

産業用需要家のプロセスモデルの開発

—鉄鋼業の事例—*

キーワード：ロードマネジメント，季時別料金制，
プロセスモデル，高炉一貫製鉄所，電
力負荷特性

山 地 憲 治 浅 野 浩 志
佐 賀 井 重 雄

〔要 旨〕

高炉一貫製鉄所を対象として生産プロセスに基づいた最適化型の需要家行動モデルを開発し，季時別料金制などの料金構造に対する電力負荷の反応を解析した。目的は料金構造の持つロードマネジメント効果をマイクロレベルで明らかにすることである。

生産工程を表す 13 のプロセスについて，物質フローとエネルギー需給を稼働率の線形関数で表現し，線形計画法を適用して生産コストを最小化する最適操業計画を求めた。外生条件として与える電気料金構造を変化させ，それに対する最適操業計画を通して，製鉄所が外部から購入する電力の負荷パターンへの影響を評価した。

ケーススタディの結果，料金構造に対応した操業時間帯の移行および需要家が所有するエネルギー貯蔵装置の最適運用等の反応が明らかにされた。また，季時別料金制の下では，需要家の最適行動により需要家自身のコストが減少するだけでなく，電気事業にとっても，系統全体の需要の谷間である夜間に負荷が誘導されるというメリットが生じることを定量的に示した。

1. はじめに
2. 高炉一貫製鉄所プロセスの概要
 - 2.1 製造工程，物質フロー
 - 2.2 エネルギー・電力需給
3. モデルの構造
 - 3.1 モデルの概要と前提
 - 3.2 変数および入力パラメータ
 - 3.3 制約条件
 - 3.4 目的関数
4. 需要家の行動分析
 - 4.1 入力データ
 - 4.2 計算ケースと結果
 - 4.3 季時別料金制の効果
 - 4.4 操業計画最適化の効果
5. 結語

* 本研究に当たっては，電力中央研究所内にプロセス負荷モデル研究会を設置した。主査の東京大学工学部茅陽一教授をはじめ同研究会のメンバーから有益なコメントを頂いた。また，データの作成に際しては新日本製鉄

(株)朝倉友美，佐藤修一両氏の全面的な協力を，モデル計算作業においては東京大学大学院山岡博氏の協力を得た。ここに深甚の謝意を表す。

1. はじめに

電力需要を積極的に望ましい方向へ誘導するロードマネジメントが、新しい電力経営方策の一つとして注目されている。なかでも、適切に設計された料金制度によるロードマネジメントは、需要家の自発的な調整によって、供給側の観点だけでなく需要側にとっても望ましい負荷パターンを創成できるという点で優れている。ロードマネジメントを効果的に実施するためには、需要家の負荷特性をプロセス・機器というミクロレベルで把握し、需要家が料金構造にいかに対応するかを予測する必要がある。

本研究の目的は、電力消費形態が技術的要因と密接に結びついている産業用電力需要の料金制度に対する反応を、生産プロセスに基づいた需要家行動モデルにより予測することである¹⁾。今回は、最初の事例研究として、季時別料金制に対する高炉一貫製鉄所の反応についての検討結果を報告する。

米国電力研究所 (EPRI) では既に同様の目的でソーダ工業およびセメント工業のプラントレベルでの需要家モデルを開発済みであるが、それは季時別料金制下での対応策を予め用意し、その中から選択するシミュレーション型モデルである^[1]。

本報告における需要家行動モデルは線形計画法を適用して最適化型モデルとして定式化する。すなわち、代表的な製鉄所を対象として、基本製造工程およびエネルギー・電力消費構造を表す生産プロセスのモデルを作成し、人件費や電気料金構造等の投入要素価格の条件下で、所与の製品出荷量を最小コストで生産する最適操業計画を求める。計画期間は1週間ないし1箇月の短期間としている。仮定する電気料金構

造を変化させて、それに対する需要家の最適操業計画を介して、どのように電力負荷パターンが影響されるかを検討する。また、このモデルをシミュレーションモデルとして用いて、様々な操業計画による電力負荷への影響を解析することもできる。

2. 高炉一貫製鉄所プロセスの概要

2.1 製造工程、物質フロー

高炉一貫製鉄所における各種鉄鋼製品の製造工程は原料からスラブ、ブルームと呼ばれる中間製品を製造する上流部門とそこから最終製品に成型加工する下流部門の二つに大きく分けられる (図 2.1 参照)。

上流部門の主要プロセスは焼結工場 (原料工場)、コークス炉、高炉、製鋼工場である。また、下流部門は次の三つの系列に分けられ：1) ブルームから大型形鋼および線材に圧延加工する系列、2) スラブから厚板、さらに厚板から UO 鋼管に加工する系列、3) スラブから熱延コイルを介して各種鋼管、およびさらに冷延コイルを介してメッキ鋼板に至る系列。

なお、これら主要製造工程の間には中間製品を一時蓄えておくバッファがある。また、酸素生産、蒸気生産等の支援プラントが存在する。

2.2 エネルギー・電力需給

1973 年の石油危機以来、省エネルギー努力の成果は著しいが、鉄鋼業のエネルギー消費は依然として莫大であり、年間の粗鋼生産が500万トンを超えるような大規模な高炉一貫製鉄所

1) 家庭用需要の負荷変動は保有機器や住居の大きさなど技術的要因のみならず生活習慣や気象要因など不規則であったり、説明しにくい要因による影響も大きい。そのため家庭用需要家の負荷分析には統計解析的なアプローチがとられることが多い。

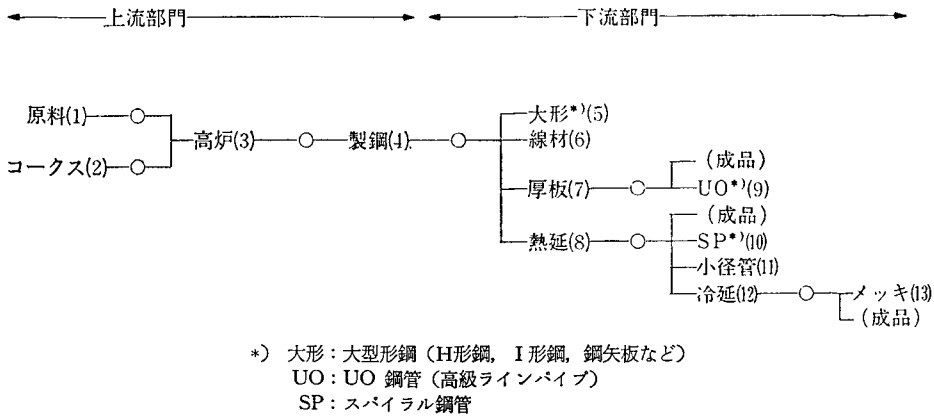


図 2.1 高炉一貫製鉄所の製造工程（○はバッファの位置を表す）

は 1 工場 で日本の全エネルギーの 1% 弱を使用している。

高炉一貫製鉄所のエネルギー供給源は、そのほとんどが石炭に基づいている。石炭は鉄鉱石の還元剤として使用されるコークスの原料であるが、乾溜される際にコークス炉ガス (COG) を発生する。また、コークスは高炉での使用工程において高炉ガス (BFG) を副生する。さらに、転炉においては製鋼中に転炉ガス (LDG) を副生する。これら副生ガスは製鉄所内の各種加熱用エネルギーとして半分強が利用され、残りの大部分は発電所（自家発電あるいは共同火力）に投入されて電力に変換されるのが通例である。また、原料工場、コークス炉、高炉からそれぞれエネルギー回収設備を通じて電力を得ることができる。なお、以前は高炉への吹込み等石油が補助燃料として用いられていたが、石油危機後の省石油努力により最近では石油はほとんど使われていない。

