産業連関表形式による業務用エネルギーシステムの評価：多様な業種と経済成長

室工大紀要第 55 号　(2005)　25～32

産業連関表形式による業務用エネルギーシステムの評価
―多様な業種と経済成長―

高野　茂[*1]，小幡　英二[*2]

An Evaluation of the Commercial Energy System on Industry Association Table - many sectors of the economy and the growth rate of GDP -

Shigeru Takano and Eiji Obata

（原稿受付日　平成 17 年 5 月 23 日　　論文受理日　平成 17 年 9 月 2 日）

Abstract

The developed countries, except for the USA, have ratified the Kyoto protocol as of February 16th, 2005. Under the protocol, Japan must carry out the promised reduction in emissions of 6.0 percent from 1990 levels during 2008 - 2012. Using an M-model of elasticity approximation, we have estimated that the commercial energy consumption in 2012 will be 2.83 x 10^{18} J/Year. The optimum system for the commercial energy has been discussed by means of the industry association table.

Keywords : Commercial energy consumption, Cogeneration, Industry association table, Global warming, Kyoto protocol

1　はじめに

京都議定書の発効により，気候変動枠組み条約の締結国は 2012 年の第一約束期間までに，温室効果ガス排出量の削減義務を果たさねばならない。日本の温室効果ガス削減量は 1990 年基準より６％減であるが，すでに 2002 年度時点で 7.6%増加しており，差引き 13%以上の削減が必要になる。

*1　物質工学専攻（太陽電設（株）常勤顧問）
*2　応用化学科

部門別にみると産業部門が不況や省コストで 1.7%減少したものの，民生部門の家庭用が 28.8%増加，業務用が 36.7%増加，運輸部門が 20.4%増加で民生部門の業務用の増加が著しい。

業務用は，事務所・ビル，デパート，卸小売など商業･サービス業に係る９業種に分類され，業態が多種であるうえ規模も中小から大規模に至るまで巾も広く，最終エネルギー消費形態の電気と熱の比率が多様で，分散システムの導入などエネルギー供給方法には検討課題も多い。

民生部門は，近年，IT 化の進展，作業環境の改善など技術革新や，職住一致などライフスタイルの変化と，エネルギー需給が複雑に絡み合

い，エネルギー有効活用や省エネルギーで統一的・包括的な施策に苦慮する部門である。

2 業務用エネルギー消費量の推移

図 2-1 に業務用の業種別エネルギー消費量の時系列推移を示す。事務所・ビル，卸小売の増加が大きく，学校，娯楽場，飲食店がやや増加傾向である。

業務用のエネルギー増減要因は床面積が関連するので, 図 2-2 に床面積の時系列推移を示す。事務所・ビル, 卸小売の伸びが大きく, IT 関連, 複写機など事務機器類のスペース拡大がエネルギー消費量増大の要因であることを示している。

図 2-3 に業種別床面積あたりのエネルギー消費量を示す。業種別で原単位が大きいのは飲食店，ホテル・旅館，病院であるが，全業種にわたるオイルショック以後の減少傾向は, 動力他, 冷暖房機器類の省エネルギー効果によるものであろう。1990 年以後の床面積当たりのエネルギー消費量は病院を除いて各業種ともほぼ平衡状態にある。

3 エネルギー源別と用途別のエネルギー消費量の動向

図 3-1 に業務用のエネルギー源別および用途別のエネルギー消費量の推移を示す。エネルギー源別ではガスが増大傾向，石油は横ばい若しくは減少傾向である。用途別では IT，電気機器類の普及の著しい動力他が増大傾向であるが，それ以外の変動は少ない。

実態として業務用のエネルギー消費は，動力他・冷房が電気エネルギー，厨房と給湯，暖房は電気エネルギーと化石燃料の石炭，石油，ガスの熱エネルギーが混在している。この中には，転換部門（電力，ガス，熱供給事業）のエネルギー損失（消費量）は含まれていない。
エネルギー源別分類の電力は，用途別分類の動力他と冷房の和との差異が少なく電力のシェアが圧倒的に大きいことを示している。図 3-2 に 1990 年基準の増減率を示す。石油危機以後の差異の増加率がより大きいことから，冷房などに熱エネルギー（吸収式冷凍機）が増加していることを示している。

