

料金による電気の使用時間帯の誘導

——プロセスモデルによる解析——

キーワード：季時別料金，プロセスモデル，鉄鋼業，
電気機械製造業，線形計画法

山 地 憲 治 佐 賀 井 重 雄

〔要 旨〕

産業用需要家について，プロセスモデルと呼ぶ需要家行動モデルを開発して，電気料金制度による需要の誘導効果を評価した。プロセスモデルは，生産工程を一纏まりの操業単位である幾つかのプロセスの組み合わせとして表現したもので，種々の電気料金に対して，コスト最小となる操業計画を求めることができる。鉄鋼業と電気機械製造業の2業種について，プロセスモデルを開発し，季時別料金による負荷移行効果を評価した。鉄鋼業は，副生ガス貯蔵装置の運用などにより，時間帯によって料金に変化する季時別料金に敏感に反応して購入電力の需要を夜間に集中することが出来ること，また，電気機械製造業では，最大電力の抑制に大きな効果が期待されること等の傾向が定量的に評価された。分析・評価対象を増やして，産業全体としての需要調整効果の推定を行うことが今後の課題である。

- | | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 1. 研究の目的と背景 | の解析・評価 |
| 2. 解析手法と評価対象 | 4. 電気機械製造業における電力需要調整の可能性 |
| 2.1 プロセスモデルによる産業用需要の解析 | 4.1 重電機製造業のプロセスモデル PROM-HEM の開発と適用 |
| 2.2 従業員一人当りの電力需要からみた各産業部門の特徴 | 4.2 量産型工場における電力需要調整の考察 |
| 3. 鉄鋼業における電力需要調整の評価 | 5. 結 語 |
| 3.1 高炉一貫製鉄所のプロセスモデル PRO-MIS の開発 | 参考文献 |
| 3.2 季時別料金に対する反応に及ぼす諸因子 | |

1. 研究の目的と背景

従来の考え方によれば，電気事業経営において，電力需要は経営環境として外から与えられるものであった。しかし，厳しさを増しつつあるエネルギー間競争のもとでは，需要側にも踏み込んだ経営方策が求められている。

需要側に働きかける経営方策として第一に注目すべきは，電気事業とその顧客とをエネルギー市場で結び付けている料金である。電気事業が多様な料金を提示することで，需要家の選択の範囲は拡がり，電気事業にとっても社会全体にとっても望ましい方向に需要を誘導する可能性が開ける。例えば，1988年1月から大口の産

業用需要家は、電気を使用する時間帯によって料金が変化する季時別料金を選択できるようになった。季時別料金は、電力生産原価をより正確に表すと同時に、需要家の電気の使用時間帯を、負荷パターンの谷間に誘導して負荷の平準化をもたらすと期待されている。情報・通信技術は革命的な進歩をとげつつあるので、このような高度な料金制度は、適用範囲、内容ともに今後急速に拡充していくものと予想される。

料金による需要の誘導は、料金に対する個々の需要家の自発的行動を市場で集計した結果として行われる。これにより、市場メカニズムによる最適性が実現される。しかし、一方、需要の誘導が電気事業の意図したように行われるという保証はない。需要誘導の効果を事前に評価するには、需要家の行動原理についての知識が必要である。とくに、季時別料金による電気の使用時間帯の誘導のような新たな試みについては、経験データが乏しいので、個々の需要家の行動についての理解が不可欠である。

本研究の目的は、個別の需要家の行動を予測するモデルを開発して、季時別料金による電気の使用時間帯の誘導効果を評価することである。

2. 解析手法と評価対象

2.1 プロセスモデルによる産業用需要家の解析

わが国でも諸外国でも、季時別料金が最初に適用されるのは、大口の産業用需要家である。料金メータ等の新たな出費が少なくすむことに加えて、産業用需要家は料金に敏感に反応するからである。

産業用需要家にとって、電気は労働などと共に生産要素の一つであり、その使用は、生産

技術の制約のもとで、生産コストの最小化という合理的な基準によって決定される。料金に対する反応は、経験によるデータが無くとも予測可能である。

これに対し、家庭用需要は、保有する機器等の技術要因だけでなく、生活習慣や気象など規則性のない要因による影響が大きく、しかも、需要家の行動基準は主観的な効用の最大化であって、コスト最小化のように容易に計量できるものではない。業務用需要の一部も同じ性質を持っている。この種の需要の料金に対する反応を評価するには、実験等によってデータを集め、統計的な取り扱いを行う必要がある。

