

アジア・太平洋地域における環境とエネルギーに関する 分析モデルの開発

Development of an Analytical Model for the Environment and Energy
in the Asia-Pacific Region

松井 賢一 (Ken-ichi Matsui)* 武井 満男 (Mitsuo Takei) †
長田 紘一 (Kouichi Osada) ‡ 中澤 康晴 (Yasuharu Nakazawa) ‡
安岡 理恵子 (Rieko Yasuoka) ‡ 平木 忠男 (Tadao Hiraki) §
守川 伸一 (Shin-ichi Morikawa) ¶ 西岡 弘雅 (Hiromasa Nishioka) ¶

要約 近年のアジア地域の経済成長は極めて高く、工業化の進展、民生の向上、モータリゼーションの進展を背景にエネルギー需要が急増している。一方で、中国は石油の純輸入国となり、インドネシア、マレーシアなどの石油生産も停滞しており、アジア域内のエネルギー需給はタイト化し、中東への依存度が急速に高まる方向にある。また、エネルギー消費の増大に伴って、環境問題が深刻化している。このような状況を背景に大阪で開催されたAPEC首脳会議では、エネルギー分野における各国間の協調の重要性が唱えられた。原子力発電の分野においては、韓国、台湾が日本に次ぐ原子力発電国となっているが、更に、中国が21世紀の比較的早い時期に、3億5千万kwの発電能力を確保するという計画を発表している。そのほかにもインドネシア、タイ等が原子力発電所の建設を検討している。

本研究は、このような状況を背景に、既存のエネルギー需給モデルとして既に定評のあるエドモンド・ライリーモデル、グリーンモデル、MARKAL等のモデルの長所を取り入れつつ、原子力発電を含む一次エネルギーの供給量のアベイラビリティ、精製装置建設計画等に基づく二次エネルギーの供給量の変化等が、アジア・太平洋地域における環境とエネルギーにどのような影響を与えるかを分析できるモデルを開発したものである。

キーワード アジア太平洋、最適化モデル、エネルギー、環境、原子力

Abstract The demand for energy in the Asian region is increasing rapidly accompanying the extremely high rate of economic growth, development of industry, improved standard of living and the propagation of motor vehicle use in recent years. On the other hand, China has become an exclusive petroleum importing country, while petroleum production in Indonesia, Malaysia and other oil-producing countries in the region has become stagnant. Thus, the balance between energy supply and demand within the Asian region has become increasingly tight, resulting in a rapidly growing trend towards higher dependency on Middle Eastern oil. In addition, accompanying this increase in energy consumption, problems affecting the environment are becoming increasingly serious. In view of these circumstances, the importance of cooperation between each country in the field of energy was strongly advocated the meeting of APEC leaders held in Osaka. In the field of nuclear power generation, although South Korea and Taiwan already generate energy by nuclear power on a scale only second to Japan in the region, China has also drafted plans for securing a power generation capacity of 350 million kilowatts relatively soon after the turn of the century. Other countries, including Indonesia and Thailand, are also studying the construction of nuclear power plants.

This research involves the development of a model that is able to analyze what types of effects the availability of primary energy supplies, including nuclear power generation, and changes in secondary energy supplies, based on refinery construction projects and so forth, will have on the environment and energy balance in the Asia-Pacific region, while incorporating the merits of existing and proven energy supply and demand models such as the Edmond-Riley model, Green Model and Markal model.

* 龍谷大学 国際文化学部

† 名古屋経済大学 経済学部 名誉教授

‡ (株) エス・アール・シー

§ (株) 原子力安全システム研究所 社会システム研究所
現 関西電力(株)本店 人材活性化室

¶ (株) 原子力安全システム研究所 社会システム研究所

in view of the present situation in this region as described above.

Keywords Asia-Pacific region, optimization model, energy, environment, nuclear power

1. 既存モデルの調査

本研究では、はじめに既存のモデルについて調査した。エネルギーと環境の問題を分析するモデルは、一般に計量経済モデル、最適化モデル、均衡型モデルなどに分類できる。また、対象とする地域に着目して分けると、国内モデルとグローバルモデルに分類できる。一般に国内モデルは輸出入は与件とし、国内的な環境制約の下でその影響分析、対抗手段の評価を行う。一方、グローバルモデルでは、グローバルな環境制約が各地域に及ぼすマクロ経済的影響を推定するものから、より複雑な相互波及効果や技術移転などが組み入れられているものまで、様々なものが開発されている。これまでに開発された主要なエネルギーと環境の関係を扱ったモデルには以下のようなものがある。

はじめに外国で開発されたモデルについて見ると次のようになる。

Nordhaus and Yohe (1984)

地域毎の資源制約と交易を扱っている最適化モデルであり、エネルギー資源は化石、非化石の2種類に簡略化されている。

Edmonds and Reilly (1983)

推定されたエネルギー供給関数と簡略化されたマクロ経済部門および民生部門モデルから派生需要として定義されるエネルギー需給関数を、価格を媒介としてリンクしている部分均衡モデルである。

Jorgenson and Wilcoxon (1990)

産業連関分析を骨格とする多部門一般均衡型のモデルであり、各産業および民生部門の環境規制への対応を定式化している一国モデルである。

Manne and Richels (1990,1991)