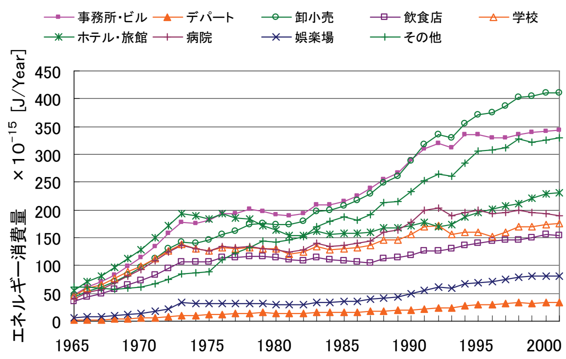

図2−1 業種別エネルギー消費量 エネルギー・経済統計要覧より作成

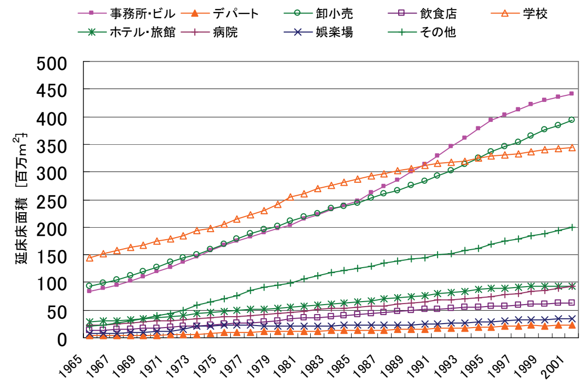

図2−2 業種別延床面積 エネルギー・経済統計要覧より作成

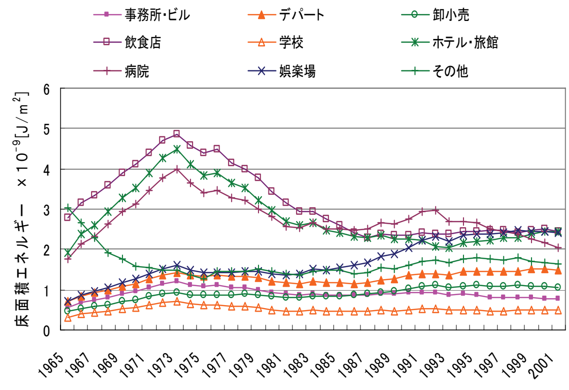

図2−3 業種別床面積当たりエネルギー消費量 エネルギー経済・統計より作成

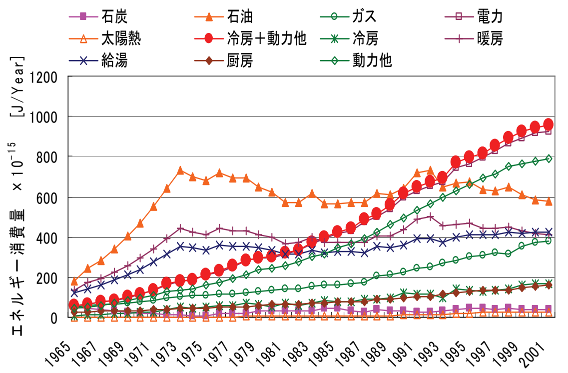

図3−1 用途別･エネルギー源別のエネルギー消費量 エネルギー・経済要覧より作成

4 GDPと原油価格（CIF）の業務用エネルギー消費量に与える影響

原油の運賃保険料込み値段であるCIF価格は中国の輸入量増加と中東の政情不安より急騰している。経済学にしたがって、一般的な財の需要の式を援用し，エネルギー消費量（E）を，所得水準（Y：GDP）と価格（P：原油価格）とすると

