

世界のエネルギー需給見通しと長期の技術開発を考慮した 気候変動シナリオの分析

World Energy Supply-demand Outlook and Climate Change Scenario Analysis Considering Technological Progress Impacts

江藤 諒*・松尾 雄司*・田上 貴彦**・末広 茂*・柳澤 明*・山下 ゆかり*・伊藤 浩吉*

Ryo ETO Yuji MATSUO Takahiko TAGAMI Shigeru SUEHIRO Akira YANAGISAWA Yukari YAMASHITA Kokichi ITO

CO₂ reduction policies lower damages caused by climate change while mitigation costs sharply increase as reduction amount of CO₂ increases. We developed four scenarios to estimate the impacts of the decreased costs of innovative technologies on costs and temperature changes using a climate change model up to 2300. Standard Scenario assumes that abatement costs decrease with technological progress under current model assumption. Technological Innovation Scenario assumes that future technological innovation moderates a sharp increase of marginal abatement cost at the range of high CO₂ reduction rate. For a comparison, we developed Baseline Scenario and 50% Reduction by 2050 Scenario. The 50% Reduction by 2050 Scenario assumes global GHG emissions decrease 50% from 2014 by 2050 and the trend continues afterwards. Although the 50% Reduction by 2050 Scenario can moderate temperature rise, the costs become much higher. The Standard Scenario can moderate mitigation costs, however, temperature rise exceeds 3°C above pre-industrial levels. The Technological Innovation Scenario can moderate mitigation costs and temperature rise is nearly 2°C above pre-industrial levels if climate sensitivity is 2.5°C. Collaborating and investing on innovative technologies is important for each country to prevent a high temperature rise.

Keywords : CO₂ Reduction Policies, Climate Change Model, Technological Innovation, Temperature rise

1. はじめに

IPCC 第5次評価報告書では、2100年のGHG濃度がCO₂換算約450ppmとなるシナリオ群は、19世紀後半からの気温上昇を2°C未満に抑える可能性が高いとされている。このほとんどのシナリオで2050年までに世界全体のGHG排出量を2010年比で40~70%削減することとなる。さらに、2100年にはGHG排出量がほぼゼロからそれ以下となっている。

気候変動対策のためのパリ協定が11月4日に発効した。パリ協定は京都議定書の反省を踏まえ、全ての国が参加し、各国が自主的な削減目標である「自主的に決定する約束草案」を持ち寄るボトムアップ的な枠組みである。そのため、目標の積み上げは過去のトレンドより抑制されるものの、2050年に排出半減といった将来像には結びつき難い。この主要因の一つは、削減量の増加につれ限界削減費用が増加することである。技術開発の加速により技術革新が起これば、現在は利用不可能、あるいは制限がある技術が低コストで利用可能になる。こ

れにより、限界削減費用が大幅に減少し、各国の削減量が大きくなることが期待される。

排出削減シナリオを検討する際は、緩和費用だけでなく、適応費用、及び被害額も考慮して長期的な観点から検討する必要がある。これは排出削減対策が気候変動によって起こる事象による被害額やそれに対応する適応策の費用を減少させる一方で、過度の対策は緩和費用の急上昇を招くためである。気候変動をもたらす気温変化はGHG濃度で決まることから、将来の被害額はその年におけるGHG排出量のみでなく、その年までの累積排出量に依存する。

そこで、本稿では動学最適化型の気候変動モデルを用いて、技術開発が現状の想定並みに続く標準ケース、及び技術開発が加速する技術革新ケースを作成し、技術革新が進展した際の被害額、適応費用、緩和費用の和である総合コストを最小化した時の排出量や気温変化を算出する。さらに、ベースラインケース、及び2050年にGHG排出量が半減する2050年半減ケースを設け、各ケースの総合コスト、二酸化炭素濃度、気温上昇を2300年まで推計する。