エネルギー消費量を工程別にみると、コークスに含まれるエネルギーも算入すると高炉を中心とする上流部門に集中しているが、加熱用のガスについては熱延プロセスの消費量も相当大きく、また、電力消費は上流の各部門に加え

て、冷延、熱延の各プロセス、および酸素製造等の支援プラントにおいても大きい。

副生ガスに含まれるエネルギーは、製鉄所の全所要エネルギー（但し、原材料としてコークスに含まれるものを除く）にはほぼ匹敵する。しかし、エネルギーの発生と消費の間には時間的なずれがある。ガスホルダーによる副生ガスの貯蔵、および共同火力が設立されている場合にはそれとのガス販売／電力購入、を通じてエネルギー需給のずれを調整している。

3. モデルの構造

プロセスモデルの定式化の詳細は付録に記す。

3.1 モデルの概要と前提

モデル化の対象とした高炉一貫製鉄所の構成に基づき、図 3.1 に示すような基本構造を持つ最適化モデルを開発した。モデルの中核は生産プロセス部分であり、原材料、中間製品および最終製品の投入・産出を表わす物質フローと副生ガスおよび電力のエネルギー需給によって表現されている（図 3.2 参照）。これら物質フローとエネルギー需給は、操業計画の時間単位である 1 ペリオド（今回は 8 時間に設定）毎にバ

外生変数：

最終製品出荷量

投入要素価格（季別料金等）



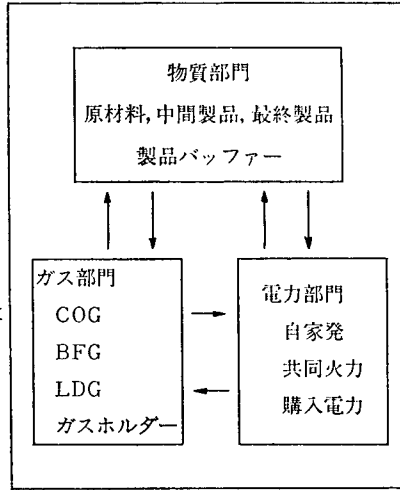
制御変数：

各プロセスの稼働率

副生ガス運用

製品バッファの初期貯蔵量

ガスホルダーの初期貯蔵量



出力：

物質フロー

ガスフロー

電力フロー

総生産コスト



図 3.1 モデルの概要

ランスするように制約される。

生産工程は図 2.1 に示されている上流部門 4 プロセス、下流部門 9 プロセスの合計 13 プロセスをすべて分離して表現した。バッファ容量も同図に示されている 7 箇所を設定した。中間製品の中にはバッファでの長期貯蔵による冷却を避けねばならないものもあるので、それらについては、バッファ出口側プロセスの使用量の一定割合以上は必ず同一ペリオド中に直前の上流プロセスで生産されねばならないとするホットチャージ比率制約を設けた。

また、生産物質のプロセス内における滞在時間およびプロセス間の移動時間についても考慮する必要がある。本モデルでは高炉における溶銑の滞在時間は約 1/2 ペリオドと仮定し、今期の出銑量は前期と今期の稼働率の平均に比例するとしている。他のプロセスの滞在時間および移動時間は無視されている。

送風、酸素、水道、蒸気等の工程は、中間製

品、最終製品の生産に直接携わらないが、エネルギーバランス上考慮する必要がある。これら支援工場は関連性の強い上流プロセスの稼働状況に合わせて運転されるとしてモデル化した。すなわち、送風工程は高炉プロセスの内に含め、蒸気、酸素および水道工程の電力/ガス使用量は製鋼プロセスに連動する支援プロセスとして一括して表現した。

副生ガスのバランスは COG, BFG, LDG の 3 種を分離して扱い、各々にガスホルダー容量を考慮した。電力供給は、焼結鉍クーラー排熱回収 (ORCS)、コークス乾式消火 (CDQ)、高炉炉頂圧回収発電 (TRT) の 3 種の自家発電設備と余剰副生ガスによる発電、および一般電気事業者からの購入によって行われるとした。モデル化の対象とした製鉄所では共同火力会社が設立されており、製鉄所が共同火力から購入する電力は共同火力へ販売する副生ガスと時間的には勿論エネルギー量としても一対一対応して

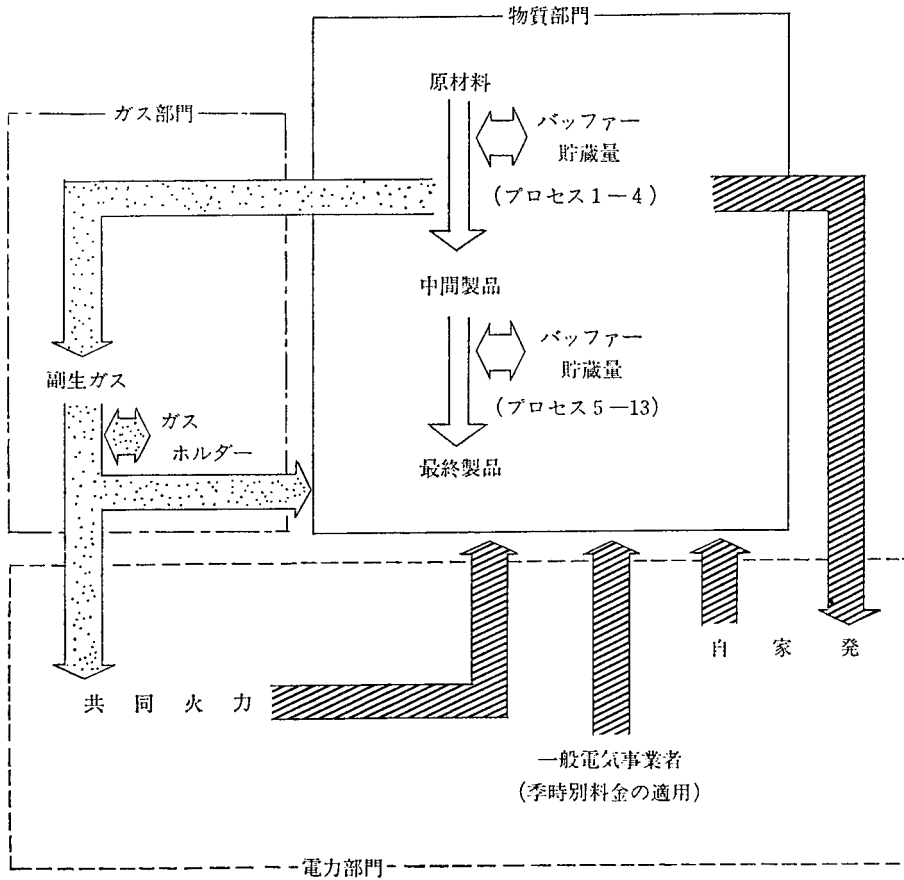


図 3.2 モデルにおける物質フローとエネルギーフロー

いる訳ではなく、またガスと電気の単価は取り引き量等に応じて変化する契約になっている。しかし、ここではモデルの簡略化のため、共同火力へ販売した副生ガスは同一ペリオド中に全量電気に変換されて製鉄所に還流するものとし、共同火力との取り引きにおけるガスと電気の単価は各々一定とした。

操業計画の最適化は、計画期間中の各ペリオドにおける 13 の各生産プロセスの稼働率および 3 種の副生ガスの運用（生産プロセスの稼働率によって、副生ガス生産量とプロセスでの使用量は定まるので、ここでいうガス運用とは、残った余剰ガスを共同火力へ販売して電力に変換するか、ガスホルダーに蓄えるか、あるいは

放散するかを選択を意味する）の決定によって行われる。これらは線形計画法により計画期間中の生産コストを最小化するように決定される。なお、ガスホルダーと生産プロセスのバッファーにおける貯蔵量については、計画期間の初期と終端で一致するという制約を課し、初期貯蔵量は最適化により求めるようにしている。