経済成長論の枠組みを持つ一般均衡型最適化モデルであり、世界を石油の貿易を含む12地域に分割し、全期間の効用最大化を行うモデルである。

OECD GREEN(Burniaux et al.1991,Hoeller and Wallin,1991)

12部門、7地域からなる中期、一般均衡モデルで、エネルギー以外の産品も取扱っており、グローバルなCO₂排出量抑制の費用推定を第1の目的としている。

次に日本で開発されたモデルについて見ると次のようになる。

後藤モデル(1991,1993)

長期を対象とした一般均衡理論の枠組みによって構築された国内モデルであり、最適化モデルを使用している。

EPA(経済企画庁)モデル(筑井,1991)

経済成長論におけるターンパイク理論に立脚した長期国内モデルであり、種々の環境制約下における最適経路がシミュレートされる産業連関モデルである。

電中研モデル(山地1991,永田1991,他)

エネルギー価格上昇が与える影響を、直接的な影響と間接的な影響を含めて、計量経済学的に推定された関係によって将来予測を行う中期国内計量経済モデルである。

(財)エネルギー経済研究所モデル(伊藤,1991)

エネルギー価格上昇によるマクロ経済への影響をシミュレートする比較的小規模な計量経済モデルが原型である。

伴モデル(1991)

エネルギー価格上昇が誘発する生産要素間の代替および技術進歩等の役割にウェイトを置いた一般均衡モデルである。

森モデル(1990)

2次エネルギーごとに需要曲線の特性と相互関係を計量経済的に推定し、体系化したもので、モデルが簡素化されていることが特徴である。

CRC総合研究所モデル(山崎1991)

一般的な中規模マクロ計量経済モデルであり、構造方程式52本、定義式62本からなる。

黒田・新保モデル(1993)

動態的な投資と資本蓄積過程を新古典派最適成長

表1 既存のエネルギーモデルの比較

モデル	モデルタイプと計算期間	モデルの概要	新エネ・省エネ技術の取り扱い	CO ₂ 削減シナリオとケーススタディ（税率等）	税の還元	課題・備考等
1 エドモンドライリーモデル（1991） 山地憲治 電力中央研究所	均衡型 1975～2000 （2100年）	世界9地域からなり、エネルギーの取引が取り扱われる。1次エネルギー7種類、2次4種類、関数としてロジスティック曲線が使われている。	バイオマス ソーラー	①標準；課徴金，排出許可無し（2100年まで計算） ②排出許可需給均衡；課徴金と排出許可 ③課徴金；課徴金のみ ④太陽エネルギー促進，省エネ技術促進	有	
2 OECD（1992） / GREEN	均衡型 ～2050	世界を12地域に分割した動学的一般均衡モデル。1次エネルギー4種，2次エネルギー2種，完全な貿易リンクを持つ，交易条件変化の影響も考慮される。	抽象化された再生可能エネルギー 化石燃料のクリーン技術（MIT改良中）	全世界で2000年までに排出量を1990年レベルで安定化 2000年 \$221 2005年 \$259 2010年 \$1	有	省エネ投資効果のモデル化，消費関数の精緻化が必要
3 MARKALモデル （1994） 加藤和彦， 村田晃伸 工技院電総研	最適化 1988～2032 （1期5年）	エネルギーの変換，輸送，貯蔵，利用，排出物制御等に係る技術を300種にわたり詳細に表現したモデル。CO ₂ ，SO _x ，NO _x の環境への排出量と経済性両面から技術ベストミックスを分析	新エネ；地熱，太陽，海洋，風力，ごみ発電等を詳細に表現。 最大導入量は外生 省エネ；効率向上を技術別に外生設定。 コージェネ，ヒートポンプ等もオプション可能	最終エネルギー需要伸率（年） 90～2000 1.9% 90～2010 1.7% 90～2030 1.3% CO ₂ ペナルティ ①無し ②9900円/t-c ③15600円/t-c	無	目的関数=システムコスト+排出量×ペナルティ 現在価値換算（6%） SO _x ，NO _x 排出量 2000年以降安定化 CO ₂ 回収発電含まず 2000年迄の設備容量は現在計画で固定
4 FUGIモデル （1991） 大西 昭 創価大学	計量経済 1990～2000	世界各地域のマクロ経済モデルは貿易マトリクスでリンクされ，エネルギー資源制約，CO ₂ 排出量制約等のシナリオのもとで均衡解が求められる。（77年モデル；15地域）	シナリオの中でオイルショック時の省エネ開発パラメータを設定	2000年までに排出量を1990年レベルに安定化 A；炭素税10%，設備投資.5% B；研究開発，技術協力 C；炭素税5% + B X；炭素税 石油100%，石炭120%，天然ガス80% 1991年30%課税 1992年残りの70%課税		