$$E = \alpha Y^{a} P^{b} \qquad (1)$$

が当てはまる。aは所得弾性値，bは価格弾性値である。両辺の対数をとれば

$$\ln(E) = \ln\alpha + a \cdot \ln(Y) + b \cdot \ln(P) \qquad (2)$$

となり，弾性値a，bと切片αを連続的な期間区分の回帰分析で求めた。図4-1に，1992～2000年のSモデル（経済低成長・消費低迷期），1986～2000年のMモデル（石油危機過ぎから現在まで），1974～2000年のLモデル（石油危機前の経済安定期から現在まで），1986～1991年（石油危機過ぎから経済低成長・消費低迷期前までの期間）の業務用エネルギーのGDPに対応するYの弾性値a，原油価格Pの弾性値b及び切片αを示す。

同様に，業種別のエネルギー消費量に対するGDPの弾性値，原油価格の弾性値及び切片を図4-2に示す。原油価格の弾性値は期間による区分，業種別の区分を問わずゼロにちかく，業務用エネルギーは非弾性的な必需品であることを示している。

2012年の業種別エネルギー消費量をGDP弾性値から予測すると図4-3になる。GDPの影響が大きいのは，娯楽場，デパート，卸小売の順である。

図4-4に，業務用のエネルギー消費量の2012年の予測値をGDPによる弾性値，ロジスティック近似値および直線近似値で示す。弾性値と直線近似の差異は少ないが，GDPとの関連のないロジスティック近似値には多少の差がある。エネルギー消費量の予測は経済状況との関連が重要なので，2012年の業務用エネルギー消費量の予測はGDP弾性値による近似値を基準とする。

5 産業連関表形式による CO_2 排出量の推定

電力，ガス，熱などのエネルギー供給は，基本的には事業ごとに定められた法律で相互関係

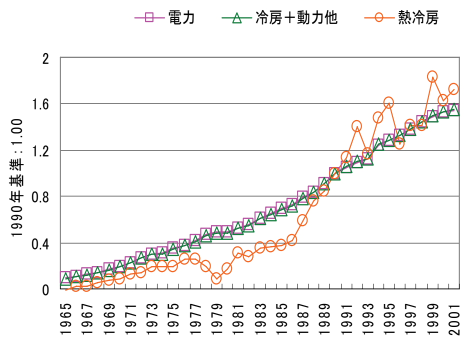

図3-2　電力と冷房＋動力他と熱冷房の推移

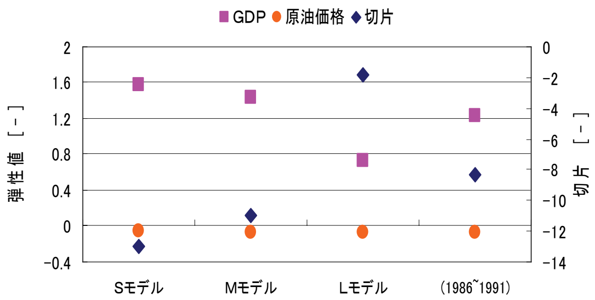

図4-1　業務用エネルギーのGDPと原油価格弾性値

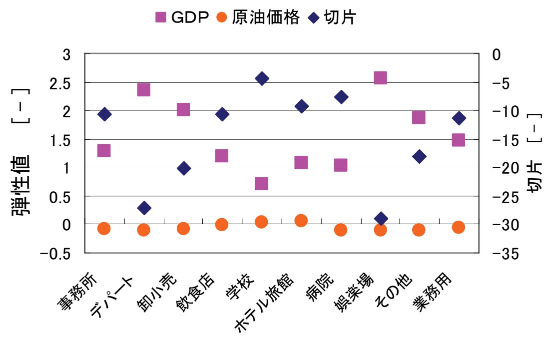

図4-2　1986～2001基準のGDPと原油価格の業種別ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量弾性値