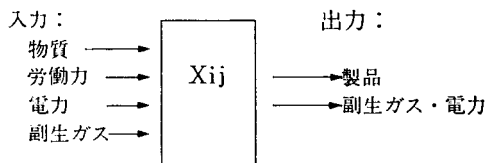
主要な外生変数は、計画期間全体で生産すべき最終製品出荷量、一般電気事業者からの購入電力の料金構造（ここで季特別料金制が考慮される）、共同火力との取り引き条件、および労働時間帯別の賃金率である。

モデル計算の結果として、最適操業計画とともに、最小化された生産コストの内訳、バッ

ァー貯蔵量の変化, およびペリオド毎のエネルギー需給の内訳が出力される。エネルギー需給の内訳から一電気事業者に対する負荷パターンを得ることができる。

3.2 変数および入力パラメータ

線形計画法を適用するために, 図 3.3 に示したように, 各プロセスの入出力量 (Y_{ij} : i -ペリオド, j -プロセス) は稼働率 (X_{ij}) の線形関数 ($Y_{ij} = A_j + B_j X_{ij}$) として表す。入力としては, 上流プロセスからの原材料, 中間製品の他に労働力, 電力, 副生ガスが必要である。出力は, 一般にはそのプロセスの製品であるが, 上流部門の各プロセスについては副生ガス (コークス炉, 高炉, 製鋼) あるいは自家発電設備による電力生産 (原料プロセス, コークス炉, 高炉) が伴う。



入出力量の線形性:

$$Y_{ij} = A_j + B_j X_{ij}$$

Y_{ij} : 第 i -ペリオドにおける j -プロセスの入出力量

X_{ij} : 第 i -ペリオドにおける j -プロセスの稼働率

図 3.3 各プロセスの入出力関係

各プロセスの特性を表す線形関数の係数 A_j , B_j (以下, 原単位と呼ぶ) は, 対象とした製鉄所の稼働実績から回帰分析により求めた。固定成分 A_j を考慮したのは労働力投入と電力投入だけであり, 他の入出力要素はプロセスの稼働率に比例するとした。

主要な制御変数は以下の通りである。

- 1) 各ペリオドにおける各プロセスの稼働率
- 2) 各ペリオドにおける共同火力向けガス販売量
- 3) 各ペリオド末期のガスホルダー貯蔵量

4) ガスホルダーおよび製品バッファの初期貯蔵量

なお, 各ペリオドにおける各プロセスの製品生産量, 購入電力量, ガス消費量, 労働力所要量, ガス放散量などは上記制御変数に従属して決定される。

今回のモデルにおいては以下に掲げる値は外生的に与えられている。

- 1) 計画期間における最終製品出荷量
- 2) 購入電力料金体系, 但し, 時間帯別の従量料金のみ考慮する。
- 3) 労働時間帯別賃金率
- 4) ガスホルダー容量
- 5) 製品バッファ容量
- 6) ホットチャージ比率
- 7) 共同火力との取引条件

今後のモデル改良においては, ガスホルダー容量等は設備投資コストを考慮することで最適化の対象とすることもできよう。

入力パラメータの主要なものは, 以下の通りである。

- 1) 各プロセスの一ペリオド当たりの生産能力
- 2) 電力生産原単位
- 3) 電力消費原単位
- 4) ガス生産原単位
- 5) ガス消費原単位
- 6) 労働原単位
- 7) 共同火力発電効率

3.3 制約条件

変数の定義に関するもの以外, モデルで考慮されている主要な制約条件は次の4種類である。

- 1) 物質バランス: 計画期間内に所与の出荷量を満たす生産を行うこと, 各ペリオドにおい

て中間製品生産プロセスからバッファを経由して中間製品消費プロセスへ物質が流れるときの収支がバッファ容量の範囲内に収ること、バッファにおいて製品貯蔵量が計画期間の初期と終端で一致すること、ホットチャージ比率制約を満たすこと。

2) 電力バランス：各ペリオドにおける製鉄所全体での電力需要が自家発電力、共同火力電力、購入電力の合計量と一致すること。

3) ガスバランス：各ペリオドにおいて次の制約条件を満たすこと： $0 \leq (\text{ガス発生量} + \text{前ペリオド末期のガスホルダー貯蔵量}) - (\text{ガス消費量} + \text{共同火力向けガス販売量} + \text{ガス放散量}) \leq \text{ガスホルダー最大貯蔵容量}$

4) 高炉、製鋼プロセスの稼働率は一定とする。

3.4 目的関数

計画期間としては1週間ないしは1箇月を考察するので、最小化すべき目的関数は短期の運転コストであり、具体的には人件費、エネルギーコスト（購入電力コスト+共同火力電力コスト-余剰副生ガス売上）および中間製品の在庫コストの計画期間中の総合計とした。

4. 需要家の行動分析

今回はモデルの有効性を試験する意味で予備的に計画期間を一週間として幾つかのケースについて最適操業計画を求めた。一週間を平日（月～金曜日）、土曜日、日曜日に分け、また、一日を第1シフト（7時～15時）、第2シフト（15時～23時）、第3シフト（23時～7時）に分ける（表 4.1 参照）。

4.1 入力データ

主な外生条件と入力パラメータは対象とした製鉄所の協力を得て以下のように設定した。

表 4.1 PERIOD 番号と時間帯対応表

PERIOD	曜日	時間
1	金	7~15
2		15~23
3		23~ 7/土
4	土	7~15
5		15~23
6		23~ 7/日
7	日	7~15
8		15~23
9		23~ 7/月
10	月	7~15
11		15~23
12		23~ 7/火
13	火	7~15
14		15~23
15		23~ 7/水
16	水	7~15
17		15~23
18		23~ 7/木
19	木	7~15
20		15~23
21		23~ 7/金

外生条件

1) 各プロセスの中間・最終製品出荷量：物質フロー図（図 2.1 参照）にしたがって、計画期間にわたる最終製品出荷量からプロセス別の中間・最終製品出荷量を割り当てた、但し、歩留まりは 100% とした。

2) 購入電力料金：対象とした製鉄所が契約している需給調整契約を参考に曜日別・ペリオド別に季時別料金を設定した（表 4.2）。比較の

表 4.2 購入電力の料金体系

（単位：円/kWh）

	季時別料金			均一料金
	月～金曜日	土曜日	日曜日	
第1シフト (7~15時)	12.10	10.67	6.65	12.10
第2シフト (15~23時)	11.89	10.67	6.65	12.10
第3シフト (23~7時)	5.33	5.33	4.66	12.10

ために用いる使用時間帯によらず一定の均一料金としては特別高圧電力契約の料金を参考に設定した。なお、基本料金は季時別料金制と均一料金制で等しいと仮定し、従量料金のみをコスト計算の対象とした。

3) 労働時間帯別賃金率：平日の第1シフトの賃金率を1とし相対値で表したとき、第2シフト：1.05、第3シフト：1.32、土曜日・日曜日の第1シフト：1.10、第2シフト：1.15、第3シフト：1.43とした。

4) ガスホルダー容量：対象とした製鉄所の現有設備に基づきガス種別に設定した。COGのガスホルダー容量は熱量ベースでBFG、LDGに比べて約10倍である。

5) 製品バッファ容量：加熱プロセスの省エネルギーの観点から上流部門では小さく、下流部門では大きく設定した。なお、今回は簡単化のため中間製品の在庫コストは考慮しない。

