

MARKALモデルによる2050年の世界のCO₂制約とエネルギー需給構造の推計

計量分析ユニット 松尾 雄司

1. はじめに

CO₂排出削減量の各国・地域間での分担は、地球温暖化対策を巡るもっとも重要な争点の1つである。近年、主にOECD諸国によって構成される気候変動枠組条約（FCCC）付属書I国からのCO₂排出量を、それ以外の国からのCO₂排出量が上回っており、この傾向は今後も継続すると予想される。しかし、非付属書I国を構成する非OECD諸国における温暖化対策はOECD諸国ほどには進んでおらず、加えて非OECD諸国は、温暖化対策によって自国の経済発展が妨げられることへの不公平感を根強く持っている。CO₂排出量削減の分担を巡る議論は今後より激しさを増すと考えられる。

本稿では、CO₂排出量に対する上限制約が世界のエネルギー需給構造およびエネルギー供給コストに与える影響を、エネルギーシステム分析のための線形計画モデルであるMARKAL（Market Allocation）モデルを用いて試算した結果を示す¹。

2. モデルの概要

本試算で用いたMARKALモデルは、所与の経済・技術シナリオおよび制約条件の下で、最小費用での構築・運営が可能な将来のエネルギーシステムを推計する線形計画モデルである。制約条件としては、再生可能エネルギーの導入ポテンシャル、原子力発電の立地制約、CO₂排出量の上限制約等、エネルギー需給に関わる技術的、社会的、政治的制約を表す。

MARKALモデルは実際のエネルギーシステムを模した構造を持っており、エネルギー需要技術およびエネルギー供給技術より構成される。エネルギー需要技術は、最終エネルギーを消費することで、エネルギーサービスを提供する。エネルギー供給技術は、一次エネルギーの採掘および最終エネルギーへの転換を行うことで、エネルギー需要技術に対して最終エネルギーを提供する。MARKALモデルによる最適化の目的関数である総システムコストは、各技術の設備コスト、燃料コスト、および運用・修理等その他のコストの総和で定義される。各エネルギー技術の導入量および稼働量は、総システムコストを最小化する最適化計算の結果として求まる。その結果を積み上げることで、分析期間のエネルギー需給構造、CO₂排出量、および総システムコストが推計される。

3. 前提条件

人口、実質GDP、および化石燃料価格については、当所「アジア／世界エネルギーアウトLOOK 2011（AWE02011）」に基づき設定した。人口はOECDで2005年の12億人から2050年に14億人、非OECDで同53億人から79億人に増加する。また実質GDPについては、2005年から2050年までOECDで年率1.8%、非OECDで4.3%で増加し、世界全体に占める非OECD地域の割合は2005年の22%から2050年の45%まで増加する。また原油・天然ガス・石炭の各一次エネルギー価格（名目）は、2005年のそれぞれ8.4、5.7及び2.4百万ドル/PJから、2050年には20.6、14.4及び4.9百万ドル/PJまで上昇する。また、割引率については5%と想定した。

これらの想定を用いて、MARKALモデルの前提条件となる産業需要、民生他需要、輸送需要の各エネルギーサービス需要を推計した。なお輸送需要については、輸送部門の詳細な分析を目的として開発されたIEEJ2050モデルのデータベースも参照した。

需要側および供給側双方のエネルギー技術については、分析開始年における地域間の効率、コスト等の技術水準の差異を考慮するものの、その後はOECD、非OECD地域ともに、その時点で利用可能なすべての技術を選択できるものとした。すなわち本試算では、特定地域で開発された最先端の技術が他地域へ導入されることを妨げる、関税その他の障壁を想定していない。

CO₂分析において特に重要となる発電技術に関しては、表1の通り想定した。またその導入ポテンシャルとしては、AWE02011のレファレンスケースおよび技術進展ケースにおける非化石エネルギーの導入量を、それぞれ下限制約および上限制約として用いた。