本研究で扱う範囲は、産業用需要家の反応の解析・評価に限定する。

解析は、代表的な産業用需要家について、プロセスモデルと呼ぶ需要家行動モデルを開発して行う。プロセスモデルでは、生産工程を、一纏まりの操業単位である幾つかのプロセスの組み合わせとして表現する。各プロセスについて、ミクロレベルの技術特性がモデル化されており、電力や労働等の生産要素の需要はそのプロセスの操業水準に応じて決定される。プロセスモデルにより、与えられた諸条件下で、生産コストを最小にする操業計画を見いだすことができる。電気料金の条件が変わればコスト最小の操業計画も変わり、それに対応する電力需要の変化が得られる。

なお、本研究で開発したプロセスモデルでは、生産設備・技術特性は与件であり、料金に対する反応は、操業計画の調整で行うものとしている。つまり、モデルは、生産工程の各プロセスの操業の変更によって対応できる一週間から数ヶ月程度の短期的な反応の解析・評価を目的として開発されている。生産設備や技術の変

化の効果は、技術特性を表すパラメータを変化させたケーススタディによって、評価することができる。

2.2 従業員一人当りの電力需要からみた各産業部門の特徴

季時別料金の導入に対して操業計画の調整を行う場合、調整のしやすさを基本的に定めるのは、労働コスト（人件費）と電力コストとの競合関係である。一般に、季時別料金の安い時間帯は賃金率が高い。

図1は、製造業の各部門について、従業員一人当りの電力需要（kW/man；年間使用電力量（kWh）/年間総労働量（man-hr））を示したものである。厳密な評価にはプロセスモデルによる解析が必要であるが、第一次近似としては、kW/man 指標が大きいほど、つまり、労働節約的で電力集約的であるほど、操業調整による電気の使用時間帯の変化を行いやすいと言える。すなわち、鉄鋼、紙・パルプ等の業種は季

時別料金に敏感に反応し、電気機械、輸送機械等は反応しにくいと予想される。

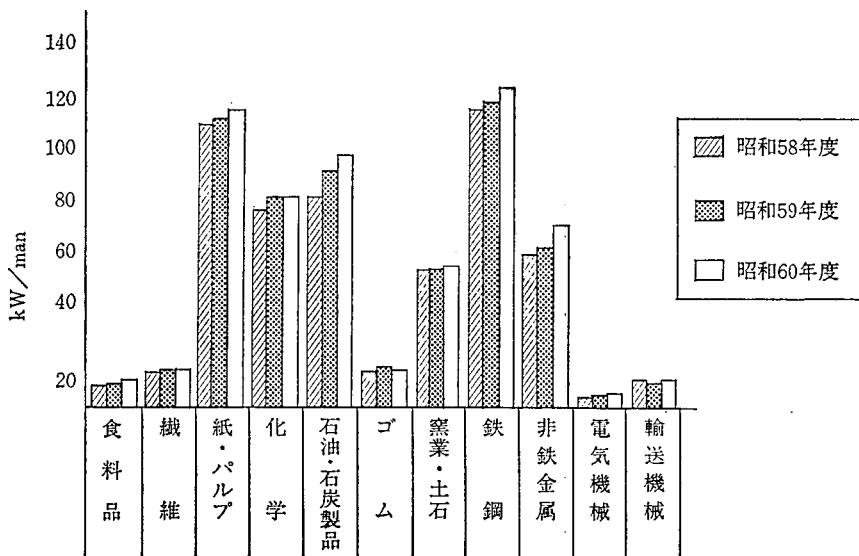
以下に紹介するプロセスモデルによる解析・評価では、鉄鋼業と電気機械製造業を取り上げる。概略検討によって季時別料金に対する反応の点では両極端にあると想定された2業種を典型例として、詳細に解析したいためである。

3. 鉄鋼業における電力需要調整の評価

3.1 高炉一貫製鉄所のプロセスモデル PR-OMIS の開発 [1, 2, 3, 4, 5]

(1) モデルの構造

モデルの対象とした高炉一貫製鉄所における各種鉄鋼製品の生産工程は、図2に示す13の製造プロセスと酸素生産、蒸気生産等の支援プロセスから構成されている。また、製造プロセスの間には中間製品を一時蓄えておくバッファがあり、各製造プロセスがある程度独立して



