カーボンプライシング・プロジェクト報告書

日興リサーチセンター
SMBC日興証券グループ

はじめに

1992 年リオ・デ・ジャネイロで開催された地球サミットにおいて、世界各国が合意した持続可能な開発(Sustainable Development)とは、地球の温暖化を食い止め地球環境を維持しつつ、経済成長とりわけ、途上国の経済発展と生活水準の向上を目指すというものです。以来、わが国を含め世界の 197 か国・地域が国際連合気候変動枠組条約（UNFCCC）に署名、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的に温室効果ガス排出削減に取り組んできました。

2015 年のパリで開催された締約国会議 COP21 において初めて「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」という世界目標で合意しました（パリ合意）。さらに、2021 年の英国グラスゴーで開催された COP26 において、1.5℃に抑えることを目標とすることが合意されました。IPCC1.5℃特別報告書では、1.5℃安定化の経路として、2030 年までに二酸化炭素排出量を 2010 年比 45%に削減、2050 年前後に実質的な排出ゼロが示されています。

これを受けて、わが国も COP26 に先駆けて、2020 年 10 月菅首相（当時）が所信表明演説において 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言しました。世界では現在、128 か国がカーボンニュートラルを宣言しており、699 のグローバル企業も実質排出ゼロの目標を宣言しています*。

*Net Zero Tracker(https://zerotracker.net/) 調べ

このようなカーボンニュートラルの時代にはカーボンプライシングがより重要になると考えます。二酸化炭素排出に価格を付けるという考え方は、古典的な厚生経済学でも提唱されている排出削減手法です。つまり、排出に課税し、排出削減に補助金を出すことにより、排出削減が達成されるというものです。また、排出権取引など外部不経済を市場に内生化する試みも削減に有効とされます。しかし、カーボンニュートラルは二酸化炭素排出の削減の取り組みだけでは達成できません。例えば、企業は削減に取り組みますが、最終的には削減しきれない排出が残ると考えられます。この排出については、いかに課税してもゼロにはできません。実質排出ゼロのためには、誰かに大気中から排出と同量の二酸化炭素を回収してもらう必要があります。このように、各主体が排出実質ゼロを達成するためには、カーボンを広くやり取りする必要があるのです。これは、グローバル・カーボン市場の形成を予想させます。

グローバル・カーボン市場はどのように形成されていくのか。この市場において、価格発見機能はどのように装備されるのか。このような問題意識から、弊社内にカーボンプライシング・プロジェクト（CPP）が立ち上がりました。CPP は、2021 年度自主プロジェクトとして社内有志が参加しました。各研究員

が、カーボンプライシングの理論、カーボンプライシングの現況あるいはカーボンプライシングに影響する技術など、多様な側面から調査研究を試み、その成果を日興リサーチレビューとして発表しました。本ブックレットは、CPP リサーチレビュー15 本をまとめたものです。

CPP リサーチレビューは、経済モデルによるカーボンプライシング、企業や金融機関におけるカーボンプライシング、オフセット市場や企業のインターナルカーボンプライシング、さらにカーボンニュートラル技術といったテーマをカバーしています。興味をもたれたテーマから読み進めていただければ幸いです。

なお、CPP は、今年度よりカーボンプライシング研究室（CP ラボ）として正式に発足しました。CP ラボでは、カーボンプライシングの調査研究を引き継ぐ他、プライシング・モデルの開発にも取り組み、グローバル・カーボン市場形成に貢献したいと考えています。

本書に関するご質問はCP ラボ室長 本山 真(motoyama_shin@nrc.nikko.co.jp)までお寄せください。

2022 年 5 月

日興リサーチセンター株式会社
取締役社長　　吉良　俊志

-謝 辞-
自主プロジェクト CPP を熱く支援してくださった前社長 末永 雅春氏に感謝申し上げます。

要　約

経済モデル

■DICE モデルによるカーボンプライシング

脱炭素の実現に向け、炭素に価格をつけて温室効果ガス排出を抑制するカーボンプライシングが注目されている。炭素にはどれくらいの価格をつけるのが適正だと考えればよいだろうか。安過ぎると排出抑制効果が薄れるが、高くなるほど支払う側の負担は大きくなる。本稿では、2018 年にノーベル経済学賞を受賞した米イェール大学のウィリアム・ノードハウス教授が開発した「DICE モデル」 を使い炭素価格や気候変動について考察する。モデルによる試算では、炭素価格は 2020 年時点で排出量 1 トンあたり約 40 ドルとなり、今後の上昇傾向が示された。また、割引率などパラメータ次第で炭素価格や気候変動に関するシナリオが変わることを確認した。

■脱炭素社会に向けた統合評価モデルの再考～有用性と不確実性、カーボンプライシング～

2015 年 12 月、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）にて「パリ合意」が取り決められて以降、主要先進国・地域で温室効果ガスの排出量削減目標が掲げられ、取り組みが進められてきた。近年では、経済活動を通じて排出される二酸化炭素に価格を付けるカーボンプライシングへの関心が高まっており、主要な例としては、「炭素税」や「排出量取引」などが挙げられ、こうした気候変動問題への対策の検討や評価には世界中の研究機関などが開発した様々なモデルから得られる結果が活用されている。

日本の金融業界においても、昨今、CAT ボンドや損害保険のような自然災害リスクを組み込んだ商品や、脱炭素関連企業の株式に投資する投資信託などが登場しており、投資家や金融機関も気候変動による影響を把握しておく必要性が増していることから、本稿では、気候変動リスクやカーボンプライシングの理解における一助となることを目指し、気候変動予測と経済モデルを結びつける統合評価モデルの代表例として DICE モデル、RICE モデル、PAGE モデル、FUND モデルを紹介する。

こうしたモデルの基本構造を理解しておくことは、統合評価モデルに限らず、今後、金融業界においても気候変動に関連した様々なリスクを把握し、経済的に評価する際に有効であろう。また、モデルにおける将来の不確実性という性質は、気候変動予測の今後の課題でもあり、モデルの有用性と併せて把握しておくことがアウトプットを見るうえで重要である。

■気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル

気候モデルと経済モデルを組み合わせたモデルは、統合評価モデルと呼ばれ、ノーベル経済学賞を受賞した William Nordhaus の DICE モデル（Dynamic Integrated model of Climate and the Economy）等の多くのモデルがあり、政策の決定や政策評価に用いられている。気候変動が地球全体の事象であるため、通常、統合評価モデルは世界を一つ、あるいはいくつかの地域に分割して世界全体を対象とするが、本稿ではこのようなグローバルな分析ではなく、国内経済や特定の地域経済を対象にした分析を行うためのモデルを提示する。そして、提示したモデルを利用して、炭素価格と気温上昇について複数のケースを前提として、二酸化炭素排出量の経路と経済的な影響として災害等による被害と二酸化炭素の削減費用、生産の経路について数値計算の結果を示した。

■一次エネルギー発電コストから推計した二酸化炭素の排出価格と排出総額

2015 年 12 月、フランスのパリにおいて第 21 回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）が開催され、2020 年以降の温室効果ガス排出削減に向けた「パリ協定」が採択された。また、2021 年 11 月にはイギリスのグラスゴーに

おいて「グラスゴー気候合意」が採択され、パリ協定からさらに踏み込んだ表現を盛り込んだ。このような中、国内でも上場企業等に対し、温室効果ガス排出量の測定や気温上昇に伴う経済的な損失額の試算などの開示検討が報じられている。そこで、本稿では、一次エネルギー源のうち温室効果ガスの一つである二酸化炭素を多く排出する石炭や LNG など化石エネルギーによる発電、発電時に二酸化炭素を排出しない原子力エネルギーや再生可能エネルギーといった非化石エネルギーによる発電に着目し、それぞれの発電コストを用いて二酸化炭素の排出価格や国内で排出される二酸化炭素の排出総額を 2020 年時点、2030 年時点の 2 時点で推計した。各化石エネルギー電源の二酸化炭素排出価格を加重平均した結果、2020 年における二酸化炭素排出価格は、二酸化炭素 1 トン当たり 10,293 円、2030 年における二酸化炭素排出価格は二酸化炭素 1 トン当たり 5,814 円との推計結果となった。

企業、金融機関

■「わが国企業は脱炭素投資を賄えるのか」

日本政府は 2050 年までにカーボンニュートラルを目指している。気候モデルと経済モデルを統合した DICE モデルを一部修正した本山モデルの推計結果を基にすると、2050 年にカーボンニュートラルが実現するためには、2020 年の炭素価格は 323 ドル/CO_2 トンとなった。この炭素価格を基に CO_2 排出量を開示している企業（387 社）が 2020 年度に排出した CO_2（年 5.81 億トン）を金額ベースに換算すると 19.9 兆円が経済学上の「社会的費用」と言える。ただし、これは単純なコストとは言えず、昨今の国際的潮流を踏まえると脱炭素に向けた資源投入と考えると、成長投資の一環と言える。この「19.9 兆円」を規模感で比較すれば、研究開発費（13.3 兆円）と設備投資額（33.9 兆円）の間に位置するものの、現実にはかなりの部分を代替する成長投資として実施されていると考えられることから、過剰な追加負担とは言えない。

■気候変動関連リスクと機会に関する一考察 ～業種による傾向分析～

気候関連のリスクと機会を整理し、的確に把握することは、企業が経営戦略やリスク管理を行う上で、非常に重要である。本稿では、TCFD 提言をもとに企業の気候関連のリスクと機会を整理し、CDP のデータを用いて気候関連のリスクと機会の項目ごとに業種別の回答率を集計し、各項目の特徴を確認し、業種ごとの傾向について考察した。各項目で回答率の高い業種が異なっており、例えば、リスクでは、企業が今後の規制強化を想定していること、機会では、金融業が気候変動を新たな市場として開拓していることなど、業種の特徴が反映されていることに言及した。

■国内株式のバリュエーションと CO_2 排出量の関係

カーボンニュートラル社会への移行では、企業には既存の技術や製品の陳腐化、社会の需要の変化に対応するために生じるコストの増加などのリスクがある一方、新たな事業や技術革新による収益性の向上などの機会もある。そのため、気候変動に関連する情報が、株式市場における企業の評価にも影響することが考えられる。気候変動関連の開示の拡充が進んでいるが、本稿では、企業の CO_2 排出量に焦点を絞り、株式のバリュエーション指標である PBR と CO_2 排出量の関係について調査し、売上高当たりの CO_2 排出量の多い業種ほど PBR が低くなる傾向があり、個別企業においても同様の傾向があることを確認した。

■脱炭素社会における企業の存続確率モデル

脱炭素社会の実現のためには、金融機関や機関投資家等の市場参加者が、企業の温室効果ガスの排出量や気候変動への取り組みを把握し、脱炭素社会に資する企業評価を行い、資本市場における資本配分等の金融面から地球温暖化対策に寄与することが期待される。しかし、温室効果ガスの排出量等の気候変動関連の情報を証券分析や企業評価に反映する方法を確立することはこれからの課題である。本稿では、脱炭素社会における企業の計量的な分析方法の一つ

の試案として、オプション理論を応用した企業の存続確率モデルを定式化し、計算結果を示しながら、利用方法を検討する。具体的な利用方法としては、①金融機関や機関投資家等の投融資先の評価、②資金調達コストの分析、③二酸化炭素の排出削減に関するシミュレーション、④二酸化炭素排出企業と回収・貯留等を行う企業のマッチングに言及した。

■金融機関の気候変動に関する開示状況調査

地球温暖化による気候変動が財務へ与える影響を把握する手段の一つとしてシナリオ分析の取り組みが始められている。本稿では、投資家向けの気候変動情報の開示方法を示した TCFD 提言を踏まえ、銀行が気候変動への対策について現状どのような開示をしているか、さらにシナリオ分析にどのように取り組んでいるかについて調査した。その結果、TCFD 提言に基づく開示に向けた取り組みについては、都市銀行、一部の地方銀行が先行して始めており、その他の地方銀行、第二地方銀行については検討段階、もしくはこれから取り組みを始めていく状況であった。また、シナリオ分析については、分析対象とした銀行の 2021 年 3 月期の取り組み状況には大きな差があったが、先行して実施している銀行では、移行リスクに関しては IEA の持続可能な開発シナリオ（SDS）、NGFS の Net Zero 2050（1.5℃シナリオ）等を活用し、物理的リスクに関しては IPCC の RCP8.5（4℃シナリオ）等を活用していた。

■金融機関の金利リスク計測における NGFS の気候シナリオの活用

2021 年 6 月、NGFS が 2 回目の気候シナリオを公表した。これは、気候変動が各国・地域の経済と金融システムに与える影響を複数のシナリオとして示したものである。本稿では、当該シナリオをどのように金融機関のリスク管理に導入していくかという観点から、6 つのシナリオの概要、経済的影響（長期金利の変化）の概略を説明した上で、NGFS の気候シナリオに基づく日本の長期金利の将来予測を 10 年スポットレートとみなしたうえで 2022 年末のイールドカーブへと変換し、現在のイールドカーブとの比較を行った。その結果、年限 10 年では Net Zero 2050 シナリオが 0.6%と最も高くなっているのに対して、年限 29 年では Divergent Net Zero シナリオが 2.47%、Delayed Transitions シナリオが 2.44%となり、気候変動政策が産業間で相違、あるいは遅延することで、迅速かつ円滑に推進する場合よりも、年限が長期化するほど現在のスポットレートとの差異が大きくなるということを示していた。

カーボンプライスの動向

■ネットゼロを実現するカーボン・オフセット

自主カーボン・クレジット市場は企業のオフセットニーズから拡大しているが、ほとんどが排出削減をオフセットするクレジットである。ネットゼロまでのトランジションにおいて、排出削減クレジットによって、企業の排出削減をオフセットすることは可能であるが、ネットゼロ時点に残る削減しきれない温室効果ガス排出は、カーボン除去・クレジットによってのみオフセットできると考えられる。現在、削減クレジットは平均 3 ドル程度で取引されているが、企業にコストのかからない削減余地がまだ十分あることを示していると考えられる。削減が進展すると削減クレジットの価格は上昇し、ネットゼロ達成時には、カーボン除去・クレジットの価格と一致すると考えられる。

■日本企業のインターナルカーボンプライシングの動向について

インターナルカーボンプライシング（以降、ICP）とは、企業自らが気候リスクを経営に反映させるために導入する、主に二酸化炭素への価格付けのことを指す。日本企業の導入状況について確認したところ、上場する大型企業が主に導入しており、その数も増加傾向にある。また、その価格（以下、ICP s ）は、200 円/トンから 2,000 万円/トンと幅広く設定されている。ICP を導入する意図には、「将来の企業の意思決定に反映させる」こと（Shadow price）と「企業の現在の炭素排出削減の行動を促す」こと（Carbon fee）の 2 つに大別される。そこで、各タイプの ICPs の分布を

比較したところ、Carbon fee は Shadow price に比べ分布する価格の幅が広く、さらに極端に低い価格（900 円/トン以下）や高い価格（5 万円/トン以上）を設定する企業が相対的に多く確認された。

■EU ETS を参考にした排出量取引市場の多期間分析

排出量取引制度とは、排出許可証を意味する「排出枠」や排出削減認定証のような「クレジット」を取引することによって、排出削減を促す制度である。制度対象者全体の排出量を制限することが可能であるが、需給によって変動する炭素価格の安定化が課題になる。本稿では、欧州排出量取引制度（EU ETS）を参考に多期間モデルを提示し、排出枠の需給に対して様々な環境の変化が生じたときに、炭素価格がどのように変化するかシミュレーションを行う。価格変動の方向性や規模が分かれば、制度設計者は価格安定化策の必要性を検討することができ、取引参加者は価格変動リスクを低減することが可能となる。

■“Effective Carbon Rates 2021”で見るカーボンプライシング制度の状況

OECD が公表する Effective Carbon Rates を基に、44 か国のカーボンプライシングを用いた制度の導入状況について、Carbon Pricing Score を確認した。OECD の 2021 年報告では、CPS のうち、2060 年ネットゼロを目標とした場合の 2030 年時点の CO2 価格を 60 ユーロ/CO2t と想定し、60 ユーロ/CO2t 以上のカーボンプライシング制度が対象とする CO2 排出量の割合（CPS60）を主要な指標として利用している。

44 か国全体での CPS60 は 19%であり、スイスをはじめとした欧州や北欧などが上位で確認された。また、中国、米国、ロシア、インドなどの CO2 排出量の多い国では、スコアが低く、60 ユーロ以上のカーボンプライシング制度の導入の割合が低い状況にある。バイオマス燃料をカーボンニュートラルのエネルギーであると仮定した場合でも、これらの国のスコアに大きな変化は確認されなかった。

6 つの排出部門別の CPS60 を確認すると、部門によって大きく異なっている。発電部門や産業部門は CO2 排出量の割合が多く、CPS60 が 5%と低いのに対し、道路輸送部門は排出の占める割合は大きいが、燃料税などのカーボンプライシング制度により、60%と高いことが確認された。

カーボンニュートラル技術

■主要な CO_2 の分離・回収技術とコスト的課題

CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)とは、排出源から CO_2 を分離・回収、輸送し、地下に閉じ込めることで、CO_2 を固定化する技術である。昨今では、カーボンニュートラル目標を掲げる国や企業が増加しており、再生可能エネルギーへの転換など排出抑制策が加速している。一方、世界人口の増加やグローバル化による経済成長により、排出抑制策だけではカーボンニュートラルは達成できない。また、エネルギーや鉄鋼などの高排出産業の脱炭素化は難しく、排出された CO_2 をオフセットできる CCS に期待が集まっている。

しかし、CCS は CO_2 を他の気体から分離して回収する工程に多大なコストがかかることが課題となっており、コスト低減向けて様々な回収方法が検討されている。現在、主流の CO_2 分離・回収方法はアミン水溶液を用いた化学吸収法であり、その分離・回収コストは 1 トン当たり 4,000~6,000 円台となっている。