* (一財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット

** (一財)日本エネルギー経済研究所 地球環境ユニット

〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1 イヌイビル・カチドキ
E-mail : ryou.eto@edmc. ieej. or. jp

2. 分析手法

2.1 計量経済型エネルギー需給モデル

本稿では削減対策投資費用は2050年まではIEEJモデルであるボトムアップ型の技術評価モデルから算出する¹⁾。2050年までの現行のエネルギー環境政策に従うベースラインケースから、省エネ、火力発電効率、原子力、再生可能エネルギー、送配電、化石燃料生産・輸送、CCSなどの各対策の導入のストック・フローを現実的な技術の普及率の制約を考慮して積み上げ、限界削減費用を推計する(図1)。CO₂削減費用は式(1)のように示される。

$$\Lambda(\mu) = I(\mu) - EC(\mu) \quad (1)$$

Λ はCO₂削減費用、 I はCO₂削減対策投資費用、 EC はベースラインケースからのエネルギーコスト低減額、 μ はベースラインケースからのCO₂削減率である。

ベースラインケースから一定程度の削減までは、省エネルギーなどに伴うエネルギーコストの低減額が追加的削減費用を上回るためCO₂削減費用は負の値になる。しかし、CO₂削減が進むにつれ削減費用は徐々に大きくなり、ベースラインケースからの削減率が60%を超えるとコストが急速に上昇する。これは既存のストックでの排出分の大幅な削減が難しいためである。

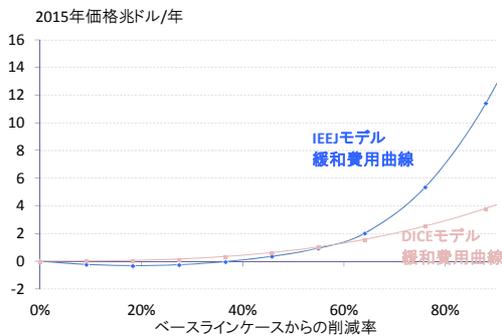


図1 2050年の緩和費用曲線(ベースラインケースからの削減率)

2.2 気候変動モデル

動学最適化型の気候変動モデルを用い、2010年以降のCO₂排出量、気候変動による被害額・適応費用及び緩和費用を推計する。被害額・適応費用はDICE-2013Rモデルにおける推計式を利用して推計する²⁾³⁾。気候変動被害額は式(2)のように示される。

$$R(t)/Q(t) = \frac{\Omega(t)}{[1 + \Omega(t)^\theta]} \quad (2)$$

R は被害額・適応費用、 Ω は気候変動被害関数、 θ は被害

額・適応費用の調整係数、 t は時間である。 Ω は世界平均気温変化の2次関数であり、式(3)のように示される。

$$\Omega(t) = 0.0026T_{AT}(t)^2 \quad (3)$$

T_{AT} は気温上昇である。この被害額には農業、海面上昇による沿岸域への影響、エネルギー使用の変化、気候に関する疾患、及び汚染、アウトドアレクリエーションの機会の損失、海岸線に近い集落の移転及び生物多様性への影響を含む。

被害額・適応費用及び緩和費用を加味した総生産 Q は式(4)のように示される。

$$Q(t) = A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} - R(t) - \Lambda(\mu) \quad (4)$$

A は全要素生産性、 K は資本、 L は労働、 γ は資本シェアである。気候変動対策によるベースラインケースからの被害額、適応費用の軽減分を便益、緩和費用の増加分を費用とし、式(5)のように費用便益分析をする。

$$\sum_{t=1}^{T_{max}} \left(\frac{Q_a(t)}{(1 + \delta + \eta g_a)^t} - \frac{Q_b(t)}{(1 + \delta + \eta g_b)^t} \right) \quad (5)$$