¹ 本試算の詳細な内容については「エネルギー・資源」誌に投稿中（鈴木、松尾、永富、末広、小宮山「地球温暖化対策がOECD及び非OECD地域のエネルギー需給構造に与える影響の分析」）。

表1 発電技術の想定

| | 導入開始年 | 寿命 | 設備利用率 | 発電効率 | 設備コスト | 固定O&Mコスト | 可変O&Mコスト |
|-----------|-------|-----|-------|-------|-----------|----------|----------|
| | [年] | [年] | [%] | [%] | [USD/kW] | [USD/kW] | [USD/PJ] |
| 旧型石炭火力 | 2005 | 40 | 85 | 33-36 | 817-987 | 28 | 1.2 |
| 微粉炭火力 | 2005 | 40 | 85 | 39-43 | 2076-2502 | 28 | 1.2 |
| 微粉炭火力+CCS | 2020 | 40 | 85 | 29-31 | 3337-4028 | 61 | 2.5 |
| IGCC | 2015 | 40 | 85 | 39-43 | 2639-2816 | 47 | 1.9 |
| IGCC+CCS | 2020 | 40 | 85 | 32-35 | 3296-4224 | 55 | 2.2 |
| 石炭CHP | 2005 | 20 | 70 | 33 | 880.2 | 79 | 1.2 |
| 石油火力 | 2005 | 40 | 85 | 33-36 | 1160-1340 | 94 | 1.0 |
| 原子力(軽水炉) | 2005 | 60 | 76-84 | 33 | 3491-4214 | 70 | 0.6 |
| 水力 | 2005 | 60 | 45 | 100 | 3076 | 11 | 0 |
| 地熱 | 2005 | 30 | 73 | 10 | 2335-3208 | 179 | 2.7 |
| バイオマス火力 | 2005 | 40 | 85 | 33-36 | 1584-2031 | 90 | 1.2 |
| 風力(陸上) | 2005 | 20 | 30 | 100 | 1056-1381 | 41 | 0 |
| 風力(洋上) | 2005 | 20 | 30 | 100 | 1511-2437 | 78 | 0 |
| 波力 | 2010 | 20 | 70 | 100 | 1807-3249 | 97 | 0 |
| 太陽熱発電 | 2010 | 20 | 25 | 100 | 2010 | 24 | 0 |
| 太陽光発電 | 2005 | 20 | 17 | 100 | 650-3249 | 41 | 0 |
| 揚水発電 | 2005 | 60 | 0 | 70 | 4420 | 10 | 0 |
| 旧型ガス火力 | 2005 | 40 | 85 | 32-38 | 869-974 | 5.5 | 4.1 |
| NGCC | 2005 | 40 | 85 | 53-63 | 895-1003 | 12 | 1.0 |
| NGCC+CCS | 2020 | 40 | 85 | 46-53 | 1499-2060 | 24 | 1.8 |
| 天然ガスCHP | 2005 | 20 | 70 | 27-32 | 978 | 11 | 1.0 |

4. 分析結果

これらの前提条件をもとに、OECDおよび非OECD地域それぞれに対して、CO₂排出量に上限制約がないケース（以降「制約なしケース」）、および2050年におけるCO₂排出量を制約なしケース比でX%削減するケース（以降「-X%ケース」）についての将来推計を行った（Xの値は、モデルによる求解が不可能になるまで10%刻みで増加させた）。両地域における各ケースの想定を表2に示す。制約なしケースにおける2050年のCO₂排出量に2倍以上の差があるため、両地域の削減率が同じであっても、削減量には大きな差があることに留意する必要がある。

表2 CO₂排出量制約のケース想定 ※ケース名は、2050年におけるCO₂排出量の制約なしケース比を表す。

| ケース名 | 2050年の排出量 [Mt-CO ₂] | | 2005年比の増減率 [%] | |
|------|------------------------------------|--------|-------------------|-------|
| | OECD | 非OECD | OECD | 非OECD |
| -10% | 14,436 | 33,131 | 16% | 145% |
| -20% | 12,832 | 29,450 | 3% | 118% |
| -30% | 11,228 | 25,769 | -10% | 91% |
| -40% | 9,624 | 22,087 | -23% | 63% |
| -50% | 8,020 | 18,406 | -36% | 36% |
| -60% | 6,416 | 14,725 | -48% | 9% |
| -70% | 4,812 | 11,044 | -61% | -18% |
| -80% | 3,208 | - | -74% | - |