目　次

経済モデル

DICE モデルによるカーボンプライシング 8

脱炭素社会に向けた統合評価モデルの再考 ～有用性と不確実性、カーボンプライシング～ 14

気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル 25

一次エネルギー発電コストから推計した二酸化炭素の排出価格と排出総額 35

企業、金融機関

「わが国企業は脱炭素投資を賄えるのか」 46

気候変動関連リスクと機会に関する一考察 ～ 業種による傾向分析 ～ 51

国内株式のバリュエーションと CO_2 排出量の関係 58

脱炭素社会における企業の存続確率モデル 66

金融機関の気候変動に関する開示状況調査 76

金融機関の金利リスク計測における NGFS の気候シナリオの活用 84

カーボンプライスの動向

ネットゼロを実現するカーボン・オフセット 91

日本企業のインターナルカーボンプライシングの動向について 102

EU ETS を参考にした排出量取引市場の多期間分析 109

“Effective Carbon Rates 2021”で見るカーボンプライシング制度の状況..... 119

カーボンニュートラル技術

主要な CO_2 の分離・回収技術とコスト的課題..... 126

DICE モデルによるカーボンプライシング

2021 年 10 月
投資工学研究所　　伊藤　央峻

1. はじめに

脱炭素の実現に向け、炭素に価格をつけて温室効果ガス排出を抑制するカーボンプライシングが注目されている。世界銀行によると、64 の国・地域に炭素税または排出量取引によるカーボンプライシングが導入され、世界の排出量の 21.5%がカバーされている[1]。この分野で先行するのは欧州だが、中国でも 2021 年 7 月に二酸化炭素（CO_2）の排出量取引が始まったほか、日本も 2022 年度の排出量取引市場の実証開始を目指している[2]。

炭素にはどれくらいの価格をつけるのが適正だと考えればよいだろうか。安過ぎると排出抑制効果が薄れるが、高くなるほど支払う側の負担は大きくなる。

本稿では、2018 年にノーベル経済学賞を受賞した米イェール大学のウィリアム・ノードハウス教授が開発した「DICE モデル」[3]を使い炭素価格や気候変動について考察する。DICE モデルはマクロ経済学や地球物理学に基づく関係式で構成されている。より複雑なシミュレーションに用いられる手法と比べると小規模になるものの、炭素価格を計算でき、経済と気候変動との関係の理解にも役立つ。

第 2 章で DICE モデルの概要と計算内容について説明し、第 3 章でモデルの出力結果及び炭素価格について述べる。第 4 章では割引率を変更した場合の出力の変化を考察する。

2. DICE モデルの概要と計算内容

DICE モデルは統合評価モデル（Integrated Assessment model, IAM）と呼ばれるモデルの一種で、経済と気候という 2 つの領域のグローバルな相互作用を 1 つにまとめている。ノードハウス教授は 1970 年代にこのテーマに取り組み始め、1990 年代半ばに世界で初めての統合評価モデルとして開発した。その後も改良が続けられており、最新版は DICE-2016R2 モデル[4]となっている。

---

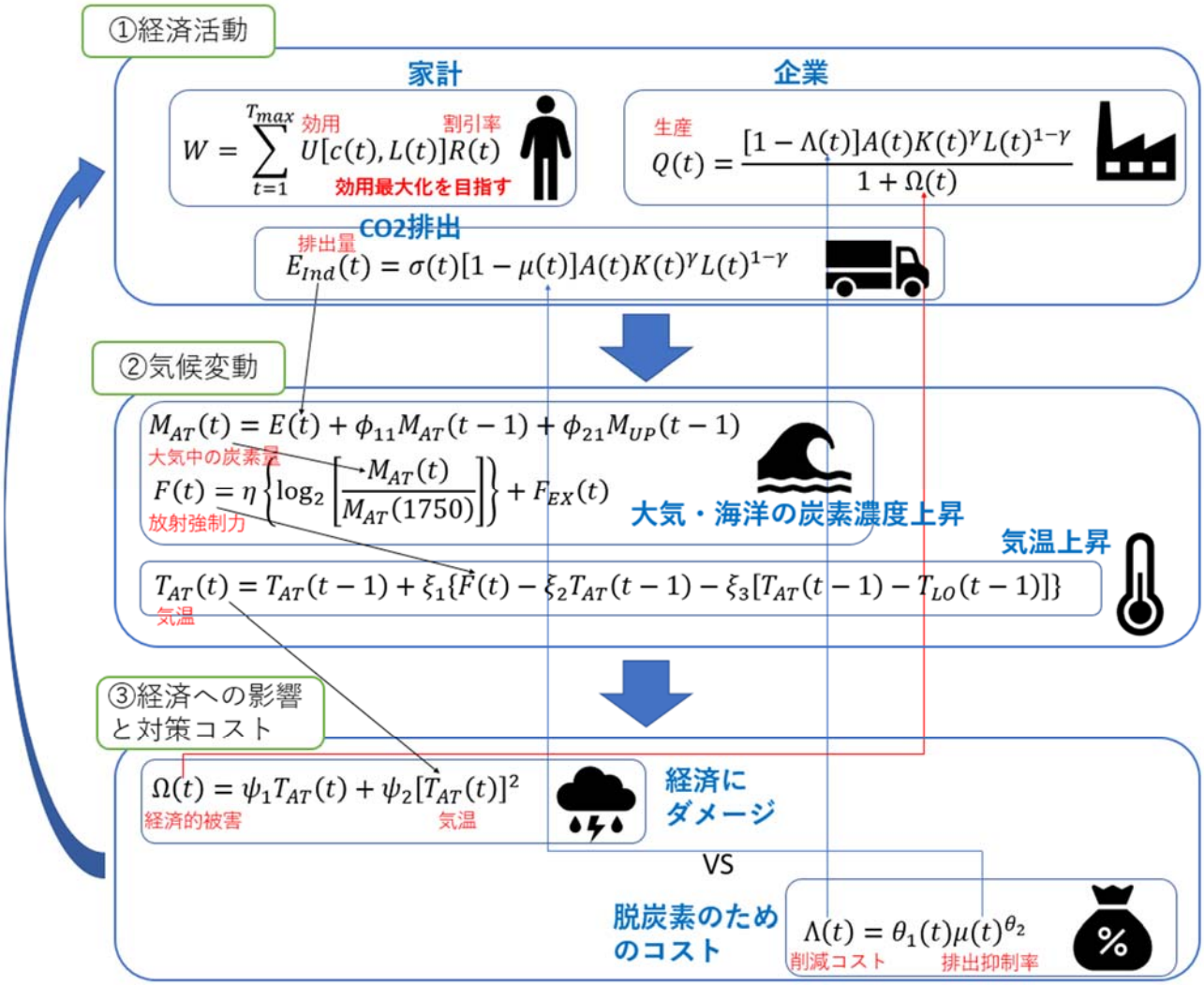
[1] World Bank[2021], “State and Trends of Carbon Pricing 2021,” https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620

[2] 経済産業省[2021], “世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法等のあり方に関する研究会 中間整理,” https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral_jitsugen/20210825_report.html
なお、日本では東京都と埼玉県が独自の排出量取引制度を既に実施している。

[3] “Dynamic Integrated model of Climate and the Economy(気候と経済の動学的統合モデル)”の略称

[4] ノードハウス教授の HP（https://williamnordhaus.com/dicerice-models）に公開されている。本稿における DICE モデルの計算には当該 HP に公開されている GAMS のソースコード（DICE-2016R2-083017.gms）をもとに日興リサーチセンターが作成した Python のプログラムを用いる。モデルに入力する各変数もそのソースコードにある値を使用する。

図表１　DICE モデルが想定する経済と気候変動の概念図



（出所）Nordhaus/Sztorc[2013]より日興リサーチセンター作成

DICE モデルで想定する経済と気候変動の関係を図表１[5]に示した。図表１の①経済活動の中で家計は長期間の効用（満足度）の合計Wを最大化させるように消費し、企業は生産活動を行い、その過程で CO_2が排出される。

経済活動による CO_2排出量$E_{Ind}(t)$に経済活動以外の排出量を加えた$E(t)$は、②気候変動において大気中の炭素量$M_{AT}(t)$を算出する要素として組み込まれている。大気中の炭素量$M_{AT}(t)$が増加すれば CO_2の温室効果により、地球のエネルギー収支を示す放射強制力$F(t)$が上昇し、これにより気温$T_{AT}(t)$が上昇する。

次に③経済への影響と対策コストをみてみると、地球温暖化の経済的被害率$\Omega(t)$は気温$T_{AT}(t)$の 2 次関数で表されている。温暖化が進むと豪雨や海面上昇といった被害が逓増すると想定している。経済的

[5] 図表に挿入した数式はモデルから一部を抜粋している。各変数の定義及びすべての数式等のモデルの詳細は DICE モデルのユーザーマニュアル（Nordhaus/Sztorc, 2013）等を参照されたい。

被害率$\Omega(t)$は生産の計算式に組み込まれており、気温が上昇するほど企業の生産活動に大きな負担を及ぼす。

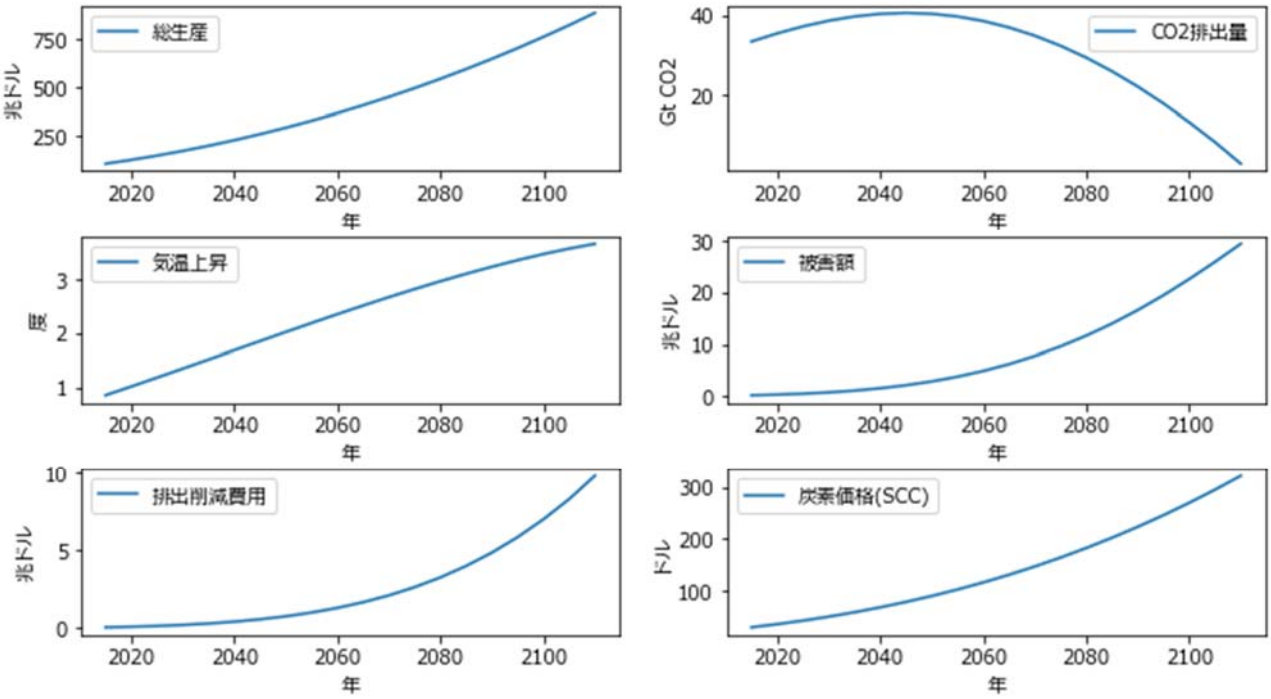
③では脱炭素のためのコストも計算される。CO_2削減にかかる費用率$\Lambda(t)$は目標とする排出抑制率$\mu(t)$の関数となっている。高い削減目標を掲げるほど生産額に占める負担も大きくなるが、その分 CO_2 排出も抑えられ経済的被害率$\Omega(t)$が減るトレードオフの関係となっている。

以上のようなモデルで人々の満足度が最も大きくなるような配分を導出し、経済活動と気候変動の相互作用をシミュレーションできる。モデル内の変数の値は実際に観測されたデータや将来の予測値をもとに決めている。

3. DICE モデルの出力結果と炭素の社会的費用

DICE モデルの出力結果を図表 2 に示した。世界の総生産が増え続けていくなか、CO_2排出量[6]は 2050 年頃にピークを迎え、その後は減少に転じ 2100 年を過ぎたあたりでネットゼロになる。一方、気温[7]は 2100 年にかけて一貫して上昇し、被害額や排出削減費用も次第に増えていく。

図表 2　DICE モデルの出力結果



（出所）DICE モデルより日興リサーチセンター作成

炭素価格は、追加的な炭素排出 1 単位が経済に与える影響の大きさを示す炭素の社会的費用（Social

[6] CO_2排出量は経済活動による排出量$E_{ind}(t)$に経済活動以外の排出量を加えた総排出量$E(t)$

[7] 気温上昇は 1900 年を基準とした数値。

Cost of Carbon, SCC）という概念で算出できる（Nordhaus, 2017）。CO_2排出量$E(t)$が追加的に 1 単位増えるごとにどれだけ消費$C(t)$が減少するかが計算される。式で示すと以下のような形になる。

$$SCC(t) = \frac{\frac{\partial W}{\partial E(t)}}{-\frac{\partial W}{\partial C(t)}} = -\frac{\partial C(t)}{\partial E(t)}$$

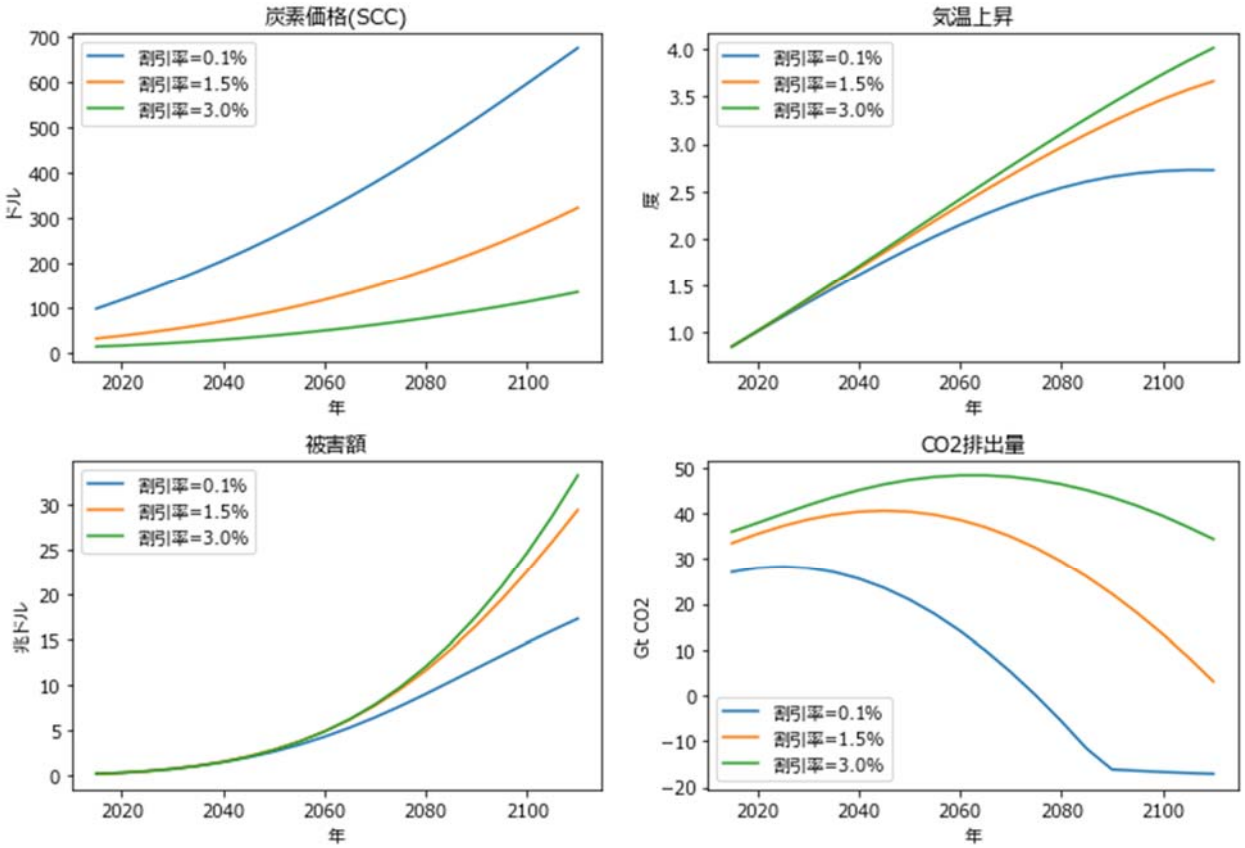
DICE モデルで算出した SCC は前出の図表 2 の右下に示している。2020 年時点では CO_2排出量 1 トンあたり約 40 ドルとなっている。また 2050 年に約 90 ドル、2100 年には約 270 ドルと上昇していく傾向がある。

4. 異なる割引率でのシミュレーション

DICE モデルによる炭素価格の難点として、人間の主観等によって価格が大きく変わってしまう点が挙げられる。一例として、割引率に関する議論がある。

一般に、人には将来よりも今受け取れる利益のほうをより好む「時間選好」の傾向がある。気候変動対策によって CO_2を減らしたとしてもその恩恵を受けられるのは将来のことであり、したがって将来の価値をどれだけ割り引くかによって炭素価格は変わってくる。

図表 3　割引率による出力結果への影響



（出所）DICE モデルより日興リサーチセンター作成

DICE モデルでは、市場金利や投資収益率に基づき、割引率を 1.5%に設定している。一方、英国の経済学者ニコラス・スターン氏が発表し世界の気候変動への見方に大きな影響を与えた「スターン報告」（Stern, 2007）では、割引率を 0.1%に置き、将来世代の受け取る価値は自分達の世代と等しく扱われるべきだと主張した。スターン氏は、割引率を 1.5%と置くと 50 年後の価値が半分以下に割り引かれてしまうことから、あたかも祖父母が 50 歳若い孫の消費行動を半分に見積もるようなものだと批判している。

図表 3 に割引率を 0.1%、1.5%、3.0%とした場合の各変数の推移を示した。スターン報告の仮定である割引率 0.1%を適用すると、SCC は 2020 年時点で 1 トンあたり 100 ドルを突破し 2100 年には約 600 ドルとかなり高額の負担になるが、その分気温上昇はゆるやかになり被害額が抑えられ 2075 年頃にカーボンニュートラルが達成される。一方、割引率を高めていくと炭素価格は下がり負担が減るが、CO_2排出量は増えていき、気温は大きく上昇する。将来世代をどこまで慮るかという価値観は炭素価格だけでなく気候変動の目標達成状況を強く左右する。

5. おわりに

本稿では DICE モデルとそれを用いた炭素の価格付けなどについて考察した。試算では、炭素価格は 2020 年時点で排出量 1 トンあたり約 40 ドルとなり、今後の上昇傾向が示された。また、割引率などパラメータ次第で炭素価格や気候変動に関するシナリオが変わることを確認した。

IMF によると現在の炭素価格は世界の平均で約 3 ドルしかなく[8]、統合評価モデルによる試算とはギャップがある。日本の炭素税にあたる地球温暖化対策税も排出量 1 トンあたり 289 円に留まっている。脱炭素の目標達成に向け、本格的なカーボンプライシングの導入に向けた議論が続きそうだ。

地球温暖化は世界全体の問題であり、DICE モデルも単一の世界を想定している[9]が、現実には国際的な協調は大きな課題である。CO_2を削減していない国が削減している国と同じく恩恵を受ける「フリーライド（ただ乗り）」問題の解決策について、ノードハウス教授は対策に取り組む国同士の貿易同盟を提案している（Nordhaus, 2020）。カーボンプライシングを実施している国で同盟を組み、同盟に参加しない国との貿易には輸入関税をかけることでインセンティブを働かせるという発想だ。近い動きとして、欧州連合（EU）は環境規制の緩い域外からの輸入品に関税をかける炭素国境調整措置（CBAM）を導入する方針を示している。こうしたカーボンプライシングをめぐる国際動向に今後も注目していきたい。

[8] Parry, I., Simon, B., and James, R.[2021], “Proposal for an International Carbon Price Floor among Large Emitters,” IMF Staff Climate Notes 2021(001)

[9] DICE モデルをベースとして世界を 12 の地域に分割した RICE（Regional Integrated model of Climate and the Economy）モデルもノードハウス教授は開発している。

参考文献

Nordhaus, W.D., and Sztorc, P.[2013], “DICE 2013R: Introduction and User’s Manual,” http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf

Nordhaus, W.D.[2017], “Revisiting the social cost of carbon,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(7), 1518.1523.