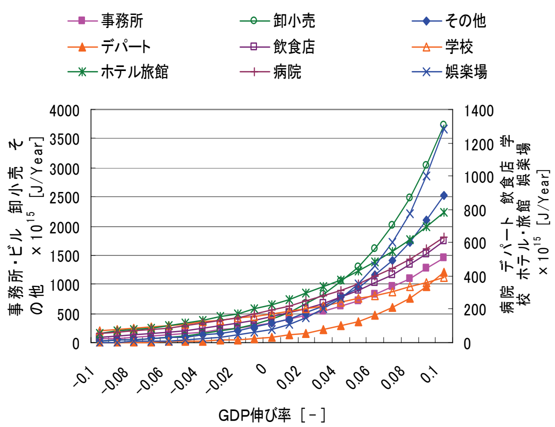

図4-3　2012年の業種別エネルギー消費量

を調整されながら発展してきた。しかし，近年の分散型システムや自然エネルギーの導入により，あらたな事業形態が創出されるようになり，事業者間の競合が複雑さを増している。ゆえに，エネルギー供給システムの動向，成果などを定量的に分析し，地球環境問題に対して全体的・統合的な調整機能をもたせる必要性が生じている。

産業間の関連性を分析する手法としては，定期的に公表される産業連関表の活用が有効で，近年は産業の拡充，地域との連携，新産業への影響・効果を数量的に推測する研究開発が進められている。地球環境問題に関しても，エネルギー需給，資源リサイクルなどを産業関連表形式による研究開発が報告されている。

以下，全国を一括した業務用のエネルギー消費量で，従来のエネルギー供給システムと，コジェネレーションや太陽光など新エネルギーを導入し，電力，ガス，熱供給事業など異なるエネルギー供給システムを複合化したモデルの CO_2 排出量を推算する。

6　産業連関分析の基本モデル

一般に産業連関表は，財の入出量を金額の行列で現わしたものである。図 6-1 に産業連関表の基本構成を示す。基本的に

（1）産業連関表
（2）投入係数表
（3）逆行列係数表

の３表で構成される。

産業連関表は生産物１単位を生産するのに必要な他部門からの原材料を縦方向，販路，産出物への配分を横方向とする行列式で，入力係数は

$$A = A_j = \begin{matrix} a_{11} \cdots a_{1j} \cdots a_{1n} \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ a_{n1} \cdots a_{nj} \cdots a_{nn} \end{matrix} \tag{3}$$

で現される。最終需要F，総生産をXで表すベクトルとすると，中間投入はAXとなるから，

$$AX + F = X \tag{4}$$

で現され，総生産量Xについて解くと

$$X = (I - A)^{-1} F \tag{5}$$

となり，最終需要から総生産量を算出することができる。I は単位行列であり，$(I - A)^{-1}$ をレオンチェフ逆行列と言う。また，１単位投入されたときの産物・排出物を表す出力係数は

$$E = E_j = \begin{matrix} e_{11} \cdots e_{1j} \cdots e_{1n} \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ e_{n1} \cdots e_{nj} \cdots e_{nn} \end{matrix} \tag{6}$$

で現されるから，システム全体として，

$$(E - A)X \geqq F \tag{7}$$

が得られ，Xは線形方程式の最適基底解を得ることで求まる。

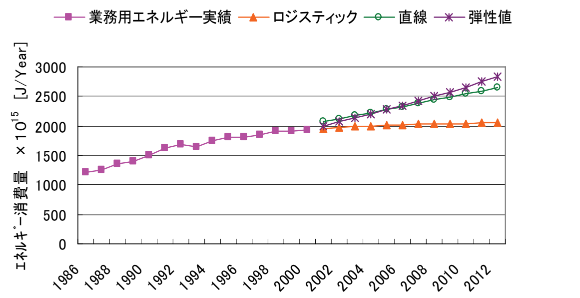

図4-4　2012年の業務用エネルギー消費量予測

（買い手）→ 需要部門 (売り手) ↓供給部門		産業部門 1.2.3.. …	最終需要 消費 投資 輸出	輸入（控除）	総生産
産業部門	1. 2. 3. · ·	産出の配分 投入の構成 A・X	F		X
付加価値	雇用者所得 営業余剰 など				
		総生産			