制約なしケースにおける世界、OECD地域、非OECD地域の一次エネルギー消費量を図1に示す。世界の一次エネルギー消費量は、2005年比9,100MTOE（84%）増の2万MTOEとなる。増加量の9割弱に相当する8,000MTOEが、非OECD地域に起因する。その結果、2050年における両地域の消費量はそれぞれ6,400MTOEおよび1万3,600MTOEとなり、世界の消費量の7割弱を非OECD地域が占めることになる。世界全体での増加分9,100MTOEのうち6,600MTOEを石炭が占めることから、2050年の一次エネルギー消費に占める石炭のシェアは、2005年比22ポイント増の46%と大幅に拡大する。非化石燃料の消費量も2,900MTOE増加するため、2050年の一次エネルギーに占める非化石燃料のシェアは2005年比6%増の25%へと拡大する。

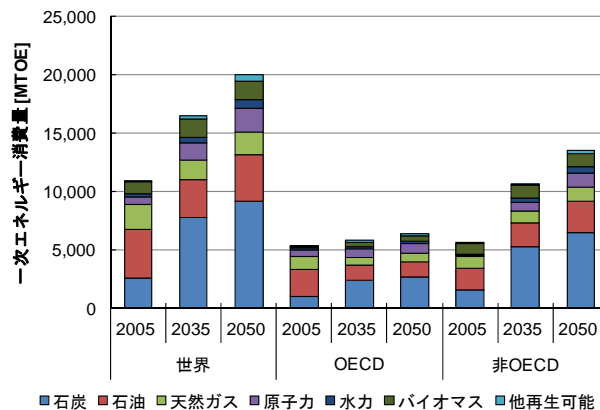
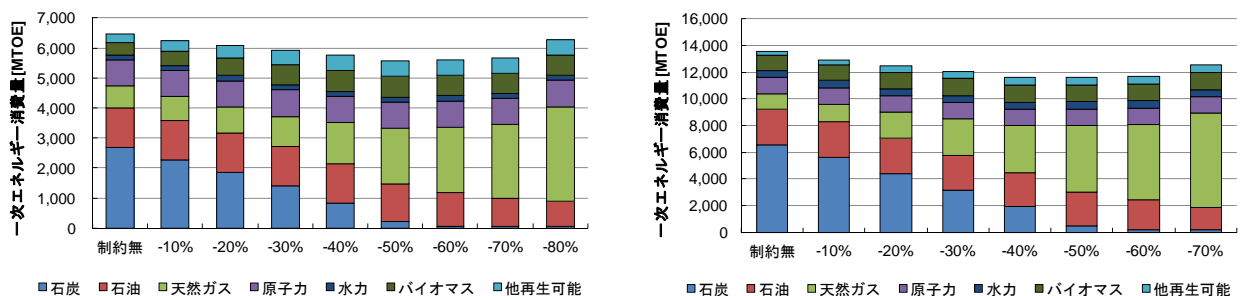


図1 制約なしケースの一次エネルギー構成

制約を課した各ケースにおける2050年の一次エネルギー構成を図2に示す。OECD地域の一次エネルギー消費量は、-50%ケースにおいて最小値5,600MTOE（制約なしケース比-14%）をとった後増加に転じる。-70%ケースまでは微増に留まるものの、-80%ケースにおいては6,300MTOE（制約なしケース比-3%）まで急増する。非OECD地域の一次エネルギー消費量は-40%ケースにおいて最小値1万1,600MTOE（制約なしケース比-15%）をとった後、やはり増加に転じる。-60%ケースまでは微増に留まるものの、-70%ケースにおいては1万2,500MTOE（制約なしケース比-8%）まで増加する。これらの結果は、排出量制約が厳しいケースにおける最終エネルギーの電化が、CO₂排出量の削減には貢献する一方で、全体でのエネルギー利用効率の低下を通じて、一次エネルギー消費量を増加させていることを示す。

