研  
究では、東海3県(愛知、岐阜、三重)を例として、各県の地域産業構造を考慮してカス  
ケーディング導入による省エネルギー性の評価を行った。その結果、東海3県の主要4業  
種におけるヒートカスケーディングによって、燃料消費量がカスケーディング前に比べ  
愛知県：37%、岐阜県：24%、三重県：71%の割合で削減されることがわかった。この  
ように、カスケーディングによる省エネルギー効果は対象としている地域の主要産業構造  
に大きく依存することを確認した。また、愛知県については金属機械産業(自動車)のエ  
ネルギー需給データを主要4業種のヒートカスケーディングモデルに組み入れ、ヒートカ  
スケーディングにおける業種拡大の可能性について検討した。自動車産業は排熱供給量が  
少ない反面、電力需要が非常に多いため、主要4業種とのコンビナート化のメリットは小  
さいことが明らかになった。



### 第3章の参考文献

- (1) 中田, 茅, 「ヒートコンビナートモデルによるエネルギー多消費型産業の省エネルギーの基礎的な評価」, 電学論 B, Vol.115, No.2, pp.149-155, 1995
- (2) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編, 「総合エネルギー統計(平成7年度版)」, 通商産業研究社, 1996
- (3) 朝日新聞社編, 「'95 民力」, pp.502-503, 朝日新聞社, 1995
- (4) (株) 日刊工業新聞社, (社) 日本自動車会議所編, 「自動車年鑑 1996 年版」, 日刊工業新聞社, 1996

## 第4章 既存産業を中核としたヒートカスケーディングにおける最適業種構成

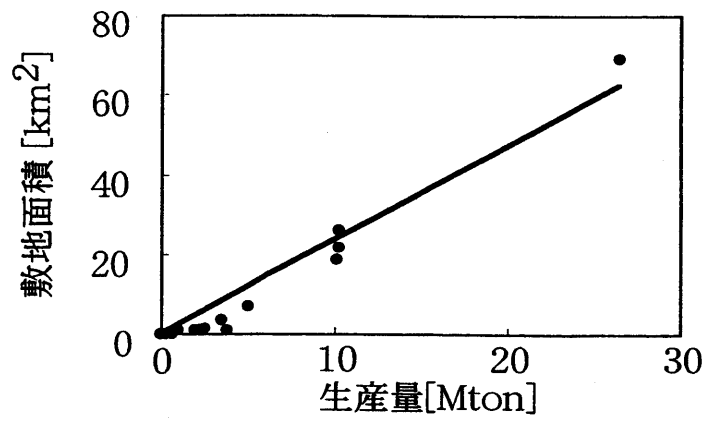
### 4.1 はじめに

前章では、東海3県における既存の地域産業構造の特徴を考慮して、排熱のカスケード利用による省エネルギー効果を算定した。本章では、さらにヒートカスケーディングの地域ポテンシャルを評価するために、ある地域に産業コンビナートを新規に建設する場合や、既存のエネルギー多消費型産業を中核として地域の再開発を計画する場合を想定する。このようなケースでは、立地上の問題として、コンビナート全体の敷地面積を考慮する必要があると考えられる。そこで本章では、敷地面積制約の下で、ヒートカスケーディングにおける最適コンビナート構成について検討する。

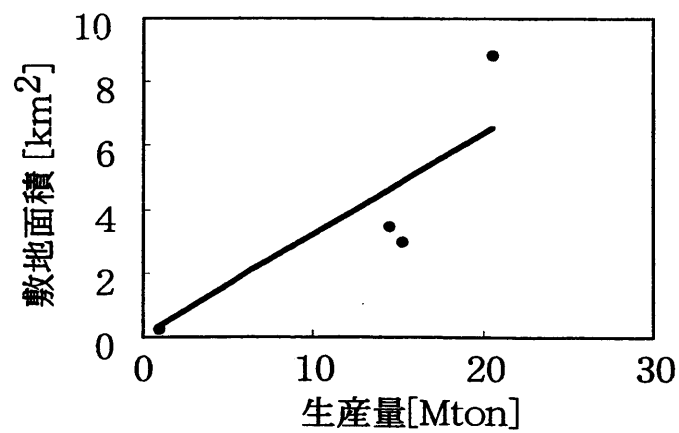
### 4.2 主要4業種の生産量と敷地面積との相関

コンビナート全体の敷地面積に関する制約を与えるために、業種別・企業別に生産量（製品販売数量）と敷地面積（主要工場の敷地面積の合計）との相関を調べた<sup>(1)</sup>。図4.1は、(a)鉄鋼、(b)窯業土石、(c)紙・パルプにおける相関図である。(a)図より、鉄鋼においては、生産量と敷地面積との間に比例関係があることがわかる。窯業土石、紙・パルプにおいてはばらつきはあるものの、ほぼ図中の実線のような比例関係が成り立つものとみなした。なお、化学工業については、対象としているエチレン単独の生産量が記載されていないため、主要企業の敷地面積の合計(28.2km<sup>2</sup>)<sup>(1)</sup>と文献<sup>(2)</sup>の業種全体としてのエチレン生産量を用い、他の業種と同様に両者の比例関係を仮定した。

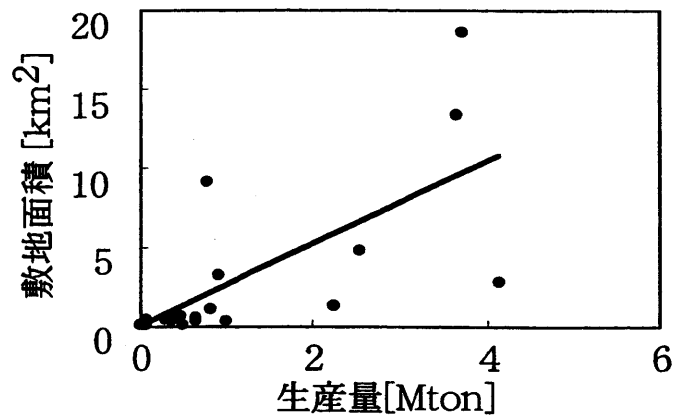
以上のような手順によって得られた各業種の敷地面積制約における比例定数を表4.1にまとめて示す。この比例定数 $A_i$ ( $i$ :業種)を用いて、コンビナート全体の敷地面積 $S_{total}$ は



(a) 鉄鋼



(b) 窯業土石



(c) 紙パルプ

図 4.1 業種別生産量と敷地面積との相関

表 4.1 敷地面積制約における比例定数

鉄鋼	窯業土石	紙パルプ	化学工業
2.37km <sup>2</sup> /Mton	0.32km <sup>2</sup> /Mton	2.60km <sup>2</sup> /Mton	4.60km <sup>2</sup> /Mton

次式で与えられる。

$$S_{total} = \sum_i S_i = \sum_i A_i \times P_i \quad [\text{km}^2] \quad (4.1)$$

$S_i$ および $P_i$ は、コンビナート内における各業種の敷地面積および生産量である。

### 4.3 目的関数および評価方法

本章の検討では、(2.6)式に示した異業種間ヒートカスケーディングを実施する前後での、コンビナートの単位敷地面積当たりの熱利用設備の燃料エネルギー削減量を目的関数として、コンビナート内部の業種構成、エネルギーフローを最適化した。

$$\frac{E_1 - E_2}{S_{total}} \quad [\text{Tcal} / \text{km}^2] \rightarrow \text{Max} \quad (4.2)$$

また、主要4業種の中のある1業種の敷地面積を固定し、ヒートカスケーディングによる省エネルギー効果を感度解析的に評価した。ここでは、各業種における実際の主要工場の敷地面積データ<sup>(1)</sup>から、固定業種の敷地面積を業種共通で3km<sup>2</sup>とし、コンビナート全体の敷地面積を4~20km<sup>2</sup>の範囲で変化させた。なお、固定業種の敷地面積(3km<sup>2</sup>)は、評価基準値として便宜上設定したものである。例えば2倍の基準値を用いたとしても、コンビナート全体として2倍の敷地面積を考えることにより、業種構成比を維持しつつ、各業種の生産量およびエネルギーフローが相似となる解が得られ、省エネルギー効果に関しては影響を及ぼさない。したがって、固定業種の規模は、コンビナート全体の敷地面積制約の範囲内で任意に設定することができる。

### 4.4 最適コンビナート構成

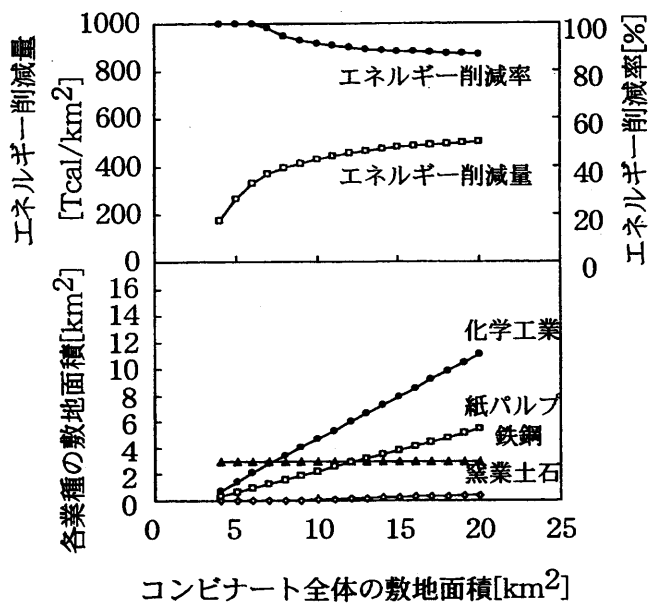
図4.2は、固定業種を(a)鉄鋼、(b)窯業土石、(c)紙・パルプ、(d)化学工業とした場合の最適コンビナートの業種構成、エネルギー削減量およびエネルギー削減率である。(a)図から、鉄鋼の敷地面積を固定した場合、主として化学工業と紙・パルプがコンビナート化されることがわかる。また、コンビナート全体の敷地面積の増大に伴い、単位敷地面

積当たりのエネルギー削減量が増大するとともに、エネルギー削減率については87 %以上の高い値を維持することができる。特に、全敷地面積が6km<sup>2</sup>以下の場合には、エネルギー削減率は100 %に達する。これは、熱利用設備の燃料エネルギーを必要としないコンビナートが形成されることを意味する。全敷地面積：6km<sup>2</sup>の場合における最適コンビナートの各業種の生産量(全国割合)は、鉄鋼：1.8 %、紙・パルプ：2.1 %、化学工業：7.4 %に相当し、330Tcal/km<sup>2</sup>の燃料エネルギーを削減することができる。このケースにおけるコンビナート内の主たるエネルギーフローの一例を図 4.3に示す。同図において、化学工業の高温排熱から紙・パルプの中低温熱需要および電力需要へ、背圧タービンを利用してカスケーディングされていることがわかる。また、紙・パルプの高温排熱量も大きく、自工場内で回収・再利用されるほか、化学工業および鉄鋼において利用されている。

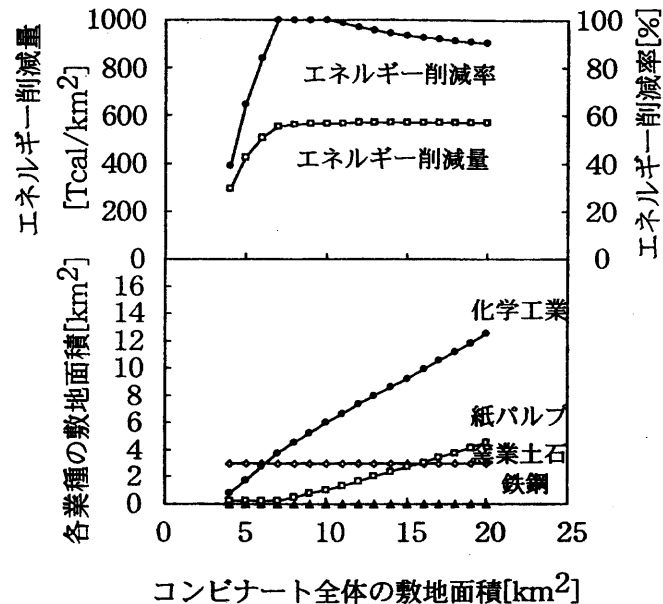
図 4.2(b) および (c) においても、化学工業と紙・パルプを主体としたコンビナート構成となることがわかる。また、(b) 図の全敷地面積：7～10km<sup>2</sup>の場合には、(a) 図のケースとは異なる業種構成を有する燃料エネルギーの不要なコンビナートが形成される。以上の結果より、前章の三重県のケースと同様に、化学工業の高温排熱と他業種の中低温熱需要および電力需要とが有効にカスケード利用されることにより、両業種が積極的にコンビナート化されることがわかる。

一方、(d) 図において、化学工業を固定した場合には、敷地面積から見れば、窯業土石がコンビナートの主体となる。しかし、窯業土石の単位生産量当たりの高温排熱供給量は化学工業および紙・パルプよりも小さい<sup>(2)</sup>。したがって、コンビナート内の排熱供給から見れば、(a)～(c) 図と同様に、化学工業と紙・パルプが主体となっていると言える。

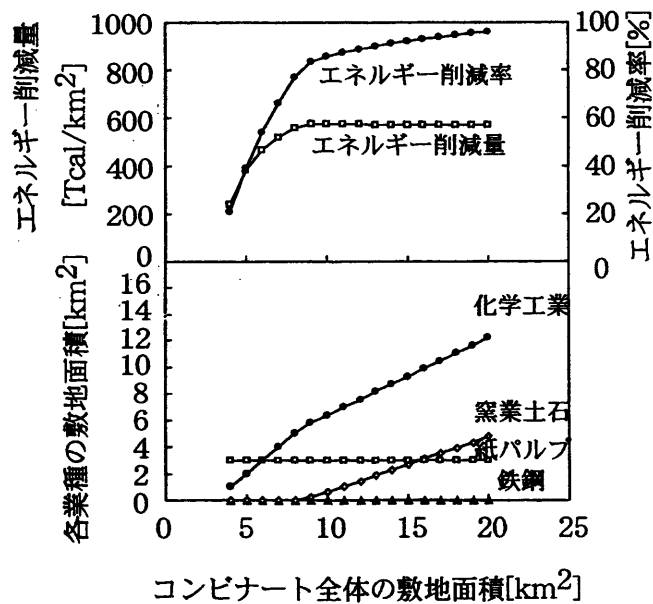
ここで、前章で述べた三重県のコンビナート(エネルギー削減率：71 %)と比較する。三重県全体の主要4業種をコンビナート化した場合における各業種の生産量(全国割合)は、図 3.2のエネルギー消費量との比例換算より、鉄鋼：0.9 %、窯業土石：3.7 %、紙・



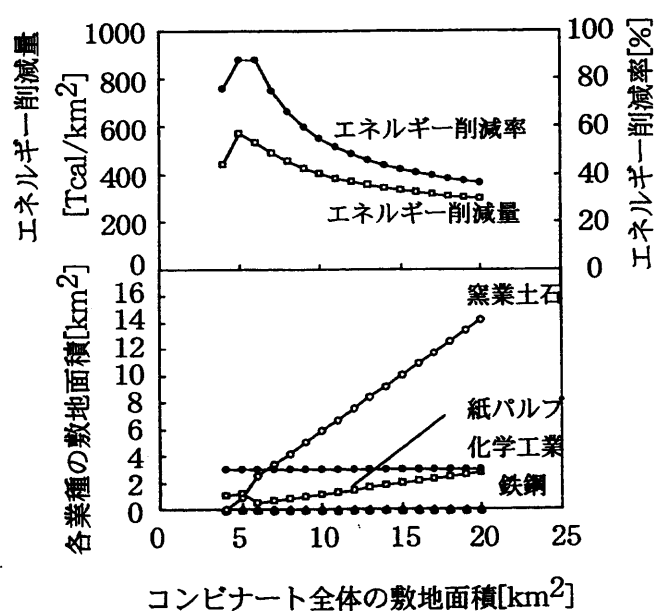
(a) 鉄鋼



(b) 窯業土石



(c) 紙パルプ



(d) 化学工業

図 4.2 各固定業種 (敷地面積: 3km<sup>2</sup>) に対する最適コンビナート構成、エネルギー削減量およびエネルギー削減率 (熱利用設備分)