表1 既存のエネルギーモデルの比較（続き）

モデル	モデルタイプと計算期間	モデルの概要	新工・省エネ技術の取り扱い	CO ₂ 削減シナリオとケーススタディ（税率等）	税の還元	課題・備考等
日経長期マクロモデル（1991） 稲葉和平 日本経済新聞社	計量経済 1990～2010	世界9地域からなり、貿易取引が内生化されている。短期的なマクロ経済の予測や環境税導入の影響推定に活用される。	技術進歩のパラメータはなし	2000年までに排出量を1990年レベルに安定化 課税率 91年100%、 ～1996 前年比35%上昇 ～2001 前年比20%上昇 ～2010 前年比 8%上昇	無	短期的な諸々のマクロ経済変数の予測や環境税導入の影響推定に適合
IU-TSUKUBA-FAIS モデル（1991） 六戸駿太郎 国際大学	計量経済 1990～2000	世界36地域からなり、先進国は30の部門からなる。短期的な経済予測に期待できる。	技術進歩はフェーズ2で取り込む予定	世界エネルギー価格20%上昇 先進9カ国炭素税導入	無	エネルギー技術戦の代替戦略や長期エネルギー戦略には規模が大きすぎる。
藤井康正（1992） 東京大学	最適化 1990～2050 （1期10年）	世界を10地域に分割し、地域間のエネルギー貿易等を明示的に考慮し、シナリオの下で、各種CO ₂ 対策技術の包括的な可能性をみる事ができる。	非化石燃料；水力、地熱、森林バイオ、太陽光、風力 CO ₂ 分離・回収・処理技術 輸送・総合システム技術	IPCCエネルギー需要シナリオ 炭素課税 ①\$100/t-c一定 無し ②\$200/t-c一定 無し ③\$ 50/t-c増加 無し ④\$100/t-c増加 無し ⑤\$100/t-c増加 有り		工学的なデータに基づいた手法が特徴
5 国内中期 山地憲治（1990） 電力中央研究所	計量経済 1988～2005	世界エネルギーモデル、多部門モデル、エネルギー競争モデル、9地域モデルからなる中期経済予測モデル。産業13部門、エネルギー10種類、	57種類の省エネ技術 燃料転換技術への補助金による設備投資	2005年に排出量を1988年レベルに安定化 1990年から税金を導入 毎年4,000円/c-t 2005年64,000円	有無 双方 可能	補助金の効果、国際的な産業構造調整の効果、新技術や自然エネルギーの検討が必要
伊藤浩吉（1988） 日本エネルギー 経済研究所	計量経済 1988～2010	一般的なマクロ経済モデルに簡略なエネルギーモデルを連結してエネルギー価格や省エネ投資の影響をモデル化		2000年に排出量を1989年レベルに安定化 ①基準（無税） ②ケース1（1995～） 石炭50%、石油40%、LNG30% ③ケース1（1995～） 石炭100%、石油80%、LNG60%	有	省エネ対策の効果、産業構造調整の効果、技術革新の考慮等の検討が必要

表1 既存のエネルギーモデルの比較(続き)

モデル	モデルタイプと計算期間	モデルの概要	新エネルギー・省エネ技術の取り扱い	CO ₂ 削減シナリオとケーススタディ(税率等)	税の還元	課題・備考等
伴 金美(1991) 大阪大	計量経済 1991~2000	エネルギー価格により要素代替や技術進歩を決定する産業モデルと動学的な最適行動を決定する消費需要モデルを中心としたマクロ計量モデル	新エネルギーは外生の取り扱い	2000年に排出量を1990年レベルに安定化 石炭30%, 石油24%, LNG16% 課税(約9,000円; 1995年)	有	価格効果についての技術的裏付けの検討が必要
山崎茂樹(1991) CRC総合研究所	計量経済 1990~2010	一般的なマクロ経済モデルにエネルギー価格と省エネ投資の影響を反映でき、省エネ投資の効果を省エネへの還元効果を分析		2000年に排出量を1990年レベルに安定化 ①課税なし ②課税50%(財源を全額省エネ投資) ③②の3倍の省エネ投資義務(2000年約17,000円)	有	省エネ投資効果についての技術的裏付け、エネルギー多消費産業の想定整合性についての検討が必要
AIM(1994) /JAPAN 国立環境研究所	ボトムアップ 1985~2010	エネルギー価格の変化により技術代替が生じる現象を中心に、エネルギー消費の変化を積み上げ方式により推定する。対象分野20, 対象燃料30	現在実用化されている省エネ技術(100種類以上)	①技術変更なし ②技術選択有り ③炭素税(3万円/t) ④③+投資回収期間延長 ⑤炭素税(3千円/t)+補助金	有	マクロ経済的なコストは推定できない。社会的コストは考慮していない。対象技術が包括的でない。
6 国内長期 後藤則行(1991) 金沢大学	最適化 均衡型 1期=5年 1990~2040	詳細なエネルギー部門を持つ動態的市場均衡モデル。 1次エネルギー6種, 2次エネルギー9種, 需要部門=産業14+民生 環境庁中間報告では2010の中期を計算(1994)	・地熱、ごみ発電等 ・新技術(太陽エネルギー等)外生条件 ・部門別省エネ技術の設定	基準ケース ①省エネルギー技術付加 ②排出量を1990水準に抑制 ③①+②	有	
筑井甚吉(1991) 亜細亜大	最適化 産業連関 1989~2010	動態化された産業連関の計画モデルで、計画期間中の消費のフローを最大化する消費ターンパイクモデル 産業22部門 EPA(経企庁)モデル	・省エネ率はヒアリングから設定	0標準(ヒアリングの省エネ) ①生産削減 ②家計省エネ(消費削減) ③家計・産業省エネ (オイルショック時の省エネ)		経済審議会「2010年への選択」で使用 このモデルは5年に1回使用される