Q_a は削減対策をする各ケースの総生産、 Q_b はベースラインケースの総生産、 δ は純時間選好率、 η は限界効用の対消費弾力性、 g_a は総生産 Q_a の成長率、 g_b は総生産 Q_b の成長率であり、 $\delta + \eta g$ は割引率を表す。この式が正であれば削減対策をする各ケースに便益があることを表す。本稿ではDICE-2013Rモデルにおける純時間選好率1.5%、限界効用の対消費弾力性は1.45を使用する。

3. ケースと設定

本稿では、ベースラインケース、標準ケース、技術革新ケース、2050年半減ケースの4ケースを設定する。ベースラインケースでは2010年を起点とし2300年まで過去の趨勢及び現在までのエネルギー・環境政策等に従って総生産当たりの排出量の改善の見通しを作成し、計算全期間の効用が最大化されるように推計する。2050年半減ケースではエネルギー起源CO₂排出量が2050年に2014年比半減、以降も同じペースで減少し、2080年以降はゼロと上限を設定して推計している。

標準ケースでは2050年以降将来までの技術進歩によるコスト低減はDICE-2013Rモデルに倣い年率0.5%と想定し、最適なGHG排出量を算出する。

一方で2050年以降の長期の将来においては、既存の最新鋭の技術を超えた革新的な技術の導入により、緩和コストがさらに大幅に低下する可能性がある。しかし、現在未使用の次

世代技術は不確実性が高く積み上げることが困難であるため、本稿では発生した二酸化炭素を固定する技術の中で現在使用されている CO₂ 回収の技術革新が進んだ場合を想定する。米国 DOE は、回収技術の進展の程度を表すため、第1世代、第二世代、転換又は第三世代の3カテゴリーを設定している⁽⁴⁾。第1世代は現在使用中で操業されている技術で、\$60/トンで CO₂ を回収できる。第二世代では CO₂ 回収費用が\$40/トン、転換又は第三世代では\$20/t まで下がることが期待されている。「技術革新ケース」では、2100年までに第二世代、2150年までに転換又は第三世代が市場に普及すると想定し、ベースラインケースからの削減率 60%以上において「標準ケース」よりも2100年に3分の2、2150年に3分の1にコストが減少すると想定する。ベースラインケースからの削減率 60%以上にカテゴリーされる他の技術も同様にコストが減少すると想定し、最適な GHG 排出量を算出する。

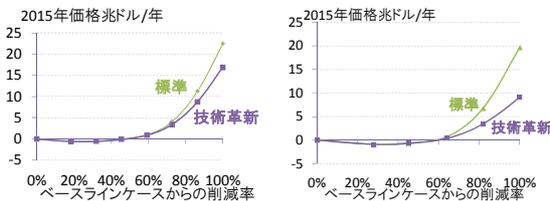


図2 緩和費用曲線（ベースラインケースからの削減率）

（左：2100年，右：2150年）

CO₂ 濃度の変化から気温上昇を推計する際に、気候感度の設定についての議論がある。気候感度は CO₂ 濃度が2倍になった時、最終的に起こる気温上昇値であり、IPCC 第5次評価報告書の WG3 の気候モデルの MAGICC において、気候感度は 3°Cとされている。一方、エネルギーモデルでの気候感度の平均が 2.0~2.6°Cであり、また IPCC の第1次報告から第3次報告では 2.5°Cであった。これらを踏まえ、本稿では、気候感度が 3°C、2.5°Cの両方を用いた結果を示す。

本稿では、他の GHG の気温への影響は DICE-2013R モデルにおいて外生的に設定している値を用いる。また、CCS 付きバイオエネルギー、その他 CO₂ 除去技術の利用可能性や規模は不確実性が高いため、いずれのケースも負の排出量を想定していない。

4. 結果

4.1 エネルギー起源 CO₂ 排出量

ベースラインケースにおけるエネルギー起源 CO₂ 排出量は 2200年まで増加の一途をたどった後、総生産当たりの排出量の改善により徐々に減少する（図3）。一方で、2050年半減ケースの 2100年から 2300年までの累積排出量は 268GtCO₂ となる。標準ケース、技術革新ケースでは 2010