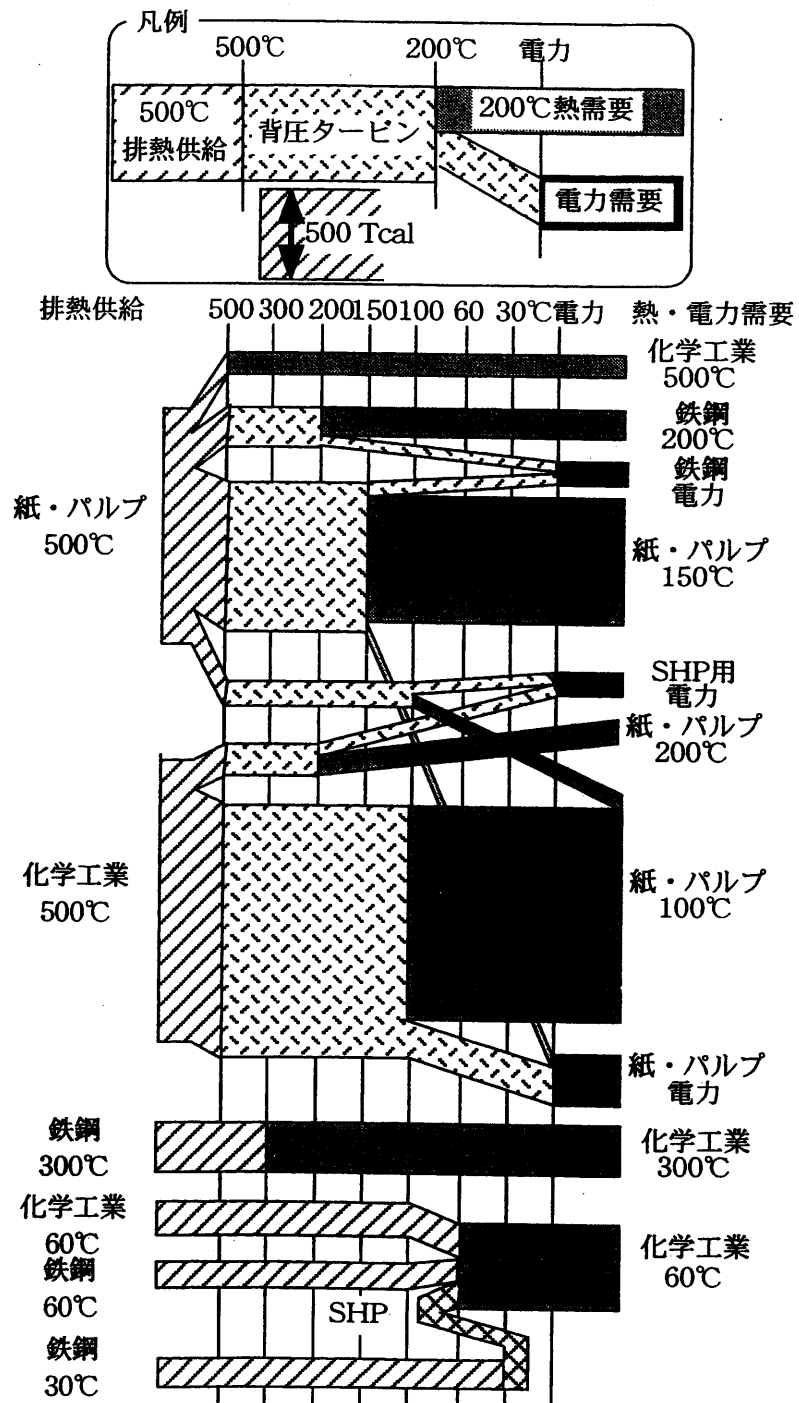


図 4.3 最適コンビナートにおけるエネルギーフロー  
(固定業種：鉄鋼、コンビナート全体の敷地面積：6km<sup>2</sup>の場合)

パルプ：1.1 %、化学工業：3.8 %である。この業種構成・規模は、窯業土石以外の3業種について見れば、図 4.2(a) および図 4.3で例示した最適コンビナートを1/2に相似的に縮小したものに相当する。このことは、三重県において産業排熱をカスケード利用することにより、最適構成に近いコンビナートを形成し得ることを示唆している。

#### 4.5 まとめ

本章では、既存の地域産業を中核とした新規産業立地や地域の再開発によるコンビナート建設の際のヒートカスケーディング導入を想定し、省エネルギー効果が最大となるようなコンビナート業種構成を求めた。その結果、任意の業種を固定した場合、すなわち、任意の業種を中核としたコンビナートを建設する場合において、最適業種構成を選択することにより、ヒートカスケーディングによって熱利用設備の燃料エネルギーを90 %以上削減し得ることがわかった。

なお、本章の検討は、我が国全体の産業部門を対象としたヒートカスケーディングの全国ポテンシャルを求めるものではなく、産業コンビナートの新設地域や、中核産業を有する既存の地域における省エネルギーポテンシャルを評価したものである。したがって、その地域でコンビナート化されない業種および生産量については、エネルギーの有効利用に寄与することができない。しかし、固定業種の規模を任意に設定できることや、図 4.2に基づいて最適業種構成を選択できることを考慮すれば、地域的なコンビナートの最適化とともに、より広い地域を対象とした省エネルギーポテンシャルにまで評価を拡張できる可能性がある。この場合には、エネルギー削減率の高いコンビナートと低いコンビナートとが、各地に分散して形成されことになると考えられる。



## 第 4 章の参考文献

- (1) 日本経済新聞社編,「会社年鑑 (1996 年版)」, 日本経済新聞社, 1996
- (2) 中田, 茅,「ヒートコンビナートモデルによるエネルギー多消費型産業の省エネルギーの基礎的な評価」, 電学論 B, Vol.115, No.2, pp.149-155, 1995

## 第5章 異業種間ヒートカスケーディングの省エネルギー性に及ぼす熱輸送損失の影響

### 5.1 はじめに

これまでのヒートカスケーディングによる省エネルギー性の評価は、熱輸送時の損失を考慮しない理想的な条件の下で行ったものであった。しかし、現状で想定している水蒸気・温水による熱エネルギーの輸送では、輸送距離に応じてエネルギー損失が発生し、ヒートカスケーディングの省エネルギー効果にも影響があるものと予想される。

本章では、まず実際の地域熱供給配管での熱輸送の事例から、本モデル内で想定している温度帯における熱輸送損失の概算を行った。次に、熱輸送損失の定式化を行い、モデルに組み込み、省エネルギー性評価を行うことで、より現実に近い形でのヒートカスケーディングにおける排熱の活用法について検討を行った。

### 5.2 過熱蒸気の熱輸送にともなう蒸気温度低下の算定

過熱蒸気によって熱輸送を行う場合には、熱輸送損失によって受端での蒸気温度が送端の蒸気温度よりも低下すると考えられる。本節では、実在する地域熱供給配管の事例から、輸送蒸気の流速を算定し、本モデルで想定している温度帯の過熱蒸気について熱輸送損失による蒸気の温度低下について試算を行った。

#### 〈5.2.1〉配管中の過熱蒸気の流速の算定

過熱蒸気の熱輸送損失・蒸気温度低下を算定するには、配管内を流れる蒸気の流速を知る必要がある。配管中の蒸気の流速に関するデータがないため、実際に熱供給が行われている新宿地区での地域熱供給配管の事例から流速  $u$  を算定した。

### (1) 各種データの入力

新宿地区での地域熱供給配管では、送端において 200°C、10kg/cm<sup>2</sup>の蒸気が 2km 輸送された場合、受端では 180°C、9.9kg/cm<sup>2</sup>に変化するという実績がある。そこで、この事例を基にして、蒸気の流速を概算した。

新宿地区の事例と一致させるために、配管入口・出口温度を 200°C、180°C とし、配管長を 2km とした。蒸気の物性値は 200°C の値を用いた<sup>(1)(2)</sup>。

$$\text{動摩擦係数 } \nu = 33.34 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5.1)$$

$$\text{熱伝導率 } \lambda = 0.0302 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

$$\text{密度 } \rho = 4.76 \text{ kg/m}^3 \quad (5.3)$$

$$\text{定圧比熱 } C = 0.581 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

$$\text{プラントル数 } Pr = 1.1 \quad (5.5)$$

### (2) 配管の形状の特定

配管の形状に関する数値は、新宿地区で用いられているものを参考にして、以下のように設定した。

$$\text{内径 } d_1 = 0.6 \text{ m} \quad (5.6)$$

$$\text{外径 } d_2 = 0.8 \text{ m} \quad (5.7)$$

$$\text{断熱材の熱伝導率 } \lambda_0 = 0.06 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

$$\text{配管の外の熱伝達率 } \alpha_2 = 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \quad (5.9)$$

### (3) 流速の算定

配管長を  $L$  km とすると、出口の温度  $T(L)$  は入口温度  $T_{in}$ 、配管外部の温度  $T_0$ 、保温抵抗  $R[\text{mh}^\circ\text{C/kcal}]$  を用いて、以下のように与えられる<sup>(2)(3)</sup>。

$$T(L) - T_0 = (T_{in} - T_0) \exp\left(\frac{-4000L}{3600RC\pi d^2 \rho u}\right) \quad (5.10)$$

(1)、(2) のデータから、上式に基づいて流速  $u$  を算定した。その結果、流速  $u$  は

$$u = 7.9\text{m/s} \quad (5.11)$$

と算定された。

### 〈5.2.2〉 蒸気輸送による蒸気温度低下の算定

前節で求めた流速 (7.9m/s) を基にして、熱輸送にともなう 500～100℃ 蒸気の温度低下を算定した。蒸気に関する物理定数を表 5.1 に <sup>(1)(2)</sup>、温度変化の算定結果を図 5.1 に示す。なお、200℃、150℃、100℃ 蒸気において、過熱蒸気が熱損失によって飽和蒸気に変化する場合には、蒸気の出口温度は飽和温度で一定になる。図 5.1 から、過熱蒸気の状態での温度低下は、過熱度にもよるが、ある程度大きいことがわかる。しかし、本研究で想定している数 km 程度の熱輸送では、蒸気温度は著しく低下しないことがわかる。

表 5.1 蒸気温度変化の算定に用いた諸定数

蒸気の入口温度 $T_{in}[^{\circ}\text{C}]$	500	300	200	150	100
圧力 $p[\text{kg}/\text{cm}^2]$	100	75	10	1	1
動粘性係数 $\nu[\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}]$	9.87	5.476	33.34	278.4	208.2
熱伝導率 $\lambda[\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}]$	0.0665	0.054	0.0302	0.0247	0.0214
密度 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	30.50	40.0	4.76	0.51	0.58
定圧比熱 $C_p[\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}]$	0.606	0.86	0.581	0.473	0.478
プラントル数 $Pr[-]$	0.967	1.45	1.1	0.974	0.981
流速 $u[\text{m}/\text{s}]$	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
内径 $d[\text{m}]$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
内側の半径 $r_1[\text{m}]$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
外側の半径 $r_2[\text{m}]$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
断熱材の熱伝導率 $\lambda_1[\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}]$	0.087	0.069	0.06	0.0555	0.051
管外部の熱伝達率 $\alpha_2[\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}]$	10	10	10	10	10
レイノルズ数 $Re[-]$	4802431.6	8655953.3	1421715.7	170258.6	227665.7
ヌセルト数 $Nu[-]$	5024.2	9465.1	1997.7	348.4	440.8
熱伝達率 $\alpha[\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}]$	556.8	851.9	100.6	14.3	15.7
保温抵抗 $R[\text{mh}^{\circ}\text{C}/\text{kcal}]$	0.566	0.704	0.804	0.867	0.939

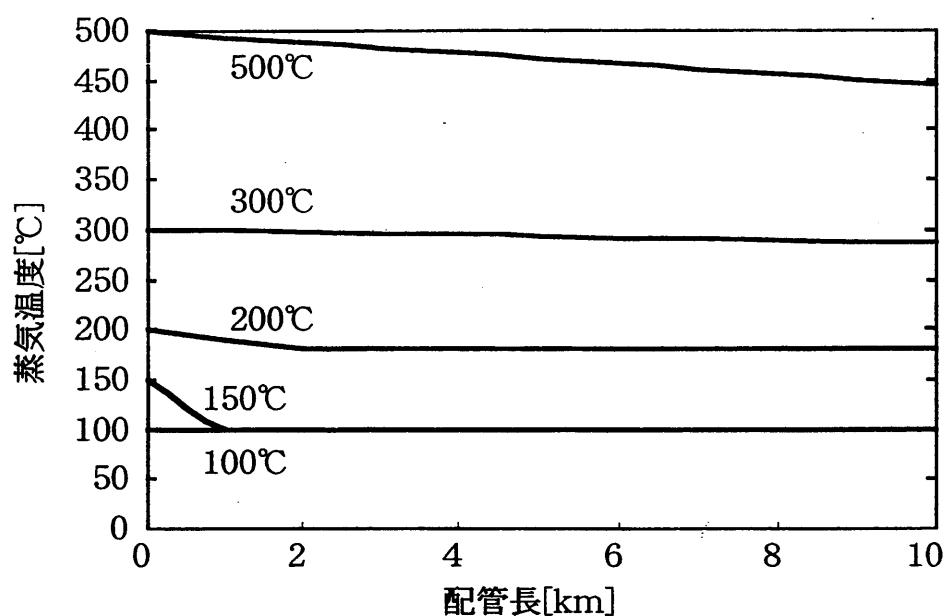


図 5.1 熱輸送損失による配管内の蒸気温度の変化

### 〈5.2.3〉 蒸気輸送による比エンタルピー損失の算定

新宿地区での地域熱供給配管の事例における比エンタルピーは、文献<sup>(1)</sup>より、

$$200^{\circ}\text{C}、10\text{kg}/\text{cm}^2\text{の蒸気の比エンタルピー} = 2830\text{kJ}/\text{kg} \quad (5.12)$$

$$180^{\circ}\text{C}、9.9\text{kg}/\text{cm}^2\text{の蒸気の比エンタルピー} = 2770\text{kJ}/\text{kg} \quad (5.13)$$

である。したがって、この場合の蒸気輸送による比エンタルピー損失を以下のように算定した。

$$\begin{aligned} \text{比エンタルピー損失} &= \frac{2830 - 2770}{2830} \times 100[\%] \\ &= 2.1[\%] \end{aligned} \quad (5.14)$$

### 5.3 熱輸送損失の定式化

本章では、熱輸送損失の程度を表す損失パラメータ $\gamma$ を用いて、以下の(a)~(d)の4通りの熱輸送効率 $\delta$ を想定し、新たにモデル内に制約条件として組み入れた。