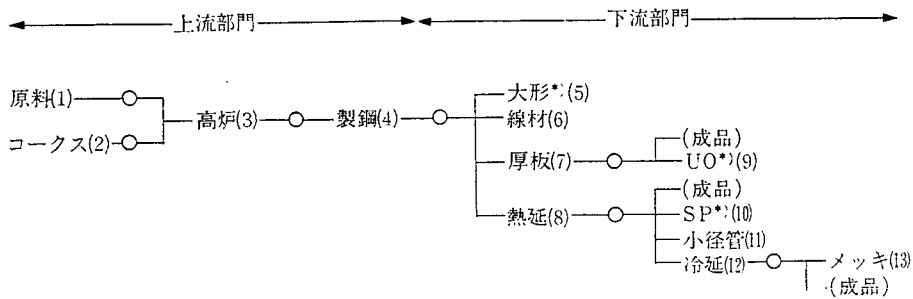
出所：参考文献[13]

図1 産業別の従業員一人当たり電力需要
〔企業の従業員規模：100人以上の場合〕

操業時間の調整を行えるようになっている。

高炉一貫製鉄所のプロセスモデル PROMIS は、線形計画法を適用した最適化モデルとして定式化されている。PROMIS の基本構造を図 3 に示す。モデルの中核となるのは、原材料・中間製品の投入と最終製品の産出を表す物質フローおよび副生ガス・電力のエネルギー需給を表す各種の制約式である。PROMIS により、

所与の製品出荷量を最小のコストで生産する週間操業計画が求められる。操業計画は、1 シフト 8 時間を単位として一週間 21 シフトについて、各生産プロセスの操業水準と副生ガス貯蔵設備の運用を決定する。最小化されるコストは、エネルギー費と人件費を合計した短期操業費である。PROMIS の詳細については文献 [4] を参照されたい。



- *) 大形：大型形鋼（H形鋼，I形鋼，鋼矢板など）
- UO：UO鋼管（高級ラインパイプ）
- SP：スパイラル鋼管
- (○はバッファの位置を表す)

図 2 高炉一貫製鉄所の製造プロセス

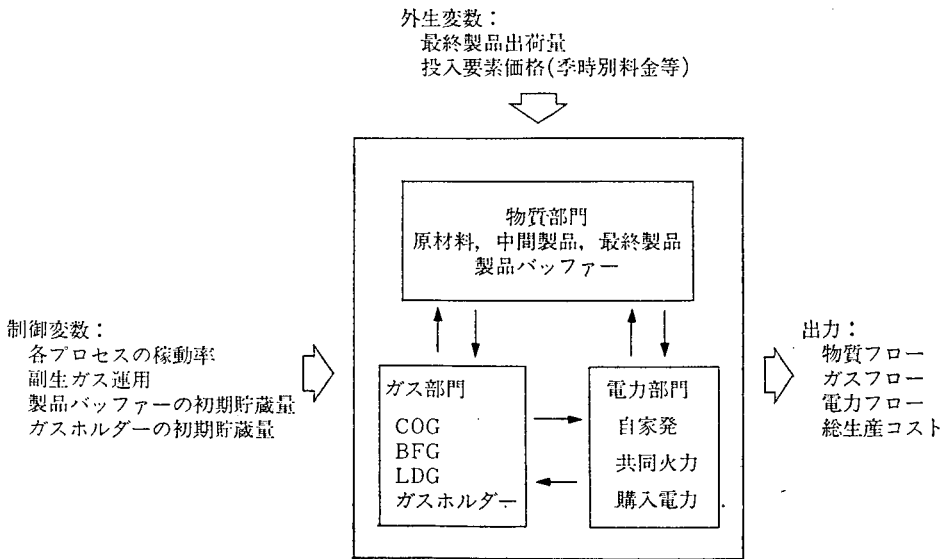


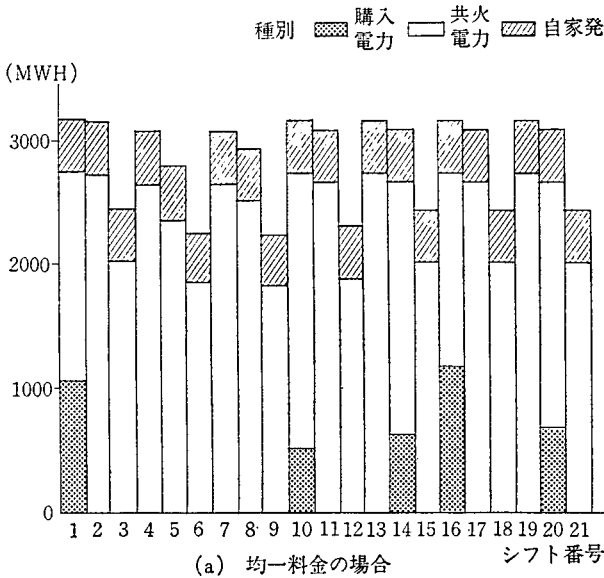
図 3 PROMIS の基本構造

(2) 季時別料金に対する反応の基本パターン

PROMIS によって、季時別料金の下での最適操業と、時間帯によらず一定の料金が課せられる均一料金の下での最適操業とを比較することができる。概略評価によって予想されたとおり、鉄鋼業は季時別料金に極めて敏感に反応する。