図 6-1　産業連関表の基本構成

7　産業連関表による CO_2 排出量とエネルギー転換効率

電源構成別 CO_2 排出原単位[13]とエネルギー源別 CO_2 排出原単位から，石炭・石油・LNG の発電効率と CO_2 排出原単位の計算値を示す。図 7-1 に示した太陽，風力，地熱，原子力，水力の発電効率は定義になじまないので表示しない。

エネルギーの最終需要を電力と熱に分類し，エネルギー供給システムを商用電力，ボイラ，コジェネレーションを電主熱従と熱主電従に分類する。

ボイラの燃料消費量を下表と推測する。

表 7-1　　ボイラ燃料消費量

エネルギー源	熱発生率	ﾎﾞｲﾗ効率	投入量
石油	0.6	0.7	0.8
LNG	0.4	0.8	0.5

また，コジェネレーションの燃料は LNG とし，転換効率を 0.8 とすると下表が得られる。

表 7-2　　電力対熱の発生割合

生産物	電/熱　発生比	電主熱従	熱主電従
電力	0.437	1.00	0.778
熱	0.563	1.29	1.00
LNG 投入量		2.86	2.22

一次エネルギー投入量は下表が得られる。

表 7-3　　石油・石炭・LNG の発電率と発電効率

ｴﾈﾙｷﾞｰ源	石油	石炭	LNG
発電率　A	0.41	0.21	0.31
発電効率　B	0.354	0.367	0.372
商用電力投入量 A/B	0.254	0.572	0.833
ボイラ投入量	0.8		0.5
コジェネ電主熱従			2.86
コジェネ熱主電従			2.22

以上の制約条件と図 7-1 の CO_2 排出原単位から，電力，熱の余剰（≧）を等号（＝）にするため電力・熱スラック変数をいれた連立方程式が得られ，分析対象となるシステムに応じた最適ベクトルを算出することができる。

8　商用電力とボイラ，コジェネレーション別の 2012 年 CO_2 排出量予測

図 4-4 から 2012 年の業務用エネルギー消費量はMモデル（石油危機過ぎから現在まで）の弾性値による近似で $2833 \mathrm{x} 10^{15}$J と予測される。