#### (a) 一律

熱輸送を行う業種間の距離等に関わらず、損失を一律とみなした場合。

$$\delta = 1 - \gamma_a \quad (5.15)$$

#### (b) 面積比例

各業種内における配管の二次元的な広がり considering、熱輸送損失が熱輸送を行う

各業種の敷地面積の和  $S_i + S_j$  に比例するとみなした場合。

$$\delta = 1 - \gamma_b(S_i + S_j) \quad (5.16)$$

#### (c) 距離比例

熱輸送損失が業種間の距離に比例するとみなした場合。業種間の距離は各業種の敷地形状を円形とした場合の半径の和によって表されたとした。

$$\delta = 1 - \gamma_c(R_i + R_j) \quad (5.17)$$

ただし、 $S_i = \pi R_i^2$ 、 $S_j = \pi R_j^2$

#### (d) 指数型

熱輸送損失が業種間の距離に対して指数的に変化するとみなした場合。

$$\delta = (1 - \gamma_d)^{(R_i + R_j)} \quad (5.18)$$

損失パラメータ $\gamma_a \sim \gamma_d$ は(5.15)~(5.18)式からもわかるように異なる次元をもつ。

本モデルでは、異業種間で熱輸送が行われる場合のみに熱輸送損失が生じるものとした。このため、熱輸送損失を考慮した場合、熱需要に関する制約式(2.2式)が以下のように修正される。

$$\sum_i \sum_{T_1} \delta \times \alpha(T_1, T_2) \times e_1(i, T_1, j, T_2) + \sum_k \delta \times \alpha('500', T_2) \times e_2(k, j, T_2) = E_d(j, T_2) \quad (5.19)$$

(b) 面積比例、(c) 距離比例、(d) 指数型の熱輸送損失をモデル内に組み入れた場合、モデルは非線形になる。非線形モデルの場合、モデル内の制約条件の関係により、最適化計算において局所最適解が求解され、本来の最適解が得られないことがある。局所最適解を回避する必要性から、本研究での非線形モデルの求解にあたっては、まず変数である各業種の敷地面積の中で、ある1業種の敷地面積  $S_i$  をパラメータとして設定した。次に、パラメータ  $S_i$  の値を  $S_{i0} \sim S_{imax}$  の範囲で離散的に変化させながら最適化計算を行い、その際に得られた最も優れた解を最適解とした。非線形モデルの最適解の探索に関する一連の行程を、図 5.2 にフローチャートととして示す。

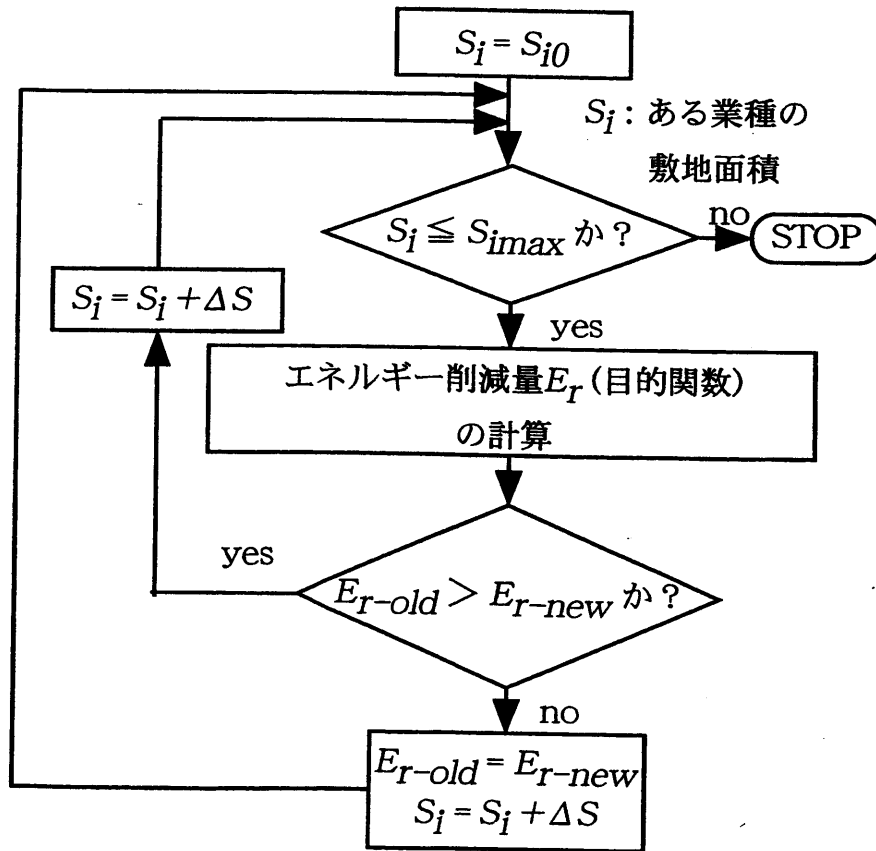


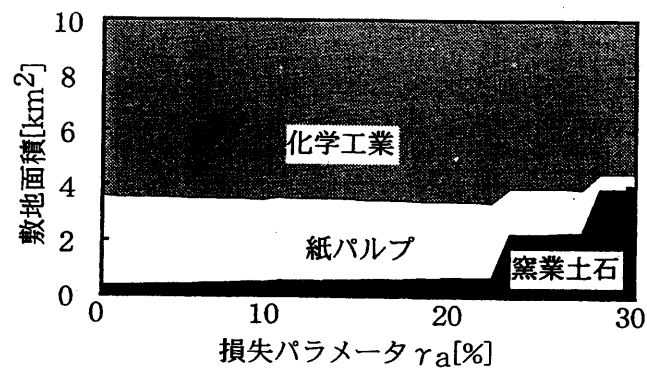
図 5.2 非線形モデルの最適解の探索に関するフローチャート

## 5.4 熱輸送損失を考慮した省エネルギー性評価

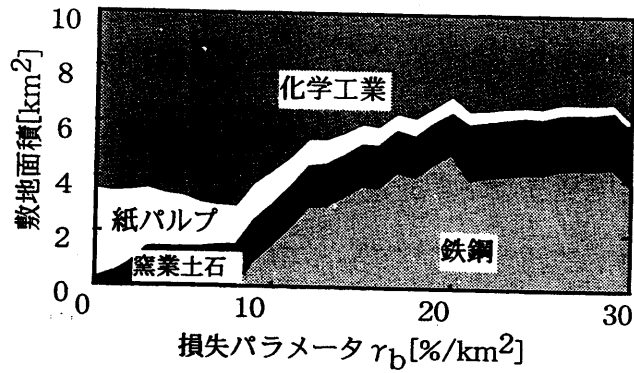
前節で示した(a)～(d)の熱輸送損失形態を想定して最適化計算を行った。5.2節の新宿地区の地域熱供給配管における熱輸送損失の実績から、200°C 蒸気の比エンタルピー損失は2%と算定される。そこで、配管出口においても入口と同質の熱エネルギーを得るものとして、その補償用エネルギーを考慮して各損失パラメータの値を0～30%とした。ただし、次元の相違により、損失パラメータの数値が同一であっても、熱輸送損失の程度は異なる点に注意が必要である。コンビナート内における各業種の敷地面積・エネルギー削減率の推移を図5.3および図5.4に示す。図5.3から、化学工業と紙パルプとの間で積極的なヒートカスケーディングが行われていることがわかる。これは、前章と同様に、化学工業の高温排熱と紙パルプの中低温蒸気需要との間でカスケーディングを行うことで、大幅なエネルギー消費量の削減が可能になるためである。また、鉄鋼は損失が(b)面積比例の場合にのみコンビナート内に組み込まれている。これは、鉄鋼の単位敷地面積あたりのエネルギー需給量が他の3業種よりも小さく、鉄鋼を組み込むことによって敷地面積に比例する熱輸送損失の影響を緩和しうるためであると考えられる。なお、図5.3(b)面積比例～(d)指数型での業種構成の推移は、(a)一律のようになめらかになっていない。これは、(b)面積比例～(d)指数型の制約を組み入れたモデルは非線形であり、図5.2に示したような離散的なパラメータ変化によって得られた解を最適解としているからである。

また、(a)～(d)のどの熱輸送損失形態においても、熱輸送損失の増加にともない、中低温蒸気需要の多い紙パルプの敷地面積が減少し、逆に電力需要のみからなる窯業土石の敷地面積が増加する。これは、熱輸送損失を考慮する場合、蒸気と比較して輸送損失の少ない電力にエネルギー変換して輸送・消費することがエネルギー削減にとって好ましいことを示している。すなわち、コンビナート内の業種構成を適切に選択することで、図5.4のように熱利用設備の燃料エネルギー(ボイラ重油)の消費量を約80%削減できることがわかる。図5.5は、図5.3(a)において、熱輸送損失の変化に対して業種構成を適切に選択し

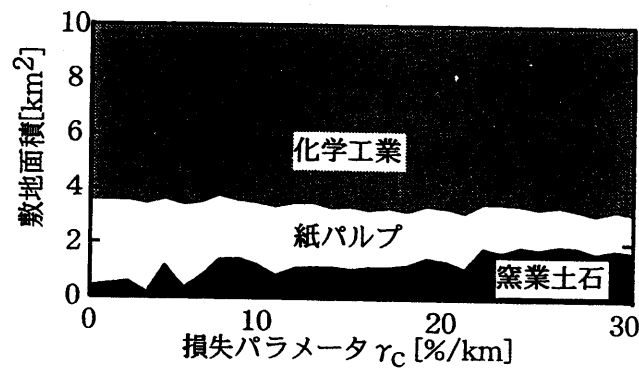




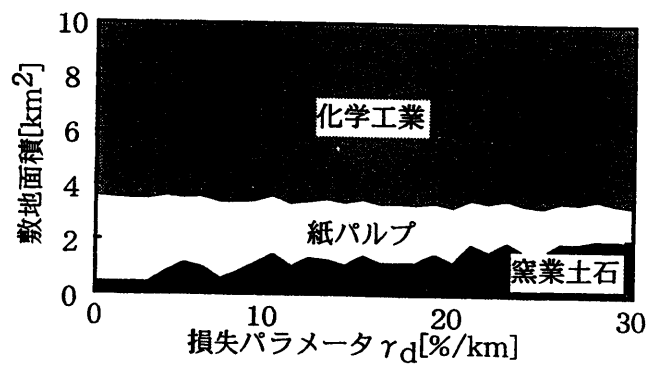
(a) 一律



(b) 面積比例



(c) 距離比例



(d) 指数型

図 5.3 熱輸送損失の変化に対する最適業種構成の推移

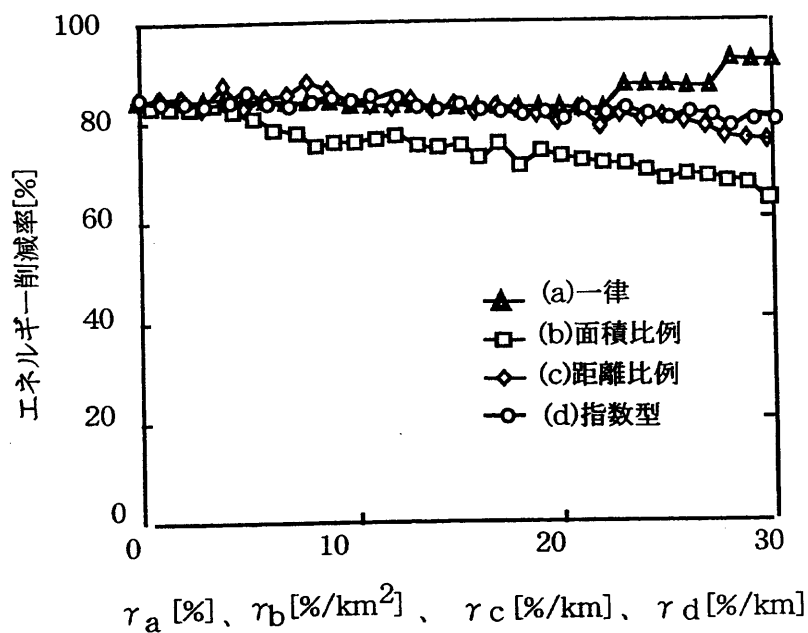


図 5.4 熱輸送損失の変化に対する熱利用設備エネルギー削減率の推移

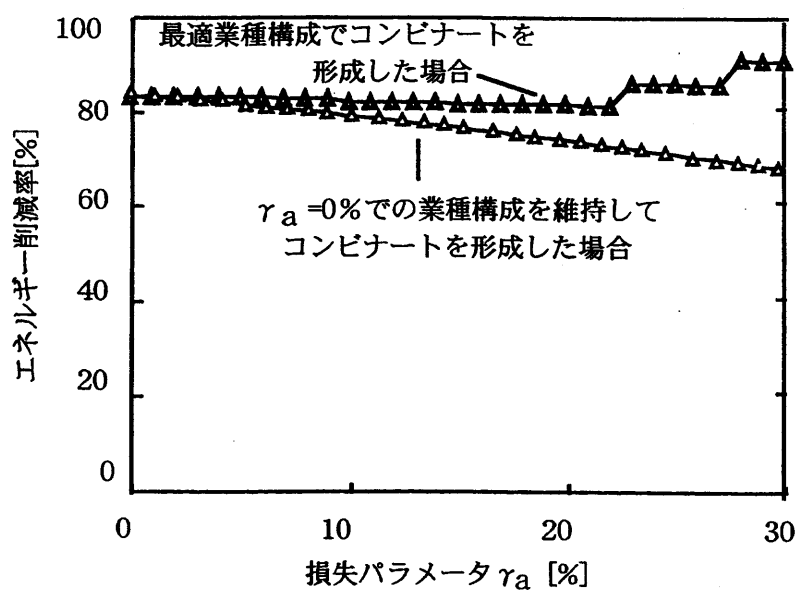


図 5.5 最適業種構成によるエネルギー削減率の向上  
熱輸送損失：一律の場合

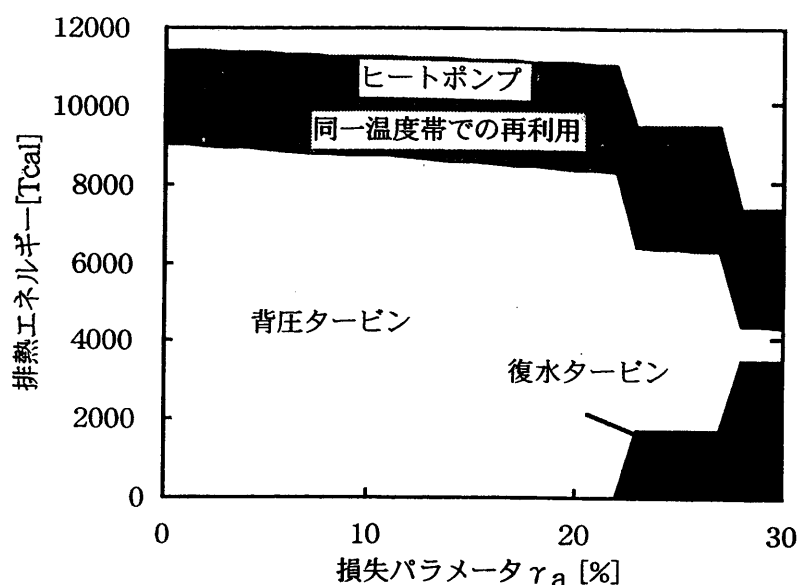


図 5.6 熱利用設備の排熱エネルギー利用状況  
熱輸送損失：一律の場合

た場合と、熱輸送損失が 0 % の場合の業種構成を維持した場合について、エネルギー削減率の推移を比較したものである。同図から、熱輸送損失の変化に応じた最適業種構成を選択することにより、コンビナート全体のエネルギー削減率を向上できることがわかる。さらに、図 5.6 は熱輸送損失の変化に対する熱利用設備の排熱エネルギー利用状況の推移を示す。同図から、熱輸送損失の増加とともに、排熱利用量が低減し、復水タービンを経て電力に変換されて利用されていることがわかる。

## 5.5 まとめ

従来の研究では考慮されていなかった熱輸送時の損失が、ヒートカスケードイングの省エネルギー性に及ぼす影響について検討した。その結果、熱輸送損失を考慮した場合においても、カスケードイングを行う業種の組み合わせを適切に選択することにより、コンビナート全体として高いエネルギー削減率を達成することが可能になることを示した。特に、本論文の検討では、熱輸送損失が多く生じると考えられる場合には、排熱エネルギーを電力の形態でカスケードイングすることがエネルギーの効率的な利用の観点から望ましいことが明らかとなった。