6) ホットチャージ比率：圧延・加工のため再加熱を要するプロセスには次のようなホットチャージ比率を与えた。大形：65%、厚板：71%、熱延：71%。

7) 共同火力取引条件：実績に基づきガス販売単価および電力購入単価を設定した。

入力パラメータ

1) 各プロセスの生産能力：定期点検・補修を考慮した月次生産能力から一ペリオド当たりの生産能力に換算した。

2) 電力生産原単位：3種類の自家発電設備の発電容量に基づき設定した。

3) 電力消費原単位：各プロセスの稼働実績（1年分の月次データ）から回帰分析により求めた。

4) ガス生産原単位：各プロセスの稼働実績（1年分の月次データ）から回帰分析により求

めた。

5) ガス消費原単位：各プロセスの稼働実績（1年分の月次データ）から回帰分析により求めた。

6) 労働原単位：上流部門はすべて固定要員、下流部門は半分が固定要員と仮定した。

7) 共同火力発電熱効率：実績に基づき設定した。

4.2 計算ケースと結果

季時別料金制の効果と操業計画最適化の効果を検討するために次の3ケースについて計算した。

最適・季時ケース：季時別料金制のもとで操業計画を最適化する。

最適・特高ケース：均一料金制（特別高圧契約並み）のもとで操業計画を最適化する。

均等・季時ケース：季時別料金制のもとで全ペリオドにわたって均等稼働率でプロセスの運転を行う。但し、副生ガスの運用は最適化する。

図4.1、4.2に最適・季時ケースおよび最適・特高ケース、それぞれの最適操業計画における各プロセスの稼働状況を示す。上流部門の4プロセスおよびUO（UO鋼管）プロセスとSP（スパイラル鋼管）プロセスでは生産要求を満たすために全期間ほぼフル稼働しなければならないので最適化の余地は少ない。このようなプロセスで稼働率を落とすのは賃金率の最も高い休日夜間である。

図4.3に均等・季時ケースにおける各プロセスの稼働状況を示す。各プロセスの平均的な稼働水準がわかる。

図4.4に各製品バッファ貯蔵量のケース間比較を示す。一般にランニングストックが尽きて下流工程の操業に支障がきたさないように上

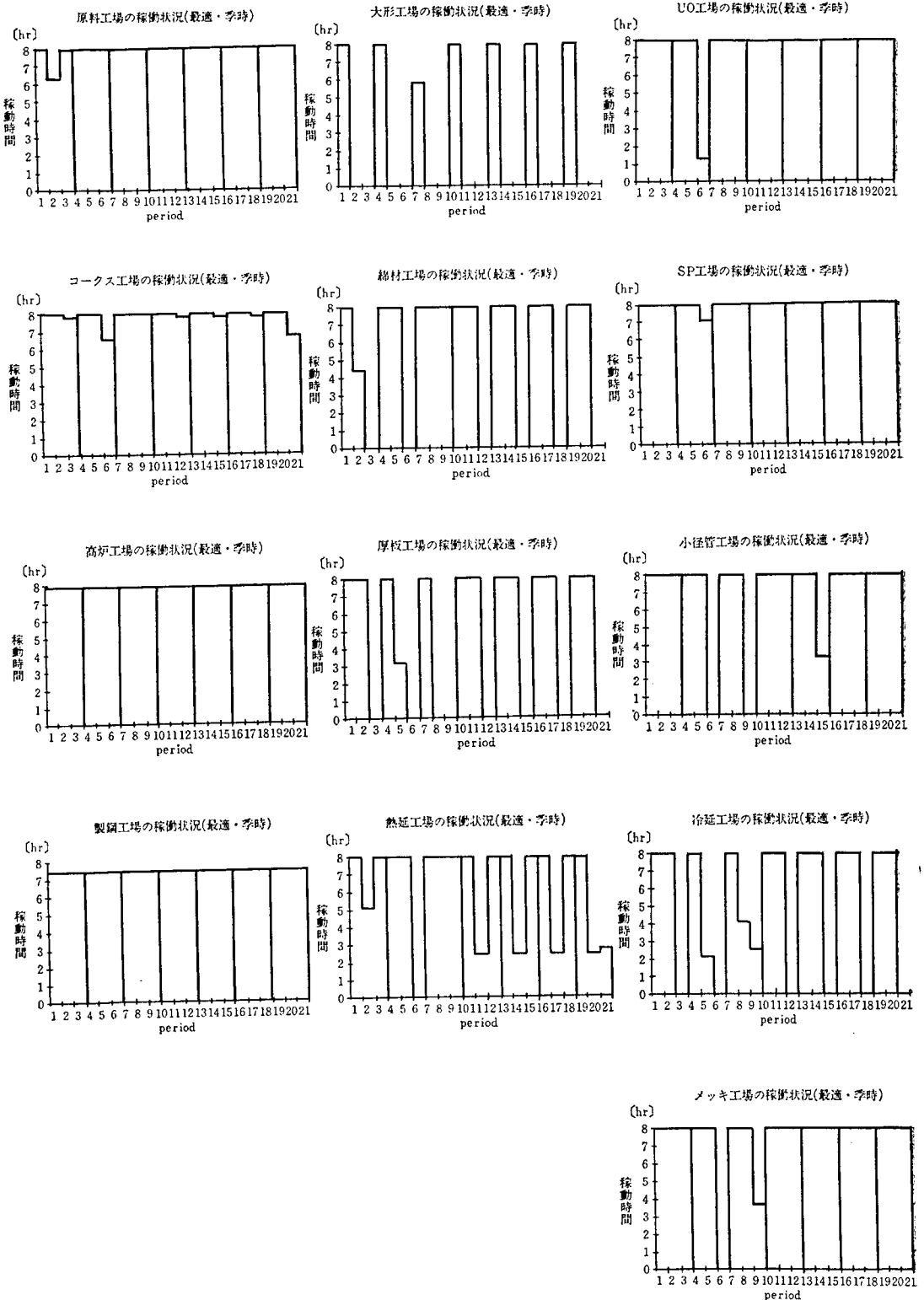


図 4.1 最適操業計画における各プロセスの稼働率 (最適・季時ケース)