Nordhaus, W.D.[2020], “The Climate Club: How to Fix a Failing Global Effort,” *Foreign Affairs May/June*, https://www.foreignaffairs.com/articles/united-states/2020-04-10/climate-club

Stern, N.[2007], “The Economics of Climate Change: The Stern Review,” Cambridge University Press

（END）

脱炭素社会に向けた統合評価モデルの再考
～有用性と不確実性、カーボンプライシング～

2022 年 3 月

資産運用研究所　　小原　萌香

1．はじめに

2015 年 12 月、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）にて、2020 年以降の地球温暖化対策の国際的な枠組みである「パリ合意」が取り決められて以降、主要先進国・地域で温室効果ガスの排出量削減目標が掲げられ、取り組みが進められてきた。日本においても、菅内閣総理大臣（当時）が 2020 年 10 月の所信表明演説にて「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル[1]、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言しており、中期目標として 2030 年度の排出量を 2013 年度から 46%削減することを掲げている。

脱炭素社会の実現に向け、温室効果ガス排出削減への取り組みを促進するために、近年、経済活動を通じて排出される二酸化炭素に価格を付ける、**カーボンプライシング**への関心が高まっており、主要な例としては、化石燃料や電気の利用に応じて税金をかける「炭素税」や、企業ごとに温室効果ガスの排出枠を定め、排出枠が余った企業と、排出枠を超えて排出した企業との間で枠を取引する「排出量取引」などの政策が挙げられる。これらは 2021 年 4 月時点で欧州を中心に 64 の国・地域で導入されており、こうした気候変動問題への対策の検討・評価の際の将来推計や影響分析には、世界中の研究機関などが開発した様々な**モデル**が活用されている。

このような中、日本の金融業界においても、昨今、CAT ボンドや損害保険のような自然災害リスクを組み込んだ商品や、脱炭素関連企業（温室効果ガスの排出量の削減、吸収及び除去等への貢献が期待される企業等）の株式に投資する投資信託などが登場しており、投資家や金融機関も、投資判断に際し、気候変動による影響を把握しておく必要性が増している。

そこで本稿では、気候変動リスクやカーボンプライシングの理解における一助となることを目指し、気候変動予測と経済モデルを結びつける**統合評価モデル**の代表例を、特徴や仕組みとともに紹介していく。

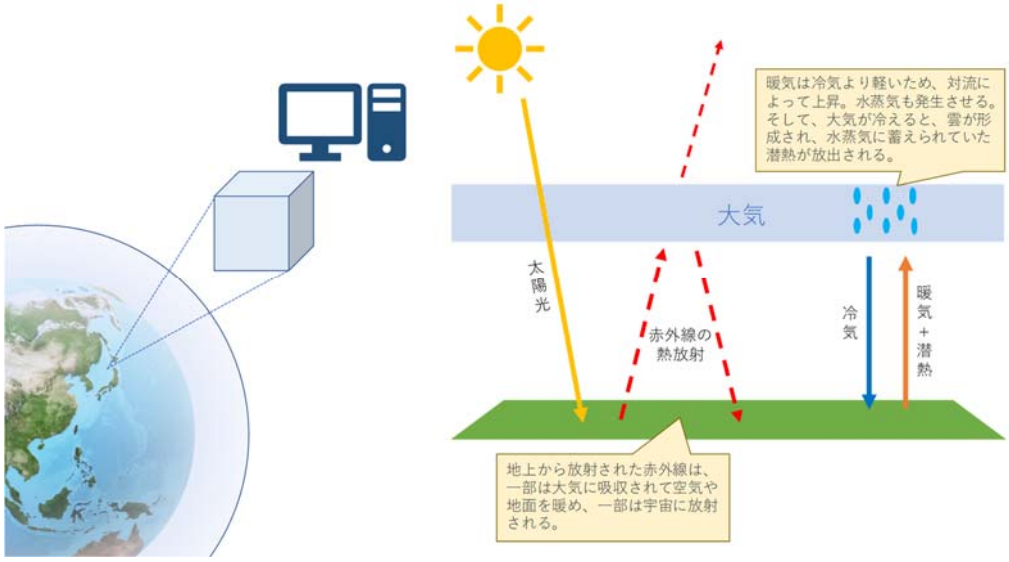
[1] 二酸化炭素やメタン、一酸化二窒素などといった温室効果ガスの「排出量」から、森林などによる「吸収量」を差し引いた量をゼロにすること。

2. シンプルなモデルの意義

さて、本題に入る前に、“モデル”そのものの意義を考える。気候変動に関連するモデルと聞くと、記憶に新しいのは 2021 年にノーベル物理学賞を受賞した、真鍋淑郎氏らの「大気・海洋結合モデル」であろう。真鍋氏らは、熱の放射収支と、対流による大気の輸送、および水循環による熱の移動に着目した。そして、上空の大気まで含む地球全体を格子状に分割することで、そのそれぞれについて、風の流れや熱の輸送を、時間間隔を設けながら計算するモデルを開発した。これにより、大気中のガス濃度と温度変化の関係を扱いやすく、かつ大気と海洋を一体化したシミュレーションを可能にした（図表 1）。

その結果、二酸化炭素濃度の上昇が地球の気温上昇を引き起こすメカニズムの解明や、さらには現在用いられている長期の気象予測モデルの開発へと繋がった。

図表 1　真鍋氏の開発した気候モデルのイメージ



（出所）スウェーデン王立科学アカデミーHP より日興リサーチセンター作成

このように、複雑に影響しあう現象を、本質的な部分を残したうえで、なるべくシンプルにすることで、パターンを見つけたり、理解・説明しやすくしたりする点にモデル化の意義がある。

本稿で紹介していく「**統合評価モデル**（*IAM*：*Integrated Assessment Model*）」は、気候変動対策を検討または評価する際のエビデンスの必要性から、世界中の研究機関で開発されてきた。これらは経済学と気候変動とを結びつけ、「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の評価報告書の作成などにも用いられており、改良により年々多様化かつ複雑化することで、モデルの中身の理解よりアウトプット（出力結果）に注目が集まりつつある。しかし、気候変動の深刻さが増した今だからこそ、モデルの性質を理解したうえでアウトプットを見ることが重要であると考える。そこで、統合評価モデルの本質部分の理解のため、次章からは気候変動の**統合評価モデルの第一世代**を築いたモデルをいくつか紹介していく。

3. 初の統合評価モデル、『DICE モデル』

統合評価モデルの 1 つ目として、DICE モデル（*Dynamic Integrated Climate-Economy*）を紹介する。2018 年にノーベル経済学賞を受賞した *William D. Nordhaus* 氏によって 1990 年代前半に開発された、初の気候変動の統合評価モデルである。

3～6 章で紹介していく 4 つの第一世代モデルは、それぞれ複数の連立した式から構成されるが、イメージがしやすいよう、まず、いずれにも共通する構造を簡潔に説明する。

モデルを構成する式は、大きく

①経済モジュール、②二酸化炭素循環モジュール、③気候変動モジュール、④損害・コストモジュール

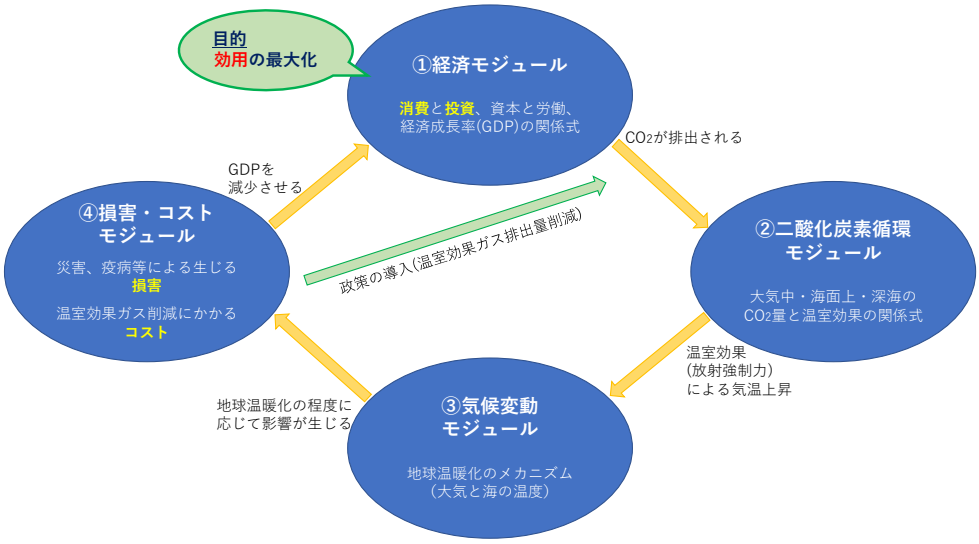
の 4 つのモジュールに分類される（図表 2）。

前提として、人々が経済活動を行う（①）と、エネルギーの利用に伴って二酸化炭素が排出される。②では、経済活動の結果、排出された二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスが、大気中や海洋上でどの程度の濃度になるかを、長年の蓄積量や森林による吸収量などを考慮しながら算出する。

そして③では、温室効果（放射強制力[2]）に応じてどの程度、地球の気温上昇が生じるかを算出し、④ではその影響で生じうる損害額、および、気候変動対策として二酸化炭素排出削減を行うときにかかるコストを算出する。ここでの損害およびコストは①において GDP を減少させる。

このような一連のサイクルにおいて、将来のある時点までの、効用の現在価値の合計を最大化することを目的関数とし、変数を最適化する。また、この際、排出削減費用や損害額のシミュレーションに加え、二酸化炭素排出量が 1 単位増加した場合に生じる影響を貨幣価値に換算した、**炭素の社会的費用（以下、*SCC* : *social cost of carbon*）**も算出することができる。

図表 2　統合評価モデルのモジュールのイメージ



（出所）日興リサーチセンター作成

[2] 対流圏と成層圏の境界（圏界面）における、地球に出入りするエネルギーの正味の放射平衡の変化のこと。正の放射強制力は大気を暖め（温暖化を引き起こし）、負の放射強制力は大気を冷やす（寒冷化を引き起こす）傾向がある。

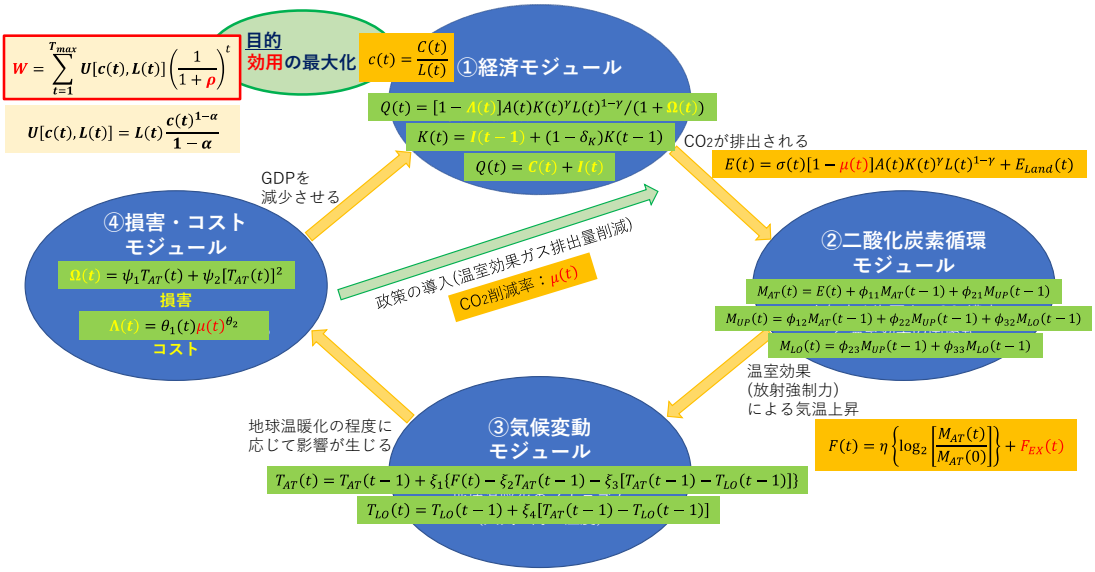
図表３は、参考までに図表２上に DICE モデルの式を配置した概要図である。このように、DICE モデルの場合、一連の複雑な事象をたった十数個の式で表したところが当時、非常に画期的であった。

DICE モデルでは、世界全体を１つの地域とみなし、効用 W を最大化するような行動（**消費 $C(t)$**と**投資 $I(t)$**のバランス）と政策（**二酸化炭素排出削減率$\mu(t)$**）を推定する。（なお、考え方として、現時点の**消費**は現在の効用を高め、**投資**は経済成長をもたらすことで将来の**消費**を増やす。また、二酸化炭素排出削減は将来の**損害**を減らす一方で、現時点で**コスト**を要する。）

簡単に式を見てみると、二酸化炭素循環モジュールでは、大気（atmosphere, AT）・海洋上部と生物圏（upper ocean, UP）・深海（lower ocean, LO）間での二酸化炭素の循環、蓄積、吸収を考慮し、二酸化炭素量をそれぞれ分けて計算している。次の、温室効果（放射強制力）$F(t)$を算出する部分では、二酸化炭素以外の温室効果ガスの放射強制力は、$F_{EX}(t)$という形で外生的に数値データを与えている。そして、気候変動モジュールでは、温室効果$F(t)$に応じた大気及び浅い海と、深海の温度を算出しており、損害・コストモジュールで算出された$\Omega(t)$と$\Lambda(t)$が、経済モジュール中の GDP $Q(t)$を減少させる関数になっていることがわかる。なお、将来の効用を現在価値に換算する際の割引率 ρ は外生的に設定している。

昨今、多くの統合評価モデルが開発されており、式の形状や用いられている統計データ、考慮している損害の範囲などはそれぞれ異なるが、基本構造は DICE モデルと同様のものが多い。

図表３　DICE モデルの概要



（出所）Nordhaus/Sztorc [2013]より日興リサーチセンター作成

なお、DICE モデルおよび次章の RICE モデルでは **SCC** を、二酸化炭素排出量 $E(t)$が１単位増加したときに伴う消費 $C(t)$の減少量との関係から算出している。

$$(式：SCC(t) = \frac{\frac{\partial W}{\partial E(t)}}{-\frac{\partial W}{\partial C(t)}} = -\frac{\partial C(t)}{\partial E(t)})$$

4. DICE モデルの応用版、『RICE モデル』

次に、RICE モデル（*Regional Integrated model of Climate and the Economy*）を紹介する。これは、先述と同じく *Nordhaus* 氏によって開発されたモデルで、DICE モデルを応用したモデルのため、基本的な構造は同様である。

だが、世界全体を 1 つの地域とみなして考えていた DICE モデルに対し、このモデルは、「*Regional Integrated model of Climate and the Economy*」という名称から分かるように、世界を複数の地域に区分し（直近の RICE-2010 モデル時点では 12 の地域[3]）、推定している点に新規性がある。

効用関数に、各地域の人口や生産（GDP）、一人当たりの消費量のデータなどをもとに算出した地域固有のウェイト（パラメータ）を与えることで、地域ごとに算出した効用の合計値 W が最大となるように最適化するモデルへと改良した（式 1 参照）。

式 1　RICE モデルの目的関数

$$\underset{c_i(t)}{\mathrm{Max}}\, W = \sum_{t=0}^{T}\sum_{i=1}^{n} \frac{\emptyset_i U_i[c_i(t),\ P_i(t)]}{(1+\rho)^t}$$
$$= \sum_{t=0}^{T}\sum_{i=1}^{n} \frac{\emptyset_i P_i(t)[c_i(t)^{1-\alpha} - 1]}{(1-\alpha)(1+\rho)^t}$$

$\emptyset_i$：地域 i 固有のウェイト

U_i ：地域 i の効用関数

$c_i(t)$ ：時間 t における 1 人当たり消費量

$P_i(t)$ ：時間 t における人口

ρ：割引率

α：消費の限界効用の弾力性

その結果、地域間の様々な協力の度合いを考慮することが可能となり、気候変動への政策を一切採用しなかった場合の「**市場アプローチ**」、全地域が政策を採用し、世界の効用の合計を最大化しようと協力しあう場合の「**協力的アプローチ**」、各地域が自国の効用のみを考慮する場合の「**非協力的（国家主義的）**