## 第 5 章の参考文献

- (1) 日本機械学会,「小型蒸気表」,日本機械学会,1981
- (2) 日本機械学会,「伝熱工学資料 改訂第 3 版」,日本機械学会,1975
- (3) 架谷,木村,「燃焼の基礎と応用」,共立出版,1986

## 第6章 民生需要を含めたヒートカスケーディングによる地域エネルギーシステムの効率化

### 6.1 はじめに

前章までは、産業部門のみを対象とし、コンビナート化による異業種間ヒートカスケーディングの有効性について検討してきた。しかし、カスケーディングの対象を産業のみとしているため、30°C、60°Cの低温排熱が十分に活用されずに廃棄されている結果となっていた。そこで本章では、低温排熱の供給先として民生需要を加え、9時間帯(3季節帯×3時間帯)モデルを作成し、未利用低温排熱エネルギーの有効活用の進展の可能性、産業と民生を合わせた総合的な地域エネルギーシステムの効率化について検討を行った。

### 6.2 民生部門のエネルギー需給モデルの構築

#### 〈6.2.1〉 民生部門のエネルギー需給モデル

本論文では、民生部門のエネルギー需給を構築するにあたって、表 6.1に示すような3季節帯×3時間帯モデルを想定した。

本論文では、工場からの低温排熱によるエネルギー供給を想定していることから、民

表 6.1 民生の季節帯・時間帯構成

季節帯	夏期	6、7、8、9月
	冬期	1、2、3、12月
	中間期	4、5、10、11月
時間帯	ピーク	11－17時(6時間)
	ミドル	8－11時、17－22時(8時間)
	オフピーク	22時－8時(10時間)

生需要のうち暖房・冷房・給湯需要を対象とした。民生部門のエネルギー需要を算定するために、民生を家庭および業務に分割した。表 6.2、図 6.1 に、日本全国を対象とした家庭・業務需要それぞれについて、エネルギー源別(電力・ガス・石油)・用途別(暖房・冷房・給湯)の年間エネルギー需要量を示す。また、業務需要は各部門のエネルギー需要パターンが異なるため、本モデルではオフィス・店舗・ホテル・病院の 4 部門に分割して取り扱っている。表 6.3 に、今回計算のために想定した各部門ごとのエネルギー需要量を示す<sup>(1)-(3)</sup>。なお、ここでの需要はエネルギー源別・用途別にヒートポンプ等の COP・熱効率を乗じた値である。今回用いた COP・熱効率の数値を表 6.4 に示す。

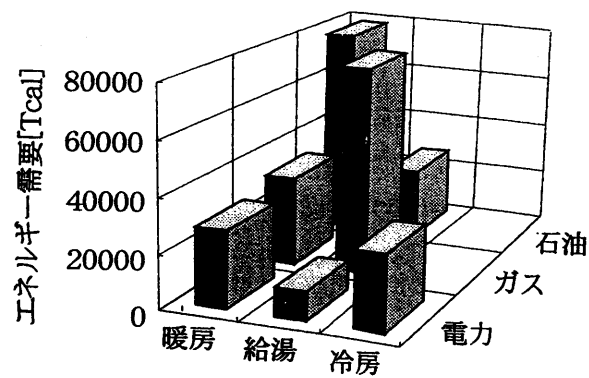
本論文では産業排熱を近郊の民生地域で利用することを想定している。そこで、工場近郊の民生エネルギー需要を求めるために、文献<sup>(4)</sup>で東京・名古屋・大阪の 3 大都市圏から工場近郊地区を選定し、面積と世帯数・事業所数を調査した。その結果を表 6.5、図 6.2 に示す。ここで得られた工場近郊地区での世帯数・事業所数と全国の世帯数・事業所数を用いて比例換算を行うことで、表 6.2、6.3 の全国の家計需要・業務需要から、今回想定した工場近郊地区全体での家庭需要・業務需要の値を算定した。これらの値を表 6.6 に示す。

次に、文献の民生需要の各部門(家庭、オフィス、店舗、病院)ごとの 12 月×24 時間帯の需要パターンを、それぞれ該当部分の平均をとることで、9 時間帯(3 季節帯×3 時間帯)の需要パターンとした<sup>(5)</sup>。時間帯別の需要パターンに基づいて、各時間の用途別エネルギー需要量を算定した。カスケードモデルの温度区分と対応させるために、給湯需要は 60°C、冷房・暖房需要は 100°C でそれぞれ賄われるものとした。以上のような過程で作成された 9 時間帯での民生需要パターンを図 6.3 に示す。また、本研究で用いた民生需要パターンの一連の作成過程を図 6.4 にフローチャートとしてまとめて示す。

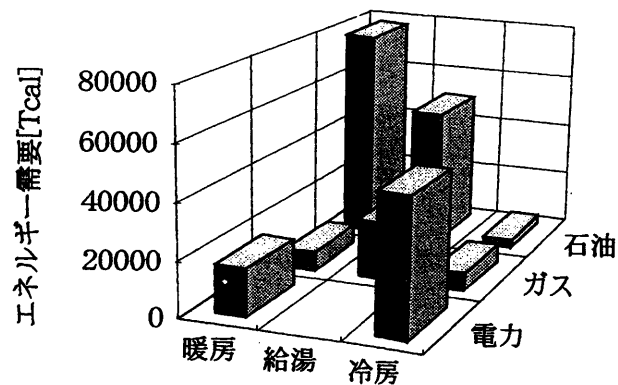
表 6.2 民生の年間エネルギー需要  
(a) 家庭 (b) 業務

	暖房	冷房	給湯
電力 [Tcal]	28700	28300	10610
ガス [Tcal]	33440	0	77749.5
石油 [Tcal]	78822	0	26336
合計 [Tcal]	140962	28300	114695.5

	暖房	冷房	給湯
電力 [Tcal]	17275	49680	0
ガス [Tcal]	7040	6597	21377.5
石油 [Tcal]	77985	3384	50440
合計 [Tcal]	102300	59661	71817.5



(a) 家庭需要



(b) 業務需要

図 6.1 民生の年間エネルギー需要



表 6.3 業務の各部門別の年間エネルギー需要

(a) オフィス

	暖房	冷房	給湯
電力 [Tcal]	4200	12040	0
ガス [Tcal]	1690	1575	5125.5
石油 [Tcal]	19503	848	12616
合計 [Tcal]	25393	14463	17741.5

(b) 店舗

	暖房	冷房	給湯
電力 [Tcal]	9675	27860	0
ガス [Tcal]	3200	3006	9732.5
石油 [Tcal]	9279	408	6000
合計 [Tcal]	22154	31274	15732.5

(c) ホテル

	暖房	冷房	給湯
電力 [Tcal]	2200	6340	0
ガス [Tcal]	1440	1350	4369
石油 [Tcal]	38052	1648	24616
合計 [Tcal]	41692	9338	28985

(d) 病院

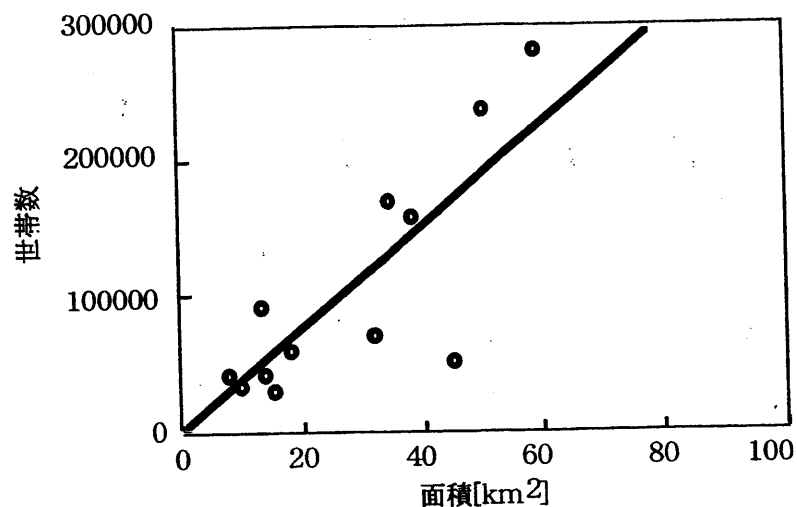
	暖房	冷房	給湯
電力 [Tcal]	1200	3440	0
ガス [Tcal]	710	666	2150.5
石油 [Tcal]	11151	480	7208
合計 [Tcal]	13061	4586	9358.5

表 6.4 エネルギー源別・用途別の熱利用設備の COP・熱効率

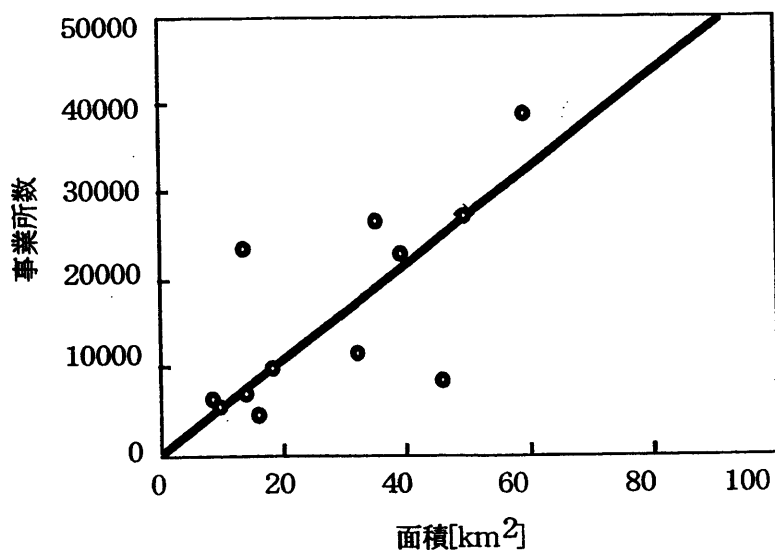
	暖房	冷房	給湯
電力	2.5	2.0	1.0
ガス	1.0	0.9	0.85
石油	0.9	0.8	0.8

表 6.5 工場近郊地区での世帯数、事業者数

地区名	面積 [km <sup>2</sup> ]	世帯数	事業者数
東京都墨田区	13.1	92811	23275
東京都江東区	39.1	155026	22714
東京都葛飾区	34.8	171742	26905
東京都江戸川区	49.8	238021	27315
東京都大田区	59.5	284836	39698
名古屋市中川区	32	71903	11432
名古屋市港区	45.6	51830	7828
名古屋市南区	18.5	58363	9365
大阪市此花区	15.4	27638	4175
大阪市港区	7.9	38003	6647
大阪市大正区	9.2	31238	5434
大阪市西淀川区	14.2	36665	6531
12 地区合計	339.1	1258076	191319
全国	377812.1	43665843	6753858



(a) 世帯数



(b) 事業所数

図 6.2 工場近郊地区の面積と世帯数・事業所数との相関

表 6.6 工場近郊地区での熱需要  
(一重効用冷凍機の COP=0.7)

(a) 家庭・業務でのエネルギー需給

	暖房	冷房	給湯
家庭 [Tcal/km <sup>2</sup> ]	12.0	3.4	9.7
業務 [Tcal/km <sup>2</sup> ]	8.5	7.1	6.0

(b) 業務の各部門別エネルギー需給

	暖房	冷房	給湯
オフィス [Tcal/km <sup>2</sup> ]	2.1	1.7	1.5
店舗 [Tcal/km <sup>2</sup> ]	1.9	3.7	1.3
ホテル [Tcal/km <sup>2</sup> ]	3.5	1.1	2.4
病院 [Tcal/km <sup>2</sup> ]	1.1	0.5	0.8

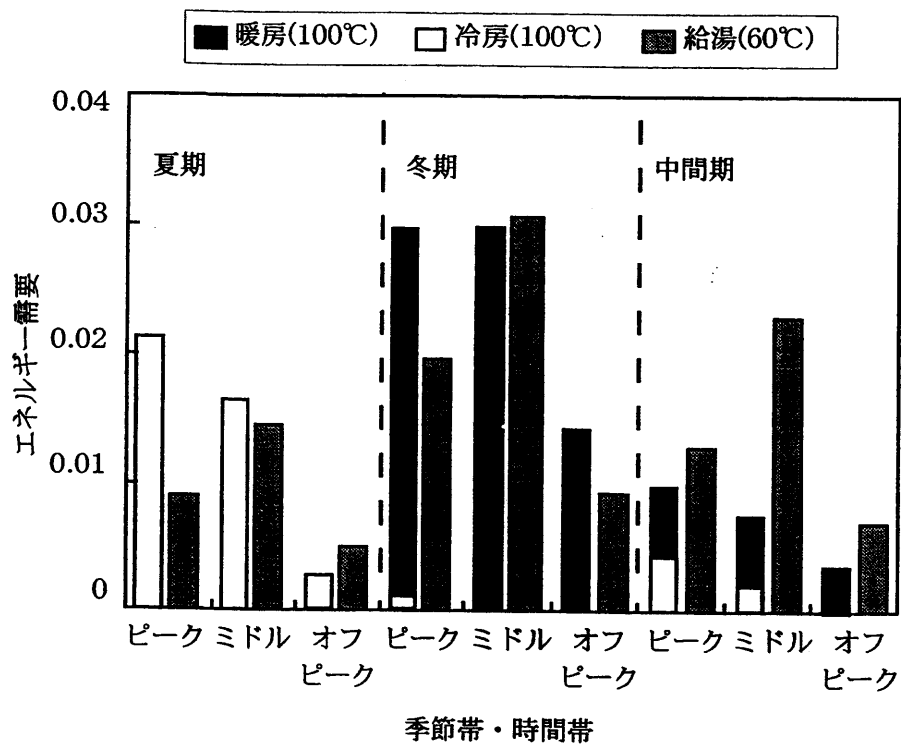


図 6.3 民生の季節帯・時間帯別エネルギー需要パターン  
(縦軸の数値は1時間当たりのエネルギー需要の年間総需要に対する相対値)