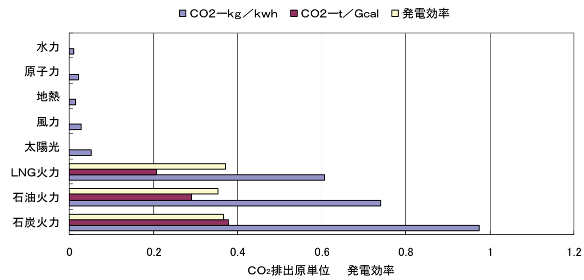

図7－1　電源別CO2排出原単位と発電効率

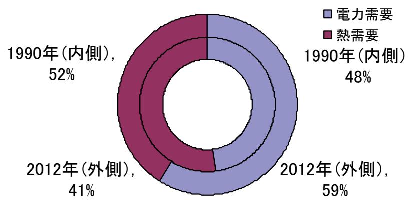

図8－1　業務用エネルギー消費量の電熱比

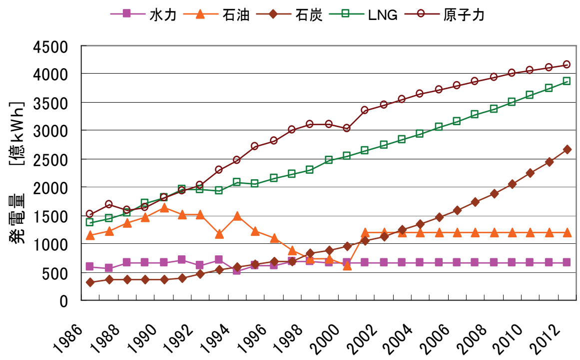

図8-2　2012年の電源別発電量の予測

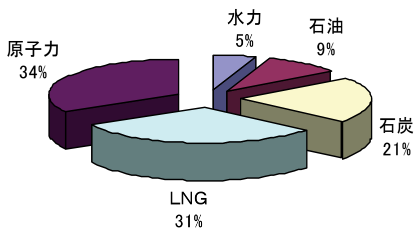

図8-3　2012年の電源別発電比率

また，業務用エネルギー消費量の 1990 年と 2012 年の電力需要と熱需要（実際の必要熱量を 0.8 として）の比率を図 8-1 に示す。需要構成比で熱需要が減少し電力需要が増加傾向にあり，エネルギー供給システムの選択が変革期にあるこ

とを示している。

統計資料(5)の一般電気事業用（９電力会社）による実績の伸びから，電源構成の変化が激しいのでロジスティック近似で，2012 年の電源別発電量を推算すると図 8-2，発電構成比は図 8-3 が得られる。

1990 年，2012 年の電源構成から，商用電力の CO_2 排出原単位は 1990 年が 0.436kg - CO_2/kWh，2012 年が 0.468kg - CO_2/kWh と推算される。

業務用エネルギー消費量の総量を一体のものと仮定して，2012 年の需要構成，商用電源構成から，産業連関分析でエネルギーシステム別の CO_2 排出量を比較すると図 8-4 が得られる。（前提としてコジェネレーションの燃料は LNG とする。）1990 年の実績および削減目標値に比較して，どのシステムでも大巾な増加である。運用については，熱主電従（電力余剰）ケースの CO_2 排出量が最も少ないが，家庭用の電力も余剰になるので売電による需給調整は難しい。

熱主電従で電力の不足分を商用電力もしくは代替電力で充当するのが，次善の策として考えられる。CO_2 排出量は少ないが，現状の商用電源の CO_2 排出原単位では 1990 年基準より６％減の目標達成は困難である。

9　太陽光導入による 2012 年の CO_2 排出量の削減

著者らは家庭用の CO_2 削減に太陽光発電が有効であることを論じてきた(2)。太陽光発電は日射の影響で不安定ではあるが，化石燃料のうち石油や天然ガス火力発電は負荷調整でバックアップできるので，昼間の太陽光発電を業務用負荷に最大限転用すればよい。

太陽光発電の設備容量としては年間ピークの約 40%まで，発電量は CO_2 排出原単位の小さい範囲とすれば年間発電量の 20%程度まで導入は可能と見込まれる。図 9-1 に CO_2 排出原単位の最も多い石炭発電を太陽光発電で置換え，熱主電従（電力不足）のコジェネレーションを導入にした場合の CO_2 排出量と発電事業の CO_2 原単位を示す。発電事業の CO_2 原単位は減少するものの，業務用の CO_2 排出量は目標値には到達しない。