図4は、需給調整契約を参考にして設定した

季時別料金の下での最適操業から得られる電力需給と、均一料金の下で得られる電力需給とを比較したものである。季時別料金が適用される場合の購入電力はすべて夜間に移行していることが判る。また、使用電力総量の比較から、季時別料金の下では夜間操業が相対的に多くなっていることも判る。ただし、副生ガス貯蔵設備の運用によって、購入電力を夜間に移行すると



シフト番号と時間帯対応表

シフト番号	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

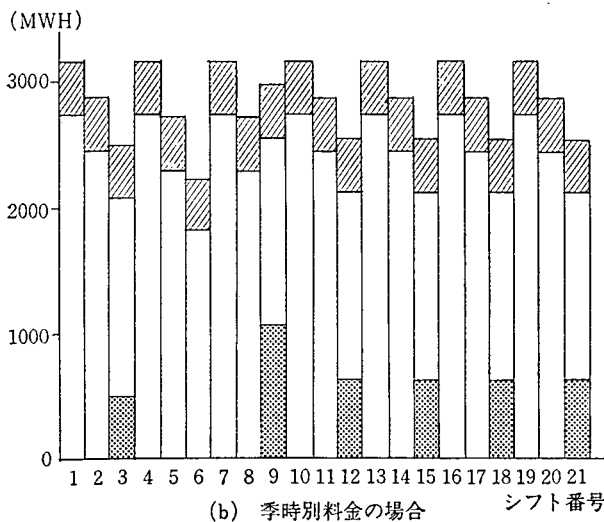


図4 最適操業下での電力需給の比較

同時に操業をできるだけ昼間に移行しているため、賃金率の高い夜間操業の増大は、購入電力の夜間への移行ほどには大きくない。季時別料金の下でも土曜日の夜間には電力を購入せず操業を低下させているのは、電気料金の割引額が賃金率の増大に見合っていないからである。

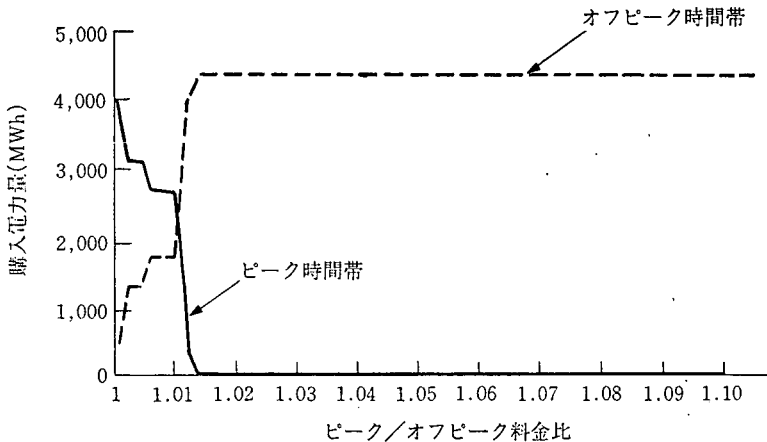
3.2 季時別料金に対する反応に及ぼす諸因子の解析・評価 [6, 7, 8]

(1) エネルギー自給度の違いによる反応の変化

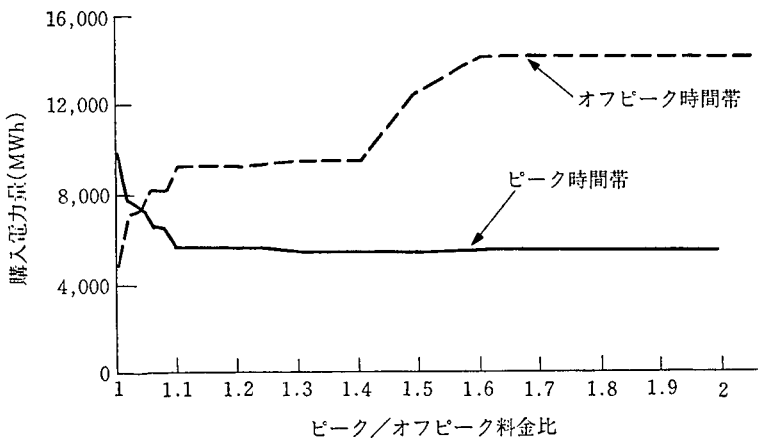
PROMIS 作成に当たって参考にした製鉄所は、大規模な上流工程を持つため副生ガスの発生量が多く、製鉄所の所要エネルギーをほとん