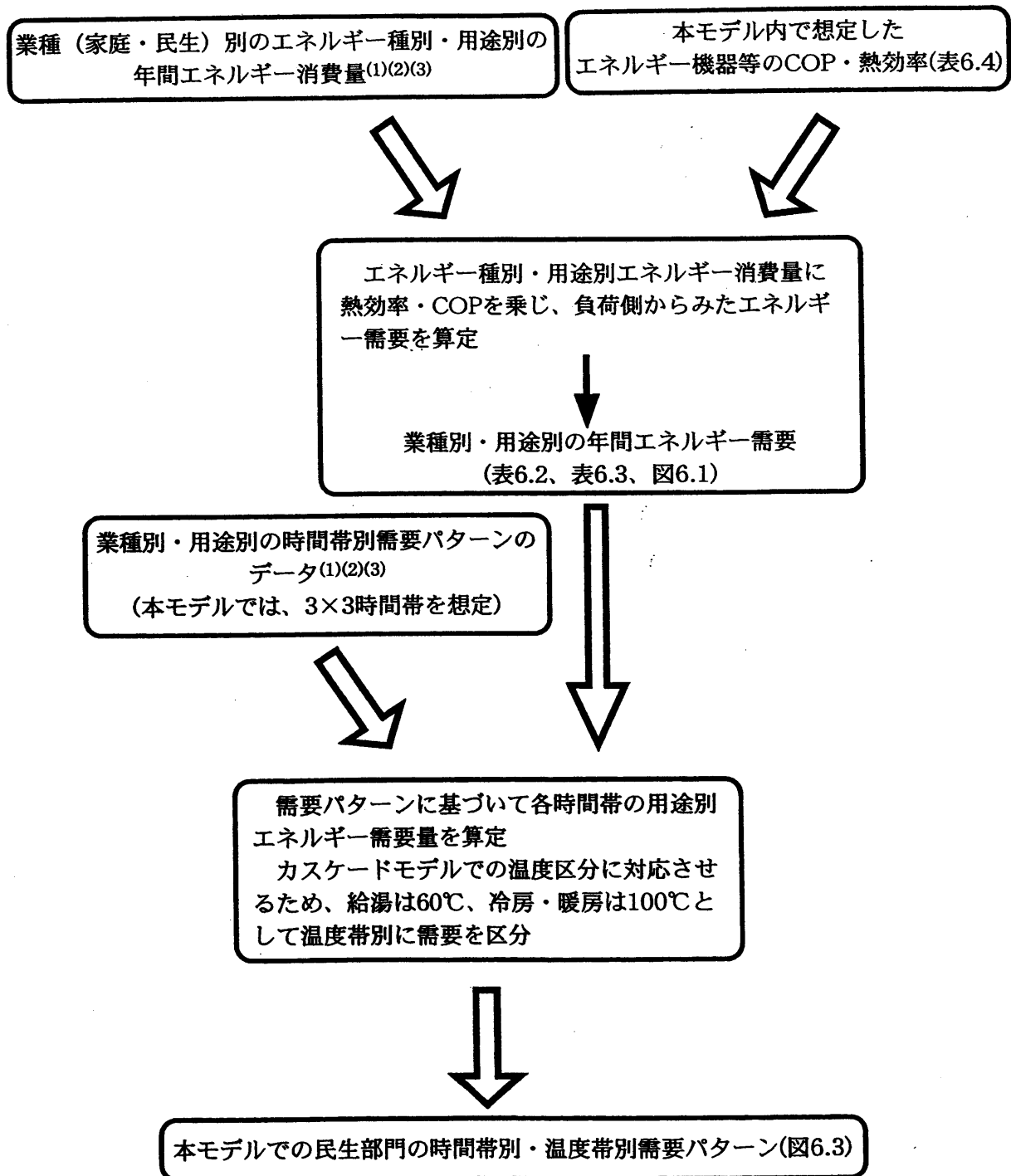


図 6.4 本モデルでの民生の年間エネルギー需要パターン算定のフロー図

### 〈6.2.2〉 目的関数

目的関数は、コンビナートとのカスケーディングを行う前後での民生地域のエネルギー需要を考慮して、以下のように設定した。

$$\frac{E_1 - E_2}{S_{total} + S_p} [\text{Tcal} / \text{km}^2] \rightarrow \text{Max} \quad (6.1)$$

ここで、 $S_p$ は民生の敷地面積を示している。また、ここでの  $E_1$  および  $E_2$  は民生地域の燃料エネルギー消費量を含む。すなわち、前章までの産業部門のみの評価ではなく、民生部門を含めた地域エネルギーシステムとしての単位面積あたりのエネルギー削減量の最大化を考える。本論文では、コンビナートの敷地面積  $10 \text{ km}^2$  に対して、民生の敷地面積を  $0 \sim 100 \text{ km}^2$  まで変化させ、コンビナート内の業種構成・地域エネルギーシステム全体としての省エネルギー効果を算定した。

## 6.3 省エネルギー性評価

まず、熱輸送効率  $\delta = 1$  の場合について、省エネルギー性の評価を行った。図 6.5 に、民生の敷地面積を変化させた場合のコンビナート内の業種構成、エネルギー削減率、エネルギー消費量の推移を示す。図 6.5(a) から、民生の敷地面積の増加にともない、窯業土石の敷地面積が増加し、紙パルプの敷地面積が減少する。しかし、民生の敷地面積が  $24 \text{ km}^2$  以上になると逆に窯業土石の敷地面積が減少し、紙パルプおよび化学工業の敷地面積が増加する。この業種構成の変化は、図 2.2 のエネルギー需給の特徴から説明できる。民生の敷地面積が  $24 \text{ km}^2$  以下の場合、民生の低温熱需要の増加とともに、その供給源が中低温熱需要の多い紙パルプから、低温排熱を多く供給する窯業土石に移行している。一方、窯業土石には低温排熱の供給に加えて電力需要が存在するため、窯業土石の敷地面積の増加は電力需要の増加をもたらし、窯業土石の割合がある程度以上に増加すると発電可能な高温蒸気を供給できる紙パルプと化学工業の割合を増加させる。

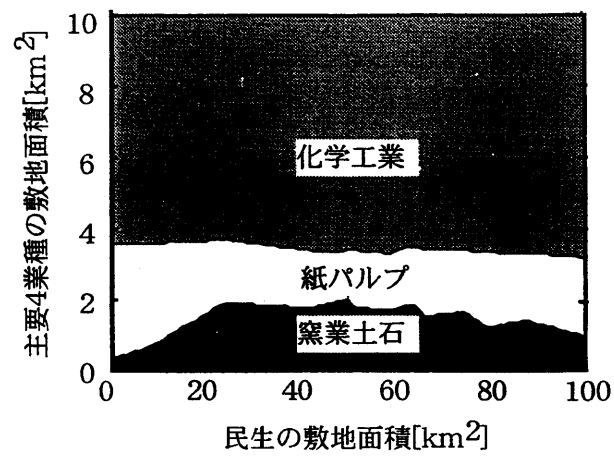
図 6.5(b) には、民生の敷地面積の変化に対して、コンビナート内の業種構成を図 6.5

(a)に示すように適切に選択した場合と、民生の敷地面積が  $0\text{km}^2$  の場合の業種構成を維持した場合について、エネルギー削減率の推移を比較したものである。同図から、コンビナート内の業種構成を適切に選択することで、民生を含んだ地域エネルギーシステムとして、高いエネルギー削減率を維持できることがわかる。特に、民生の敷地面積が  $50\text{km}^2$  以下の場合には、エネルギー削減率は 85 % 前後で維持される。図 6.5(c) はカスケーディング前後のエネルギー消費量を比較したものである。同図から、エネルギー消費量を増加させることなく、 $10\text{km}^2$  の産業部門のコンビナートから  $50\text{km}^2$  の民生地域の需要を賄い得ることがわかる。

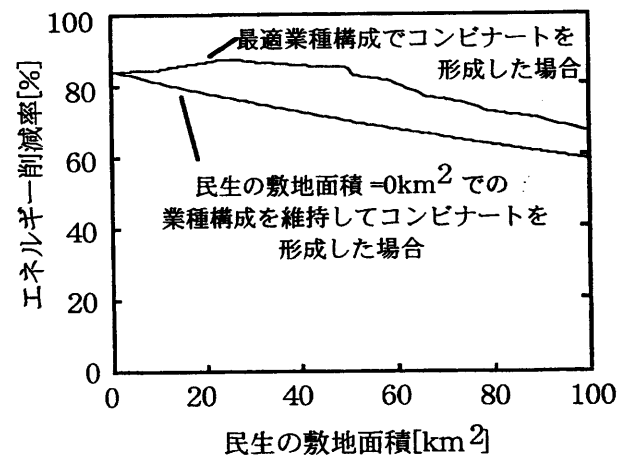
#### 6.4 熱輸送損失の影響

民生需要が存在する場合について、熱輸送損失がヒートカスケーディングの有効性に与える影響を評価するため、前章の熱輸送損失モデルを用いて、熱輸送損失が一律で表現される場合について、省エネルギー性の評価を行った。なお、計算機のメモリ容量の制限から、モデル内ではコンビナートと民生との間の熱輸送にのみ損失が生じるものと設定した。

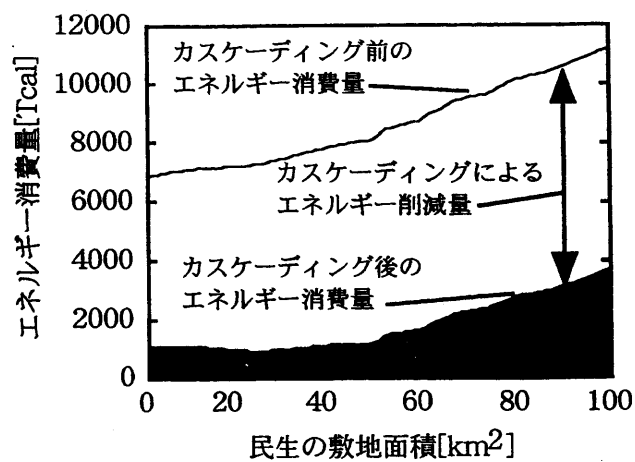
コンビナートの敷地面積を  $10\text{km}^2$ 、民生の敷地面積を  $50\text{km}^2$  とした場合の熱輸送損失の変化に対するコンビナート内の業種構成・エネルギー削減率の推移を図 6.6 に示す。同図において、熱輸送損失の増加とともに窯業土石の敷地面積が減少している。すなわち、コンビナート内の業種構成が、前節の熱輸送損失を考慮せずに民生の敷地面積を増加させた場合とほぼ同様の変化をしている。これは、熱輸送損失が増加するにつれて、コンビナートからみた民生の見かけの熱需要が増加するためである。この結果、熱輸送損失の増加により、前節で民生の敷地面積を変化させた場合と同様の最適業種構成の推移が生じることになる。



(a) コンビナートの最適業種構成



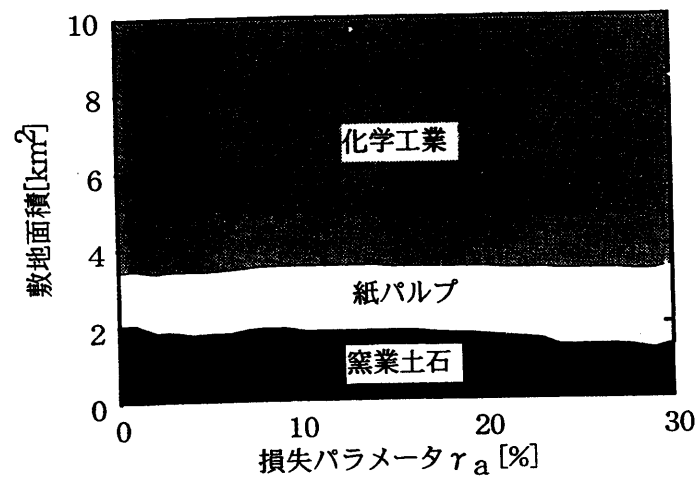
(b) エネルギー削減率



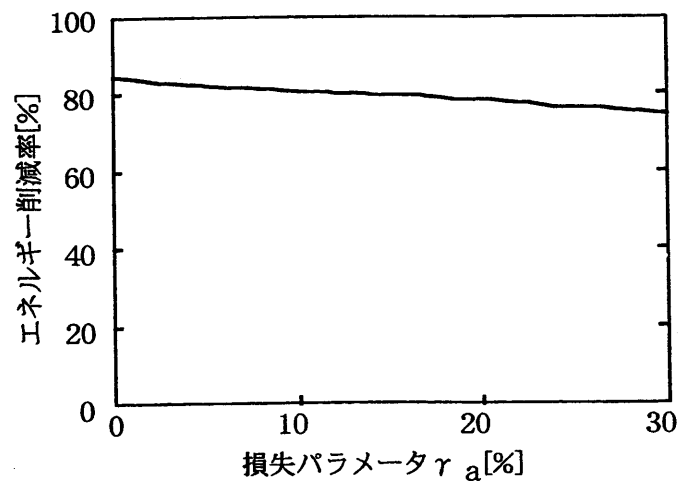
(c) エネルギー消費量

図 6.5 民生の敷地面積の変化に対するコンビナートの最適業種構成・エネルギー削減率・エネルギー削減量の推移

(コンビナートの敷地面積=10 $\text{km}^2$ )



(a) 最適業種構成



(b) エネルギー削減率

図 6.6 熱輸送損失を考慮した場合の地域エネルギーシステム全体としての省エネルギー効果

(熱輸送損失：一律、コンビナートの敷地面積=10km<sup>2</sup>、民生の敷地面積：50km<sup>2</sup>)



## 6.5 まとめ

本章では、産業のみを対象としたカスケーディングにおいて十分に活用されずに廃棄されている 30°C、60°C の低温排熱の供給先として民生需要を加え、9 時間帯 (3 季節帯×3 時間帯) モデルを作成し、未利用エネルギーの有効活用の進展の可能性について評価を行った。その結果、コンビナートの業種構成の最適化により高いエネルギー削減率の実現が可能であることを明らかにした。本研究で用いたモデルでは、民生の敷地面積が 50km<sup>2</sup> 以下ならば、熱利用設備の燃料エネルギー (ボイラ重油) の消費量を 85 % 前後削減できる見通しを得た。また、熱輸送損失と民生需要をともに考慮した場合においても、最適業種構成を選択することで、地域エネルギーシステム全体としての効率化が可能であることを明らかにした。

## 第 6 章の参考文献

- (1) (財) 日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター, 「エネルギー・経済統計要覧 1996 年版」, (財) 省エネルギーセンター, pp.16-17, 66-73, 86-97, 1996
- (2) 空気調和・衛生工学会, 「都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価」, 丸善, pp.138-142, 1994
- (3) (財) 日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター, 「民生部門エネルギー消費実態調査 (総括編)」, pp.156-157, 1995
- (4) 朝日新聞社編, 「'95 民力」, pp.502-503, 朝日新聞社, 1995
- (5) 坂野, 加藤, 早川, 鈴置, 茅, 「エネルギーシステム全体からみた CGS を主体とする地域熱供給システムの導入可能性」, エネルギー・資源学会第 14 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.181-186, 1998

## 第7章 異業種間ヒートカスケーディングの経済性評価

### 7.1 はじめに

前章までは、省エネルギー性の観点を中心にして、産業および民生におけるヒートカスケーディング導入の検討を行ってきた。しかし、実際にヒートカスケーディングを導入するには、省エネルギー性だけではなく、経済的側面からの評価も不可欠である。本章では、省エネルギー性ととも、コンビナート内の各種熱利用設備コスト、燃料エネルギー(重油)コスト、熱配管コストといった経済性を考慮して、異業種間ヒートカスケーディングの有効性評価を行った。

### 7.2 ヒートカスケーディングの経済性

ヒートカスケーディングの経済性については、コンビナート内の各種熱利用設備コスト、燃料エネルギー(重油)コスト、熱配管コストの総和を評価対象とした。

各種熱利用設備コスト、燃料エネルギー(重油)コストは文献<sup>(1)</sup>に示されている温度帯・熱利用設備別コストを用いた。1Tcalあたりの熱利用設備コストの単価Aを表7.1に示す。

(1)内の数式の第1項は排熱回収コスト、第2項は設備コストを示している。なお、コスト算定にあたっては、年経費率17%、設備利用率85%としている。

熱利用設備コストは、業種*i*、温度帯  $T_1$  から業種 *j*、温度帯  $T_2$  へ移動する排熱量  $e(i, T_1, j, T_2)$  [Tcal/year]、1Tcalあたりの熱利用設備コストの値  $A$  [100万円/Tcal/year] から、以下のように示される。

$$\text{熱利用設備コスト} = \sum_i \sum_{T_1} \sum_j \sum_{T_2} A(T_1, T_2) \times e(i, T_1, j, T_2) \quad (7.1)$$