年以降徐々に排出量が減少する。気候感度が高いと被害額が大きくなるため、より早期に排出量が削減される。長期的には、標準ケースは高い削減率において限界削減費用が高いことから気候感度にかかわらずゼロ・エミッションに近づかない一方、技術革新ケースでは気候感度が 3°Cの場合は 2180年以降、2.5°Cの場合は 2200年以降にゼロ・エミッションとなる。2010年から 2300年の累積排出量は気候感度が 3°Cの場合、標準ケースで 1,239GtCO₂、技術革新ケースで 812GtCO₂ となり、気候感度が 2.5°Cの場合は標準ケースで 1,369GtCO₂、技術革新ケースで 938GtCO₂ となる。

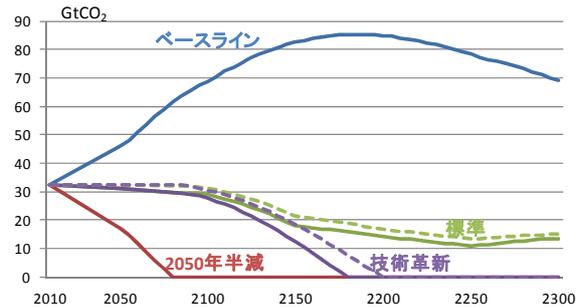


図3 各ケースの 2300年までのエネルギー起源 CO₂ 排出量

（実線：気候感度 3°C，点線：気候感度 2.5°C）

4.2 大気中の CO₂ 濃度

大気中の CO₂ 濃度はベースラインケースでは増加の一途をたどり、2300年には 1400ppm まで到達する（図4）。一方、2050年半減ケースでは 2050年をピークに減少し、2100年以降に 400ppm を下回った後は緩やかに減少する。

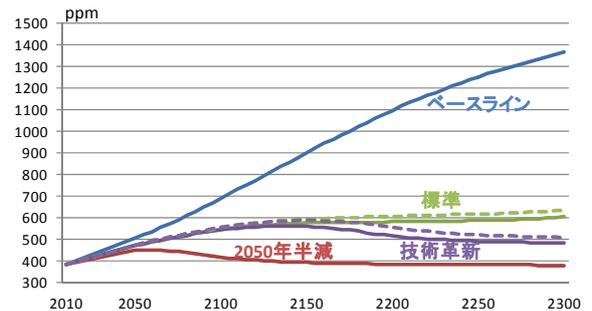


図4 各ケースの 2300年までの大気中の CO₂ 濃度（実線：

気候感度 3°C，点線：気候感度 2.5°C）

標準ケースでは CO₂ が一定程度排出されるため、2300年には 600 ppm を超える。一方、技術革新ケースでは CO₂ 排出量が 2080年以降ゼロになるため、気候感度が 3°Cの場合は 2130年頃、2.5°Cの場合は 2150年頃をピークに減少し、気候感度にかかわらず 2300年までに 500ppm 付近まで減少

する。他のGHGもあることから、仮に2100年以降に技術革新により削減率の高い領域で限界削減費用が低下しても、現在の被害額・適応費用、緩和費用の推計に基づいた最適解では長期的にGHG濃度は450ppmを下回らない。

4.3 費用便益

図5は各ケースのベースラインケース比での緩和費用、及び被害、適応費用軽減による便益を2010年から2150年、2200年、2300年までの累積で示したものである。0は費用と便益が一致する点であり、正の値は便益が費用を超える。

2050年半減ケースはCO₂濃度を長期的に大幅に抑制できるものの、気候変動の被害、適応費用軽減の便益を考慮してもベースラインケースよりも費用が高い。一方、標準ケースや技術革新ケースは緩和費用が十分低下した時期に削減対策をするため、ベースラインケースよりも費用対効果が高い。なお、標準ケースと技術革新ケースを比較すると、技術革新ケースにおいてCO₂濃度が低いが、費用対効果の観点からは同等の便益となる。