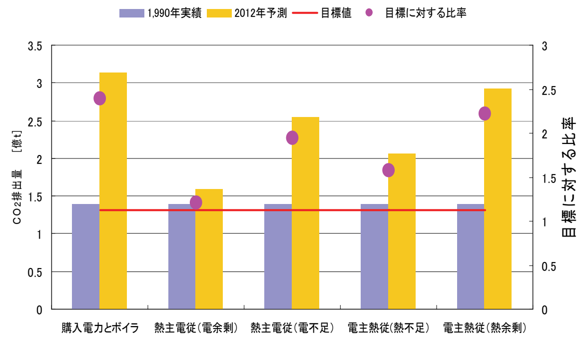

図8-4　システム別　CO_2 排出量

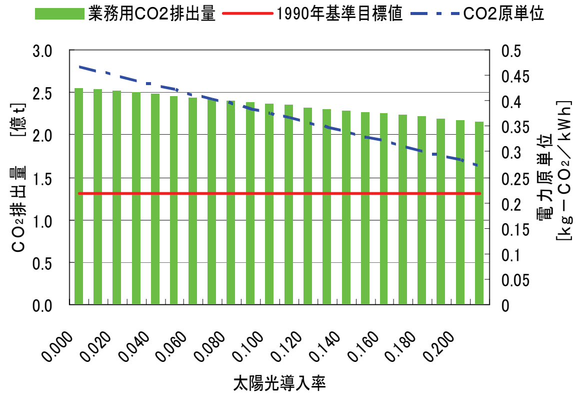

図9-1　2012年太陽光導入とCO2排出量

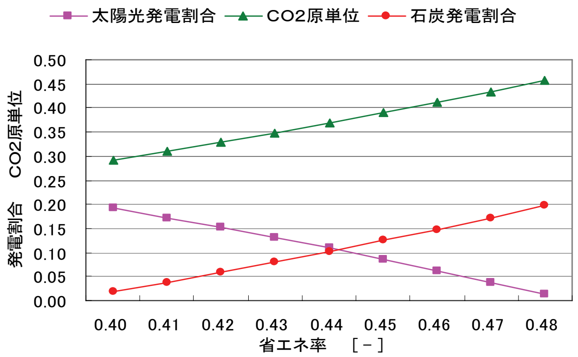

図10-1　省エネ率と太陽光と石炭発電の割合

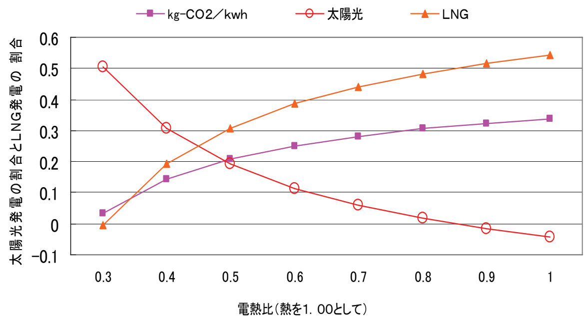

図11-1　電熱比と従来システム・コジェネレーション

10　省エネルギーと太陽光の導入および石炭削減

業務用エネルギー消費量は，熟成型社会の重要な要因となるうえ，ビジネス活動の高効率化や運輸部門の旅客エネルギー削減効果もあるので，無原則・画一的なエネルギー削減は慎まなければならない。業務用エネルギー削減のポイントは，さらなる利用機器類の原単位低減と床面積増加の抑制である。IT，暖冷房，建物の断熱工法などで省エネルギーが期待できる。図10-1に熱主電従（電力不足）ケースによりCO_2削減目標値をクリアする条件で，省エネルギー率をパラメータに太陽光発電と石炭発電の相殺関係と，電気事業のCO_2原単位を示す。省エネルギーが進めば石炭消費量は増量が可能である。重要なことは発電事業のCO_2排出原単位により，従来システム（商用電力＋ボイラ）とコジェネレーションのいずれを選択すべきかが判断基準になる.

11　従来システムとコジェネレーション方式の得失

業務用エネルギー消費量の削減が進まない場合は，石炭・石油火力は極力抑制せざるを得ない。原子力発電をベース電源としCO_2排出原単位の小さい水力とLNGを負荷変動に運用する場合を想定する。図11-1に従来システムと熱主電従で電力不足ケースの発電事業におけるCO_2排出量原単位を示す。従来システムとコジェネレーションの選択分岐点は,電力比(熱基準;1.00)が 0.4～0.8 でCO_2排出原単位が 0.14～0.31（kg-CO_2/kWh）となり，太陽光，LNG，原子力を大幅に増加しない限りコジェネレーションが優位となる。

電主熱従の熱余剰は熱を捨てるだけ，電主熱従の熱不足はボイラの追炊きとなる。業務用エネルギーにコジェネレーションを検討する場合は，発電事業のCO_2排出量原単位と電熱負荷の将来予測をして導入を決定することが重要である。

12　産業連関表の特徴と課題

本稿では，業務用エネルギー消費量をマクロの最終エネルギー消費量で評価をしたが，実際にはミクロの業種別，地域別，規模別で実用化されるものである。コジェネレーションは熱の輸送が経済性をともない難いので，分散システムは熱需要に近い場所に設置し，電熱バランスの調整機能を発電事業が果たすべきことを示唆している。