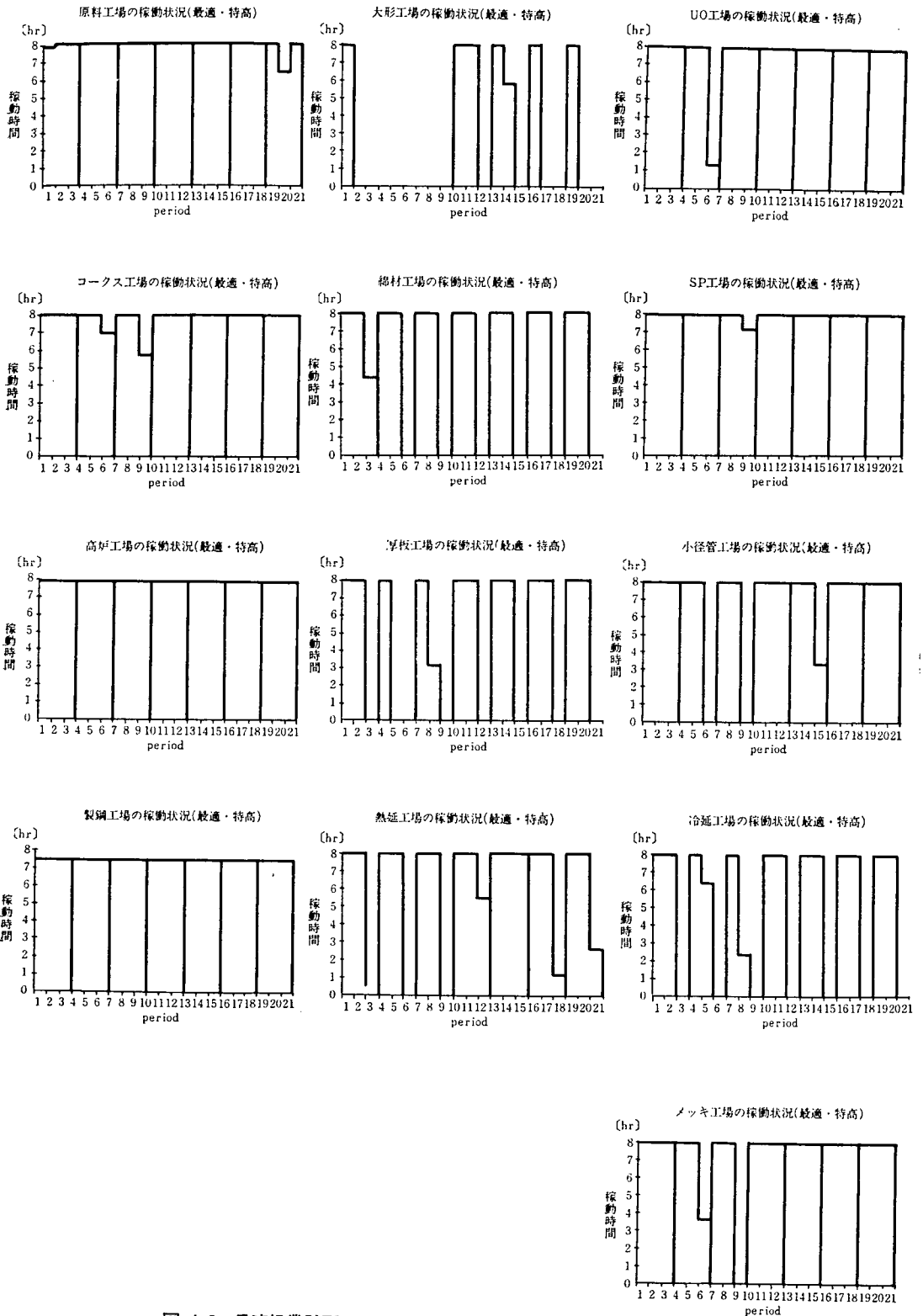


図 4.2 最適操業計画における各プロセスの稼働率(最適・特高ケース)

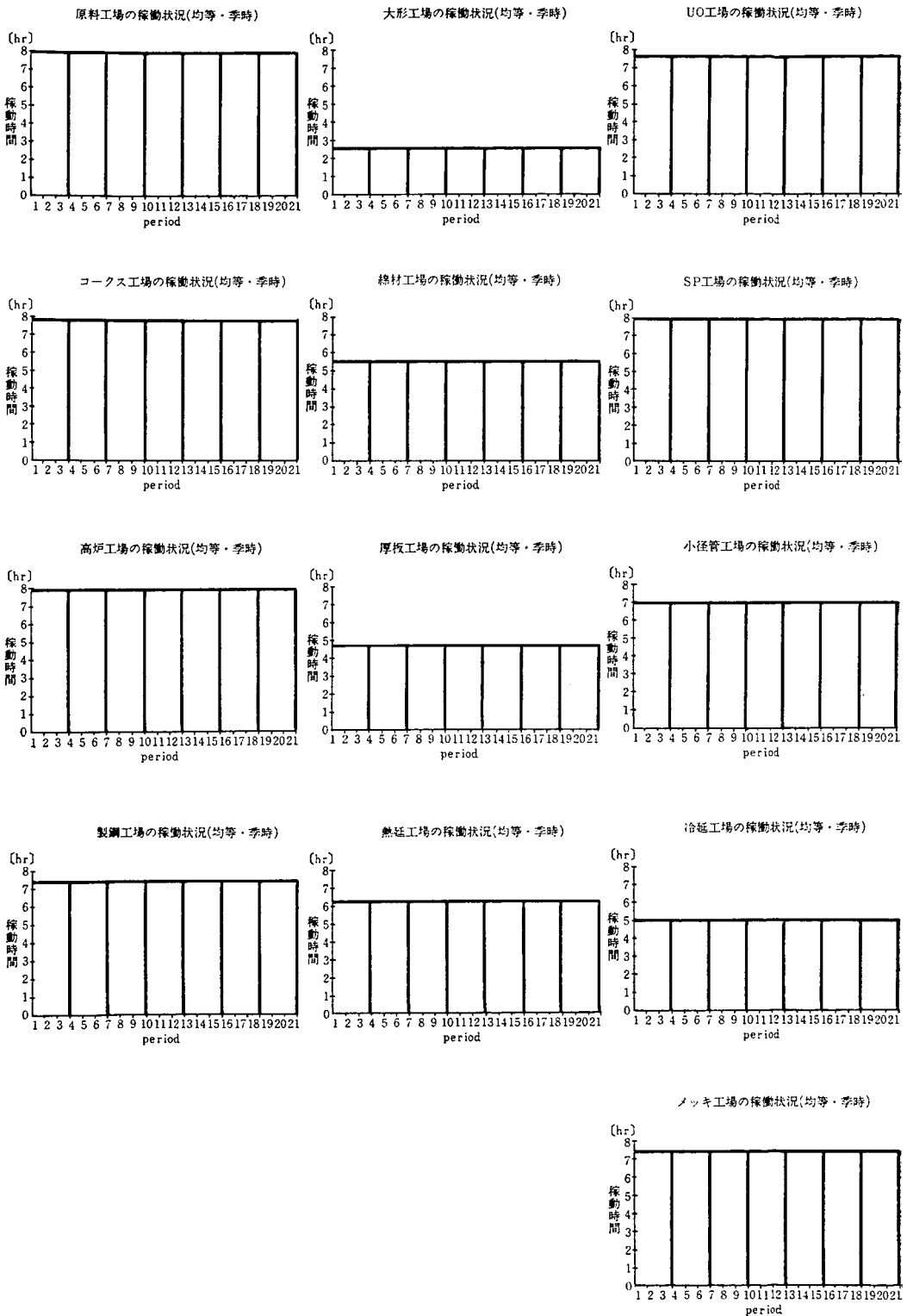


図 4.3 均等操業計画における各プロセスの稼働率 (均等・季時ケース)