熱配管コストは、熱配管の断面積が最大流量(最大熱需要量)に比例する関係(7.2)、熱

配管コストが管径の2乗に比例する関係(7.3)、および熱配管コストが距離に比例する関係(7.4)から<sup>(2)</sup>、熱配管コストの単価  $B$ [百万円/Tcal/km/year] を用いて(7.5)式で表されるものとした。

$$(\text{管径})^2 \propto (\text{流量}) = (\text{熱需要量}) \quad (7.2)$$

$$(\text{熱配管コスト}) \propto (\text{管径})^2 \quad (7.3)$$

$$(\text{熱配管コスト}) \propto (\text{距離}) \quad (7.4)$$

$$(\text{熱配管コスト}) = B \times (\text{距離}) \times (\text{熱需要量}) \quad (7.5)$$

本研究では、ある地区で導入が計画されている地域熱供給配管の試算、年経費率(17%)、および各温度帯における蒸気・温水の比熱から、温度帯別に(7.5)式の熱配管コストの単価  $B$  の値を表 7.2 のように決定した。ここで算定された単価  $B$  を用いてモデル内での熱配管コストを考慮した場合を基準ケースとした。

業種  $i$ 、 $j$  間の輸送距離  $L(i, j)$  は、業種  $i$ 、 $j$  の敷地面積  $S_i$ 、 $S_j$  を用いて以下のように定義した。

$$L(i, j) = \begin{cases} R_i + R_j & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (7.6)$$

$$\text{ただし、} S_i = \pi R_i^2, S_j = \pi R_j^2$$

すなわち、両者の敷地形状を円形とみなし、その場合の各業種の半径の和を輸送距離とした。ただし、同業種内での熱輸送コストは、異業種間の熱輸送に対して必要な配管が短いため無視できるものとしている。

コンビナート全体での熱配管コストは以下のように示される。

$$\text{熱配管コスト} = \sum_i \sum_{T_1} \sum_j \sum_{T_2} B(T_1) \times e(i, T_1, j, T_2) \times L(i, j) \quad (7.7)$$

よって、コンビナート内でのカスケーディングに関する総コスト  $C$  は、以下のように示される。

$$\begin{aligned} C &= \text{熱利用設備コスト} + \text{燃料エネルギーコスト} + \text{熱配管コスト} \\ &= \sum_i \sum_{T_1} \sum_j \sum_{T_2} A(T_1, T_2) \times e(i, T_1, j, T_2) \end{aligned}$$

表 7.1 モデルで用いた熱利用設備コスト

熱利用設備	排熱利用温度帯 [°C]	利用コスト A[100 万円/Tcal/year]
背圧タービン	500 → 200    300 → 200	0.956 (=0.8+0.156)
	500 → 150    300 → 150	
	500 → 100    300 → 100	
減圧器	200 → 150    150 → 100	0.342
	200 → 100	
SHP	30 → 60    60 → 100	1.08(=0.342+0.738)
	60 → 150	4.982(=0.342+4.64)
	100 → 150	2.66(=0.8+1.86)
	150 → 300	3.51(=0.8+2.71)
	200 → 300	3.18(=0.8+2.38)
排熱回収設備	蒸気 (500 300 200 150 100)	0.8
	温水 (60 30)	0.342
ボイラ	500	0.642
復水タービン	500 → 電力    300 → 電力	1.015(=0.8+0.215)
燃料エネルギー (重油)		200 万円/Tcal

表 7.2 熱配管コスト (7.5式) における単価 B

熱輸送の温度 [°C]	単価 B[100 万円/Tcal/km/year]
500	0.0150
300	0.0150
200	0.1139
150	1.0999
100	0.9884
60	0.0063
30	0.0124

$$+ \sum_i \sum_{T_1} \sum_j \sum_{T_2} B(T_1) \times e(i, T_1, j, T_2) \times L(i, j) \quad (7.8)$$

本章では、コンビナート全体の敷地面積を 10km<sup>2</sup>とし、異業種間熱輸送の際に 10 %の熱輸送損失を考慮した。

### 7.3 省エネルギー性・経済性の両面からみた異業種間ヒートカスケーディングの評価

省エネルギー性・経済性の両面からの異業種間ヒートカスケーディングの評価として、ここでは以下のような手順で検討した。

まず、業種構成の制約を一切与えずに、コンビナート内部の燃料エネルギー削減量最大化を目的関数として、ヒートカスケーディングの第一義的目的である省エネルギー性の観点から最適業種構成を求めた。次に、その最適業種構成を維持した状態で、熱配管コストを含めた総コストの最小化を目的関数として、コンビナート内部のエネルギーフローを最適化した。

#### 〈7.3.1〉 異業種間ヒートカスケーディングの経済性評価

まず、これまでのように、ヒートカスケーディングの省エネルギー性の観点から、コンビナート内の燃料エネルギー削減量の最大化を目的として、最適業種構成を求めた結果を図 7.1 に示す。コンビナートの敷地面積は 10km<sup>2</sup>とした。同図の業種構成からなるヒートコンビナートにおいては、主に化学工業の高温排熱が紙パルプの中低温蒸気需要および窯業土石の電力需要へ有効活用され、コンビナート全体で年間約 5500Tcal の燃料エネルギーが削減される。

次に、省エネルギー性からみた図 7.1 の最適業種構成において、経済的評価を行った。図 7.1 の最適業種構成からなるヒートコンビナートにおいて、カスケーディングに関する総コスト  $C$  が最小化されるようにエネルギーフローを最適化した。総コスト算定にあたっては、熱配管コストをパラメータとした評価を行った。ここでは、表 7.2 に示した熱配管

コストの単価を用いてコストを算定した場合を基準ケースとして、基準ケース、および基準ケースの 75 %、50 %、25 % にコストが低減したケースを想定した。各ケースにおいて、最適エネルギーフローが構成された場合の総コストの内訳、およびコスト削減率を図 7.2 に示す。熱配管コストが基準ケースの 50 % に低減された場合に総コストに対する熱配管コストの割合が高くなる。これは、経済性の観点からも異業種間ヒートカスケーディングが積極的に導入されることを示している。また、同図から、ヒートカスケーディングを導入することで、導入しない場合よりも総コストが 20～35 % 削減されることがわかる。このことから、異業種間ヒートカスケーディングの導入は省エネルギー性のみならず経済的にも有利であると言える。

#### 〈7.3.2〉 異業種間ヒートカスケーディングの省エネルギー性評価

図 7.3 は、上述の各ケースにおける省エネルギー効果を示す。図 7.2 および図 7.3 から、熱配管コストが安価な場合には、ヒートカスケーディングによって総コストを最小化するとともに、燃料エネルギーを 83 % 削減できることがわかる。さらに、各ケースにおける排熱利用状況を図 7.4 に示す。同図において、配管コストが高くなるにつれて、熱配管を通じての同一温度帯での排熱再利用や背圧タービンの利用が減少し、逆に電力を利用するヒートポンプや復水タービンの利用が増大している。これは、排熱エネルギーを電気エネルギーに変換して異業種間でカスケード輸送することが有利であることを意味している。また、各ケースにおけるコンビナート内部での熱配管の長さを図 7.5 に示す。ここでの熱配管長は、コンビナート内での熱配管長の総和であり、流量を考慮したものではない。熱配管コストが安価になるにつれて、配管長が長くなり、積極的な熱輸送が行われ、省エネルギーが達成されていることがわかる。ただし、本ケースにおいては、熱配管長が熱配管コストが基準ケース比 50 % の場合に比べて、25 % の場合は短くなっている。これは、移動するエネルギー量は同量にもかかわらず、熱配管数が少なくなるためである。以上のよ

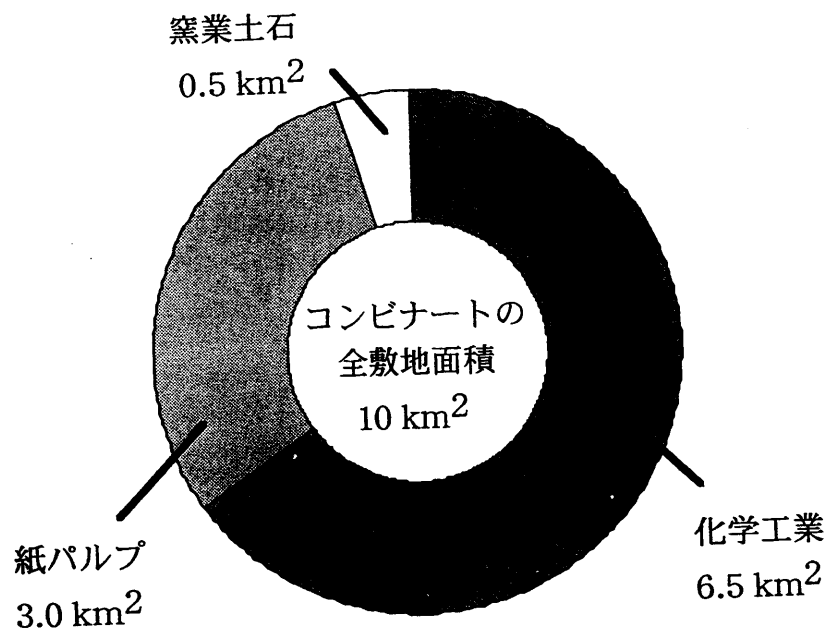


図 7.1 燃料エネルギー削減量の最大化からみたコンビナート最適業種構成

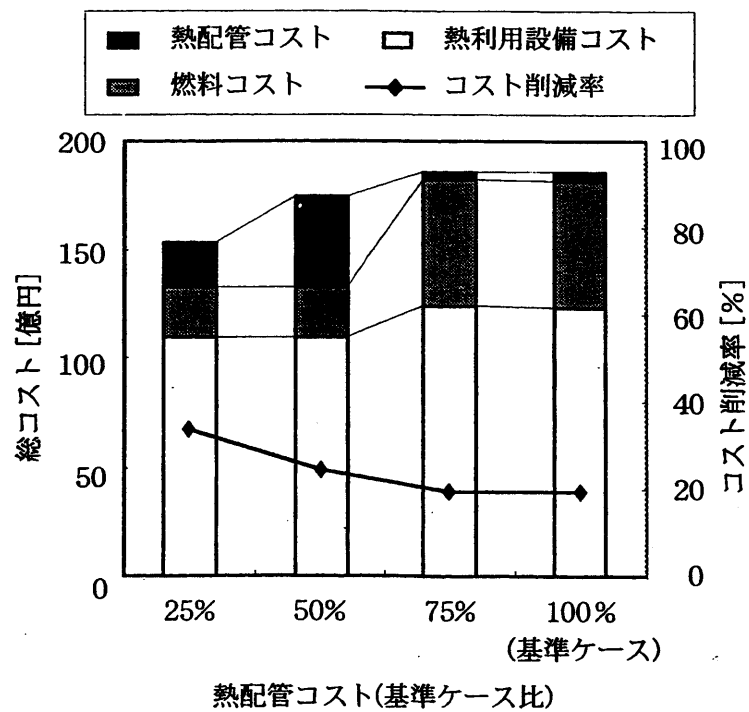


図 7.2 最適コンビナートにおけるヒートカスケードの経済性



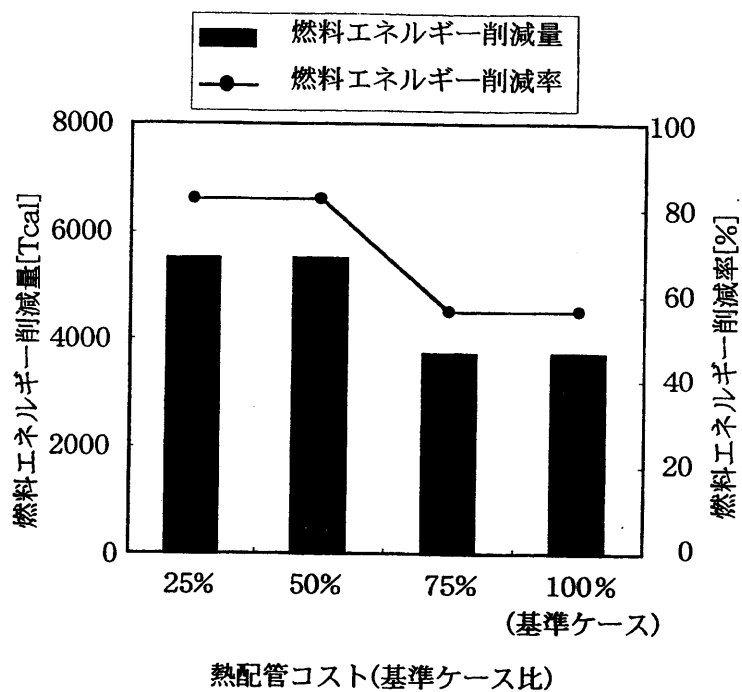


図 7.3 最適コンビナートにおけるヒートカスケードの省エネルギー性

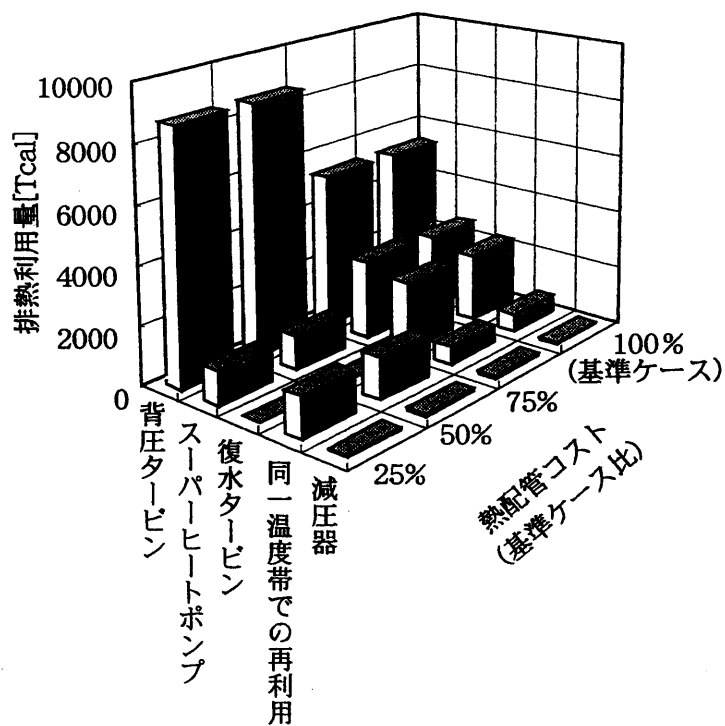


図 7.4 最適コンビナート内の排熱利用状況

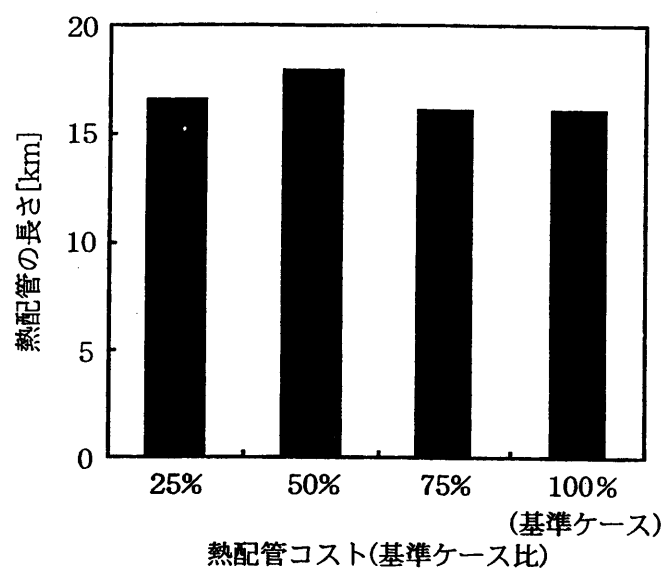


図 7.5 最適コンビナート内の熱配管長

うに産業排熱を回収して異業種間でカスケード利用することにより、省エネルギー性とともに経済的なシステム構築にも寄与することが明らかとなった。

## 7.4 まとめ

本章では、省エネルギー性ととともに経済性を考慮して、異業種間ヒートカスケーディングの有効性評価を行った。特に、敷設場所によって大きく変動する熱配管コストをパラメータとしてコンビナート内部での排熱利用状況の評価した。その結果、熱配管コストが想定した基準ケースの50%に低減された場合に、経済性の観点からも異業種間ヒートカスケーディングが積極的に導入されることを示した。また、熱配管コストに応じて、排熱利用とエネルギー輸送の形態を適切に選択することで、異業種間ヒートカスケーディングが省エネルギー性・経済性の両面から有効であることを指摘した。