ど自給することが可能であった。しかし、わが国の高炉一貫製鉄所の中には、生産工程の下流部門の比率が高くてエネルギー自給度が低いものも多い。エネルギー自給度の低い製鉄所では、重油・石炭を燃料とする自家発電所を保有する場合がある。このような製鉄所についてもプロセスモデルによる解析を行い、エネルギー自給度の違いが季時別料金に対する反応にどのように影響するかを検討した。

季時別料金はピーク時間帯とオフピーク時間帯の2時間帯で変化するとし、両者の料金比が、購入電力を使用する時間帯に対してどのよ



(a) 自給度の高い製鉄所



(b) 自給度の低い製鉄所

図5 製鉄所のエネルギー自給度と季時別料金への反応

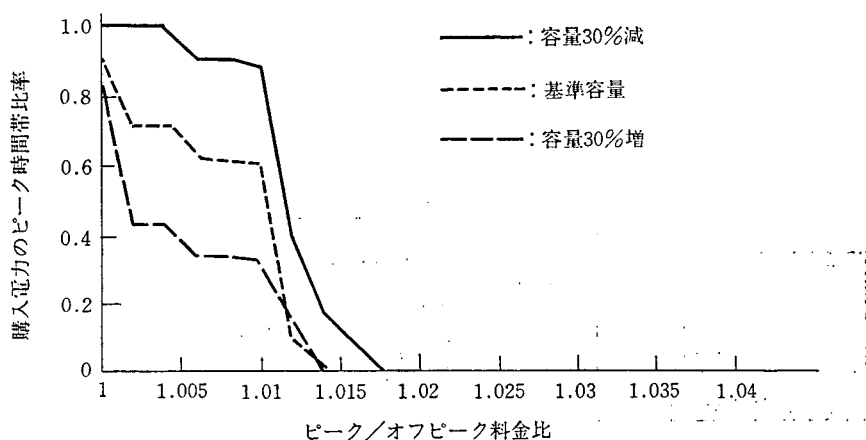


図 6 副生ガス (COG) 貯蔵設備容量と季時別料金への反応 (エネルギー自給度の高い製鉄所の場合)

うに影響するかを調べた。結果を図5に示す。自給度の高い製鉄所では、僅かな料金比に対しても敏感に反応して、購入電力の使用はオフピーク時間帯に移行しているのに対し、自給度の低い製鉄所の反応の感度は鈍く、料金比を大きくしてもオフピークへの完全な移行は生じていない。また、自給度の低い製鉄所では、料金比を大きくすると、オフピーク時間帯の購入電力量が単独で増大し、購入電力の総量が増加するという効果をもたらしている。これはオフピークの購入電力の価格が、重油等による自家発電より割安になるためと考えられる。

(2) 副生ガス貯蔵設備の効果

エネルギー自給度の高い製鉄所のプロセスモデルにおいて、コークス炉ガス (COG) の貯蔵設備の容量を ±30% 変化させた場合について検討した。図6は、季時別料金のピーク/オフピーク料金比の変化に対する、購入電力総量 (自給度の高い製鉄所では購入電力総量は季時別料金の下でも変化しない) に占めるピーク時間帯での購入電力量の比率の変化を示している。ガス貯蔵設備の容量を大きくすれば、季時別料金に対する反応が敏感になる傾向が示され

ている。

4. 電気機械製造業における電力需要調整の可能性

4.1 重電機製造業のプロセスモデル PRO-MHEM の開発と適用 [9, 10, 14, 15, 17]

重電機製造工場の生産プロセスは、鉄鋼業のような量産型ではなく、受注生産を基本としている。モデル化の対象とした工場の主要出荷製品は、原動機、回転電気機械、原子力機器と多岐にわたるが、生産額の大きさおよび電力需要調整の観点から、大型タービン発電機をモデルで操業計画の変更を行う対象製品とし、その他の製品の操業計画は固定した。

生産コストのうち、電気料金構造による操業計画の変更と関連する短期的なコスト要因は電力コストおよび労働コストである。生産工程毎の電力と労働の所要量についての予備的な考察から、季時別料金制の導入により操業計画の変更が費用効果的になる可能性のある工程は、大型タービン発電機の出荷前に行われる電気特性試験に限られることが明らかになった。そこ