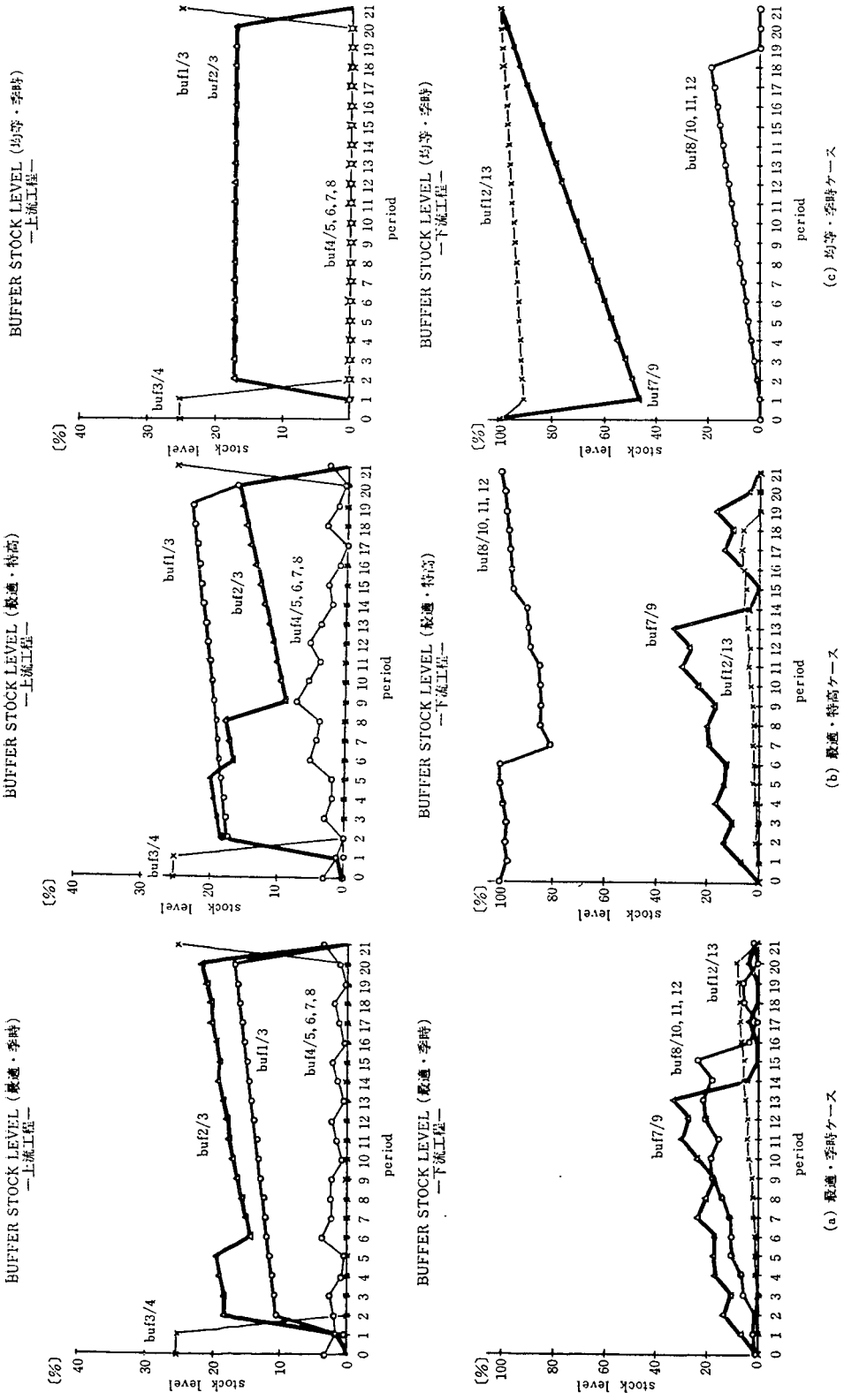


図 4.4 製品バッファ貯蔵量の変化

注) buf i_1/i_2 は第 i_1 プロセスと第 i_2 プロセスの間のバッファを意味する

流工程では早期に貯蔵量を増やしている。熱延プロセスの製品バッファー水準 (buf 8/10, 11, 12) は最適・季時ケースと最適・特高ケースで顕著に異なるパターンを示している。

図 4.5 に各ケースにおける 3 種類のガスホルダー貯蔵量の変化を示す。今回の各ケースではガスホルダーの最適運用の結果、ガス放散は生じていない。最適・季時ケースにおいては季時別料金制の料金構造を反映して日間運用に近いパターンがみられる。

また、図 4.6 に電力供給構成の変化を示す。各ケースで購入時間帯は変化しているが、購入電力の総計は、いずれのケースでも等しく総電力使用量の約 5% ほどである。

表 4.3 は、各ケースについて最小化された一週間の総生産コストの内訳を示している。

4.3 季時別料金制の効果

最適・季時ケースを最適・特高ケースと比較することで、需要家の最適行動を介しての季時別料金制の効果を解析できる。図 4.2 および 4.3 に示される両ケースの最適操業計画を比較すると、季時別料金制下では夜間操業が多くなっていることがわかる。この様子は製鉄所全体の稼働状況を表している総使用電力量の変化 (図 4.6 参照) からも見取れる。但し、ガスホルダー貯蔵を利用して購入電力を夜間へ移行すると同時に操業を昼間へ移行しているため、労働条件の変化を伴う夜間操業率の上昇は購入電力の夜間シフトほどは大きくない。

図 4.6 にみられるように、均一料金制から季時別料金制にすると購入電力量は不変 (ガス放散がないため) のままで昼間から夜間にすべての購入負荷がシフトしている。需要家にとって均一料金制と季時別料金制とではどちらが有利かを解析するためには、均一料金制下で最適化

されている負荷パターンを変えなければ購入電力費総額は変化しないような季時別料金制の料金構造を設定して比較する必要がある。今回の両ケースの電気料金はそのような制約を満たしていないので両ケースのコストの比較には注意を要する。最適・特高ケースにおいて人件費が若干小さくなっているのは、電気料金は一定なので、賃金率の時間変化を利用してコスト低下を図るという最適化の結果であろう。この人件費低減がそれほど大きくないのは固定要員の割合が大きいためである。

なお、本モデルによる予備計算として一日の操業パターンを解析した結果から、次のことが知られている。1) ガスホルダーを利用しない場合、操業を夜間にシフトすると人件費は増大するが季時別料金制下では購入電力費の減少の方が大きく総コストは低下する。2) ガスホルダーを活用すれば、操業を昼間にシフトさせ同時に購入電力を夜間に移行することが可能であり、ガスホルダー容量の限度内ではこれですらに運転コストを減少できる^[2]。

4.4 操業計画最適化の効果

各生産プロセスの操業最適化の効果をみるには、最適・季時ケースと均等・季時ケースを比較すればよい。図 4.4 に示されるように全プロセスを全期間均等に運転しても、ガスホルダーを最適に運用すること (図 4.5 参照) によって購入電力をすべて夜間に移行することができる。最適操業の場合には、ガスホルダー容量は購入電力の移行だけでなく、操業の昼間シフトに対応するための副生ガス貯蔵にも利用されるが、均等操業の場合には、ガスホルダーは購入電力をできるだけ単価の安い時間帯 (夜間、特に日曜夜間) に移行することを単一の目的として運用されることになる。したがって、均等操

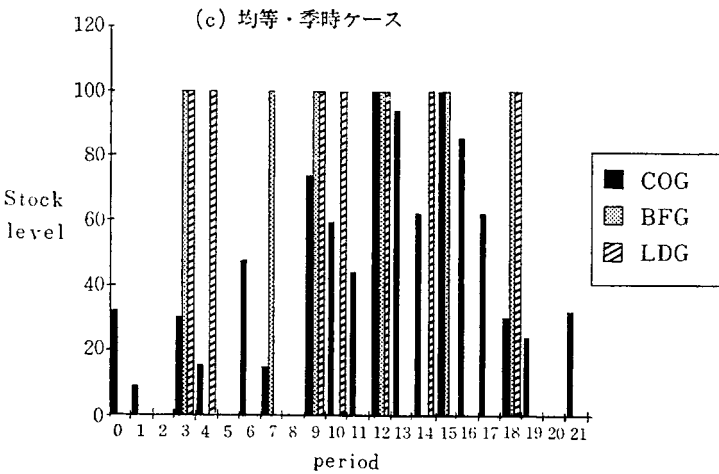
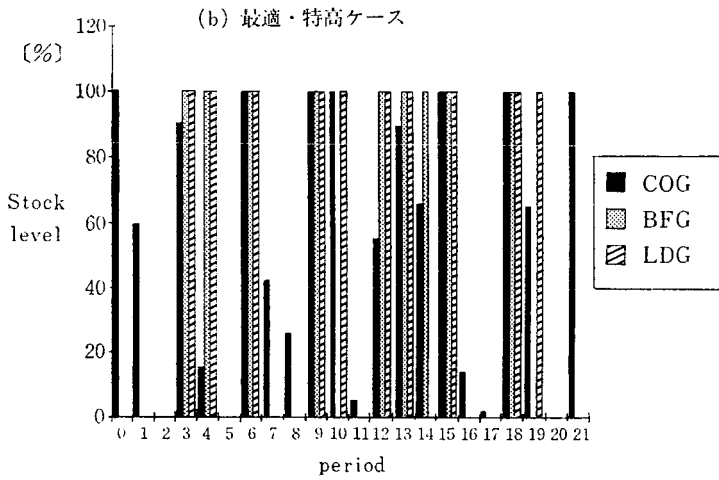
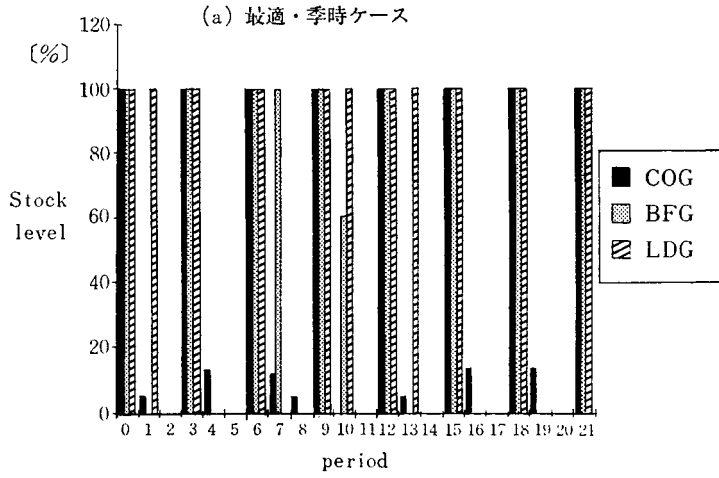