## 第7章の参考文献

- (1) 中田, 茅, 「ヒートコンビナートモデルによるエネルギー多消費型産業の省エネルギーの基礎的な評価」, 電学論 B, Vol.115, No.2, pp.149-155, 1995
- (2) 石坂, 山地, 茅, 「需要分布を考慮した都市におけるコージェネレーションシステムの導入評価」, 電学論 B, Vol.114, No.2, pp.505-513, 1994

## 第8章 排熱のエクセルギーを考慮した経済的インセンティブの効果

### 8.1 はじめに

前章までの検討で、異業種間ヒートカスケーディングの導入は省エネルギー性の観点から有効であるとともに、熱配管コストが基準ケースの50%に低減された場合には、経済性の観点からも有効であることを指摘した。しかし、現状においてはコンビナート内部の熱輸送コストが高く、ヒートカスケーディングの導入は進んでいない。

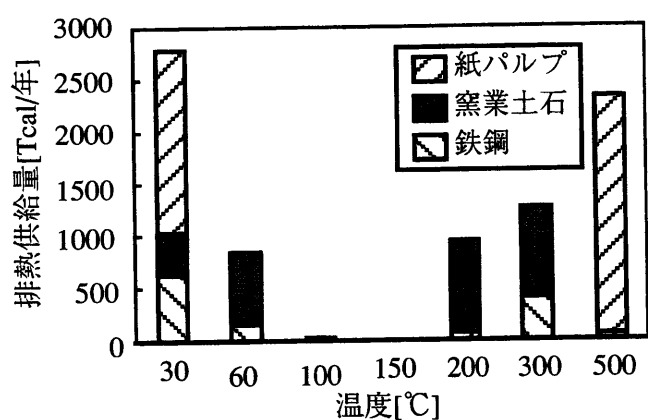
ヒートカスケーディングの導入促進のための方策の1つとして、経済的インセンティブの導入がある。最もよく用いられる経済的インセンティブとして炭素税がある。炭素税の導入には、燃料転換を推進する効果があるが、燃料転換が不可能な状態においても、エネルギー消費量自身を削減する効果がある。しかし、炭素税は投入された燃料エネルギー消費量に対して課税されるものであり、エネルギーの利用工程を考慮しておらず、エネルギー利用の量的な面のみを考慮した経済的インセンティブといえる。そこで本章では、ヒートカスケーディング導入の経済的インセンティブとして、エネルギー利用の質的な面、すなわちエクセルギー効率に着目し、その具体例として「エクセルギー税」の効果を検討した。さらに、エネルギー税の一部がエクセルギー効率に応じて還付される「報奨金」制度の有効性についても検討を行った。

### 8.2 評価モデルおよび目的関数

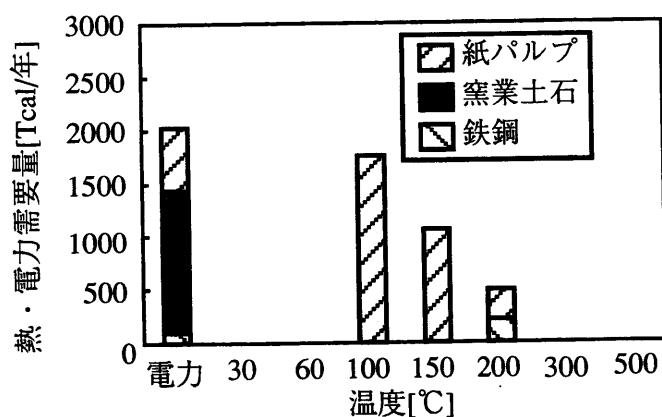
#### 〈8.2.1〉 評価モデル

本章では、産業部門におけるヒートカスケーディング導入効果を評価するために、鉄鋼3.5km<sup>2</sup>、窯業土石5km<sup>2</sup>、紙パルプ1.5km<sup>2</sup>の3業種からなる10km<sup>2</sup>のコンビナートを

想定した。なお、前章までの最適化計算では、高温排熱供給が多い化学工業を中核としたヒートコンビナートを形成した場合に、大きな省エネルギー効果が得られた。しかし、化学工業を中核としたヒートコンビナート構成では、省エネルギー性・経済性のいずれの場合を目的関数とした場合においても、高温排熱の使用が促進される結果となり、目的関数の違いによる計算結果の差が小さい<sup>(1)</sup>。そこで本章のモデル化では、インセンティブの効果を評価しやすいように、上述のような業種構成を設定し、最適化計算を行っている。本モデルにおけるエネルギー需給状況を図 8.1 に示す。



(a) 排熱供給量



(b) 熱・電力需要量

図 8.1 コンビナート内部の排熱供給量および熱・電力需要量

### (8.2.2) 目的関数

目的関数として、以下の二通りを想定した。

- ・ **燃料消費量最小化** 燃料消費量最小化を目的とする場合には、(2.4) 式で示されたコンビナート内でのエネルギー (重油) 消費量  $oil$  を目的関数とし、これを最小化した。

$$oil \rightarrow \min \quad (8.1)$$

- ・ **総コスト最小化** 総コスト最小化を目的とする場合には、(7.8) 式で示されたコンビナート内での総コスト  $C$  を目的関数とし、これを最小化した。

$$C \rightarrow \min \quad (8.2)$$

また、コンビナート内でのエクセルギー効率は、供給エネルギーのもつエクセルギー  $EX_s$  と需要エネルギーのもつエクセルギー  $EX_d$  を用いて、以下のように定義した。

$$\text{エクセルギー効率} = \frac{EX_d}{EX_s} \quad (8.3)$$

ただし、

$$EX_s = \sum_i \sum_{T_1} \lambda(T_1) E_s(i, T_1) + \lambda_f E$$

$$EX_d = \sum_j \sum_{T_2} \lambda(T_2) E_d(j, T_2) + \sum_j E_e(j)$$

ここで、 $\lambda(T)$  は温度帯  $T$  における熱エネルギーの有効比、 $\lambda_f$  は燃料 (重油) のエクセルギー換算係数 (0.975) である。本研究で用いた  $\lambda(T)$  の値を表 8.1 に示す。本研究では、エ

表 8.1 本研究で用いた  $\lambda(T)$  の値

温度 [°C]	圧力 [MPa]	$\lambda(T)$
500	10	0.432
400	9	0.414
300	8	0.397
200	1.4	0.323
150	0.4	0.332
100	0.1	0.189
60	0.1	0.054
30	0.1	0.008
25	0.1	0.000

クセルギーの基準を 25°C、0.1MPa とした。

### 8.3 省エネルギー性・経済性を目的関数とした評価

図 8.2は、評価モデルとしたヒートコンビナートにおいて、燃料消費量最小化またはコスト最小化を目的とした場合のヒートコンビナート内部の燃料消費量および総コストを示したものである。表 8.2に、各々の目的関数の場合にコンビナートで達成される総コスト、燃料消費量、エクセルギー効率を示す。また、図 8.3に燃料消費量最小化またはコスト最小化を目的とした場合のヒートコンビナート内部の主なエネルギーフローを示す。図 8.3から明らかなように、燃料消費量最小化を目的とした場合には、発電効率の高いガスタービンが導入され、ヒートポンプによる排熱エネルギーの利用が促進される。その結果、効率的なエネルギー利用が促進され、エクセルギー効率は 56.1%に達する。しかし、ガスタービンは復水・背圧式の蒸気タービンと比べ高価であるため、コスト最小化を目的

表 8.2 最適化を行った場合のエクセルギー効率

目的	総コスト [億円/年]	燃料消費量 [Tcal/年]	エクセルギー 効率 [%]
燃料消費量最小化	206.0	3342	56.1
総コスト最小化	190.6	5618	38.9

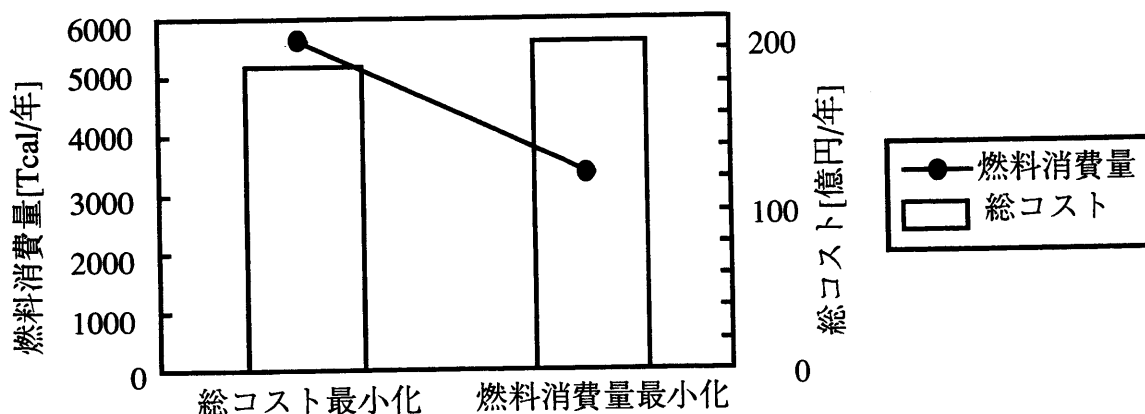


図 8.2 ヒートコンビナートにおける燃料消費量および総コスト



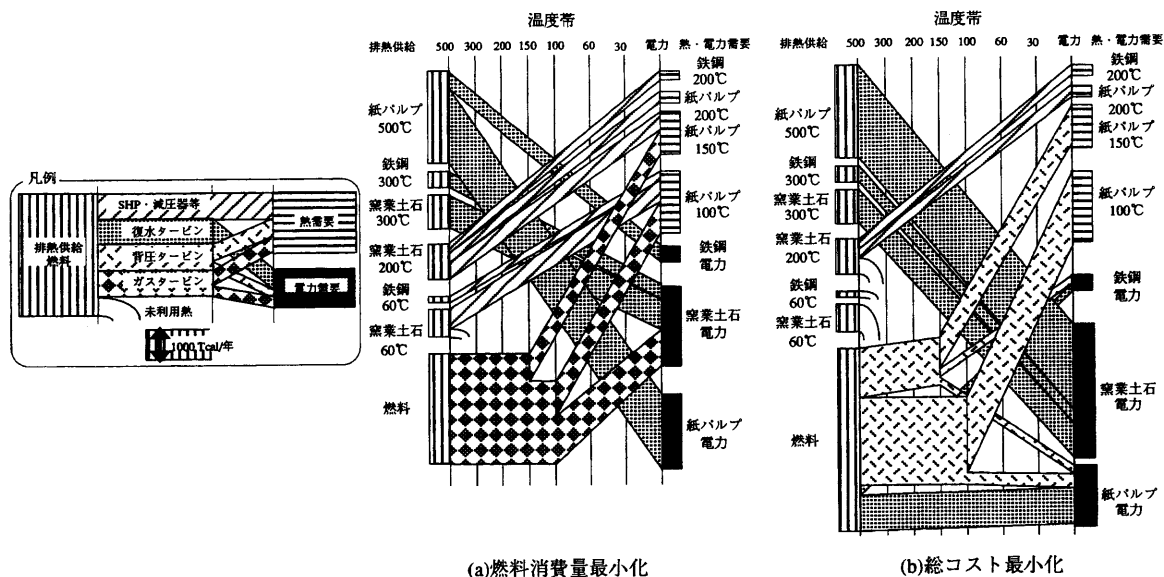


図 8.3 ヒートコンビナート内部の主なエネルギーフロー

とした場合と比較して総コストは高くなる。一方、コスト最小化を目的とした場合には、安価な復水・背圧式の蒸気タービンの導入が促進される。その結果、総コストは燃料消費量最小化の場合と比較して7%(15億円/年)程度安くなるものの、燃料消費量は68%増加する。

このように、本モデルでは、燃料消費量最小化の場合と総コスト最小化の場合を比較すると、省エネルギー性は大きく異なるものの、経済性の違いは小さい。そのため、総コスト最小化の場合よりも、燃料消費量最小化の場合の方が、経済性と省エネルギー性が両立する可能性が高いと考えられる。すなわち、燃料消費量最小化を目的として行動した場合には、総コスト最小化を目的とした場合とほぼ同程度の経済性を維持しつつ省エネルギー性を向上させることができる可能性がある。しかし、実際の産業では、総コスト最小化を目的として行動することが多い。そこで、次節において、省エネルギー性を向上させるための経済的インセンティブについて検討を行う。

## 8.4 経済的インセンティブによるヒートカスケーディング導入促進効果

本節では、総コスト最小化を目的とするコンビナートにおいて、省エネルギー化を促進するための経済的インセンティブとして、エネルギー税とエクセルギー税とを想定し、経済性と省エネルギー性との両立の可能性について検討する。また、エネルギー税が課税された状態において、エネルギー税の一部をエクセルギー効率を反映させた報奨金として還付することによる経済的なインセンティブを検討した。

### 〈8.4.1〉 エネルギー税・エクセルギー税を考慮した経済性評価

本項では、経済的インセンティブとしてエネルギー税またはエクセルギー税の導入を想定する。エネルギー税はコンビナート全体で消費される燃料消費量に対して課税されるものとする。エネルギー税率を  $tax_1$  とすると、コンビナート全体でのエネルギー税の総額は次式で表わされる。

$$\text{エネルギー税の総額} = tax_1 \times E \quad (8.4)$$

本モデルでは、燃料として重油のみを想定している。したがって、エネルギー税の課税は炭素税の課税と等価である。

次に、エネルギー利用の質を考慮した経済的インセンティブとしてエクセルギー税を想定する。本節では、エクセルギー税を各工程において有効に活用されずに失われたエクセルギー、すなわちエクセルギー損失に対して課すものとする。工場でのエクセルギー損失を正確に決定するためには、各エネルギー利用プロセス内における不可逆過程でのエクセルギー損失を考慮しなければならない。しかし、本研究では1次エネルギー供給レベルでのエネルギーおよびエクセルギー効率の改善を目的としており、各エネルギー利用プロセスでの効率の改善を目的としていない。そこで、モデル内では供給エネルギーのもつエクセルギー  $EX_s$  と需要エネルギーのもつエクセルギー  $EX_d$  の差をエクセルギー損失とした。エクセルギー税率を  $tax_2$  とした場合、コンビナート全体でのエクセルギー税の総額

は次式で表わされる。

$$\text{エクセルギー税の総額} = tax_2 \times (EX_s - EX_d) \quad (8.5)$$

エネルギー税またはエクセルギー税を含む総コストの最小化を目的として最適化評価を行った。エネルギー税率およびエクセルギー税率をパラメータとして、それぞれ0円/Mcalから2.2円/Mcalまで、0.1円/Mcalずつ変化させた場合の燃料消費量とコンビナートの総コストの関係を評価した結果を図8.4に示す。同図から、エネルギー税：1.4円/Mcal、エクセルギー税：1.5円/Mcalとした場合に、燃料消費量最小化を目的とした場合(3342Tcal/年)とほぼ同程度の燃料消費量(3347Tcal/年)を達成することが可能であることがわかる。また、エクセルギー税を導入した場合は、エネルギー税と比較して全体的に低コストで燃料消費量の削減を実現していることがわかる。すなわち、エネルギー利用の質を考慮するエクセルギー税の導入は、エネルギー税と比較して経済的な省エネルギー施策であるといえることができる。なお、本検討では、燃料転換の効果が経済的インセンティブの評価に影響しないように、燃料を重油の1種類に限定した。その結果、エクセルギー税の有効性が明確に表れるような評価が得られた。