[3] 米国、EU 諸国、日本、ロシア、ユーラシア（東ヨーロッパといくつかの旧ソ連構成国）、中国、インド、中東、サハラ以南アフリカ、ラテンアメリカ、その他の高収入諸国、その他発展途上国の 12 の地域に区分している。

アプローチ」の結果を比較することで、気候変動対策のためには、自国利益のみならず、各国・地域間での協力も考える重要性を提起するものとなった（図表４）。なお、非協力的アプローチの考え方にはゲーム理論で有名な、ナッシュ均衡[4]の考え方が取り入れられている。

図表４　RICE モデルのアプローチ

市場アプローチ	気候変動に対する政策(温室効果ガス排出規制)を行わないと仮定するアプローチ。
協力的アプローチ	各国が温室効果ガスの排出量を、協力的かつ効率的な方法で削減するアプローチ。（国際的に高度な協力関係が必要であり、あまり現実的ではない。）
非協力的アプローチ	他国の政策が、自国の採る政策に対して不変であると仮定し、各国が自国の経済厚生のみを考慮して温室効果ガス排出規制を設定するアプローチ。

（出所）Nordhaus/Yang [1996]より日興リサーチセンター作成

5．不確実性を考慮した、『PAGE モデル』

続いて、PAGE モデル（*Policy Analysis for the Greenhouse Effect*）を紹介する。これは、EU の政策決定に使用する目的で、*Chris Hope* 氏らによって 1990 年代前半に開発されたモデルである。近年では PAGE モデルから派生した「PAGE-ICE」や「Mimi-PAGE」が用いられている。

PAGE モデルは、あらゆる統合評価モデルに共通の課題である「将来の不確実性」への対処として、**確率モデル**になっている。主要な入力変数は単一の値ではなく、様々な値の可能性からなる**確率分布**で定義されており、各変数には、最小値、最大値、平均値、最頻値が定められている。なお、PAGE モデルにおいては、**SCC** を二酸化炭素の排出量が 1 単位増加したときの、将来のある時点までの損害額の変化量を、地域ごとの消費量を加味して加重したものの割引現在価値の合計から算出しており、確率分布中から様々な値を選択して入力し、モデルを数百回以上実行することで不確実性を考慮している。

その他にも、DICE/RICE モデルとの相違点として、気候変動による損害を「**経済的損害（有形）**」と「**非経済的損害（無形）**」の 2 種類に分け、単位気温上昇当たりの GDP の年間損失率から貨幣価値に換算し、評価している。**経済的損害**は、農業や林業など、市場における損害を指し、GDP に占める農業の割合が高い発展途上国ほど大きい。経済的損害は、モデル中の経済モジュールにおける**投資**と**消費**に影響を及ぼし、さらに、**投資**は経済成長に、**消費**は人々の**厚生（効用）**に影響を及ぼす。

一方、**非経済的損害**は、生態系における種の損失や、疾病の罹患率など、環境や社会における損害を

[4] 数学者の John F. Nash が提唱した非協力ゲームの基本概念。ゲームの全参加者それぞれが、一定のルールのもと、自己利益が最大となる戦略を選択し合った場合に生じる均衡状態のこと。

指し、人々の**厚生**に影響を及ぼす。不確実性が高い要素であり、1 人当たり収入の大きい先進国ほど、非経済的損害を減少させる意欲（余力）があるため、発展途上国ほど損害額がより大きくなると考える。

なお、地球温暖化に関連した研究の進展とともにモデルも改良されており、放射強制力の算出部分では、二酸化炭素（CO_2）やメタン（CH_4）、一酸化二窒素（N_2O）といった温室効果ガスの種類ごとにモデルに組み込んでいる。また、温室効果をもたらすとされる正の放射強制力だけでなく、硫酸塩エアロゾル（エーロゾル）とその前駆物質[5]などのもつ**負の放射強制力（冷却効果）**も考慮されている（図表 5 参照）。

図表 5　気候変動をもたらす主な駆動要因別の放射強制力の推定値

（出所）「IPCC 第 5 次評価報告書第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳」より図 SPM.5 を転載

6. 気候変動による影響を詳細に表現した、『FUND モデル』

最後に、FUND モデル（*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*）を紹介する。これは、*Richard S. J. Tol* 氏によって 1990 年代後半に開発されたモデルであり、RICE モデルと同様、世界を複数の地域に区分して評価する。初期モデルから何度も改良が重ねられており、直近では 2019 年に FUND4.0 モデルに関する論文が *Tol* 氏により公開されている。

[5] 化学反応などで、ある物質が生成される前の段階にある物質のこと。 前駆体、先駆物質とも言う。

FUND モデルの最大の特徴は、インプット（外部から与えるデータ）もアウトプット（モデル内部での計算により出力されるデータ）も多様な点である。特に、気候変動モジュールは他のモデルと比べて非常に詳細で、気候変動により経済的影響が及ぶ事象として、

- 農業
- 林業
- 海面上昇（湿地や乾燥地の喪失）
- 熱帯・亜熱帯の暴風雨
- 寒冷・熱ストレスに関連する心血管・呼吸器系の障害
- マラリア、デング熱、住血吸虫症
- 水資源
- 管理されていない生態系
- エネルギー消費

などを組み込んでおり、それぞれ単位気温上昇当たりの損害の規模が貨幣換算化されている。一方で、経済モジュールや二酸化炭素循環モジュールは、比較的単純な作りとなっている。

さらに、FUND モデルでは、損害の種類を PAGE モデルのように有形・無形に分けるだけでなく、要因が**気温の変化量（トータル：℃）**によるものと、**気温の変化の速度（ペース：℃/年）**によるものとに分け、関数の形状を変えており、その結果、様々なシナリオでのシミュレーションの比較や、二酸化炭素以外の温室効果ガスの社会的費用の算出も可能となった。

なお、FUND モデルにおいても **SCC** を、二酸化炭素排出量 δ が 1 単位増加したときの、将来のある時点までの損害額の変化量の割引現在価値の合計から算出している。

$$（式：SCC_r = \frac{1}{\frac{\partial U}{\partial C}} \frac{1}{\sum \delta} \sum_r \sum_t \frac{dC \frac{\partial U}{\partial C}}{\prod(1+\rho)}）$$

7. モデルの抱える課題

ここまで、経済学と気候変動を結びつけるモデルとして、4 つの統合評価モデルを紹介した。これら第一世代のモデルは、公開された文献などをもとに様々な形のモデルへと応用されていった。現在最前線で用いられている「IMAGE」や「GCAM」、「AIM/CGE」などといったモデルは、より複雑で精巧な構造になっており、気候変動問題と経済の複雑な関係性を把握し、気候変動をシミュレーションするため、世界中で活用されている。

このように有用な統合評価モデルであるが、しかし、それと同時に、用いるうえでは排除できない**不確実性**の問題についても理解しておかねばならない。例えば、出力結果を最も大きく左右するパラメータが、「割引率」である。将来世代における気候変動の被害を、シミュレーションする側の人間がどの程度評価するか（どのくらいの影響の大きさと考えるか）次第で、設定される割引率は変わり、割引率が小さいほど **SCC** は高くなる傾向にある。その他にも、「気候変動への適応性」（人間が気候の変化に合わせて社会のシステムを調整することで損害を軽減させる可能性）や「気候感度」（放射強制力に応じてどの程度地球の気温変化がもたらされるか）など、予測的に外部から与えているパラメータも不確実性の大きな要因である。

実際、算出された **SCC** は研究ごとに大きなばらつきがあり、統合評価モデルを用いて **SCC** を算出している様々な文献を集め、メタ分析を行った文献によると（P. Wang et al., 2019）、集計した SCC の

幅は－50$/tC～8,752$/tC（－13.36$/t$CO_2$～2386.91$/tCO_2）に及んでいたという。未知の気候変動の将来予測を行う統合評価モデルにおいて、不確実性は切り離せない課題であり、シミュレーションする人間の主観や予測が加わりやすい要素でもある。そのため、我々はモデルから出力された結果のみを見るのでなく、シミュレーションに際してどのようなパラメータを外部から与えているのか、ある程度理解したうえで結果を見ていくことが重要である。

8. おわりに

本稿では、気候変動リスクやカーボンプライシングの理解の一助のため、統合評価モデルの代表例として、DICE モデル、RICE モデル、PAGE モデル、FUND モデルを紹介した。これらは共通して、大きく 4 つのモジュール（経済モジュール、二酸化炭素循環モジュール、気候変動モジュール、損害・コストモジュール）から構成され、将来のある時点までの、効用の現在価値の合計を最大化することを目的関数にしている。

世界全体を一つの地域とみなしていた初期の DICE モデルをもとに、度重なる改良により、各国・地域間の様々な協力の度合いごとの将来シナリオを比較するモデルや、二酸化炭素以外の温室効果ガスの影響も組み込んだモデル、気候変動の及ぶ事象をより詳細に加味したモデルなどへと発展を遂げており、これらは、気候変動と経済を結びつけ、影響を貨幣価値化して将来予測をするうえで有用である。

それと同時に、モデルにおける将来の不確実性という性質は、今後の課題でもあり、我々はアウトプットを見るのみならず、どのような仮定やシナリオに基づいているのかを意識・把握することが賢明であろう。

引き続き各国・地域の気候変動問題への対策の動向や、統合評価モデルに関する研究の進展を追いながら、将来的には日本の気候変動リスクも組み込んだモデルや、そのアウトプット部分にも着目し、実務に活用していきたい。

参考文献

World Bank, [2021], “State and Trends of Carbon Pricing 2021”, http://hdl.handle.net/10986/35620.

The Royal Swedish Academy of Sciences, [2021], “The Nobel Prize in Physics 2021 – popular science background”, https://www.complexityinstitute.it/wp-content/uploads/2021/10/popular-physicsprize2021.pdf.

Pei Wang, Xiangzheng Deng, Huimin Zhou and Shangkun Yu, [2019], “Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis”, Journal of Cleaner Production, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.058.

Tomas Havranek, Zuzana Irsova, Karel Janda and David Zilberman, [2015], "Selective reporting and the social cost of carbon", Energy Economics, https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.009.

W.D. Nordhaus and P. Sztorc, [2013], "DICE 2013R: Introduction and User's Manual", http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf.

W.D. Nordhaus and Z. Yang, [1996], "A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies," The American Economic Review, https://www.jstor.org/stable/2118303.

N. Nakicenovic, W.D. Nordhaus, R. Richels and F.L. Toth, [1996], "Climate Change: Integrating Science, Economics, and Policy", http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/5025/1/CP-96-001.pdf.

C. Hope and David Newbery, [2006], "Calculating the Social Cost of Carbon", Energy Policy Research Group, Cambridge Judge Business School, University of Cambridge, https://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2008/11/eprg0720.pdf.

C. Hope, [2011], "The Social Cost of Co2 from the Page09 Model", Economics Discussion Paper, https://ssrn.com/abstract=1973863.

Richard S. J. Tol, [1995], "The damage costs of climate change toward more comprehensive calculations", Environmental and Resource Economics, https://link.springer.com/article/10.1007/BF00691574.

Richard S. J. Tol, [1997], "On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions: An Application of FUND", Environmental Modeling and Assessment, http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.175.5716&rep=rep1&type=pdf.

Richard S. J. Tol, [1999], "Spatial and Temporal Efficiency in Climate Policy: Applications of FUND" Environmental and Resource Economics, https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.175.5064&rep=rep1&type=pdf.

David Anthoff and Richard S. J. Tol, [2011], "The Uncertainty about the Social Cost of Carbon: A Decomposition Analysis Using FUND", Economic and Social Research Institute (ESRI), https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0706-7.

Stephanie Waldhoff, David Anthoff, Steven Rose and Richard S. J. Tol, [2014], "The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of FUND", Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal,

http://www.economics-ejournal.org/dataset/PDFs/journalarticles_2014-31.pdf.
気象庁,[2013],「IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約」,
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf.
日本銀行金融研究所, [2021],「気候変動の経済学」, 金研ニュースレター,
https://www.imes.boj.or.jp/jp/newsletter/newsletter.html.
伊藤央峻, [2021],「DICE モデルによるカーボンプライシング」, 日興リサーチレビュー,
https://www.nikko-research.co.jp/library/10425/.
本山真, [2021],「気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル」, 日興リサーチレビュー,
https://www.nikko-research.co.jp/library/10496/.

（END）

気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル

2021 年 10 月
投資工学研究所 主任研究員　　本山　真

1. はじめに

世界的に地球温暖化の影響と考えられる異常気象や自然災害が発生し、その規模は拡大し、頻度も増加している。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」とし、世界の気温上昇が産業革命前と比べて 2021～40 年には 1.5℃に達することを予測した「第 6 次評価報告書」の一部を 8 月に公表した。2018 年に IPCC が公表した「1.5℃特別報告書」における想定より地球温暖化は 10 年程度早く進行しており、その影響の深刻さが増している。

地球温暖化対策として、気温上昇の原因とされる二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出削減が喫緊の課題となり、さらに二酸化炭素を回収・貯蔵する技術等の開発、実用化が求められている。世界各国は、温室効果ガスの大幅な排出削減を政治目標とし、日本は「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」とし、2030 年度には 2013 年度比で 46%削減することを目標としている。また、企業や金融機関は排出削減に取り組み、気候変動リスクをコストとしてだけでなく、ビジネス機会とする経営への転換が課題になっている。そのためには、気候変動による経済への影響を定量的に把握することが重要だろう。

気候モデルと経済モデルを組み合わせたモデルは、統合評価モデルと呼ばれ、ノーベル経済学賞を受賞した William Nordhaus の DICE モデル（Dynamic Integrated model of Climate and the Economy）等の多くのモデルがあり、政策の決定や政策評価に用いられている。気候変動が地球全体の事象であるため、通常、統合評価モデルは世界を一つ、あるいはいくつかの地域に分割して世界全体を対象とするが、本稿ではこのようなグローバルな分析ではなく、国内経済や特定の地域経済を対象にした分析を行うためのモデルを提示する。国や地方公共団体、企業、金融機関等の多くの主体が温室効果ガスの排出削減への取り組みが求められる中、気候変動による経済への影響を考慮した意思決定のためにはシンプルなモデルが役立つと考える。そこで、次章において具体的なモデルを提示し、3 章でそのモデルを用いて数値計算を行った結果を示し、考察を加える。

2. 気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル

世界全体の気候変動と経済活動を分析対象にした統合評価モデルは、世界全体をいくつかの地域に分割することや経済における複数の産業部門を考慮することによってモデルの大規模化が進んでいる。ま

た、気候変動に関連する地球物理学的な現象は各専門分野の高度化により新たな知見が解明されている。

一方、初期の統合評価モデルである DICE モデルは、世界を一つとし、経済主体も家計と企業のみのシンプルなモデルである。世界全体の気候変動と経済活動を組み込み、二酸化炭素の排出・蓄積や気温上昇、そして気温上昇による経済への影響が一つのモデルとして定式化されている[1]。気候変動による経済への影響を理解するためには優れたモデルであると考える。しかし、気温上昇等に関する見通しは新しい研究成果によって変化していくが、DICE モデルでその成果を考慮することは難しい。そこで、以下では DICE モデルをもとにして気温上昇を所与としたマクロ経済成長モデルを提示する[2]。

DICE モデルが想定する経済活動を簡潔に示すと図表 1 の（1）から（5）であり、気候変動を示す（a）から（c）が二酸化炭素の排出が大気の気温変化に与える影響として、モデル内で（内生変数として）気温上昇を導出し、経済への影響である（3）で利用される。

図表 1　DICE モデルにおける気候変動と経済活動の概要

（1）	企業は、技術力等、蓄積された資本、労働力を使って生産する
（2）	企業の生産活動によって二酸化炭素が排出される
（a）	大気中に排出された二酸化炭素は、大気、海洋、深海で循環して蓄積、あるいは吸収される
（b）	大気中に蓄積された二酸化炭素量の増減等によって地球に出入りするエネルギーの収支が変化し、気温に影響を与える
（c）	気温は、海洋の温度の影響を受ける
（3）	経済活動による生産は、気温上昇による災害等の経済的な被害と二酸化炭素の削減費用によって減少する
（4）	生産は、消費と投資として支出される
（5）	家計は、将来にわたった消費による効用の現在価値の合計値が最大になるように消費と貯蓄を行う

（出所）日興リサーチセンター作成

しかし、気温上昇については、IPCC 等による最新の気候変動の研究成果等、科学的な知見が絶えず更新されていく。また、DICE モデルが前提としているグローバルな分析ではなく、本稿が目的とする国内経済や特定の地域経済の場合は、二酸化炭素の排出によって世界全体の気温上昇に与える影響は大きくない。そこで DICE モデルにおいて気候変動を示す（a）から（c）の代わりに、気温上昇については

[1] 本章以降では、二酸化炭素は温室効果ガスと同じ意味で用いる。

[2] DICE モデルは、バージョンアップを続けているが、本稿では DICE モデルのユーザーマニュアル(Nordhaus,Sztorc(2013))と以下のソースコードをもとに定式化する。計算には HP(https://williamnordhaus.com/dicerice-models)に公開されている GAMS のソースコード(DICE-2016R2-083017.gms)を参考に当社が作成したプログラムを用いた。モデルに入力する各変数もそのソースコードにある値を使用した。

気候変動に関する研究成果や想定したシナリオ等のモデルの外で決まる値（外生変数）を用いることを提案する。具体的な計算式は以下の（1）から（5）に示す[3]。

（1）企業は、技術力等（全要素生産性）$A(t)$、蓄積された資本（資本ストック）$K(t)$、労働力$L(t)$を使って$Q_{GROSS}(t)$の生産をする[4]

$$Q_{GROSS}(t) = A(t)K(t)^{\gamma}L(t)^{1-\gamma} \tag{1-1}$$

$$A(t) = A(t-1)[1 + g_A(t)] \tag{1-2}$$

$$g_A(t) = \frac{g_A(t-1)}{1+\delta_A} \tag{1-3}$$

$$L(t) = L(t-1)[1 + g_L(t)] \tag{1-4}$$

$$g_L(t) = \frac{g_L(t-1)}{1+\delta_L} \tag{1-5}$$

$$K(t) = I(t) + (1-\delta_K)K(t-1) \tag{1-6}$$

コブ・ダグラス型の生産関数（資本分配率γ、労働分配率$1-\gamma$は一定の値）を利用し、全要素生産性$A(t)$、労働力$L(t)$は、現時点での値からそれぞれ変化率$g_A(t)$、$g_L(t)$で増加していくことを仮定する。資本ストック$K(t)$は、同じ期の投資$I(t)$に、前期までの資本ストック$K(t-1)$が減耗（減耗率δ_K）することを考慮した値を加える。