図 4.5 ガスホルダー貯蔵量の変化

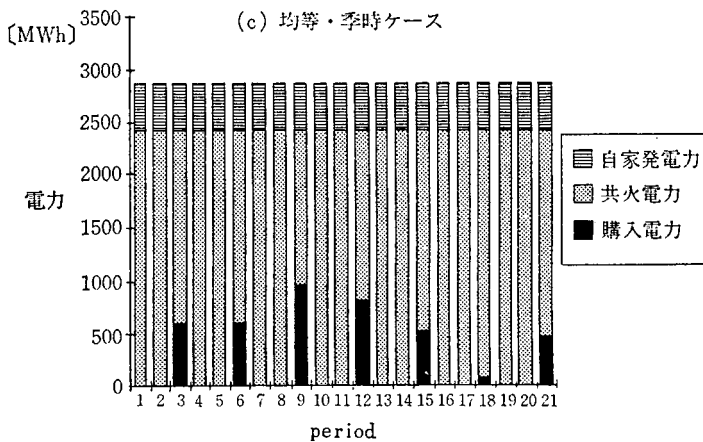
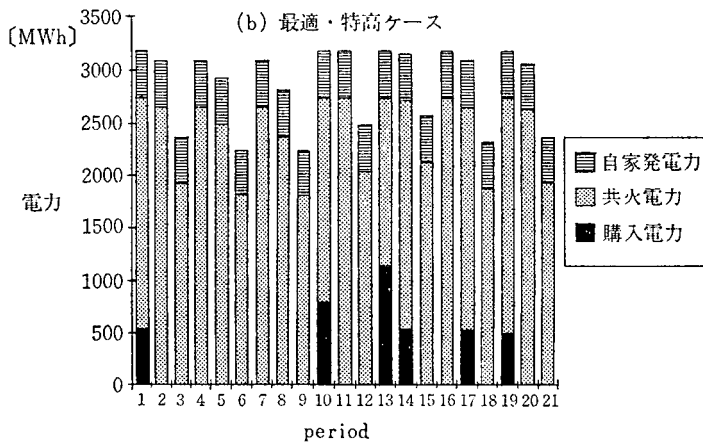
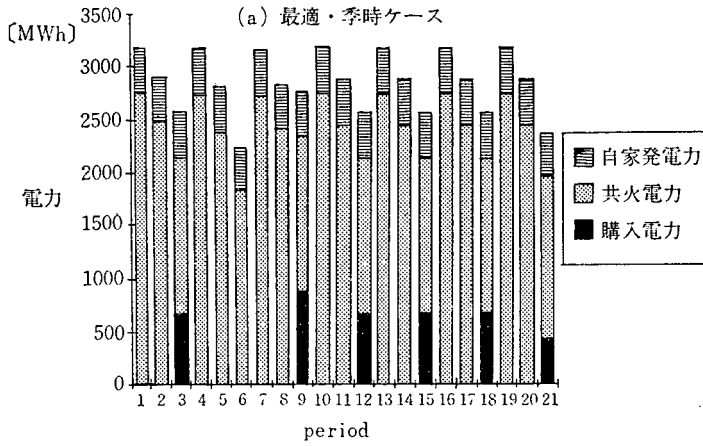


図 4.6 電力供給構成の変化

業の方が購入電力費は若干安くすることができ
る（表 4.3 参照）。なお、人件費については当
然ながら均等操業すると高くなる。

表 4.3 各ケースの運転コストの内訳

ケース	最適・季時	最適・特高	均等・季時
購入電力費	6.41	14.97	6.40
共火純支出	28.08	28.08	28.08
人件費	65.51	65.36	66.33
総コスト	100.00	108.41	100.80

(注) 最適・季時ケースの総コストを 100 とした相対値
[%] で示す。
共火純支出=共火電力購入費-ガス販売収入

5. 結 語

最適化型のプロセスモデルを開発し、高炉一貫製鉄所をケーススタディの対象として電気料金構造に対する負荷の反応評価を試みた。本モデルは従来明確でなかった次のようなプロセスレベルでの需要家の反応とその結果を明らかにした。

- プロセス間の物質・エネルギーのフローとストックに関する制約のもとでの操業時間帯の移行可能性とそれによるコスト低減効果
- 賃金率と電力コスト単価の相反する時間帯

変化を調整するためのエネルギー貯蔵設備の最適運用とその効果

また、季時別料金制下では以上のような需要家の最適行動により、需要家自身のコストが減少するだけでなく、電気事業にとっても、系統全体の需要の谷間（夜間、特に日曜夜間）に負荷が誘導されるというメリットが生じることを定量的に示した。

今後は本モデルの改良を続けると同時に、今回試みたアプローチを鉄鋼業以外の化学工業、機械製造業等へ応用してモデルの適用可能性を拡げる努力を行う予定である。

参考文献

- [1] EPRI EA-4206: "Commercial and Industrial Response to Time-of-Use Rates: Methodology and Case Studies," (1985)
- [2] Yamaji, K., H. Asano, and S. Sagai: "A Process Model for Industrial Response to Time-of-Use Rates: Case Study for the Iron and Steel Industry," Proceedings of the 2nd CRIEPI-EPRI Workshop on Energy Analysis, Sept. 24-26, 1986 (in printing)

付録 鉄鋼業プロセス負荷モデルの定式化

以下に鉄鋼業プロセス負荷モデル "PROM IS" (Process Load Model for the Iron and Steel Industry) の定式化の詳細を記す。

A.1 変数およびパラメータ

1) 制御変数

- ① x_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセスの稼働時間 $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$

M : 計画期間中の全ペリオド数,
 T : ペリオド幅, N : プロセス数
 $0 \leq x_{ij} \leq X_{ij} \leq T$ (A.1)

- ② PP_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセスの最終製品生産量（中間製品の一部分が最終製品になるプロセスについて）
 $0 \leq PP_{ij}$ (A.2)

- ③ GSC_{ik} : 第 i ペリオドにおける共同火力
向け k -ガス販売量 $k=COG,$
 BFG, LDG

$$0 \leq GSC_{ik} \quad (A.3)$$

- ④ GS_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガスホ
ルダーの貯蔵量

$$0 \leq GS_{ik} \leq GS_k^{max} \quad (A.4)$$

- ⑤ MS_0^h : h バッファの初期貯蔵量
- ⑥ GS_{0k} : k -ガスホルダーの初期貯蔵量

2) その他の内生変数

- ① MP_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセス
の中間製品生産 ($=p_i x_{ij}$)
- ② MI_{ik} : 第 i ペリオドにおける k プロセス
の中間製品消費 ($=p_k x_{ik}$)
- ③ MS_i^h : 第 i ペリオドにおける h バッファ
の貯蔵量
- ④ ES_i : 第 i ペリオドにおける自家発電電
力量 ($= \sum_{j \in G^e} l_j^e x_{ij}$)
- ⑤ ESC_i : 第 i ペリオドにおける共同火力か
らの購入電力量
($= \sum_k eff_k GSC_{ik}$)