理論の枠組みの中に入れた一般均衡モデルであり、想定された定常状態への最適経路を見出す。

以上のモデルを比較する形でまとめたものが、表1である。

2. モデルの概要

次にこの研究で開発したモデルの概要について記述する。このモデルは、世界的に活用されている「MARKAL」「Edmonds Reilly (以下ERモデルと略す)」「GREEN」の考え方を取入れた最適計算手法による世界エネルギー需給モデルである。

本モデルの特色は以下のとおりである。

(1) 地域分割

世界をAPEC諸国を中心に表2に示すように24地域に分割した。既存の主なモデルの地域数は、10地域前後であるが、本モデルはAPEC諸国を中心に24地域に分割したことで、個々のAPEC諸国のエネルギー需給動向を把握することができる。

なお、データ入手の可能な範囲で地域分割数を若干変化させることもできる。例えば香港と中国を一つにして、その他アジアからインドを分割す

表2 地域名

NO	地域	NO	地域
1	日本	13	パプアニューギニア
2	韓国	14	中国
3	台湾	15	アメリカ
4	香港	16	カナダ
5	シンガポール	17	メキシコ
6	インドネシア	18	チリ
7	マレーシア	19	西欧
8	フィリピン	20	中東
9	タイ	21	旧ソ連・東欧
10	ブルネイ	22	アフリカ
11	オーストラリア	23	その他中南米
12	ニュージーランド	24	その他アジア

るといった変更も可能である。

(2) エネルギー源

一次エネルギー7種と二次エネルギー8種のエネルギー全体を取扱っている。既存の地域分割数の多い長期モデルの場合、エネルギーの種類は4～

10種類程度であるが、本モデルはより細かく分けている。更に、原子力を他のエネルギーと競合する一項目として扱っており、原子力による化石燃料使用量の低減、環境負荷の減少といった影響を把握できるようにしている。また、これらエネルギーの供給、転換、需要量を明確に表示できる。

(3) エネルギー輸送

エネルギー輸送を扱えるモデルは少ないが、本モデルでは、アジア・太平洋地域の地域割りにおける輸出地から輸入地へのエネルギーの輸送量が、エネルギー源毎に明確に表示できる。これにより石油製品貿易などの実態をふまえたエネルギー需給構造の予測が可能となる。

(4) 計算期間

計算期間は、中期モデルでは2010年頃までが大半であり、長期モデルでも2050年程度までのものが多く、本モデルは1期10年とした1990年から2100年の超長期のエネルギー需給の動向を予測することができる。

(5) 環境要因

地球環境要因であるCO₂ (NO_x, SO_x)の排出規制、環境税、削減技術の導入がエネルギーフローに及ぼす影響を、排出量と経済性両面から分析できる。既存モデルでは排出規制、環境税、削減技術の全てを取扱えるものは少ない。

(6) シナリオの変化

エネルギー供給量、転換量、需要量の制約、輸送量と輸送経路の制約、エネルギー価格、転換価格、転換効率等、種々のシナリオの変化に対応できる。従って、条件設定を細かく変えて条件の変化がどのような影響を与えるかを詳細に分析していくことが可能となっている。