（2）企業の生産活動によって二酸化炭素$E_{IND}(t)$が排出される

$$E_{IND}(t) = \sigma(t)[1-\mu(t)]Q_{GROSS}(t) \tag{2-1}$$

$$\sigma(t) = \sigma(t-1)[1 + g_\sigma(t)] \tag{2-2}$$

$$g_\sigma(t) = \frac{g_\sigma(t-1)}{1+\delta_\sigma} \tag{2-3}$$

生産$Q_{GROSS}(t)$が大きくなるほど、生産活動による二酸化炭素排出量$E_{IND}(t)$は増加するが、生産 1 単位当たりの二酸化炭素排出量$\sigma(t)$が低下すれば、生産が同じであっても二酸化炭素排出量は減少する[5]。$\sigma(t)$は現時点での値から変化率$g_\sigma(t)$で変化していくことを仮定する。また、排出削減率$\mu(t)$はモデルで推定されるパラメータであり、$\mu(t)$が大きくなるほど、二酸化炭素排出量$E_{IND}(t)$は減少する。

（3）経済活動による生産$Q(t)$は、気温上昇による災害等の経済的な被害と二酸化炭素の削減費用によ

[3] DICE モデルと同じ計算式は式の番号をカッコあり、異なる計算式はカッコなしで表す。
[4] $Q_{GROSS}(t)$は災害等の経済的な被害と二酸化炭素の排出費用を考慮する前の生産（GDP）である。
[5] エネルギー転換等によって二酸化炭素排出量が減ることをモデルで考慮することができる。

って減少する

$$Q(t) = \frac{[1-\Lambda(t)]Q_{gross}(t)}{1+\Omega(t)} \qquad (3-1)$$

$$\Omega(t) = \psi_1 T_{AT}(t) + \psi_2 [T_{AT}(t)]^2 \qquad (3-2)$$

$$\Lambda(t) = \theta_1(t)\mu(t)^{\theta_2} \qquad (3-3)$$

$$\theta_1(t) = \frac{P_{BST}(t)}{\theta_2}\sigma(t) \qquad (3-4)$$

$\Omega(t)$は、生産$Q_{GROSS}(t)$に対する災害等による経済的な被害の比率を表し、気温上昇$T_{AT}(t)$の 2 乗のオーダーで増加すると仮定する。DICE モデルでは二酸化炭素の排出が大気の気温変化に影響を与えることがモデルに組み込まれているが、ここでは気温上昇$T_{AT}(t)$は、モデルから計算される値ではなく、気候変動に関する研究成果やシナリオにもとづく所与の値とする。

$\Lambda(t)$は、生産$Q_{GROSS}(t)$に対する二酸化炭素の削減費用の比率であり、モデルのパラメータである排出削減率$\mu(t)$のθ_2乗のオーダーで増加すると仮定する。$P_{BST}(t)$は William Nordhaus が導入したバックストップ・テクノロジーの価格である[6]。例えば、バックストップ・テクノロジーの価格が二酸化炭素 1t 当たり 500 ドルである場合、500 ドルの費用で二酸化炭素 1t の排出がない技術に代替できることを意味し、この価格が低下すると同じ排出削減率であっても$\Lambda(t)$が小さくなり、より低い削減費用で二酸化炭素の排出削減が達成できる。$\sigma(t)$は前出（$(2-2)$式）の生産 1 単位当たりの二酸化炭素排出量である。

そして、生産$Q(t)$は、二酸化炭素の削減費用と災害による経済的な被害を控除した金額になる。

（4）生産$Q(t)$は、消費$C(t)$と投資$I(t)$として支出される。<u>ここで、二酸化炭素の排出に対する経済的な負担$G(t)$を導入する</u>

$$Q(t) = C(t) + I(t) + G(t) \qquad 4-1$$

$$I(t) = s(t)[Q(t) - G(t)] \qquad 4-2$$

$$G(t) = P_H(t) \cdot E_{Ind}(t) \qquad 4-3$$

$$P_H(t) = P_H(t-1)[1+\rho] \qquad 4-4$$

上記の下線部が本稿のモデルの特徴であり、二酸化炭素の排出に対する経済的な負担$G(t)$としてモデルに組み込む。$G(t)$は、二酸化炭素排出 1 単位当たりの価格$P_H(t)$（以下、炭素価格）と生産活動による二酸化炭素排出量$E_{IND}(t)$の積であり、$G(t)$が正の時期には家計の消費$C(t)$が減少し、家計にとっては経済的な負担になる。炭素価格$P_H(t)$は、初期時点の炭素価格$P_H(0)$が金利ρで上昇すると考える[7]。

また、貯蓄率$s(t)$は家計の行動としてモデルで推定されるパラメータであり、資本ストックとして蓄

[6] 二酸化炭素を排出しない代替技術の普及等をモデルで考慮することができる。

[7] ホテリングの定理（Hotelling(1931)、前田(2009)）を援用する。

積される当期の投資$I(t)$を決める役割を果たす。

（5）家計は、将来にわたった消費による効用の現在価値の合計値が最大になるように消費と貯蓄を行う

$$W = \sum_{t=1}^{T_{max}} U[c(t), L(t)]R(t) \tag{5-1}$$

$$U[c(t), L(t)] = L(t)\frac{c(t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} \tag{5-2}$$

$$c(t) = \frac{C(t)}{L(t)} = \frac{Q(t) - I(t) - G(t)}{L(t)} \tag{5-3}$$

$$R(t) = \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^t \tag{5-4}$$

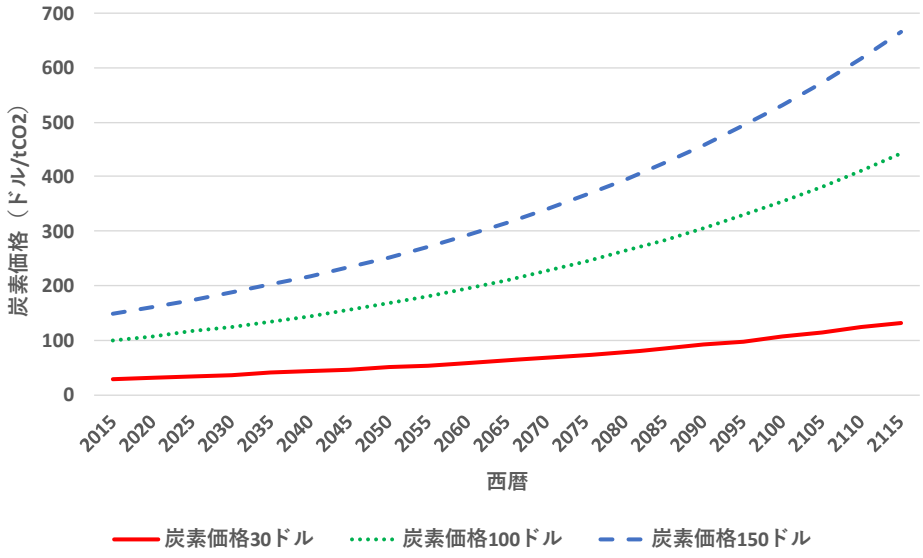
家計の最適化行動として目的関数Wを最大化する。家計の効用$U[c(t), L(t)]$として相対的リスク回避度一定(CRRA 型)の効用関数を仮定する。Wの最大化により未知のパラメータであった排出削減率$\mu(t)$と家計の貯蓄率$s(t)$が推定され、（1）から（5）の連立方程式における未知数（内生変数）を求めることができる。

3. 数値計算の結果と考察

前章のモデルを用いて初期時点の炭素価格$P_H(0)$を 30 ドル、100 ドル、150 ドルの 3 通りとしたときに、将来の二酸化炭素排出量の経路がどのように変化し、どの程度の経済的な影響があるかを数値例で確認する。気温上昇については単純な想定とし、初期時点を 1℃として、5 年ごとに 0.1℃ずつ上昇し、上限を 3℃として計算する。

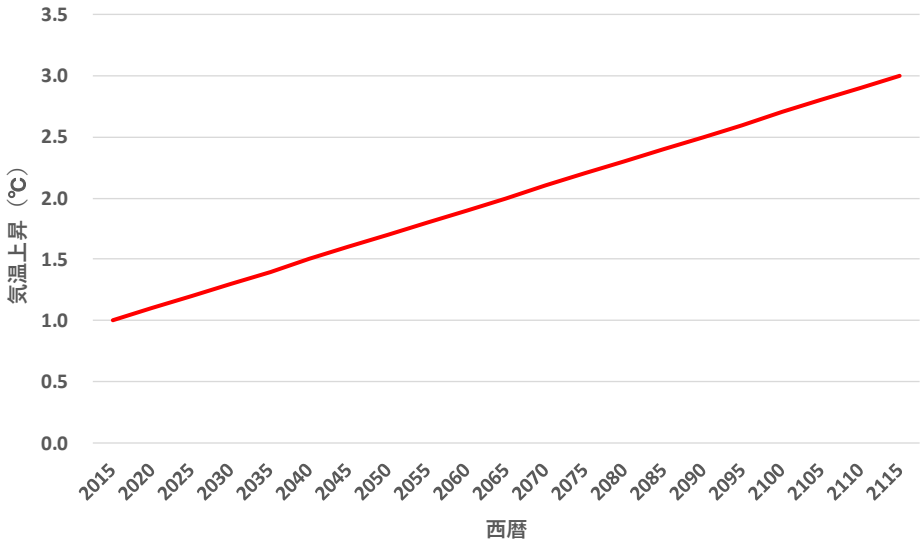
$(5-1)$式の最大化は 5 年刻みの 100 期分（500 年間）のデータを用いて行うが、以下の図表では 100 年後までの結果を示す。図表 2 は計算の前提とした炭素価格であり、時間の経過とともに$4-4$式にしたがって上昇する。図表 3 は計算の前提とした気温上昇である。

図表２　計算の前提とする炭素価格



（出所）日興リサーチセンター作成

図表３　計算の前提とする気温上昇



（出所）日興リサーチセンター作成

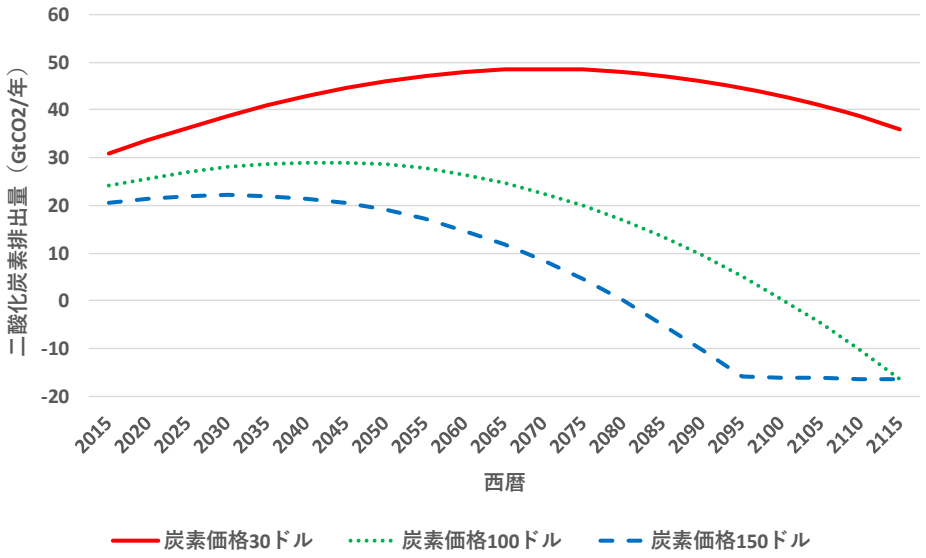
図表２の炭素価格と図表３の気温上昇を前提として前章のモデルで得られる二酸化炭素排出量$E_{IND}(t)$の経路が図表４である。

炭素価格$P_H(0)$を 150 ドルとした場合が二酸化炭素の排出削減は最も早く進み、2080 年でほぼ排出量がゼロとなり、その後は排出量がマイナスとなる。今回の計算では、将来、二酸化炭素の回収・貯蔵等により排出量がマイナスになることも想定し、排出削減率$\mu(t)$の上限を 120%としたため、上限に達した 2095 年以降は二酸化炭素排出量（吸収量）$E_{IND}(t)$が横ばいになっている。

炭素価格$P_H(0)$を 30 ドルとした場合は、二酸化炭素排出量$E_{IND}(t)$は 2070 年をピークに減少に転じるが、100 年後の 2115 年においても現在より排出量が多い。

ここでは、炭素価格$P_H(0)$を前提として、二酸化炭素排出量の経路を計算したが、二酸化炭素の排出削減目標がある場合は、その目標を達成する炭素価格$P_H(0)$を見つけることにも利用することができる。

図表 4 二酸化炭素排出量の経路

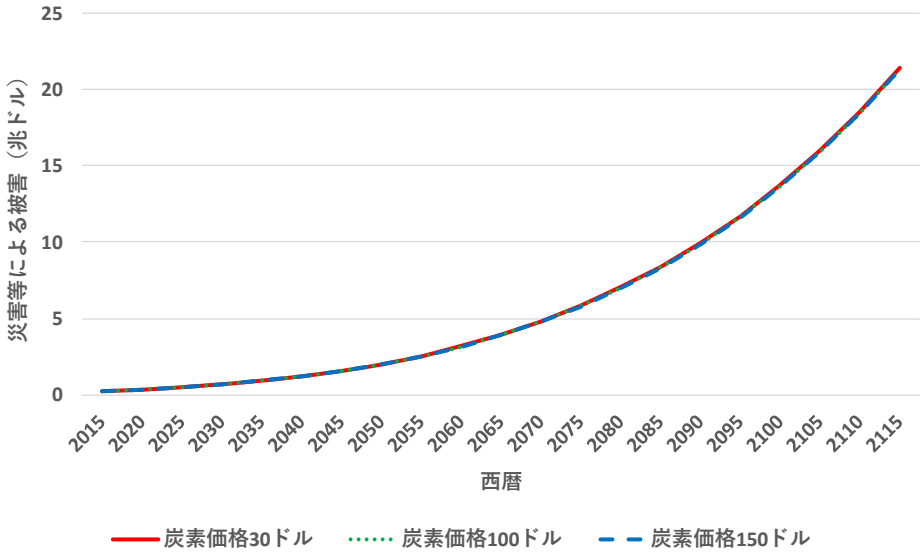


（出所）DICE モデルのデータより日興リサーチセンター作成

災害による経済的な被害と二酸化炭素の削減費用の経路が図表 5、6 である。災害による経済的な被害は、DICE モデルのように二酸化炭素の排出削減が気温上昇の緩和に結びつかないため、炭素価格の 3 通りのケースでの差異は大きくない（図表 5、グラフは 3 通りでほぼ重なっている）。本稿のモデルでは、災害による経済的な被害と二酸化炭素の削減費用のトレードオフの関係がなくなるが、二酸化炭素を排出する主体が大きくない場合は、二酸化炭素の排出が世界全体の気温上昇に与える影響は少なく、このような結果が得られることは現実的なものだろう。そのため、二酸化炭素の排出削減のためには、排出に対して経済的な負担を課すことがより重要になるが、本モデルでは$4-1$式で二酸化炭素の排出に対する経済的な負担$G(t)$として考慮される。

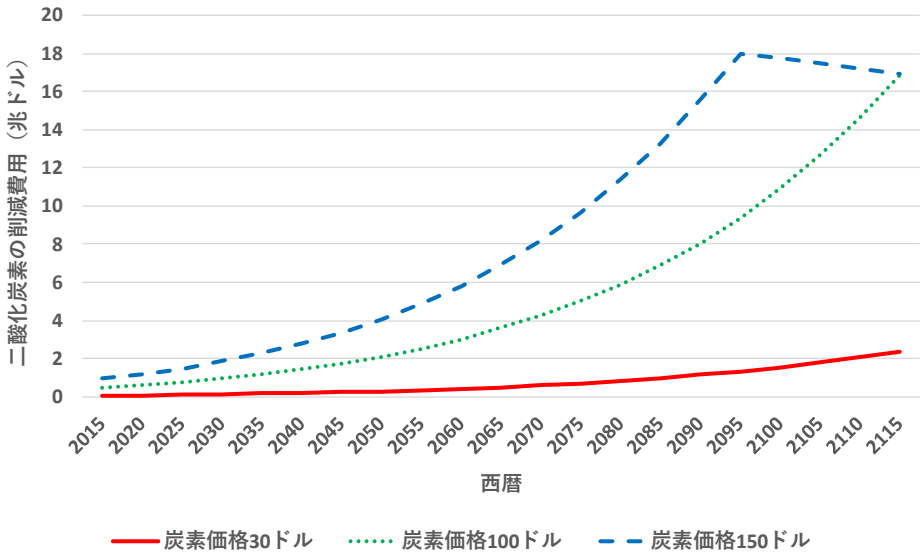
二酸化炭素の削減費用は、炭素価格$P_H(0)$を 150 ドルとした場合、最も大きくなり、排出削減率$\mu(t)$の上限に達した 2095 年がピークになる（図表 6）。そのときの削減費用は生産$Q(t)$の 2.5%程度である。

図表 5　災害等による被害の経路



（出所）DICE モデルのデータより日興リサーチセンター作成

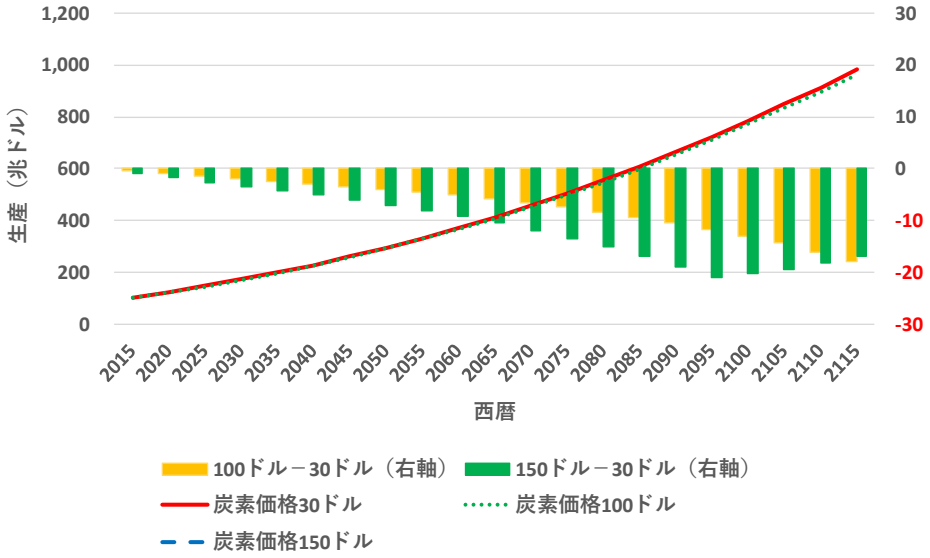
図表 6　二酸化炭素の削減費用の経路



（出所）DICE モデルのデータより日興リサーチセンター作成

最後に、炭素価格の 3 通りの生産$Q(t)$を比較したものが図表 7 である。炭素価格$P_H(0)$を 30 ドルとした場合の生産$Q(t)$を基準にして、炭素価格$P_H(0)$を 100 ドル、150 ドルとした場合の生産$Q(t)$がどれだけ減少するかを示したものが図表 7 の棒グラフである（軸は右側）。100 年後の 2115 年にわずかではあるが、炭素価格$P_H(0)$を 100 ドルとした場合より 150 ドルとした場合の方が、生産が大きくなることが確認できる（2115 年の黄色の棒グラフより緑色の棒グラフの方が、マイナスが小さい）。

図表 7　生産の経路と 3 つのケースの比較



（出所）DICE モデルのデータより日興リサーチセンター作成

4. おわりに

DICE モデルを参考にして、二酸化炭素の排出によって世界全体の気温上昇に与える影響が大きくない国内経済や特定の地域経済を対象にした分析を行うためのモデルを提示した。そして、炭素価格と気温上昇について複数のケースを前提として、二酸化炭素排出量の経路と経済的な影響として災害等による被害と二酸化炭素の削減費用、生産の経路について数値計算の結果を示した。また、二酸化炭素の排出削減目標がある場合、このモデルを使えば、その目標を達成する炭素価格$P_H(0)$を見つけることができる。

本稿では、モデルに用いる変数等は DICE モデルのものをそのまま利用したが、今後は、経済変数等を国内のものにして、気温上昇が国内経済に与える影響を分析することを課題としたい。

参考文献

Hotelling, Harold(1931),“The Economics of Exhaustible Resources”, Journal of Political economy, Vol.39, pp137-175.