- ⑥ EP_i : 第 i ペリオドにおける一般電気事
業者からの購入電力量

$$0 \leq EP_i \quad (A.5)$$

- ⑦ E_i : 第 i ペリオドにおける総電力使用
量 ($= \sum_i (a_j^e + b_j^e x_{ij})$)
- ⑧ GG_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガス生
産量 ($= \sum_{j \in G_k^g} l_{jk}^g x_{ij}$)
- ⑨ G_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガス総
使用量 ($= \sum_j b_{jk}^g x_{ij}$)

- ⑩ GR_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガス放
散量

$$0 \leq GR_{ik} \quad (A.6)$$

- ⑪ L_{ij} : 第 i ペリオドにおける労働力所要
量 ($= A_j + B_{ij} x_{ij}$)

3) 外生変数

- ① P_j : j プロセスの計画期間生産量
- ② PP_j : j プロセスの計画期間生産量 (中
間製品の一部分が最終製品にもなる
プロセスについて)
- ③ $e0_i$: 第 i ペリオドにおける購入電力単
価
- ④ w_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセス
の労働単価
- ⑤ GS_k^{max} : k -ガスホルダーの容量
- ⑥ MS_{max}^h : h バッファの容量
- ⑦ gc_{ik} : 第 i ペリオドにおける共同火力向
けガス販売単価
- ⑧ ec_i : 第 i ペリオドにおける共同火力電
力単価
- ⑨ r_j : j プロセスのホットチャージ比率

4) 入力パラメータ

- ① X_{ij} : 第 i ペリオドにおける定期点検・
補修を考慮した j プロセスの稼働
時間
- ② p_j : j プロセスの生産能力
- ③ l_i^e : j プロセスの電力生産原単位
- ④ a_j^e : j プロセスの電力消費原単位 (固
定分)
- ⑤ b_j^e : j プロセスの電力消費原単位 (比
例分)
- ⑥ l_{jk}^g : j プロセスの k -ガス生産原単位
- ⑦ a_{jk}^g : j プロセスの k -ガス消費原単位
(固定分)
- ⑧ b_{jk}^g : j プロセスの k -ガス消費原単位
(比例分)
- ⑨ A_j : j プロセスの労働原単位 (固定分)
- ⑩ B_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセス

の労働原単位（比例分）

- ⑪ sc^h : h バッファーにおける在庫コスト係数
- ⑫ F : ec_i 中の固定費係数
- ⑬ G : ec_i 中の可変費係数
- ⑭ eff_k : 共同火力の k -ガス発電効率

A.2 制約条件

1) 物質バランス

$$P_j = \sum_{j \in G_1^p} p_j x_{ij} : \text{計画期間における } j \text{ プロセスの生産量} \quad (\text{A.7})$$

G_1^p : 最終製品生産のプロセスの集合

$$PP_j = \sum_{j \in G_2^p} PP_{ij} \quad (\text{A.8})$$

G_2^p : 中間製品が最終製品にもなるプロセスの集合（例えば、熱延プロセスなど）

$$0 \leq \sum_{j \in H_i^h} MP_{ij} - \sum_{k \in H_0^h} MI_{ik} + MS_i^h = MS_{i+1}^h \leq MS_{\max}^h \quad (\text{A.9})$$

: 中間製品生産プロセスの集合 H_i^h から h バッファーを経由して中間製品消費プロセスの集合 H_0^h へ物質が流れる時のバランス

$$\sum_{j \in H_i^h} MP_{ij}^h \geq \sum_{k \in H_0^h} r_k MI_{ik}^h \quad (\text{A.10})$$

: ホットチャージの条件

$$-d \leq \sum_i \sum_j (MP_{ij} - MI_{ij}) \leq d \quad (\text{A.11})$$

: 中間製品全体のバランス

ただし, $0 \leq d \leq \min MS_0^h$

$1 \leq i \leq M-1, 1 \leq h \leq H$

H : バッファーの数

MS_i^h : 第 i ペリオドにおける h バッファーの貯蔵量

MP_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセスの中間製品生産

MI_{ik} : 第 i ペリオドにおける k プロセスの中間製品消費

MS_{\max}^h : バッファー h の容量

H_i^h : バッファー h と接続する中間製品生産プロセスの集合

H_0^h : バッファー h と接続する中間製品消費プロセスの集合

r_j : j プロセスのホットチャージ比率 ($0 < r_j < 1$)

●高炉プロセスに関しては、中間製品の生産、ガス生産および自家発電等は前期と今期の稼働率の平均 ($(x_{i-1} + x_{ij})/2$) に比例するものとする。

2) 電力量バランス

$$E_i = EP_i + ES_i + ESC_i \quad (\text{A.12})$$

: 第 i ペリオドにおける電力バランス
 $1 \leq i \leq M$

E_i : 第 i ペリオドにおける総電力使用量

ES_i : 第 i ペリオドにおける自家発電電力量

ESC_i : 第 i ペリオドにおける共同火力からの購入電力量

G^e : 自家発電設備を持つプロセスの集合

eff_k : 共同火力の k -ガス発電効率

a_i^e : j プロセスの電力消費原単位（固定分）

b_i^e : j プロセスの電力消費原単位（比例分）

l_i^e : j プロセスの電力生産費原単位

$$E_i = \sum_j (a_i^e + b_i^e x_{ij}) \quad (\text{A.13})$$

$$ES_i = \sum_{j \in G^e} l_i^e x_{ij} \quad (\text{A.14})$$

$$ESC_i = \sum_k eff_k GSC_{ik} \quad (\text{A.15})$$

3) ガス量バランス

$$0 \leq GS_{ik} + GG_{ik} - G_{ik} - GSC_{ik} - GR_{ik} \\ = GS_{i+1,k} \leq GS_k^{\max} \quad (A.16)$$

: ガスホルダーにおけるバランス

$$1 \leq i \leq M, 1 \leq k \leq K$$

K : ガスの種類数 (=3)

GS_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガスホルダーの貯蔵量

G_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガス総使用量

GG_{ik} : 第 i ペリオドにおける k -ガス生産量

GS_k^{\max} : k -ガスホルダーの容量

G_k^g : k -ガスを生産するプロセスの集合

b_{ik}^g : j プロセスの k -ガス消費原単位 (比例分)

l_{ik}^h : j プロセスの k -ガス生産原単位

$$G_{ik} = \sum_i (b_{ik}^g x_{ij}) \quad (A.17)$$

$$GG_{ik} = \sum_{i \in G_k^g} l_{ik}^g x_{ij} \quad (A.18)$$

4) その他の制約式

$$x_{i3} = P_3 / MT \quad (A.19)$$

: 高炉の稼働率は一定。

$$x_{i4} = P_4 / MT \quad (A.20)$$

: 製鋼プロセスの稼働率は一定。

A.3 目的関数

$$C = \sum_i \{ \sum_j w_{ij} (A_j + B_{ij} x_{ij}) + ec_i ESC_i \\ + e0_i EP_i - \sum_k gc_{ik} GSC_{ik} + \sum_h sc^h MS_i^h \} \\ \rightarrow \min \quad (A.21)$$

A_j : j プロセスの労働原単位 (固定分)

B_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセスの労働原単位 (比例分)

w_{ij} : 第 i ペリオドにおける j プロセスの労働単価

$e0_i$: 第 i ペリオドにおける購入電力単価

ec_i : 第 i ペリオドにおける共同火力電力単価

gc_{ik} : 第 i ペリオドにおける共同火力向けガス販売単価

sc^h : h バッファーにおける在庫コスト係数

F : ec_i 中の固定費分

G : ec_i 中の gc_{ik} に対する比例分

$$ec_i = F + G \sum_k gc_{ik} \quad (A.22)$$

やまじ けんじ
あさの ひろし
経済部エネルギー研究室
さがい しげお
情報システム部経営情報研究室