(7) モデルタイプ

モデルは線型計画モデル(LPモデル)であり、種々のシナリオの下で最も経済的な条件を模索し、最適化を測るモデルである。また、エネルギ

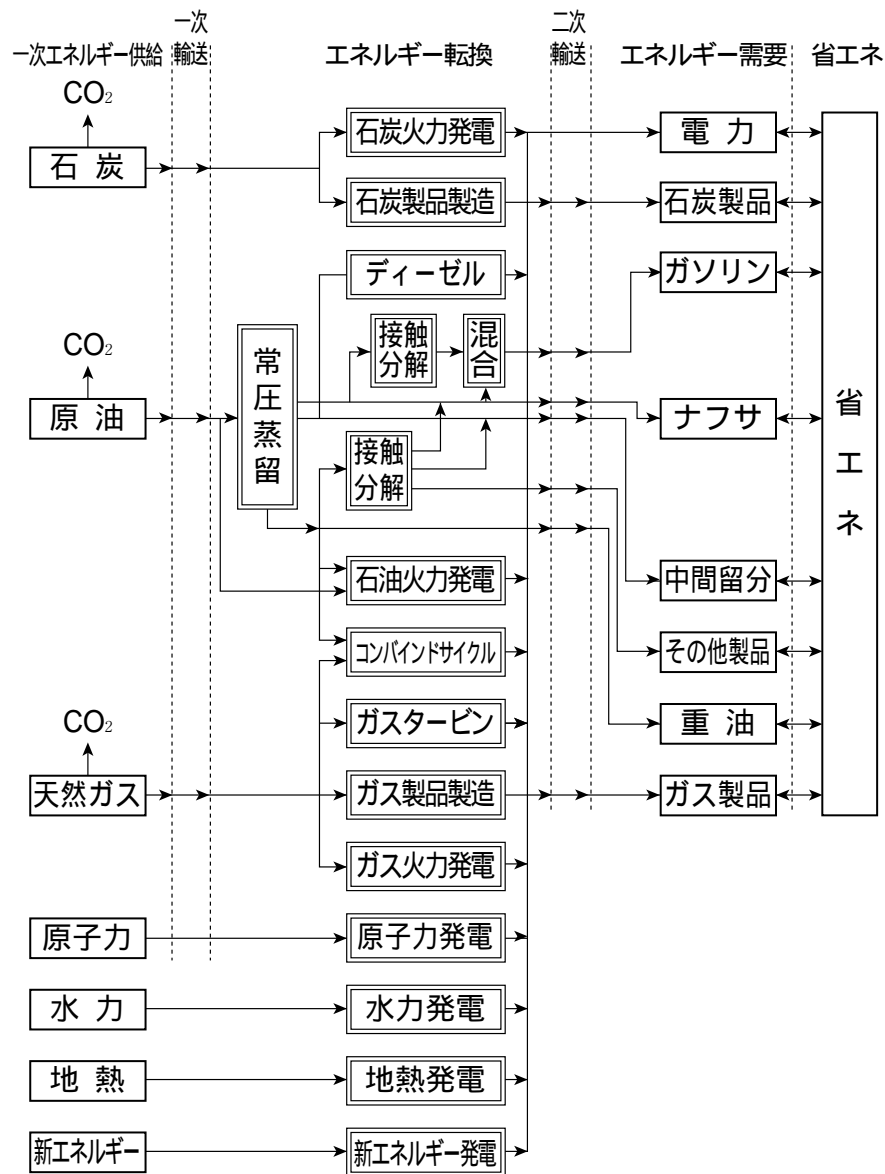


図1 地域モデルフロー

供給量と価格との関係を示す関数としてロジスティック曲線を使用している。更に省エネ投資の影響を取り入れる事も可能である。通常のLPモデルは一次線形式のみを対象としているが、本モデルではステップ関数の導入により、指数関数式を対象としており、初期では伸び率が低く、成長期では伸び率が高くなり、成熟期ではまた低くなるという関係を反映した予測が可能となる。超長期の予測を行う場合には、発展段階により、

GDP伸び率などが変化していくため、実態に即した予測を行うことができる。

(8) 操作性

モデルの運用はパソコン上で行われるので操作が容易であり、モデルの特徴を容易に理解することができる。計算時間は1ケース約15分程度であり、シミュレーションを行う場合には、あるケースについて計算を行い、条件を少し変えて結果を

比較，検討するなどが容易に行えるモデルである．

2.1 モデルのフロー

図1に1地域のエネルギーの流れを示すモデルフローを示す．図の左側からエネルギー供給，一次エネルギー輸送，エネルギー転換，二次エネルギー輸送を経て最終需要に至るフローネットワークとして示した．

一次エネルギーは石炭，原油，天然ガス，原子力，水力，地熱，および新エネルギーとし，石炭，原油，天然ガス，および原子力は地域間輸送することができる．また，一次エネルギーの供給時におけるCO₂排出量を算出する．

エネルギー転換設備として，火力発電（石炭，石油，ガス），原子力発電，水力をはじめとする再生可能エネルギーを利用した発電（太陽光，風力，バイオマス等の新エネルギー，地熱），ディーゼル，コンバインドサイクルおよびガスタービン発電，石炭製品製造，石油精製，ガス製品製造設備がある．

二次エネルギーは石炭製品，液体製品（ガソリン，ナフサ，中間留分，その他製品，重油），ガス製品，電力とし，ガソリン，ナフサ，中間留分，その他製品，および重油は地域間輸送することができる．

次に，本モデルでは，図2に示すようにA，B，Cそれぞれの国（地域）でのエネルギーの供給，転換，需要のエネルギー需給をはかると共に，他地域とのエネルギー輸送（輸出入）をも考慮した全地域におけるコストが最小となる最適解をLPモデルに

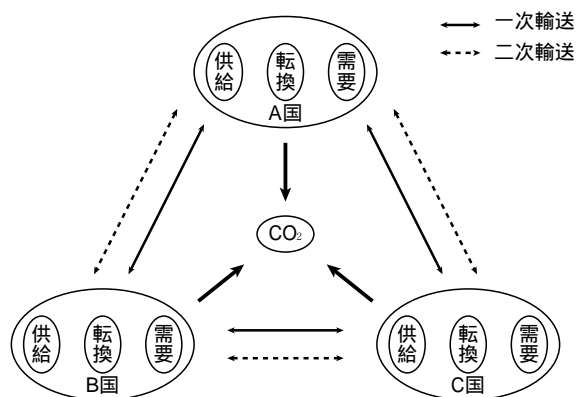


図2 エネルギー輸送とCO₂排出

よって算出する．また，一次エネルギーの供給時におけるCO₂排出量を地域別に算出し，将来のCO₂排出量を予測する．

2.2 LPモデルとステップ関数

本モデルはLPモデル（線型計画モデル）であり，目的関数（システムコスト）と制約式から構成される．

$$\text{目的関数（システムコスト）：} \quad \sum_j C_j X_j \quad (\text{式1})$$

$$\text{制約式} \quad : \quad \sum_j a_{ij} X_j = b_i \quad (\text{式2})$$

ここで， C_j はコストの係数， a_{ij} は制約式の係数， b_i は制約値（制約式の右辺）であり，制約式（ i 個）で構成される境界条件のもとで目的関数（総システムコスト）を最小とする変数 X_j の値を求めることになる．本モデルは前提条件から目的関数と制約式が設定され，システムコストを最小とする最適解を得る．