Nordhaus, W.D., and Sztorc, P. (2013), “DICE 2013R: Introduction and User’s Manual,” http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf

ウィリアム・ノードハウス（2015）,「気候カジノ」,日経 BP

前田章(2009),「排出権制度の経済理論」,岩波書店

伊藤央峻(2021),「DICE モデルによるカーボンプライシング」,日興リサーチレビュー

https://www.nikko-research.co.jp/library/10425/
後藤誠也, 川﨑正勝(2021),「EU ETS を参考にした排出量取引市場の多期間分析」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/10487/

（END）

一次エネルギー発電コストから推計した
二酸化炭素の排出価格と排出総額

2022 年 1 月

資産運用研究所 主任研究員　　藤原 崇幸

1．はじめに

2015 年 12 月、フランスのパリにおいて第 21 回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）が開催され、2020 年以降の温室効果ガス排出削減に向けた「パリ協定」が採択された。

パリ協定では、

- 世界の平均気温の上昇を産業革命前に比べ＋2℃より十分低く保ち、＋1.5℃に抑える努力を追求

することなどを目標として掲げた。

近年の先進国の温室効果ガス排出量は省エネ技術の進展などから緩やかながらも減少傾向にあり、1990 年時点との比較では 2019 年時点の温室効果ガス排出量は約 20%減少している。しかし、中国やインドなど発展途上国の経済発展に伴い、世界全体では依然として温室効果ガス排出量は増加傾向にある。現在も世界の平均気温の上昇が一因ではないかと懸念される甚大な自然災害が世界各国で発生しており、2021 年 4 月には、アメリカ政府により気候変動に関する首脳会議（気候変動リーダーズサミット）が開かれ、先進国を中心に非常に野心的な温室効果ガス排出量削減方針が表明された。そして、2021 年 11 月にはイギリスのグラスゴーにおいて COP26 が開催され、「グラスゴー気候合意」が採択された。

グラスゴー気候合意では、

- 世界の平均気温の上昇を産業革命前に比べ＋2℃を十分下回る水準に抑え、＋1.5℃に抑えるための努力を継続

するとし、パリ協定からさらに踏み込んだ表現を盛り込んだ。

このような中、企業に対し気候変動等に関する開示の充実に向けた動きが国内外で行われている。例えば、国内でも上場企業等に対し、温室効果ガス排出量の測定や気温上昇に伴う経済的な損失額の試算などの開示検討が報じられている。そして、そのためには企業等が排出する温室効果ガスの経済的費用を把握する必要がある。

そこで、本稿では、一次エネルギー源のうち温室効果ガスの一つである二酸化炭素を多く排出する石炭や LNG など化石エネルギーによる発電、発電時に二酸化炭素を排出しない原子力エネルギーや再生

可能エネルギーといった非化石エネルギーによる発電に着目し、それぞれの発電コストを用いて二酸化炭素の排出価格や国内で排出される二酸化炭素の排出総額を 2020 年時点、2030 年時点の 2 時点で推計した。化石エネルギー由来の電力も非化石エネルギー由来の電力も、それ自体の品質は同等であるものの、発生源の電源が異なることで発電コストが異なっている。本稿では、化石エネルギーによる発電コストが非化石エネルギーによる発電コストを下回っている場合、その差額が二酸化炭素の排出価格に帰着するとの仮定をおいている。

次章以降では二酸化炭素の排出価格推計に用いたデータや推計方法などについて順を追って説明し、推計された排出価格等の考察を行う。

2. 二酸化炭素の排出価格の推計に用いた基礎データ

第 2 章では二酸化炭素の排出価格の推計に用いた基礎データについて説明する。なお、二酸化炭素の排出価格の推計では、一次エネルギー源による発電部門として図表 1 の部門（以下、電源）を用いた。

図表 1　二酸化炭素の排出価格の推計に用いた発電部門

化石エネルギー	石油火力	石炭火力	ＬＮＧ火力	
原子力エネルギー	原子力			
再生可能エネルギー	太陽光（事業用）	太陽光（住宅）	風力（陸上）	風力（洋上）
	水力（中水力）	バイオマス（混焼）	バイオマス（専焼）	地熱

（出所）日興リサーチセンター作成

図表 2　電源別発電コスト（2020 年の試算結果）

電源別 発電コスト （円/kWh）	2020年				
	資本費	運転維持費	燃料費	社会的費用	政策費
石油火力	4.9	3.3	14.8	3.5	0.2
石炭火力	2.0	2.3	4.3	3.9	0.0
ＬＮＧ火力	1.3	1.2	6.4	1.7	0.1
原子力	4.2	3.7	1.7	0.6	1.3
太陽光（事業用）	8.8	3.2	0.0	0.0	0.9
太陽光（住宅）	14.6	2.5	0.0	0.0	0.6
風力（陸上）	10.0	4.7	0.0	0.0	5.2
風力（洋上）	12.5	8.6	0.0	0.0	9.0
水力（中水力）	5.7	3.0	0.0	0.0	2.3
バイオマス（混焼）	2.1	2.4	4.4	3.8	0.5
バイオマス（専焼）	3.0	4.2	21.0	0.0	1.7
地熱	5.8	5.1	0.0	0.0	5.8

（出所）資源エネルギー庁より日興リサーチセンター作成

図表 3　電源別発電コスト（2030 年の試算結果）

電源別 発電コスト （円/kWh）	2030年				
	資本費	運転維持費	燃料費	社会的費用	政策費
石油火力	4.9	3.3	12.9	3.7	0.1
石炭火力	2.0	2.3	4.3	4.9	0.1
ＬＮＧ火力	1.3	1.2	6.0	2.1	0.1
原子力	4.2	3.7	1.7	0.6	1.5
太陽光（事業用）	7.3	3.2	0.0	0.0	0.7
太陽光（住宅）	11.4	2.5	0.0	0.0	0.3
風力（陸上）	7.1	4.7	0.0	0.0	2.9
風力（洋上）	11.9	6.3	0.0	0.0	7.7
水力（中水力）	5.7	3.0	0.0	0.0	2.3
バイオマス（混焼）	2.1	2.4	4.4	4.8	0.5
バイオマス（専焼）	3.0	4.2	21.0	0.0	1.7
地熱	5.8	5.1	0.0	0.0	5.8

（出所）資源エネルギー庁より日興リサーチセンター作成

一次エネルギー源による発電コスト、プラントの建設費や固定資産税などの「資本費」、人件費や修繕費などの「運転維持費」、排出される二酸化炭素対策費用や原子力安全対策費用などの「社会的費用」、化石燃料費や核燃料サイクル費などの「燃料費」、そして「政策費」の主に 5 つに分けられる。本稿では、資源エネルギー庁が公表する「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」に基づき、モデルプラント方式による 2020 年および 2030 年の電源別発電コスト試算の結果を用いた。詳細は図表 2、図表 3 の通りである。

図表 4　電源別発電量構成のシナリオ

電源別 発電量構成 （%）	2020年	2030年
石油火力	6.35	2.00
石炭火力	30.97	19.00
ＬＮＧ火力	39.01	20.00
原子力	3.87	21.00
太陽光	7.90	16.00
風力	0.90	5.00
水力	7.83	11.00
バイオマス	2.88	5.00
地熱	0.30	1.00

（出所）資源エネルギー庁より日興リサーチセンター作成

また、電源別の発電構成（図表 4）は資源エネルギー庁が公表する「総合エネルギー統計（1990～2020 年度速報）」および「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し（2030 年度の発電電力量・電力構成）」に基づいている。

さらに、化石エネルギーにおいては、それぞれの標準発熱量や炭素排出係数、熱効率などの諸元データ（図表 5）が必要であり、それらについても資源エネルギー庁が公表する「エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数（2018 年度改訂）の解説」、また経済産業省から公表されている「発電コスト検証に関するこれまでの議論について」のモデルプラントの数値に基づいている。

図表 5　化石エネルギー別諸元データ

化石エネルギー諸元データ	標準発熱量	炭素排出係数（g-C/MJ）	熱効率（%）
原油	39.50	19.18	39.00
石炭	26.08	24.29	43.50
天然ガス	39.26	13.87	54.50

※標準発熱量単位：原油(MJ/L)、石炭(MJ/kg)、天然ガス(MJ/㎥)

（出所）資源エネルギー庁、経済産業省より日興リサーチセンター作成

このほか、原油や石炭、天然ガスといった化石エネルギーの価格（図表 6）は世界銀行の「Commodity Markets Outlook」、ドル円の為替レート（図表 7）は OECD の「Economic Outlook」に基づいている。なお、2030 年の為替レートは公表されておらず、現時点で公表されている最も将来時点の為替レートは 2023 年となっている。そのため、本稿では 2023 年の予測為替レートを 2030 年の予測為替レートとして用いた。

図表 6　化石エネルギー価格

エネルギー価格（USD）	2020年	2030年
原油($/bbl)	41.30	67.90
石炭($/mt)	60.80	67.50
天然ガス($/mmBtu)	8.30	8.50

（出所）世界銀行より日興リサーチセンター作成

図表 7　ドル円為替レート

為替(円)	2020年	2030年
ドル円	106.76	113.56

※2030 年の予測為替レートは 2023 年の予測為替レートを利用

（出所）OECD より日興リサーチセンター作成

3. 二酸化炭素の排出価格の推計条件および推計方法

第 3 章では、前章で説明した基礎データを用いて二酸化炭素の排出価格の推計を行うにあたり、定めた推計条件および推計方法を記す。

【推計条件】

- 化石エネルギー電源（石油火力、石炭火力、ＬＮＧ火力）について、発電コストのうち燃料費を除く費用について図表 2，3 の数値を用いた。国内の電力会社は長期契約により燃料を調達しているが、燃料費は市場での取引価格の変動の影響が大きいことから、現時点における市場取引価格および市場の予測価格を用いることとし、図表 5～7 のデータより算出した数値を用いた。
- 非化石エネルギー電源（原子力、太陽光、風力、水力、バイオマス、地熱）について、発電コストは図表 2，3 の数値を用いた。
- 現在の発電能力を基に、2020 年時点および 2030 年時点の両時点で事業用太陽光発電の割合を 80%、住宅太陽光発電の割合を 20%と仮定した。
- 現在の発電能力や今後の見通し[1]を基に、2020 年時点は陸上風力発電の割合を 98%、洋上風力発電の割合を 2%、2030 年時点は陸上風力発電の割合を 75%、洋上風力発電の割合を 25%と仮定した。
- 水力発電には中水力発電のほか小水力発電もあるが、現在の発電能力の大部分が中水力発電のため、中水力発電の数値を用いた。
- 現在の発電能力を基に、2020 年時点および 2030 年時点の両時点で専焼バイオマス発電の割合を 70%、混焼バイオマス発電の割合を 30%と仮定した。
- 二酸化炭素の排出価格の推計は 2020 年および 2030 年の 2 時点について行った。

【推計方法】

- 化石エネルギー電源（石油火力、石炭火力、ＬＮＧ火力）それぞれの発電コストと非化石エネルギー電源（原子力、太陽光、風力、水力、バイオマス、地熱）の発電コストを用いて、化石エネルギー電源それぞれの発電コストから二酸化炭素の排出価格を推計する。
- 発電コストのうち、化石エネルギー電源の燃料費については、単位量当たりの発熱量と熱効率から単位量当たりの発電量（単位発電量）を求め、化石エネルギーの単位量当たりの価格によって算出したものを用いた。（第 4 章：算出手順 A,D,E,F 参照）

[1] 日本風力発電協会による風力発電の導入予測（2020 年（陸上風力 1110 万 kW、洋上風力 31 万 kW）、2030 年（陸上風力 2600 万 kW、洋上風力 1000 万 kW））を基に割合を仮定。

- 化石エネルギー電源の単位量当たりの二酸化炭素排出量は、単位量当たりの発熱量と炭素排出係数から算出した。（第 4 章：算出手順 B,C 参照）
- 非化石エネルギー電源に対する化石エネルギー電源の単位量当たりの二酸化炭素価格は、((非化石エネルギー電源の発電コスト ÷ 化石エネルギーの燃料費 - 化石エネルギーの発電コスト÷化石エネルギーの燃料費) × 化石エネルギーの単位量当たりの価格) ÷ 単位量当たりの二酸化炭素排出量として算出したものに各非化石エネルギー電源の電源構成を加味した加重平均として推計する。（第 4 章：算出手順 G,H 参照）
- 非化石エネルギー電源に対する最終的な二酸化炭素の排出価格は化石エネルギー電源の電源構成を加味した加重平均として推計する。ただし、非化石エネルギー電源に対する化石エネルギー電源の単位量当たりの二酸化炭素価格の加重平均がマイナスとなっている場合は、安定した電力供給としての役割などコスト面以外の理由で該当する化石エネルギー電源を用いて発電せざるを得ない状況と推測し、最終的な二酸化炭素の排出価格の推計から除外した。（第 4 章：算出手順 I 参照）

4. 二酸化炭素の排出価格および排出総額

第 4 章では、はじめに LNG 火力発電を例に、2020 年の二酸化炭素排出価格の算出手順を例示する。その後、二酸化炭素排出価格（図表 8）および国内で排出されるエネルギー起源の二酸化炭素排出量に対する二酸化炭素排出総額（図表 10）について、2020 年および 2030 年の推計結果を示す。

【算出手順】

A) LNG 火力発電の 1 ㎥当たりの発電量[2]を求める。

$$\text{単位発電量}\left({}^{kWh}/_{m^3}\right) = \frac{39.26 \times 10^6 \times 54.5\%}{3.6 \times 10^6} = 5.94$$

B) LNG の二酸化炭素排出係数[3]を求める。

$$\text{二酸化炭素排出係数}\left({}^{kg-CO_2}/_{MJ}\right) = \frac{13.87 \times \frac{44}{12}}{1.0 \times 10^3} = 0.05$$

C) LNG の 1 ㎥当たりの二酸化炭素排出量を求める。

$$\text{二酸化炭素排出量}\left({}^{t-CO_2}/_{m^3}\right) = 39.26 \times 0.05 \times 10^{-3} = 2.00 \times 10^{-3}$$

[2] 1[Wh]=3600[J]として算出。

[3] 炭素の原子量を 12、二酸化炭素の分子量を 44 として算出。

D)　1mmBtu 当たりの LNG 価格を 1 ㎥当たりの LNG 価格[4]に換算する。

$$\text{LNG 価格}\left(\text{円}/m^3\right) = 8.30 \times 106.76 \times \frac{46}{1360} = 29.97$$

E)　LNG 火力発電の 1kWh 当たりの燃料単価を求める。

$$\text{燃料単価}\left(\text{円}/kWh\right) = \frac{29.97}{5.94} = 5.04$$

F)　LNG 火力発電の 1kWh 当たりの発電コストを求める。

$$\text{発電コスト}\left(\text{円}/kWh\right) = 1.30 + 1.20 + 5.04 + 1.70 + 0.10 = 9.34$$

G)　非化石エネルギー電源に対する LNG 火力発電の 1 トン当たりの二酸化炭素排出価格を求める。

$$\text{非化石エネルギー発電コスト}\left(\text{円}/kWh\right) - \text{LNG 火力発電コスト}\left(\text{円}/kWh\right)$$

$$= \text{LNG 二酸化炭素排出価格}\left(\text{円}/t - CO_2\right) \times \text{LNG 二酸化炭素排出量}\left(t - CO_2/m^3\right)$$

$$\times \text{LNG 発電単価}\left(\text{円}/kWh\right) \div \text{LNG 価格}\left(\text{円}/m^3\right)$$

という関係式を仮定する。つまり、化石エネルギーの燃料費で調整した非化石エネルギーと化石エネルギーの発電コスト差に二酸化炭素排出価格が内包していると仮定して二酸化炭素排出価格を求める。

（例：対原子力発電）

$$\text{二酸化炭素排出価格}\left(\text{円}/t - CO_2\right) = \frac{\left(\frac{11.50}{5.04} - \frac{9.34}{5.04}\right) \times 29.97}{2.00 \times 10^{-3}} = 6422$$