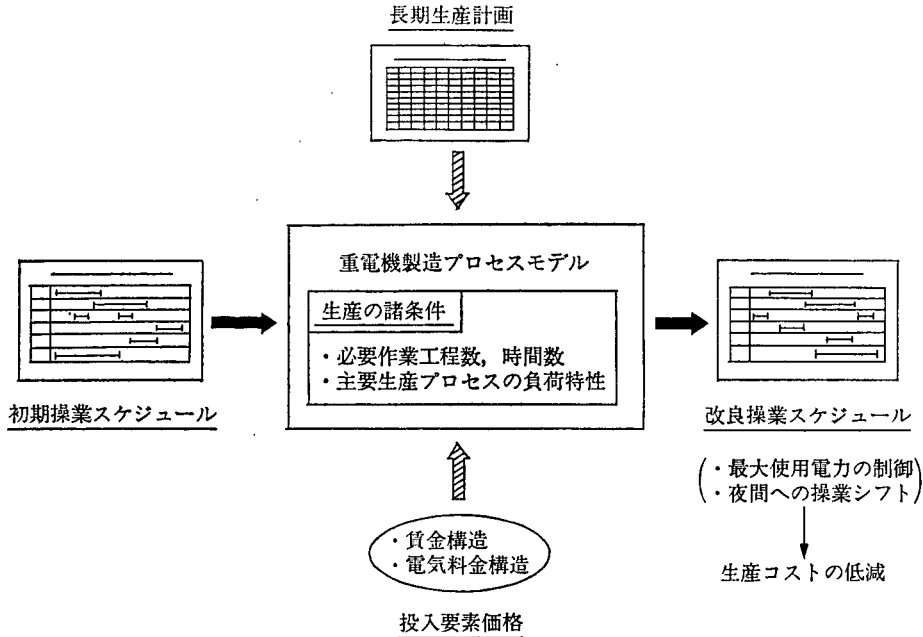


図 7 PROMHEM の概要

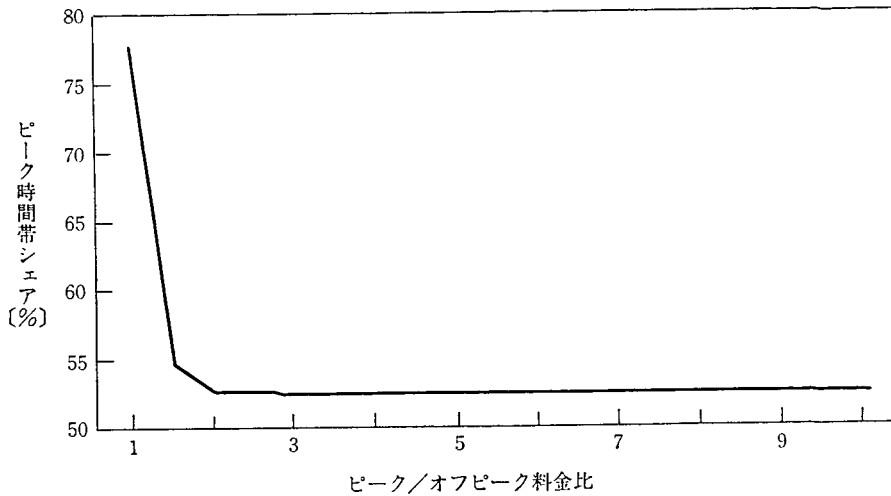
で、この試験工程に着目して料金による負荷移行効果を解析した。

重電機製造プロセスモデル PROMHEM は、PROMIS のような単純な線形計画モデルとはならず、整数計画問題として定式化される。計画期間は 1 カ月程度の短期モデルとし、基本製造工程および所要電力・労働投入を表す生産プロセスのモデルを作成した(図 7)。賃金率や電気料金構造等の投入要素価格および処理順序等の操業制約の諸条件下で、所与の製品出荷量を最小コスト(電力量料金および労働コストの和)で生産する最適操業計画問題として、モデルの定式化を行った。実際の求解にあたっては、厳密解(大域的最適解)を実用時間内で求めることは不可能であるため、初期解を逐次改良する発見的準最適化算法によって近似解を求めた。