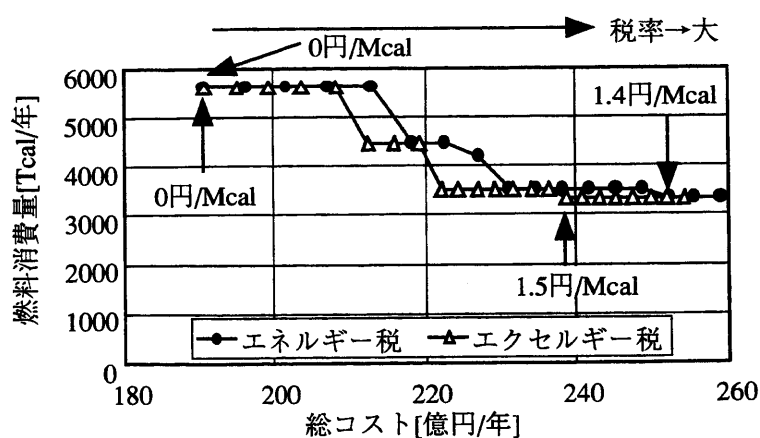


図 8.4 エネルギー税・エクセルギー税による燃料消費量および総コストの推移

#### 〈8.4.2〉 報奨金の導入による省エネルギー促進効果

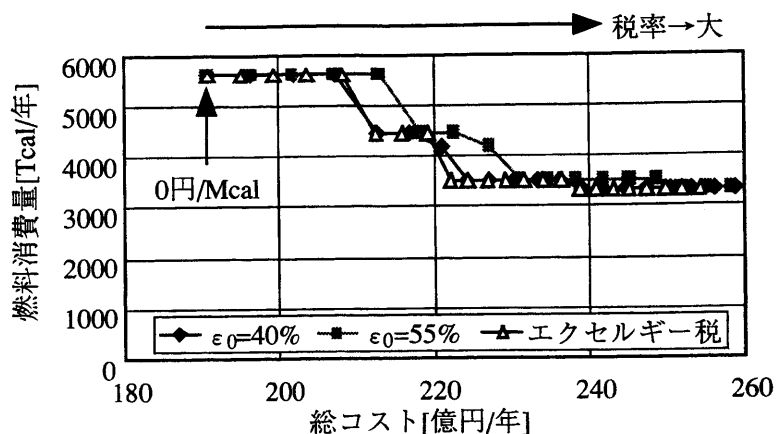
前項ではエネルギー利用の質を考慮した経済的インセンティブとしてエクセルギー税を想定し、エネルギー税との比較を行った。しかし、課税を行う行政側が各工場のエクセルギー効率を把握することは実質的に不可能である。そこで、本項ではエネルギー利用の質を考慮し、かつ各工場に対して積極的な省エネルギー化、すなわち排熱の有効利用によるエクセルギー効率の向上を促進する経済的インセンティブとして報奨金制度を想定した。報奨金制度は、まず燃料消費量に応じて一律にエネルギー税を課税し、次に各コンビナートから申告されたエクセルギー効率に応じて課税額の一部を報奨金として還付するものである。本論文では、コンビナート内のエクセルギー効率が設定された基準値より優れている場合に、その度合に応じて報奨金が支払われるものと想定した。そこで、報奨金として還付されることになるエネルギー税額は、徴収されたエネルギー税額に以下の式に示す還付率を乗じて算定されるものとした。

エネルギー税の還付率

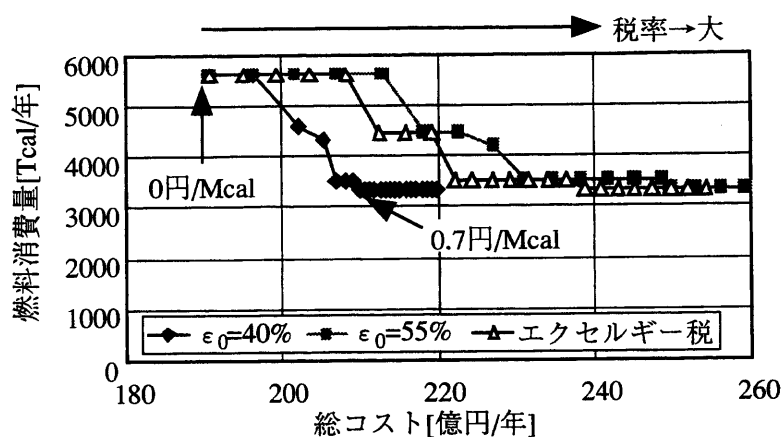
$$= \begin{cases} a \times (\varepsilon - \varepsilon_0) & (\varepsilon \geq \varepsilon_0) \\ 0 & (\varepsilon < \varepsilon_0) \end{cases} \quad (8.6)$$

ここで、 $a$  は還付率の大きさを変化させるパラメータ、 $\varepsilon$  はコンビナートのエクセルギー効率、 $\varepsilon_0$  は報奨金支給の基準となるエクセルギー効率を表す。上式からわかるように、コンビナートのエクセルギー効率が $\varepsilon_0$ 以上の場合には、エクセルギー効率の向上とともに、エネルギー税の還付率は上昇することになる。

図 8.5 に、エネルギー税額を 0 円/Mcal から 2.2 円/Mcal まで、0.1 円/Mcal ずつ変化させた場合におけるコンビナート内での総コストとエネルギー消費量の関係を示す。本論文では、 $\varepsilon_0$  は 40 % および 55 % とし、図 (a) では  $a=1$ 、同図 (b) では  $a=5$  とした。図からわかるように、エネルギー税、エクセルギー税の場合と同様に、報奨金はヒートカスケーディングの導入に対して経済的インセンティブを与えることがわかる。また、図 8.5(b) に示すように、 $\varepsilon_0$  と  $a$  の値を適切に設定することにより、エクセルギー税よりも経済的に



(a)  $a=1$



(b)  $a=5$

図 8.5 総コストと燃料消費量の関係 (エネルギー税+報奨金)

ヒートカスケーディングを導入できる可能性がある。これは、コンビナート内で同じエクセルギー効率を達成した場合においても、 $\varepsilon_0$ が小さく、 $a$ が大きいほど、エネルギー税の還付率が大きくなり、報奨金支給額が増加するためである。例えば、図 8.5(b) において、燃料消費量最小化を目的とする場合と同程度の燃料消費量 (3347Tcal/年) を達成するための最小のコストは、エクセルギー税の場合 238.6 億円/年、報奨金制度の場合 210.0 億円/年 ( $\varepsilon_0=40\%$ ) である。エクセルギー税の場合、総コストに占めるエクセルギー税の総額は 33.2 億円/年である。一方、報奨金制度の場合、エネルギー税の総額 23.4 億円/年に対して 18.8 億円/年が報奨金として還付され、正味の税の総額は 4.6 億円/年となり、エクセルギー税よりも経済的にヒートカスケーディングを導入できる。

ところで、本章で想定したエネルギー税を、各々の工場内の効率改善を促進するために徴収する「供託金」として位置づけることも可能である。このような、効率改善を促進するための「供託金」的な位置づけでの「エネルギー税」および「報奨金制度」の導入は、産業分野をはじめとしたエネルギーシステムにおける効率化に対して有効な経済的施策であると考えられる。このように、エクセルギー的な視点を考慮することにより、エネルギーのカスケード利用を積極的に促進することが可能となる。

## 8.5 まとめ

本章では、ヒートカスケーディングの導入促進に対する経済的インセンティブの効果について評価を行った。その結果、エネルギー税・エクセルギー税のような経済的インセンティブの導入を行うことにより、ヒートカスケーディングの導入が促進され、コンビナート内部においてエネルギーの効率的な利用が行われることを示した。また、経済的インセンティブとしてエクセルギー税、および報奨金を導入した場合には、エネルギー利用の質を考慮しているため、エネルギー税と比較して安価にヒートカスケーディングの導入を実現できることを明らかにした。

## 第 8 章の参考文献

- (1) 若園，早川，加藤，鈴置，茅，「産業排熱のカスケード利用による地域エネルギーシステムの効率化」，エネルギー・資源学会第 14 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.157-162, 1998

## 第9章 総括

### 9.1 はじめに

近年、地球環境問題の深刻化は全世界的規模での問題として、その対策が活発に議論されている。特に、化石燃料の大量消費による二酸化炭素の大量排出は、地球全体での温暖化を招くものとして、省エネルギー化の促進による二酸化炭素の排出抑制が課題とされている。このような背景から、様々な省エネルギー化方策が検討の対象となっている。その中でも、本研究で取り上げた産業分野を対象とした異業種間ヒートカスケーディングによる排熱の有効利用は、更なる省エネルギー化の可能性を見いだすものとして、今後その導入の促進が期待される。しかし、ヒートカスケーディングに関する従来の研究は、主要産業を仮想的にコンビナート化した場合の省エネルギー効果の全国ポテンシャルが試算されたものであった。カスケード利用の導入を推進するにあたっては、実際の産業構造を考慮した上での検討が必要である。そこで本研究では、より現実的な評価を行うため、地域産業構造の特徴や過熱蒸気の熱輸送損失、カスケーディングに要するコストを考慮した上で、ヒートカスケーディング導入による省エネルギー性・経済性の評価を行った。また、コンビナートの排熱を通じて、地域として都市の総合的な省エネルギー化の可能性についても検討した。特に、本研究の特徴として各業種の生産量(=排熱需給規模)と敷地面積の相関を求め、カスケード導入を実施したコンビナート建設に対して、省エネルギー性の面から最適な業種構成について評価を行った。さらに、ヒートカスケーディングの導入促進に対する経済的インセンティブの効果について評価を行った。

### 9.2 本論文の総括

本研究において得られた成果を、各章ごとにまとめる。



第2章では、産業分野でのエネルギー需給状況、本研究で用いたヒートカスケーディングに関するシミュレーションモデルの概要について述べた。

第3章では、ヒートカスケーディングについて、カスケーディング導入の対象としている地域の産業構造を考慮した場合の省エネルギー性について評価を行った。本研究では、東海3県（愛知、岐阜、三重）を例として、各県の地域産業構造を考慮してカスケーディング導入による省エネルギー性の評価を行った。その結果、東海3県の主要4業種におけるヒートカスケーディングによる省エネルギー効果は、燃料消費量がカスケーディング前に比べ愛知県：37%、岐阜県：24%、三重県：71%の割合で削減されることがわかった。また、愛知県については金属機械産業（自動車）をモデルに組み入れ、ヒートカスケーディングにおける業種拡大の可能性について検討した。その結果、自動車産業は排熱供給量が少ない反面、電力需要が多いため、主要4業種とのコンビナート化のメリットが小さいことを明らかにした。

第4章では、既存の地域産業を中核とした新規産業立地や地域の再開発によるコンビナート建設の際のヒートカスケーディング導入を想定し、省エネルギー効果が最大となるようなコンビナート業種構成を求めた。その結果、任意の業種を中核としたコンビナートを建設する場合において、本章で得られた最適業種構成を選択することにより、ヒートカスケーディングによって熱利用設備の燃料エネルギーを約90%以上削減し得ることがわかった。なお、本章の検討は、我が国全体の産業部門を対象としたヒートカスケーディングの全国ポテンシャルを求めるものではなく、産業コンビナートの新設地域や、中核産業を有する既存の地域における省エネルギーポテンシャルを評価したものである。しかし、固定業種の規模を任意に設定できることや、本章で得られた最適業種構成を選択できることを考慮すれば、地域的なコンビナートの最適化とともに、より広い地域を対象とした省エネルギーポテンシャルにまで評価を拡張できる可能性がある。

第5章では、従来の研究では考慮されていなかった熱輸送時の損失が、ヒートカスケー

ディングの省エネルギー性に及ぼす影響について検討した。その結果、熱輸送損失が発生する場合には、カスケーディングを行う業種の組み合わせを適切に選択し、排熱エネルギーを電力の形態でカスケーディングすることがエネルギーの効率的な利用の観点から望ましいことを明らかにした。

第6章では、ヒートカスケーディングモデルにおいて、新たに民生需要を加えて、従来の産業のみを対象としたヒートカスケーディングでは十分に活用されていなかった30°C、60°Cの低温排熱の有効利用による省エネルギー化の可能性について検討した。その結果、本研究で用いたモデルでは、民生の敷地面積が50km<sup>2</sup>以下ならば、熱利用設備の燃料エネルギー（ボイラ重油）の消費量を85%前後削減できる見通しを得た。また、熱輸送損失と民生需要をともに考慮した場合においても、最適業種構成を選択することで、地域エネルギーシステム全体としての効率化が可能であることを明らかにした。

第7章では、敷設場所によって大きく変動する熱配管コストをパラメータとして、省エネルギー性とともに経済性を考慮した異業種間ヒートカスケーディングの有効性評価を行った。その結果、熱配管コストに応じて排熱利用、エネルギー輸送の形態を適切に選択することで、異業種間ヒートカスケーディングが省エネルギー性・経済性の両面から有効であることを指摘した。

第8章では、ヒートカスケーディングの導入促進のための方策として、経済的インセンティブの影響を評価した。特に、ヒートカスケーディング導入の経済的インセンティブとして、エネルギー利用の質的な面、すなわちエクセルギー効率に着目し、その具体例として「エクセルギー税」や、エネルギー税の一部がエクセルギー効率に応じて還付される「報奨金」制度の有効性について検討した。その結果、エネルギー税・エクセルギー税のような経済的インセンティブの導入を行うことにより、ヒートカスケーディングの導入が促進され、コンビナート内部においてエネルギーの効率的な利用が行われることを示した。また、経済的インセンティブとしてエクセルギー税、および報奨金を導入した場合に

は、エネルギー利用の質を考慮しているため、エネルギー税と比較して安価にヒートカスケーディングの導入を実現できることを明らかにした。

### 9.3 今後の検討事項

ヒートカスケーディングについての今後の検討課題について示す。

#### 各工場の操業時間の変動を考慮したヒートカスケーディング導入可能性評価

本研究で異業種間ヒートカスケーディングの対象としたエネルギー多消費型主要4業種(鉄鋼、窯業土石、紙パルプ、化学工業)は、いずれも素材型産業であることから、熱需給に関しては時間変動を考慮せずに1時間帯モデルとして取り扱った。しかし、実際の工場では、各熱利用設備機器の定期点検、製品製造量変動などの要因により、排熱の供給が一時的に停止ないしは減少する事態が予想される。ヒートカスケーディングを導入する場合には、このような操業休止時の排熱供給の変動に対応するための新たな熱供給設備が必要である。今後、熱供給設備への設備投資を考慮した、より実地的な経済性評価や、熱供給の時間的変動を想定した省エネルギー性評価を行い、ヒートカスケーディングの導入可能性を検討する必要がある。

#### 新技術の導入による高効率エネルギー輸送

本研究では水蒸気・温水による熱輸送を想定し、著しく熱輸送損失が生じる際には、水蒸気・温水に比べて熱輸送損失が小さい電力にエネルギー変換することが、省エネルギー性の観点から有利であることを指摘した。今日では、本研究で想定した数km～数十kmの距離を対象とした効率的な熱輸送方法として、水素吸蔵合金やメタノールなどの化学反応を用いた高効率エネルギー輸送が検討されている。このような新技術が低価格で実現すれば、ヒートカスケーディングの導入が促進されると思われる。

## 未利用エネルギーの有効利用による地域エネルギーシステムの効率化

近年、本研究で取り上げた産業排熱をはじめ、河川水やごみ処理場からの焼却熱が「未利用エネルギー」として注目され、有効活用による省エネルギー化が検討されている。今後、未利用エネルギーを含めた総合的なエネルギーカスケード利用を想定し、産業・民生を含めた総合的な地域エネルギーシステムの効率化について検討を行う必要がある。