H)　LNG 火力発電の非化石エネルギー電源に対する 1 トン当たりの二酸化炭素排出価格を求める。

$$\text{二酸化炭素排出価格}\left(\text{円}/t - CO_2\right)$$

$$= \text{各非化石エネルギー電源に対する二酸化炭素排出価格の加重平均} = 14284$$

[4] 天然ガス 1360 ㎥＝46mmBtu として算出。

同様の算出手順で、2020 年の石油火力発電、石炭火力発電の非化石エネルギー電源に対する 1 トン当たりの二酸化炭素排出価格を算出した。石油火力発電は-6,531 円となり推計から除外し、石炭火力発電は 5,266 円との算出結果となった。

I) 非化石エネルギー電源に対する各化石エネルギー電源の 1 トン当たりの二酸化炭素排出価格の加重平均より最終的な 1 トン当たりの二酸化炭素排出価格を求める。（化石エネルギー電源の二酸化炭素排出価格がマイナスとなるものは加重平均から除外する）

$$\text{最終的な二酸化炭素排出価格}\left(\text{円}/t-CO_2\right)=\frac{14284\times 39.01\%+5266\times 30.97\%}{39.01\%+30.97\%}=10293$$

これより、各化石エネルギー電源の二酸化炭素排出価格を加重平均した結果、2020 年における二酸化炭素排出価格は、二酸化炭素 1 トン当たり 10,293 円と推計される。

また、上記と同様の算出手順で、2030 年における二酸化炭素排出価格を推計した結果、二酸化炭素 1 トン当たり 5,814 円となった。

図表 8　二酸化炭素排出価格

二酸化炭素排出価格（円/t-CO2）	2020年	2030年
	10,293	5,814

（出所）日興リサーチセンター作成

続いて、資源エネルギー庁が公表する「総合エネルギー統計」より、国内で排出されるエネルギー起源の二酸化炭素排出量（図表 9）を用いて、国内で排出される二酸化炭素の排出総額を算出する。

図表 9　国内で排出される二酸化炭素排出量

二酸化炭素排出量（Mt-CO2）	2020年	2030年
企業・事業所他	538	378
家庭	167	112
運輸	185	121
エネルギー転換	78	55
総計	967	667

（出所）資源エネルギー庁より日興リサーチセンター作成

国内で排出される二酸化炭素の排出量を 1990 年以降でみると、2013 年の年間 12 億 3,539 万トンがピークで、2020 年はピークから 22%減少の年間 9 億 6,744 万トンと推計される。また、2030 年は、昨年の気候変動リーダーズサミットで菅首相（当時）が表明した目標値である 2013 年比で 46%減の年間 6 億 6,711 万トンとしている。

この二酸化炭素排出量を用いて算出した 2020 年における国内の二酸化炭素排出総額は、金額に換算して 9 兆 9,575 億円（図表 10）と推計される。そのうち、5 兆 5,332 億円が企業・事業所等を経由する二酸化炭素排出額などとなっている。また、2030 年の二酸化炭素排出量が目標通りであれば、国内の二酸化炭素排出総額 3 兆 8,787 億円と推計され、二酸化炭素排出量の減少予想に加え、二酸化炭素価格の低下予測から 2020 年比で 61%減と大幅な減額が見込まれる。

図表 10　二酸化炭素排出総額

CO2 排出総額（億円）	推計時点	総額	部門別			
			企業・事業所他	家庭	運輸	エネルギー転換
	2020年	99,575	55,332	17,233	19,027	7,982
	2030年	38,787	22,004	6,518	7,040	3,225

（出所）日興リサーチセンター作成

5. おわりに

本稿では、化石エネルギーや非化石エネルギーといった一次エネルギーの発電コストの差異を用いて、二酸化炭素排出価格や国内で排出されるエネルギー起源の二酸化炭素排出総額の推計を行った。

化石エネルギーの発電コストの上昇が見込まれる一方、太陽光や風力など再生可能エネルギーによる発電コストは低下が見込まれることなどから、化石エネルギーと非化石エネルギーの発電コスト差が縮小することで、二酸化炭素の排出価格は減少する推計結果となった。

2021 年は、世界全体で温室効果ガスの削減に向けた取組みへの加速の必要性を共通認識として共有した 1 年であった。その中で、メタネーション[5]などカーボンニュートラルを実現するための新しい技術の開発が期待されている。

また国内では、経済産業省や環境省で企業の温室効果ガス排出量の報告内容や公表の手法の見直しが検討されるなど、さまざまな分野で温室効果ガス削減に向けた取組みが加速している。このような中、今回の分析結果がカーボンニュートラルに向けた取組みへの一助になることを期待する。

[5] メタネーションとは、二酸化炭素と水素を原料として、LNG 火力発電の主原料であるメタンを合成する技術。原料の水素は再生可能エネルギーを用いて、水を水素と酸素に分離して獲得。合成したメタンと酸素を燃焼させ、二酸化炭素と水を生成する。実質的に、サイクル内で再生可能エネルギーを除くすべての原料を獲得することが可能となる技術で、カーボンニュートラルの実現に向けた取組みの中で大いに期待されている。

参考文献

OECD[2021], 「Economic Outlook」
https://www.oecd.org/economic-outlook/

資源エネルギー庁[2021], 「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/03.pdf

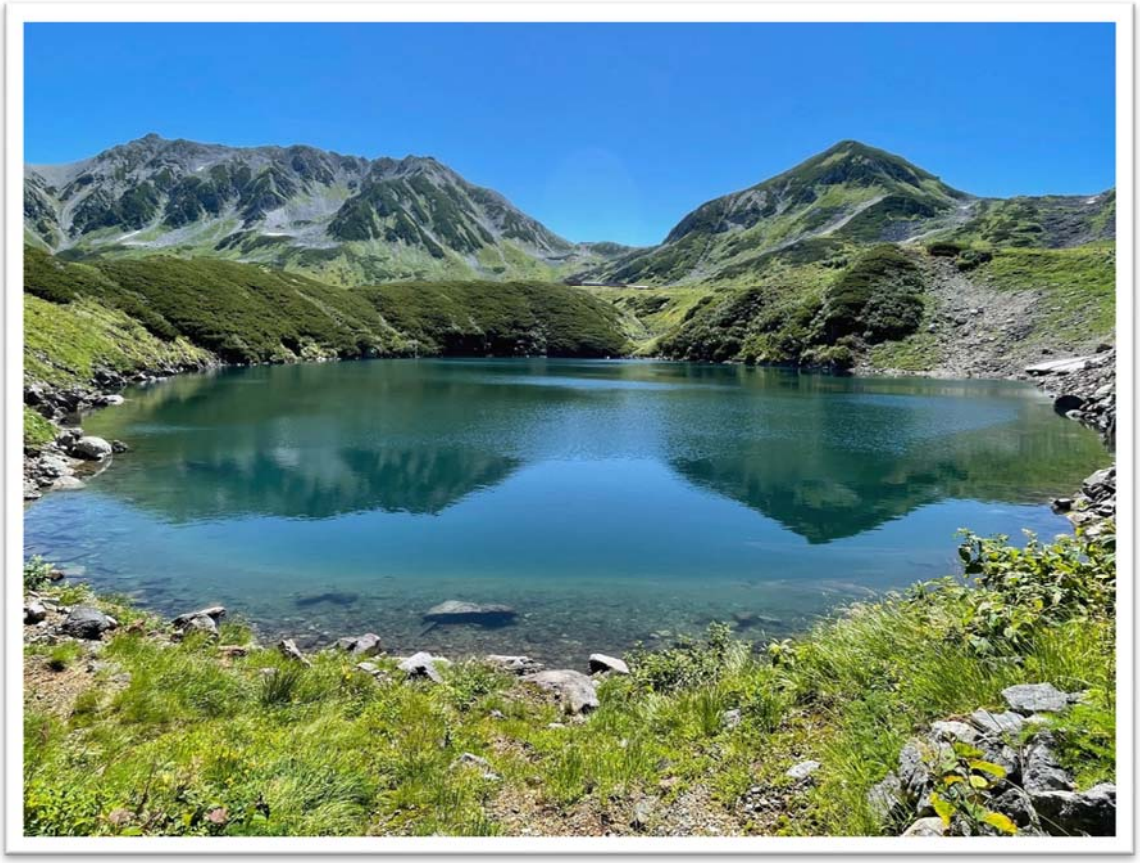
資源エネルギー庁[2021], 「総合エネルギー統計」
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline7

資源エネルギー庁[2020], 「エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数（2018 年度改訂）の解説」
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf

経済産業省[2021], 「発電コスト検証に関するこれまでの議論について」
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/2021/data/07_05.pdf

世界銀行[2021], 「Commodity Markets Outlook」
https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets

（END）



「わが国企業は脱炭素投資を賄えるのか」

2022 年 4 月
社会システム研究所 主任研究員　　司　淳

1．はじめに

地球規模の課題である気候変動問題の解決に向けて、2015 年にパリ合意が採択され、世界共通の長期目標として、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低い、できれば 1.5℃までに抑える努力を追求すること（2℃目標）」、「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収量による除去量との間の均衡を達成すること」等が合意された。その後、「第 26 回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP26）」（2021 年）において、「1.5℃目標」が明確化された。

2020 年 10 月 26 日、菅首相（当時）は所信表明演説で、日本政府として初めて 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言した[1]。経済成長を犠牲にすることなく温室効果ガスの排出量を削減するためには、温室効果ガスの排出量を抑えるための技術や温室効果ガスを排出しないエネルギーの開発を推進しなければならない。同時に温室効果ガスを吸収する技術や産業の育成も不可欠である。本稿では、気候モデルと経済モデルを統合したモデルとして最も知られた DICE モデルを一部修正したモデル（「気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル（本山真、2021 年）（以下「本山モデル」）」）[2]による推計結果を基に、本邦企業における脱炭素関連投資の実現可能性について探った。

2．脱炭素社会へ取り組む中心的主体は企業

2015 年のパリ合意は、「第 21 回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）」において合意されたもので、気候変動枠組条約に加盟する全 196 ヵ国・地域が参加した史上初の枠組みである。なにより意義が大きいことは、1997 年の「京都議定書（COP3）」に比べて、地球上の温室効果ガス総排出量の約 4 割を占める米国、中国という「2 大排出国」が批准したことである。トランプ前米大統領が脱退を表明したものの、バイデン現大統領が復帰を宣言したことでも知られる[3]。

このパリ合意は、「今世紀半ばのカーボンニュートラル」という今日にいたる世界の気候変動をめぐる議論を決定づけた明らかな転換点となった。国家としてのコミットであるため、温室効果ガス削減の責任は第一義的には国家にあるが、削減する主体は国というよりも、むしろ企業こそが中心的主体と言え

[1] 「カーボンニュートラルとは」https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/
[2] 「気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル」（本山真、2021 年、日興リサーチセンター）https://www.nikko-research.co.jp/library/10496/
[3] 「グリーン・ジャイアント」（森川　潤、2021 年、文春新書）

よう。それは、TCFD（Task Force on Climate-related Financial Disclosures :「気候関連財務情報開示タスクフォース」）が 2017 年 6 月に公表した最終報告書で、企業等に対し、気候変動関連リスク、及び機会に関する４項目「Governance（ガバナンス）、Strategy（戦略）、Risk Management（リスク管理）、Metrics and Targets（指標と目標）」について開示することを推奨したことに表れている[4]。実際、企業が気候変動リスクに対して、どの程度さらされているのか、その情報開示が投資家から要求されており、また、投資家も気候変動イニシアティブ「Climate Action 100+」などの協働エンゲージメントによって、企業が「パリ合意」目標を達成することを促している[5]。このように投資家などのステークホルダーから企業が気候変動リスクへの対応が迫られていることが基本的な背景にある。

３．カーボンプライシングと DICE モデル

DICE モデルを開発し 2018 年にノーベル経済学賞を受賞した Nordhaus(2015)では、カーボンプライシング（炭素の価格付け）について、地球温暖化を止めるために重要な役割を持つことが示されている。それは、二酸化炭素排出による「社会的費用」を負担させるためである[6]。

世界全体の気候変動と経済活動を分析対象とした統合評価モデル＝DICE モデルは、世界経済成長モデルとなっており、考え方としては次のように整理される。

生産活動によって排出される二酸化炭素が気温に影響を与え、上昇した気温によって経済的な被害を受けることになる。生産活動はその被害額と二酸化炭素の削減コストによって減少することになり、生産に対する消費は、それによる効用を最大化するように求められるという考え方である。

本山モデルでは、気候変動に関する影響をモデルの外で決まる値（外生変数）を用いることとし、炭素価格が二酸化炭素排出量の目標に応じて決まり、気温上昇はモデル外の値を代入することによって、災害等による経済的な被害が決まるなど、シミュレーションを容易にしたものとなっている。

この本山モデルでは、2015 年の炭素価格（/ CO_2 トン）を初期値として設定し、気温が一定程度上昇していくという仮定の下に炭素価格や二酸化炭素排出量がどのように変化していくかを算出した。そこで、二酸化炭素排出量がネットゼロになる時期が、政府が目標とする 2050 年に実現するケースは 2015 年の初期値を 300 ドル/CO_2 トンと想定したものという結果になった。

---

[4] 気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）(fsb-tcfd.org)
https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf

[5] 「Climate Action 100+の概要」（高橋龍生、2020 年、日興リサーチセンター）
https://www.nikko-research.co.jp/library/9094/

[6] Nordhaus W. (2015) “The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World”, Yale University Press.（邦訳：ウィリアム・ノードハウス（2015）「気候カジノ：経済学から見た地球温暖化問題の最適化」、日経ＢＰ社）

４．今の本邦企業は脱炭素投資を賄えるのか

この本山モデルを参照すると、2020 年時点の炭素価格は 323 ドル/ CO_2 トンとなっており、2020 年度の為替レート（東京市場年度平均：106.40 円/ドル）で日本円に換算すると約 3.4 万円/ CO_2 トンとなる。本章では、この炭素価格を前提に、本邦企業が脱炭素社会に向けて温室効果ガス排出という「社会的費用」を賄うことが可能か、あるいは「社会的費用」ではなく脱炭素投資と位置づけた場合について考察した。

2000 年に英国で設立された NPO である CDP（Carbon Disclosure Project）は、企業の環境情報開示を促進してきた。2021 年度は、13,000 社を超える企業が CDP に情報を開示しているが、このうち日本企業は 427 社にとどまる。

また温室効果ガスの排出量を算定する場合、CDP は「GHG プロトコルイニシアティブ」が策定した「GHG プロトコル」を採用している。GHG プロトコルでは温室効果ガスの排出量を算定する範囲として、Scope1～3 を定義している。Scope1 は事業者自らによる温室効果ガスの直接排出（燃料の燃焼、工業プロセス）、Scope2 は、他社から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出、Scope3 は、Scope1、Scope2 以外の間接排出（事業者の活動に関連する他社の排出）と定義されている。その上で、GHG プロトコルでは「事業者は、最低、Scope1 と Scope2 からの GHG 排出に関して、算定及び報告しなければならない」とされている[7]。Scope3 まで含めると、原料調達から製造、物流、販売、廃棄に至る、企業の事業活動の影響範囲全体の「サプライチェーン排出量」という意味になり、事業者の関連する他社の排出も含むことになるため、当モデルでも Scope1 と Scope2 の総和を集計したものを用いた。以下では、CDP に回答した 427 社のうち、Scope1 と Scope2 を回答した金融機関を除く一般事業会社 387 社のデータを利用した。

財務情報については、「日経財務データ」、「日経 NEEDS-Cges（Corporate governance evaluation system：コーポレート・ガバナンス評価システム）」より上場する一般事業会社の取得可能なデータを集計し、比較検討した。

図表 1 は、2020 年度決算期において、CO_2 排出量（Scope1+Scope2）を開示した東証上場企業（除く金融機関、以下同）387 社の CO_2 排出量と財務指標を集計したものである。387 社は金融機関を除く上場企業全体 3,684 社の 1 割程度に過ぎない企業群であるが、時価総額や自己資本では全体の 3 分の 2 を占める。

この 387 社が 1 年間に排出した CO_2 は合計で 5.81 億トンとなっている。企業だけでなく公的部門や家計部門を含めた日本全体の CO_2 排出量が年間 11.5 億トン（2020 年度確報値）であることから、このわずか 387 社が、わが国 CO_2 排出量全体の過半を捕捉していることは留意しておく必要があろう。

[7] 「温室効果ガス（GHG）プロトコル」https://www.env.go.jp/council/06earth/y061-11/ref04.pdf

図表１　金融機関を除く上場企業の財務指標と CO_2 排出量

（2020年度、単位：兆円）

	社数	**CO_2排出量（億トン）**	**CO_2排出額**	時価総額	自己資本	現金＋有価証券	設備投資	研究開発費
CO_2排出量開示企業	**387**	**5.81**	**19.9**	**460**	**296**	**165**	**33.9**	**13.3**
上場企業（除く金融機関）	3,684	･･･	･･･	686	437	219	45.0	15.5

（注）CO_2 排出量 1 トン＝323 ドル、1 ドル＝106.40 円（2020 年度平均）で換算した。設備投資は実施額。CO_2 は Scope1 と Scope2 の総和、時価総額の社数は 460 兆円が 386 社、686 兆円が 3658 社

（出所）「日経財務データ」「CDP（カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト）」「日経 NEEDS-Cges（Corporate governance evaluation system：コーポレート・ガバナンス評価システム）」より日興リサーチセンター作成

ここで、本山モデルで得た炭素価格（2020 年 3.4 万円/CO_2 トン）を代入すれば、年間 5.81 億トンという CO_2 排出量を 19.9 兆円という金額（CO_2 排出額）で表すことができる。年間 19.9 兆円は経済学上の「社会的費用」に位置づけられる。仮に、「気候変動対策費」という名目で、利益を減らす費用として全てを計上するとしても、追加的費用としては、現金・有価証券（165 兆円）の約 12%に過ぎない。

しかし、現実問題として 19.9 兆円は単純なコストとは言えない。昨今の国際的潮流のように脱炭素をビジネス機会と捉えると、この「19.9 兆円」はコストとして支払う費用ではなく、成長投資の一環と考えることができる。現在、わが国は「2050 年カーボンニュートラル」を掲げ、補助金や規制強化などの政策対応により、企業部門の脱炭素関連投資を促進する成長戦略の検討が開始されている[8]。日本政策投資銀行の「全国設備投資計画調査（2021 年６月）」によれば、脱炭素関連の投資は、すでに３割程度の企業が拡大する方針を掲げている。投資の中身をみると、「再生可能エネルギー関連」や「省エネ関連」と回答する企業の割合が多くなっているという。