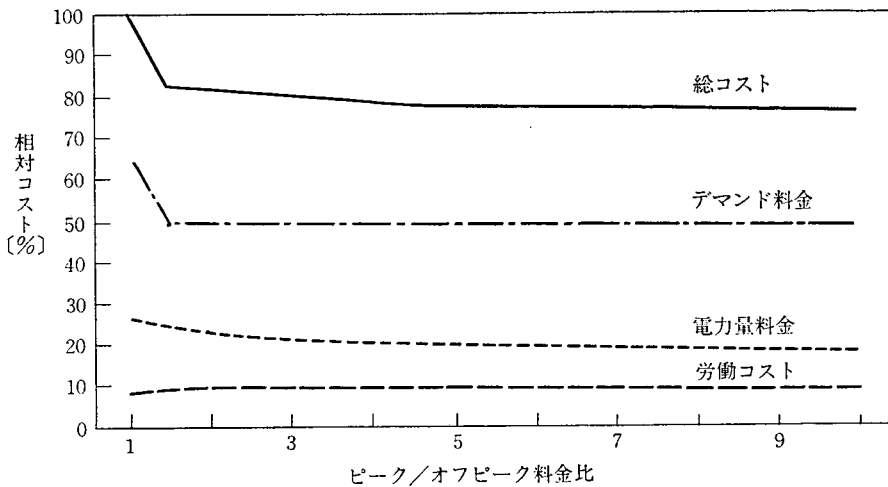
PROMHEM には、短期運転コスト(人件費と電力量料金)の低減を目的とするアルゴリ

ズム 2 種 [(A) 時間帯の番号の順番に、作業割当をコストが減少する方向へ逐次改良を行う; (B) kW/man の大きいアクティビティの順番に、(A) と同様の作業割当の逐次改良を行なう] と最大電力需要の低減を目的とするアルゴリズム [(C) 消費電力 [MW] の大きなアクティビティの順番に、作業割当を最大電力が減少する方向へと改良を行う] の 3 種の準最適化算法が組み込まれている。アルゴリズム A, B ともに、ほぼ同等のコスト削減をもたらし、これらとアルゴリズム C を組み合わせて反復適用すると 3 回程度で改良効果が収束することがケーススタディによって確認されている(参考文献 [14])。

PROMHEM (アルゴリズム A) を利用して、季時別料金に関する感度解析を行った。季時別料金(電力量料金)のピーク/オフピーク比を 1~10 の範囲で変化させたとき、試験工程についてはその工程の使用電力量の 20~25% がピ



(a) 電気特性試験工程の電力需要のピーク/オフピーク時間帯分布



(b) 生産コストの変化*

*:ただし、デマンド料金は一般電力を含む工場全体の電力使用をもとに計算。
電力量料金と労働コストは、試験工程に関するもののみ。

図 8 PROMHEM (アルゴリズム A) による季時別料金に対する反応の解析

ーク時間帯からオフピーク時間帯へ移行する可能性が示された (図 8)。電力負荷パターンは特に料金比 1~2 の間で大きく変化し、料金比 3 以上では季時別料金の効果は飽和した。ただし、試験頻度はそれほど高くないため、工場の年間を通しての全需要に与える影響はそれほど大きくはならない。したがって、きめ細かい時

間帯や料金差の設定、弾力的な電力契約など料金メニュー上の工夫が必要である。

また、短期運転コスト削減のアルゴリズム (A, B) に最大電力需要削減のアルゴリズム (C) を組合せて解析し、デマンド料金コストに関して大幅なコスト節減がもたらされることを見出した。今後、時間帯別にデマンド料金が

設定された場合には、試験電力や電気炉のような変動負荷を抱える需要家にとって、デマンド料金コスト、すなわち、最大需要の抑制が重要であるといえる。

4.2 量産型工場における電力需要調整の考察 [11, 12, 13]

家電製品など量産型の電気機械製造業についても、調査検討を行っている。工場の調査により、製造工程の各プロセス毎に所要電力と労働力のデータを集め、2.2節で述べた一人当たり電力需要 kW/man を評価したが、現状の製造工程の技術では、工場全体の平均値として 10～20 kW/man 程度であり、季時別料金を導入しても操業時間帯のシフトは期待できないことが判った。

ただし、今後製造工程の自動化によって kW/man 値が上昇した場合には、季時別料金の導入による効果が期待される。調査したデータに基づいて作成した、線形計画法によるプロセスモデルを用いた解析によって、工場全体の平均として 50 kW/man 程度が達成できれば、ピーク/オフピークの料金比が 10 以下の季時別料金によって電力需要の誘導が実現できることが明らかにされている。