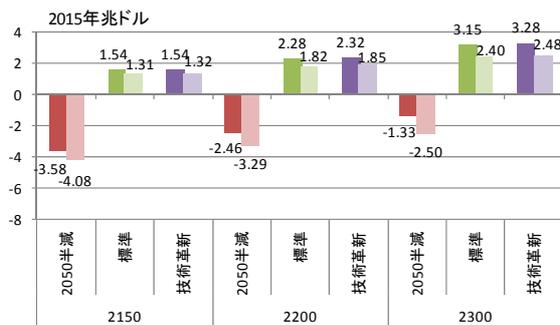


図5 2010年からの費用便益の累積総和(左:気候感度3°C, 右:2.5°C)

4.4 19世紀後半からの気温上昇

19世紀後半からの気温は2050年半減ケースでは1.3°C~1.5°Cの上昇となり2°C以下に抑えることができる(図6)。

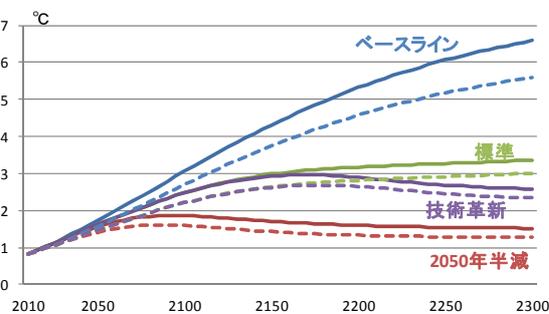


図6 19世紀後半からの気温上昇(実線:気候感度3°C, 点線:気候感度2.5°C)

標準ケースではCO₂が増加し続けることから気温も上昇し続け、2300年には3.0°C~3.4°Cの上昇となる。一方、技術革新ケースでは450ppmまでCO₂濃度は減少しないものの、2180年頃に気候感度が3°Cの場合は3°C付近、2.5°Cの場合は2.7°Cをピークに以降は減少し、2.3°C~2.6°Cの上昇程度に抑えることができる。技術革新ケースではベースラインケースよりも便益がある中で、気候感度が2.5°Cの場合は長期的に19世紀後半からの気温上昇は2°C程度まで抑制可能である。

5. おわりに

2050年半減ケースではCO₂排出量を大幅に削減し、気温上昇を大きく抑制できるが、ベースラインケースよりも費用が高くなる。一方、現状程度の技術進展が将来も継続すれば、ベースラインケースよりも便益があるが、大気中のCO₂濃度は増加し続け、気温は上昇の一途をたどってしまう。仮に将来、現状以上の技術開発が進み、削減率が高い技術の費用を抑えることができれば、より少ない費用でCO₂濃度を減少させ、気候感度によっては19世紀後半からの気温上昇を2°C近くまで低減しうる。当面は省エネルギー技術や低炭素技術で対策を進め、超長期にわたって全世界でゼロ・エミッションに近い極めて大幅なCO₂排出削減を目指すためには、削減率の大きな領域での限界削減費用の急速な高騰を低減する技術開発が必要である。世界全体で気温上昇を抑制する際は、各国が協力して革新的な技術開発への投資を推進する政策が重要となる。

参考文献

- 1) 呂正, 松尾雄司, 末広茂, 柳澤明, 山下ゆかり, 伊藤浩吉; アジア・世界の長期エネルギー需給見通しと原油価格変動の影響評価, 第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2017)。
- 2) W. Nordhaus and S. Paul; DICE 2013R: Introduction and User's Manual, <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/> (アクセス日2016.10.25)
- 3) 馬奈木俊介; 環境・エネルギー・資源戦略 新たな成長分野を切り拓く, (2013), 日本評論社。
- 4) 日本エヌ・ユー・エス株式会社「平成27年度 地球温暖化問題等対策調査(二酸化炭素回収・貯留に係る技術動向等調査)」
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000423.pdf (アクセス日2016.10.25)