本モデルでは，供給量と供給コストの関係を示す供給曲線と，需要量と需要コストの関係を示す需要曲線をステップ関数として表現している．

2.3 モデルの構造

本モデルは，対象とするエネルギーシステムを構成する各要素技術およびその相互関係を線型式（等式および不等式）で表現する線型計画モデルである．線型計画モデルは変数，目的関数，関係式や制約式で構成されている．

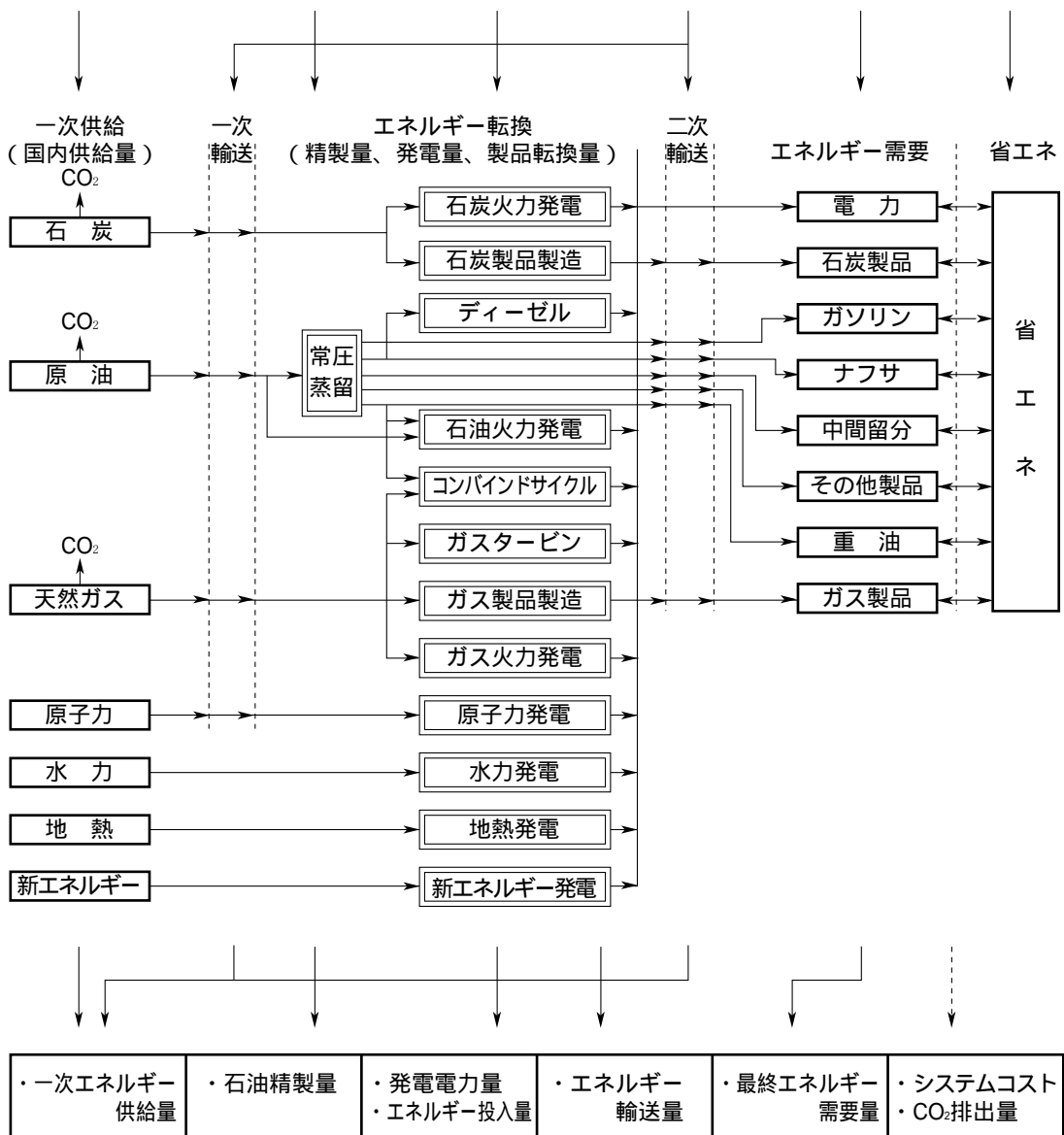
また，変数と前提条件や出力内容との関連を図3に示す．

3. 基本ケース

ここでは，このモデルを利用して，世界的に最も標準的とみなされている国際エネルギー機関の長期エネルギー需給予測の値をベースとした場合の供給システムコストの推定結果を示すことにする．