非化石エネルギーが-30%ケースにおいてほぼ上限まで導入されることから、それ以降のケースにおける一次エネルギー消費量の変動はすべて化石燃料消費量の変動である。OECD地域については、一次エネルギーに占める非化石燃料のシェアは、-50%ケースにおいて40%まで増加するものの、-80%ケースにおいては35%まで減少する。非OECD地域についても、-40%ケースにおいて31%まで増加した後、-70%ケースにおいては27%まで減少する。



(a) OECD 地域

(b) 非 OECD 地域

図2 各ケースにおける2050年の一次エネルギー構成

制約なしケースを基準とした、各ケースにおける総システムコストの増加額、および2050年における限界削減費用を図3に示す。OECD地域における総システムコストは、一次エネルギー消費量が最小となる-50%ケースで1.6兆ドル、最も制約の厳しい-80%ケースで9.2兆ドル増加する。一方、非OECD地域における総システムコストは、一次エネルギー消費量が最小となる-40%ケースで3.3兆ドル、最も制約の厳しい-70%ケースで11.3兆ドル増加する。この結果は、制約なしケース比の排出削減量が大きくなるほど、単位排出削減量あたりの追加コストも大きくなることを示す。2050年の限界削減費用は、OECD、非OECD地域ともに、一次エネルギー消費量が最小となるケースを過ぎるにつれて急激に増加する。もっとも制約の厳しいケースにおいては、両地域ともに1,000ドル/トンを超える。

総システムコストの内訳を見ると、設備コストは、排出量制約の強化とともに増加する。この増加は、高効率機器、再生可能エネルギー機器、需要側機器の電化、CCS付き発電設備等への投資に起因する。燃料コストは、排出量制約が-10%~20%のケースにおいて、再生可能エネルギーの導入拡大によって一時的に減少するものの、その後は石炭から天然ガスへの燃料転換、CCS導入に伴う発電効率の低下、および電化の進展によって大幅に増加する。その他コストは、石炭火力発電から天然ガス火力発電への転換、および需要側における先端技術の導入による運用維持コストの低下にもなって減少する。