5. 結 語

産業用需要家について、プロセスモデルと呼ぶ需要家行動モデルを開発して、電気料金制度による需要の誘導効果を評価した。プロセスモデルは、生産工程を一纏まりの操業単位である幾つかのプロセスの組み合わせとして表現したもので、種々の電気料金に対して、コスト最小となる操業計画を求めることができる。鉄鋼業と電気機械製造業の2業種について、プロセスモデルを開発し、季時別料金による負荷移行効

果を評価した。鉄鋼業は、副生ガス貯蔵装置の運用などにより、時間帯によって料金に変化する季時別料金に敏感に反応して購入電力の需要を夜間に集中することが出来ること、また、電気機械製造業では、最大電力の抑制に大きな効果が期待されること等の傾向が定量的に評価された。分析・評価対象を増やして、産業全体としての需要調整効果の推定を行うことが今後の課題である。

なお、本研究の推進にあたっては、電力中央研究所内にロードマネジメント研究会を設置して、調整を行っている。主査の茅陽一教授（東京大学工学部）をはじめ、同研究会のメンバーから数多くの有益な示唆をいただいた。特にモデル作成においては、対象とした産業界の方々から貴重なデータを提供していただいた。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- [1] 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 Second CRIEPI-EPRI Workshop on Energy Analysis, Tokyo, Japan, September 24-26, 1986, CRIEPI Report EY86006 (1987)
- [2] 山地, 浅野, 佐賀井: 産業用需要家のプロセスモデルの開発—鉄鋼業の事例—, 電力経済研究, No. 22 (1987)
- [3] 山地, 浅野, 佐賀井, 佐藤, 山岡: 季時別料金制下における産業用需要家の最過生産計画—プロセスモデルによる鉄鋼業の解析—, 第4回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1987)
- [4] 佐賀井, 浅野, 山地: 鉄鋼プロセス負荷モデル PROMIS—システムの構成と利用法, 電力中央研究所内部資料 No. 279 (1987)
- [5] 佐賀井, 浅野, 山地: 鉄鋼プロセス負荷モデルによる電力・季時別料金制の効果分析, 日

- 本 OR 学会昭和 62 年度春季研究発表会 (1987)
- [6] 山岡, 林, 茅, 山地, 浅野, 佐賀井: 鉄鋼業の電力需要調整モデル, 昭和 62 年電気学会電力技術研究会 (1987)
- [7] 浅野, 佐賀井, 山地, 長嶋, 長沼: 季時別料金制下における産業用需要家の電力需要調整—プロセスモデルによる重電機製造者の解析—, 第 5 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1988)
- [8] 山岡, 林, 茅, 浅野: 鉄鋼業における電力需要調整の評価, 第 5 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1988)
- [9] 浅野, 佐賀井, 山地: 季時別料金制下における重電機製造業の電力需要調整の評価, 電力経済研究 No. 24 (1988)
- [10] Asano, H., S. Sagai, and K. Yamaji: Microscopic Analysis of Industrial Customers' Response to Time-of-Use Rates: Case Studies for an Integrated Steel Mill and a Heavy Electrical Apparatus Works, CRI-EPI Report EY87002 (1988)
- [11] 土屋, 林, 茅: 生産計画への季時別電気料金制導入と自動化, 昭和 63 年電気学会全国大会講演論文集 (1988)
- [12] 土屋, 林, 茅: 軽電機産業への季時別電気料金制度導入シミュレーション, エネルギー・資源研究会第 7 回研究発表会講演論文集 (1988)
- [13] 土屋, 林, 茅: 産業電力需要への季時別電気料金制度の適用, 昭和 63 年電気学会電力技術研究会 (1988)
- [14] 浅野, 佐賀井: 重電機製造プロセスモデルの開発 (I)—季時別料金制下の電力需要調整—, 電力中央研究所研究報告 Y88010 (1988)
- [15] 佐賀井, 浅野: 重電機製造プロセスモデルの開発 (II)—PROMHEM システムの構成と利用法—, 電力中央研究所研究報告 Y88013 (1988)
- [16] Asano, H., S. Sagai, and K. Yamaji: Process Models for Assessing Industrial Response to Time-of-Use Rates, The Annual North American Conference, IAEE (1988)
- [17] 佐賀井, 浅野, 山地: 産業用需要家における電力需要調整可能性の定量的評価—重電機産業の事例を中心に—, 第 6 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1989)
- [18] 山岡, 茅: 時間帯別料金制に対する産業用電力需要調整モデル—わが国の鉄鋼業について—, 電気学会論文誌 B, Vol. 109, No. 1 (1989)

(やまじ けんじ
 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)