前提条件

一次エネルギー供給	石油精製	発電	輸送	エネルギー需要	省エネ
<ul style="list-style-type: none"> 供給可能量 供給価格 供給可能量と価格のステップ倍率 CO₂排出原単位 	<ul style="list-style-type: none"> 運転費 新設ペナルティ 収率、自家燃 精製能力 新設設備量 新設設備価格 	<ul style="list-style-type: none"> 建設費、変動費 転換効率 稼働率、使用率 発電設備計画 新設量とコストのステップ倍率 	<ul style="list-style-type: none"> 輸出入量 貿易量 基準運賃 運賃倍率 	<ul style="list-style-type: none"> 最終エネルギー需要 石炭需要 ガス需要 石油製品需要 電力需要 	<ul style="list-style-type: none"> 省エネルギーと価格



シミュレーション結果

図3 前提条件とシミュレーション

3.1 モデルのフレームと前提

シミュレーション期間は、1992年、2000年、2010年、2020年の4期と設定した。1992年を実績年、2000年以降を予測年としてそれぞれの期で供給と需要のバランスを計る単年度モデルとした。為替レートは、全期間に渡り\$1を100円と設定した。地域区分は、APEC諸国を中心に24地域に設定した。APEC諸国は日本からチリまでの18地域に分割し、その他の地域として西欧、中東、旧ソ連東欧、アフリカ、メキシコとチリを除くその他中南米、APEC諸国を除くその他アジアの6地域に分割した。

エネルギー源としては図1のエネルギーフローに示すように、一次エネルギー7種（石炭、原油、天然ガス、原子力、水力、地熱、新エネルギー）、二次エネルギー8種（電力、石炭製品、ガソリン、ナフサ、中間留分、その他製品、重油、ガス製品）と中間製品（改質ガソリン）1種の16種を設定した。

CO₂排出量を算出するために使用したCO₂排出原単位は表3に示すとおりである。

次に、一次エネルギー供給量を制約するための石炭、原油、天然ガスの供給可能量、最終エネルギー需要量は、主としてIEAならびにAPECの資料を用いて設定した。また、石油精製設備量、発電設備量の基準となる値も主として、IEAならびにAPECの

表3 CO₂排出原単位

NO	エネルギー名	CO ₂ 原単位	単 位
1	石炭	0.630	千Cトン/千トン
2	原油	0.723	千Cトン/千kl
3	ガソリン	0.625	千Cトン/千kl
4	ナフサ	0.625	千Cトン/千kl
5	中間留分	0.693	千Cトン/千kl
6	重油	0.819	千Cトン/千kl
7	その他製品	0.693	千Cトン/千kl
8	原子力	0.0	千Cトン/億kwh
9	天然ガス	0.768	千Cトン/千トン
10	水力	0.0	千Cトン/億kwh
11	地熱	0.0	千Cトン/億kwh
12	新エネルギー	0.0	千Cトン/億kwh
13	石炭製品	0.630	千Cトン/千トン
14	ガス製品	0.768	千Cトン/千トン
15	改質ガソリン	0.625	千Cトン/千kl
16	電力	0.0	千Cトン/億kwh

資料を利用した。

4. 基本ケースのシステムコスト、CO₂排出量の推計結果

本モデルでのシステムコストは、生産コスト、転換コスト、輸送コストの合計であるが、輸送コストは全体に占める割合が極めて小さいので、ここでは生産コストと転換コストについて述べる。

ここで、生産コストは、1次エネルギー供給量と供給コストの関係を表したステップ関数によって計算された一次エネルギー供給コストであり、また、転換コストは、新設設備量と新設コストの関係を表したステップ関数によって計算された新設建設費と全転換設備のランニングコストの合計である。従って、ここでのシステムコストは、現実のエネルギー供給価格や建設費とはやや異なりモデル上の指標である。この指標は、地域別やケース別の相对比较をしたり、将来の傾向を分析する上で重要な意味を持っている。

4.1 世界全体のシステムコスト

世界全体のシステムコストをまとめたものが表4である。世界全体の生産コストと転換コストの合計は、1992年254兆円、2000年279兆円、2010年428兆円、2020年602兆円である。1992年を100とした比率でみると、2000年110、2010年168、2020年237となり、2020年には、1992年の約2.37倍の

表4 世界全体のシステムコスト [千円]

	1992年	2000年	2010年	2020年
生産コスト	8852189	11844499	17846594	25861934
(比率)	(100.0)	(133.8)	(201.6)	(292.2)
(伸び率)	(0.0)	(3.7)	(4.2)	(3.8)
転換コスト	16563303	16089532	24960103	34397190
(比率)	(100.0)	(97.1)	(150.7)	(207.7)
(伸び率)	(0.0)	(0.4)	(4.5)	(3.3)
合 計	25415492	27934031	42806697	60259124
(比率)	(100.0)	(109.9)	(168.4)	(237.1)
(伸び率)	(0.0)	(1.2)	(4.4)	(3.5)

システムコストとなる。コストの構成でみると2020年の生産コストは1992年の2.92倍であるのに対し、転換コストは約2.08倍であり、生産コストが大幅に増加している。