エネルギーシステムの選択に際して産業連関表の援用は，

① 国，業界，地方自治体，個別企業など規模の大小を問わない。
② 石炭，石油，天然ガスなどの化石燃料や水力，原子力など多様なエネルギー源が一元的に評価できる。
③ 事務所・ビル，病院，卸小売など業種を問わず最適化ができる。
④ 運用面で，年間の季節，月，週，日負荷の変動に対応できる。
⑤ 電熱比が改善できる吸収式冷凍機などの導入評価が可能になる。

など実用性も高い。一方，

① エネルギー統計の整備が不可欠である。
② エネルギー消費における電熱量の実態把握が必要である。
③ 経済活動の動向とエネルギー消費量の定量的把握が可能になる。

の条件整備が必要である。

13　むすび

業務用エネルギーの消費は業種の多様化，企業規模の格差，経済性の重要さなどで，省エネルギーや分散システムの選択など抜本的な改善には課題も多い。ITや情報機器の普及拡大は他部門のエネルギーの削減に寄与し，ヒートアイランドによる暑い夏の冷房完備はビジネスの円滑な遂行にも必要であるから，画一的な抑制は困難である。

業務用は熟成社会の経済成長のキーとして位置づけられるエネルギー消費である。経済性や市場原理が優先される社会システムの中で，企業が多量の生産品で利益を得ることを非難される筋合いはないし，ライフサイクルとして暖冷房完備のオフィスビルで仕事をするのも当然の権利であり,オイルショック後の1980年代後半から，省エネルギーの語りが遠ざかった気配も感じられる。だが，地球環境にはそれを容認できる余地はもはや少ない。京都議定書の発効は抜本的な地球温暖防止シナリオの実効性をかけ，

法改正，税制改革，技術革新など経済社会システム改革の正念場と言えよう。

参考文献

(1) 高野茂・小幡英二；文明史にみられる人口・エネルギー消費の推移―永続的社会の構築を目指して―　開発技報，46　(2003.10)

(2) 高野茂・小幡英二；住宅用太陽光発電システムとガスコージェネによる CO_2 削減効果に関する一試算　室蘭工業大学紀要　第54巻　pp.147-154　(2004)

(3) 資源エネルギー庁長官官房総合政策課；総合エネルギー統計 平成13年度版

(4) 内閣府経済社会総合研究所；経済要覧　平成15年版

(5) 日本エネルギー経済研究所　計量分析部；エネルギー経済統計要覧　2003年版

(6) 総務省統計局・統計研修所；日本の統計 2003

(7) エネルギー・資源学会；エネルギー・資源ハンドブック(1996.11)

(8) 資源エネルギー年鑑編集委員会;2003･2004 資源エネルギ年鑑　通産資料出版会　(2003.1)

(9) 通商産業省　資源エネルギー庁省エネルギー対策課　監修 省エネルギー総覧　2000･2001 (2000.2.29)

(10)　不破敬一郎　森田昌敏；地球環境ハンドブック　(2002.10.25)

(11) 産業環境管理協会　茅　陽一監修;環境ハンドブック (2002.10.10)

(12) 日本能率協会総合研究所;産業別にみた中期需要予測　通産資料出版会　(2003.6.30)

(13) 経済産業省；エネルギー白書　2004 年版 (2004.6.15)

(14) 縄田和満；Excelによる回帰分析　朝倉書店
(2001.4)

(15) 林　茂雄・馬場　涼訳；計測における誤差解析入門　東京化学同人　(2000.7)

(16) 小宮山　宏；地球持続の技術　岩波新書 (2002.4)

(17) 茅　陽一；CO_2 削減戦略　日刊工業新聞社 (2000.8)

(18) 首都圏白書；平成14年版 (2003.8)

(19) 石丸公生;天然ガス燃料電池　日刊工業新聞社　(1994.9)