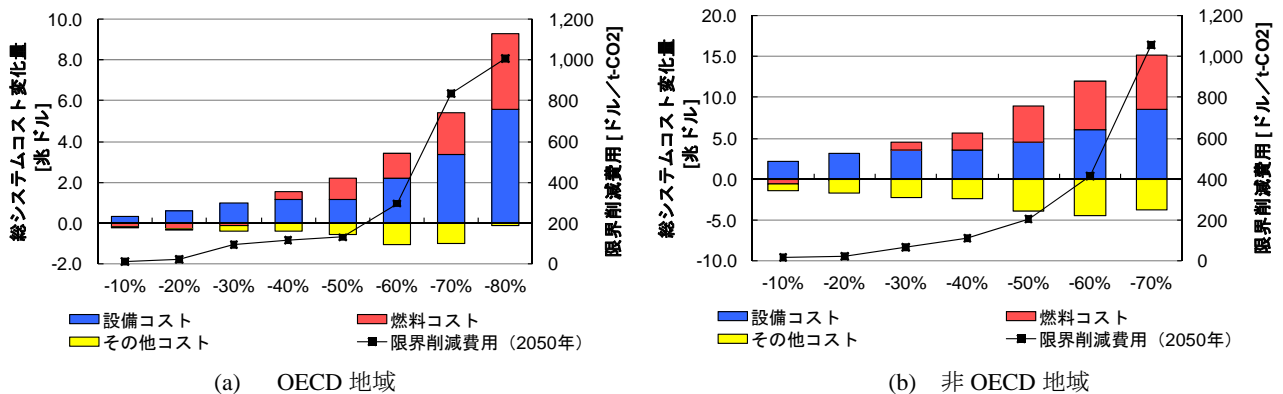


図3 各ケースにおける総システムコストの増加量

5. まとめと結論

CO₂排出量に制約がない場合、2050年までの世界の一次エネルギー消費の増加分の約7割が、石炭によって賄われ、これに伴い2050年における世界のCO₂排出量は、2005年比で約2倍に増加する。増加量の約9割が非OECD地域に由来することから、非OECD地域を中心とした温暖化対策を進めることが急務である。なお、2050年におけるCO₂排出量を2005年比で半減させる場合、制約なしケース比で約4分の1まで減少させる必要がある。

このケースに対して、需要技術の高効率化、再生可能エネルギーの導入促進、石炭から天然ガスへの燃料転換等、CO₂排出量と同時に化石燃料の消費量を減少させるコベネフィット型の対策により、2050年にOECD地域で-50%、非OECD地域で-40%程度の排出削減が可能である。これらの対策は温暖化対策のみならずエネルギー安定供給の観点からも有効であることから、非OECD地域においても積極的な導入が見込まれる。

一方、この水準を超えた排出量制約が課される場合には発電部門におけるCCSの導入が始まることで、一次エネルギー消費量は微増に転じる。さらに-70%ないし-80%といった厳しい削減目標を達成するためには、最終エネルギーの電化とCCS付き火力発電の導入とを組み合わせる必要が生じる。このような対策は、ライフサイクルでのエネルギー利用効率の低下を通じて一次エネルギー消費量を大幅に増加させるため、非OECD諸国による積極的な導入はあまり期待できない。

これらの結果から、世界のCO₂排出量を2005年比で50%削減するという野心的な目標を、コベネフィット型の対策のみで達成することは難しいことがわかる。表2より、OECDおよび非OECD地域の一次エネルギー消費量を最小化する-50%および-40%ケースのCO₂排出量は、それぞれ80億トン

(制約なしケース比-80億トン) および221億トン(制約なしケース比-147億トン)である。これら両ケースを組み合わせた場合の世界の一次エネルギー消費量は、2005年比14%減の1万7,100MTOEと大幅に減少するものの、CO₂排出量は301億トンとなり、2005年比で16%増加する。なお、この場合の総システムコストは、制約なしケースと比べて4.9兆ドルの増加に留まる。

一方、CCS付き天然ガス火力を最大限に導入すれば、2050年におけるCO₂排出量を2005年比で50%近く削減することができる。表2より、OECD地域の-80%ケース、および非OECDの-70%ケースにおけるCO₂排出量は、それぞれ32億トン(制約なしケース比-128億トン)および110億トン(制約なしケース比-258億トン)である。これら両ケースを組み合わせた場合の世界のCO₂排出量は142億トンとなり、2005年比で45%減少する。ただし、この場合の世界の一次エネルギー消費量は1万9,000MTOE、総システムコストは制約なしケース比で20.5兆ドル増となり、一次エネルギー消費を最小化する場合に比べ、それぞれ1,900MTOE、15.6兆ドルの増加となる。このケースを目指す場合には、地域による削減量の違いからくる不公平感をどのように扱うかも課題となる。即ち、2050年においても、非OECD地域の実質GDPは世界の実質GDPの45%を占めるにすぎない。にもかかわらず、CO₂排出削減量の68%、総システムコスト増加量の55%を、非OECD地域が負担することになる。以上のような分担率によって生じる不公平感を解消してゆくことが、今後の温暖化対策を進める上で重要である。

今後非OECD地域についての知見を深めるためには、同地域の中でも特に急激な経済発展が見込まれるアジア地域を対象とした分析を行うことが重要である。中国、インド両国は言うに及ばず、両国に劣らぬ勢いで発展を続けるASEAN諸国についての知見を深めることも、アジアの低炭素化を考える上で必要不可欠である。