生産コストの年平均伸び率を最終エネルギー需要量の伸びと比較すると、最終エネルギー需要の伸びが1992～2000年で1.9%、2000～2010年で2.3%、2010～2020年で2.0%の伸びであるのに対し、生産コストの伸びはそれぞれ3.7%、4.2%、3.8%と大きく上回り、需要の伸びに対し生産コストは約2倍に伸びている。これは、需要の伸びが大きいために、供給と需要の関係（供給曲線）から供給コスト（生産コスト）が上昇した為である。

また、転換コストについてみると、2000年は減少しているものの、2010年と2020年の年平均伸び率は4.5%、3.3%と生産コストと同様に需要の2倍近い伸びを示している。これは、世界全体として2000年までは、現在の設備で需要をまかなえるが、それ以降は設備の増設が必要なることを示している。特に後述するアジア太平洋地域では大幅な増設が必要となっている。

4.2 アジア太平洋地域のシステムコスト

日本から中国までのアジア太平洋14地域のシステムコストを表5に示す。生産コストと転換コストの合計は、1992年50兆円、2000年62兆円、2010年110兆円、2020年180兆円である。1992年を100

表5 アジア太平洋地域のシステムコスト

[千円]

	1992年	2000年	2010年	2020年
生産コスト (比率) (伸び率)	1564635 (100.0) (0.0)	2470216 (157.9) (5.9)	4042923 (258.4) (5.0)	6091519 (389.3) (4.2)
転換コスト (比率) (伸び率)	3479391 (100.0) (0.0)	3769988 (108.4) (1.0)	6931206 (199.2) (6.3)	11904776 (342.2) (5.6)
合計 (比率) (伸び率)	5044026 (100.0) (0.0)	6240204 (123.7) (2.7)	10974129 (217.6) (5.8)	17996295 (356.8) (5.1)

とした比率でみると、2000年124、2010年218、2020年357となり、2020年には、1992年の約3.57倍のシステムコストとなり、アジア太平洋地域のシステムコストは世界全体の平均的な増加を大幅に上回っている。

また、コストの構成でみると2020年の生産コストは1992年の3.89倍であるのに対し、転換コストは約3.42倍であり、世界全体と同様に生産コストの増加の方が大きい。特に、転換コストは世界全体の増加2.07倍と比べると大きな増加となっており、この地域では大幅な設備の増設が必要となっていることがわかる。

システムコストの年平均伸び率を最終エネルギー需要の伸びと比較すると、最終エネルギー需要の伸びが2000年で1.9%、2010年で2.3%、2020年で2.0%の伸びであるのに対し、生産コストの伸びは5.9%、5.0%、4.2%と大幅に上回っている。また、転換コストは、2010年で6.3%、2020年で5.6%と生産コストよりも更に上回っている。これは、アジア太平洋地域の需要が大幅に増大しているためである。

次にCO₂排出量についてみると以下ようになる。

4.3 世界全体のCO₂排出量

世界全体のCO₂排出量は表6のように推定された。すなわち世界全体の排出量は、1992年54.4億t、2000年61.6億t、2010年79.8億t、2020年100.8億tと増大する。これを1992年を100とした比率でみると、2000年113、2010年147、2020年185となり、2020年には、1992年の約1.85倍の排出量となる。

表6 CO₂排出量 [万Cトン]

	1992年	2000年	2010年	2020年
世界全体 (比率) (伸び率)	543975 (100.0) (0.0)	615948 (113.2) (1.6)	797870 (146.7) (2.6)	1007657 (185.2) (2.4)
アジア太平洋 (比率) (伸び率)	280108 (100.0) (0.0)	336400 (120.1) (2.3)	431056 (153.9) (2.5)	541432 (193.3) (2.3)

排出量を年平均伸び率で見ると、2000年までは1.6%、2010年まで2.6%、2020年まで2.4%となり、2010年まで増加傾向を示し、それ以降やや伸び率は鈍化する。

4.4 アジア太平洋地域のCO₂排出量

アジア太平洋地域では、1992年28.0億t、2000年33.6億t、2010年43.1億t、2020年54.1億tである。これを1992年を100とした比率で見ると、2000年120、2010年154、2020年193となり、2020年には、1992年の約1.93倍の排出量となり、排出量の伸びは世界全体を上回る。排出量を年平均伸び率で見ると、2000年までは2.3%、2010年まで2.5%、2020年まで2.3%となっている。この地域の伸び率が世界全体の伸び率を大きく上回っているのは、アジア、なかんづく中国における石炭使用量の

増加によるところが大きい。

5. おわりに

以上、本研究で開発したモデルの概要と標準的な世界のエネルギー需給予測を基礎としたケースのシミュレーションケースを紹介したが、線型計画モデルは、多くのケーススタディを行い、ケース間の比較を行うことによって異なるエネルギー政策のインプリケーションを探るところに最も効果が発揮されるモデルである。今後、二酸化炭素の排出抑制や課徴金の効果が推定できるようにするというようなモデルの改良を行った上で、原子力発電の大幅導入、中国のエネルギー需要の大幅増大、アメリカにおける省エネルギーの大幅な進展等々のケーススタディを行って、エネルギーと環境の関連についての種々の政策のインプリケーションを抽出する予定である。