そこで「19.9 兆円」を脱炭素投資と考えて規模感で比較すると、研究開発費（13.3 兆円）より約 6.6 兆円多いが設備投資額（33.9 兆円）より約 14 兆円少ない。ただし、すでに多くの企業が「再生可能エネルギー関連」や「省エネ関連」を設備投資として実施したり、脱炭素に向けた研究開発についても実施したりしていることから、19.9 兆円を単純に上乗せする投資額と位置付けることは適切とは言えない。現実には、かなりの部分を代替する成長投資として実施されていると考えられることから、さほど過剰な追加負担とは言えないだろう。

なお、最近の円安傾向を踏まえて 125 円/ドル（4 月中旬）で換算すると、炭素価格 4 万円/ CO_2 トン、年間 CO_2 排出額 23.5 兆円と算出されるが、結論に影響はない。

[8] 「日本経済 2021－2022－成長と分配の好循環実現に向けて－」（内閣府）によると、事例として、「2050 年までのカーボンニュートラルを明記し、再生可能エネルギーの導入や企業の温室効果ガス排出量のオープンデータ化に向けた法整備等を目的に、地球温暖化対策推進法が 2021 年 5 月に一部改正された」と紹介されている。

5. おわりに

わが国企業を取り巻く現状は、流動性確保などの新型コロナ感染症への危機対応ステージを乗り越え、民間部門がリスクをとって事業の再構築を進めるとともに、デジタル・脱炭素などの成長産業への資源投入を進めていくステージに移りつつある。そこでは、企業のさらなる成長を起点に、家計への適切な分配を通じて、成長と分配の好循環の実現が期待されている。

近年、わが国企業は雇用者への賃金としての分配や、国内での付加価値創出の源泉となる投資活動への支出が伸び悩んでいることが指摘されている。今後の投資スタンスの回復に向けて、中長期的な成長力の観点から注目される分野は IT 投資と脱炭素関連投資とされ、とりわけ温室効果ガス排出量の削減に向けた検討は、世界的な潮流となっている。今後、脱炭素に向けた動きが世界的に加速し、企業側の取り組みの優劣が、競争力に直結する可能性が高まっている。

参考文献

Nordhaus., W. 2015. The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World. Yale University Press.（邦訳：ウィリアム・ノードハウス（2015）「気候カジノ：経済学から見た地球温暖化問題の最適化」、日経ＢＰ社）

TCFD, 2017, Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures: Final Report, https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf

環境省「温室効果ガス（GHG）プロトコル」 https://www.env.go.jp/council/06earth/y061-11/ref04.pdf

高橋龍生, 2020, 「Climate Action 100+の概要」, 日興リサーチレビュー, https://www.nikko-research.co.jp/library/9094/

脱炭素ポータル, 2021,「カーボンニュートラルとは」,環境省ホームページ（2022 年 3 月取得, https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/)

内閣府, 2021, 「日本経済 2021－2022－成長と分配の好循環実現に向けて－」<第 2 章　成長と分配の好循環実現に向けた企業部門の課題> https://www5.cao.go.jp/keizai3/2021/0207nk/pdf/n21_2.pdf

本山真, 2021,「気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル」, 日興リサーチレビュー, https://www.nikko-research.co.jp/library/10496/

森川潤, 2021,『グリーン・ジャイアント』文春新書

（END）

気候変動関連リスクと機会に関する一考察
～ 業種による傾向分析 ～

2022 年 4 月

投資工学研究所 川﨑　正勝
後藤　誠也

1．はじめに

2022 年 4 月、東京証券取引所は上場企業の企業価値の向上への取り組みを促し、国内外の投資家から支持を得るため、市場再編を行った。最上位市場に該当するプライム市場では、グローバルな投資家から評価されるため、流動性やガバナンス、経営成績・財政状態など様々な基準が要求される。特に地球温暖化の進行に対する危機感が高まる中、気候変動に関する情報開示に注目が集まっている。2017 年に TCFD[1]が企業や機関に対して気候関連の情報開示の推奨や開示基準の明確化などの提言（TCFD［2017］）を行って以来、日本企業は積極的に提言への賛同を表明し、開示に努めてきた。しかし、日本取引所グループが 2021 年 11 月に発表した「TCFD 提言に沿った情報開示の実態調査」（日本取引所グループ［2021］）によると、2021 年 3 月時点で TCFD 提言に賛同を表明し、TCFD 公式ウェブサイトに TCFD Supporters[2]として社名が掲載されている東証上場企業は 259 社にとどまる。プライム市場上場企業が 1,839 社[3]であることを考えると、今後、気候関連の情報開示への取り組みは重要な課題となるだろう。

カーボンニュートラルを目指し、脱炭素社会への移行が必要とされるなか、気候変動への対応は多くの企業に重大なリスクとともに多大な機会をもたらす。気候関連のリスクと機会を整理し、的確に把握することは、企業が経営戦略やリスク管理を行う上で、非常に重要である。TCFD 提言では、企業に影響を与える潜在的な気候関連のリスクと機会を 11 項目に分類している。企業が直面する気候関連のリスクと機会は業種・企業ごとに異なり、企業の戦略や投資配分、また投資家の企業に対する投資判断にも多大な影響を与えるだろう。

本稿では、CDP[4]のデータを用いて気候変動に関するリスクや機会について考察する。CDP は企業に対して気候変動などに関するアンケートを行い、回答をもとにスコアの算出などを行っている。現状、気候関連の情報は、統合報告書や TCFD レポートなどで公表されているが、企業ごとに開示文書やフォ

[1] TCFD とは、金融安定理事会によって気候関連の情報開示及び金融機関の対応をどのように行うかを検討するために設立された気候関連財務情報開示タスクフォースのことである。

[2] https://www.fsb-tcfd.org/supporters/

[3] 2022 年 4 月 4 日の市場再編時点

[4] CDP は、企業や自治体などに対して気候変動をはじめとする環境課題に関する開示を求める英国の非政府組織（NGO）である。本稿では CDP がグローバルな企業に求める質問書への回答のうち、日本企業のデータを用いている。質問に回答する日本企業は年々増加しており、2021 年時点では 536 社が回答している。

ーマットが異なっており、定型的な情報の収集が難しい。CDP は時価総額上位企業を中心にアンケートを実施しており、統一したフォーマットで収集された、利便性が高いデータを提供している。

本稿の構成は、以下の通りである。2 章で TCFD 提言をもとに企業の気候関連のリスクと機会について整理し、3 章で CDP のデータを用いて気候関連のリスクと機会に関して業種ごとの傾向を確認する。

2. 気候変動関連のリスクと機会について

2021 年 6 月に「コーポレートガバナンス・コード」（東京証券取引所［2021］）が改訂され、東京証券取引所のプライム市場上場企業は「TCFD 又はそれと同等の枠組みに基づく開示の質と量の充実」が求められることとなった。2017 年に TCFD は気候変動がもたらすリスク及び機会について、明確で比較可能、かつ一貫した情報を開示できる枠組みを提言した。TCFD 提言では、重要な要素として気候関連のリスクと機会に関する分類を定義している。計 11 項目のリスクと機会について具体的な切り口と潜在的な財務への影響例を図表 1、2 に示す。

提言では、企業の気候変動に対する潜在的なリスクを「移行リスク」と「物理的リスク」に分類している。「移行リスク」は図表 1 の上から 4 つの項目からなり、脱炭素社会への移行に伴って生じる、幅広い分野におけるリスクである。これらは、政策の変化や技術革新などが該当し、操業コストの増大や製品/サービスの需要減など企業の財務に大きな影響を与えることが予想される。「物理的リスク」は図表 1 の下の 2 つの気候変動に起因する異常気象（急性リスク）とより長期的な気象の変化や影響（慢性リスク）に分類され、保有する資産に対する直接的な損害やサプライチェーンの寸断から生じる間接的な被害などによって、組織の財務に影響を与える。また、潜在的な機会は、気候変動の緩和や適応に関する取り組みによって、組織にとって好機となるであろう 5 項目に分類される（図表 2）。

図表 1　TCFD 提言によるリスクの説明

タイプ	リスク	主な切り口の例	潜在的な財務的影響
移行リスク	政策及び法規制のリスク	・GHG排出に関する規制の強化 ・情報開示義務の拡大	・操業コストの増大（例：コンプライアンスコスト、保険料） ・政策の変更に伴う資産価値の下落 ・訴訟及び裁判の結果によるコスト増大や製品／サービスの需要低下
	技術のリスク	・既存製品の低炭素技術への入れ替え ・新規技術への投資失敗 ・新規技術への先行コスト	・製品／サービスの需要低下 ・新技術代替技術への先行コスト
	市場のリスク	・消費者行動の変化 ・市場シグナルの不透明化 ・原材料コストの上昇	・消費者の好みの変化による製品／サービスの需要低下 ・生産原価の増大（例：エネルギー、廃棄物処理）によるコスト増 ・改定（例：化石燃料埋蔵量、土地証券の評価）による資産価格の下落
	評判のリスク	・消費者選好の変化 ・業種への非難 ・ステークホルダーからの懸念の増加	・消費者の好みの変化による製品／サービスの需要低下 ・製造能力の減少（例：許認可の遅延）による収益減少 ・従業員管理計画面のマイナス影響（例：従業員の勧誘維持）によるコスト増 ・資本の利用可能性の低下
物理的リスク	急性リスク	・サイクロン洪水のような異常気象の深刻化増加	・製造能力の減少（例：郵送の困難、サプライチェーンの障害）による収益減少 ・従業員へのマイナス影響（例：健康、安全、勤労）によるコスト増
	慢性リスク	・降雨や気象パターンの変化 ・平均気温の上昇 ・海面上昇	・資産価値の下落（例：「ハイリスク」な地域にある不動産へのダメージ） ・操業コストの増大（例：発電所での冷却水の不足、「ハイリスク」な地域での保険料増大） ・資本コストの増大（例：施設へのダメージ）

（出所）環境省ホームページ（環境省［2021］）及び TCFD［2017］より加工して日興リサーチセンター作成

図表 2　TCFD 提言による機会の説明

タイプ	機会	主な切り口の例	潜在的な財務的影響
機会	資源の効率	・交通輸送手段の効率化 ・製造流通プロセスの効率化 ・リサイクルの活用 ・効率性のよい建築物 ・水使用量消費量の削減	・営業費用の削減（例：効率化、費用削減） ・製造能力の拡大、収益増加 ・固定資産価値の向上（例：省エネビル等） ・従業員管理計画面の向上（健康、安全、満足度の向上）、費用削減
	エネルギー源	・低炭素エネルギー源の利用 ・政策的インセンティブの利用 ・新規技術の利用 ・カーボン市場への参画 ・エネルギー安全保障分散化へのシフト	・営業費用の削減（例：低コスト利用） ・将来の化石燃料費上昇への備え ・炭素価格低炭素技術からのROI上昇 ・低炭素生産を好む投資家増加による資本増加 ・評判の獲得、製品サービスの需要増加
	製品及びサービス	・低炭素商品サービスの開発拡大 ・気候への適応対策保険リスク対応の開発 ・研究開発イノベーションによる新規商品サービスの開発 ・ビジネス活動の多様化、消費者選好の変化	・低炭素製品サービス需要による収益増加 ・適応ニーズによる収益増加（保険リスク移転商品サービス） ・消費者選好の変化に対する競争力の強化
	市場	・新規市場へのアクセス ・公的セクターによるインセンティブの活用 ・保険補償を新たに必要とする資産地域へのアクセス	・新規市場へのアクセスによる収益増加（例：政府開発銀行とのパートナーシップ） ・金融資産の多様化（例：グリーンボンド、グリーンインフラ）
	回復力	・再エネプログラム、省エネ対策の推進 ・資源の代替多様化	・レジリエンス計画による市場価値の向上 ・サプライチェーンの信頼性の向上 ・レジリエンス関連の新規製品サービスによる収益増加

（出所）環境省ホームページ（環境省［2021］）及び TCFD［2017］より加工して日興リサーチセンター作成

TCFD 提言は、上記の気候関連のリスク及び機会が組織にもたらす財務的影響に関する情報開示の向上を目的としている。組織に対する気候関連の財務的影響は、組織が晒される具体的な気候関連リスクと機会をどのように管理・獲得するかについての戦略的計画・リスク管理によって左右される。そのため、企業がどのような種類の気候関連のリスクと機会を抱え、財務的な影響を受けているかを把握する

ことは、投資家や金融機関にとっても非常に重要だと言えよう。

3. 気候関連のリスクと機会に関する分析

3.1. 分析データについて

本稿の分析では、2021 年の CDP の気候変動に関する質問書の回答を用いた。2021 年 9 月時点で東証一部に上場しており、質問書の基本情報に登録されている 394 社を分析対象とした。質問書のうち、「リスク・機会」において、事業に大きな財務的または戦略的影響を与える可能性のあるリスク・機会の詳細の提供を求めた質問を用い、TCFD に対応し一部細分化されたリスク 8 項目・機会 5 項目それぞれについて回答がある企業を東証 17 業種[5]ごとに集計した。なお、リスクに関しては TCFD の「政策及び法規制のリスク」の項目が「現在の規制リスク」、「新たな規制リスク」、「法的リスク」の 3 つに細分化されている。

3.2. リスクに関する考察

集計結果を図表 3 に示す。各項目の値は、各項目の回答企業数を CDP 回答企業数で割ったものであり、業種別の回答率を意味する。また、回答率が 50%を超えているものを赤で色付けしている。

図表 3　リスクの回答率

業種名	CDP回答企業数	現在の規制リスク	新たな規制リスク	法的リスク	技術のリスク	市場のリスク	評判のリスク	急性リスク	慢性リスク
食品	25	36%	56%	8%	4%	20%	16%	68%	44%
エネルギー資源	5	20%	60%	0%	0%	80%	0%	60%	20%
建設・資材	34	32%	82%	6%	26%	32%	21%	62%	59%
素材・化学	53	23%	72%	6%	6%	34%	21%	53%	43%
医薬品	13	23%	54%	0%	23%	8%	23%	77%	31%
自動車・輸送機	31	42%	48%	10%	23%	48%	16%	68%	29%
鉄鋼・非鉄	11	36%	55%	0%	36%	36%	45%	64%	27%
機械	26	38%	38%	8%	35%	31%	38%	65%	19%
電機・精密	67	31%	60%	1%	15%	30%	22%	78%	25%
情報通信・サービスその他	41	22%	54%	5%	12%	37%	22%	68%	27%
電気・ガス	9	33%	78%	0%	56%	56%	33%	67%	33%
運輸・物流	21	43%	38%	10%	24%	52%	48%	86%	33%
商社・卸売	8	0%	63%	0%	0%	25%	0%	38%	25%
小売	17	18%	47%	6%	6%	12%	18%	71%	59%
銀行	11	36%	55%	18%	27%	36%	36%	82%	9%
金融（除く銀行）	15	33%	47%	13%	7%	20%	47%	73%	27%
不動産	7	29%	71%	0%	14%	29%	14%	57%	29%

（出所）2021 年 CDP 気候変動に関する質問書の回答データより日興リサーチセンター作成

CDP において、TCFD の「政策及び法規制のリスク」に対応する「現在の規制リスク」、「新たな規制リスク」、「法的リスク」を確認する。3 つのリスク項目を比較すると、「法的リスク」の回答率は全体的

[5] 証券コード協議会が定める日本株の分類として広く利用されている 33 業種分類をもとに、投資利便性を考慮して 17 業種に再編した業種分類。（https://www.jpx.co.jp/markets/indices/line-up/files/fac_13_sector.pdf）

に低く、「現在の規制リスク」と「新たな規制リスク」では、ほとんどの業種で「新たな規制リスク」の回答率が高い。「新たな規制リスク」の回答率が高いことは、今後の規制強化を企業が想定していることを示していると考えられ、近年、各国が二酸化炭素の排出削減のための対策を打ち出していることを考えると自然な結果だろう。CDP のアンケートへの回答の詳細を確認すると、炭素税を含むカーボンプライシングの導入・強化を想定している企業が幅広い業種で存在し、カーボンプライシングへの注目の高さが窺える。

「技術のリスク」をみると、「電気・ガス」が他業種と比較して多くなっており、低・脱炭素技術への対応が急務となっていることが窺える。回答では、再生可能エネルギーやデジタル技術を活用したエネルギーシステムの高度化に対する多額の投資の必要性が記載されており、近年のカーボンニュートラルへ向けた取り組みが表れている。

「市場のリスク」では、「エネルギー資源」の回答率が突出しており、「電気・ガス」、「運輸・物流」も回答率が高い。いずれの業種でも、化石燃料を忌避する社会情勢による需要減、コスト増をリスクとしており、業界の強い危機意識が表れていると考えられる。

TCFD において「物理的リスク」は「急性リスク」と「慢性リスク」に分類されているが、回答の特徴は明確に分かれた。「急性リスク」では、「商社・卸売」を除く業種の回答率が 50%を超えており、ほとんどの業種で「急性リスク」が意識されていることを示している。一方、「慢性リスク」の回答率で 50%を超えているのは「建設・資材」、「小売」のみであり、多くの企業は「慢性リスク」を十分に認識していないことが分かる。これは、自然災害などの被害を受け、そのリスクに直面している「急性リスク」と、長期的な気温上昇や自然環境の変化による被害を認識しづらい「慢性リスク」との現時点での被害に対する認識の差異によるものと考えられる。しかしながら、「急性リスク」も「慢性リスク」もほとんどの企業で避けられないリスクであり、「慢性リスク」を認識し、経営戦略やリスク管理に組み込むことが必要であろう。両項目の回答を確認すると、「急性リスク」における商社・卸売の回答率の低さは、CDP 回答企業数が 8 社と少ないこともあるが、「商社・卸売」では多様な商品、地域で活動していることからリスクが分散されていると解釈できる。また、「慢性リスク」では、「建設・資材」、「小売」の回答率が高いが、どちらも、気温上昇により屋外での活動が過酷になることをリスクとしており、業種の特徴が表れている。

3.3. 機会に関する考察

集計結果を図表 4 に示す。各項目の値は、図表 3 と同様に業種別の回答率を意味している。

「資源の効率」で回答率が 50%を超えているのは「運輸・物流」のみである。回答では、省エネ車両の導入や鉄道や船舶などのエネルギー効率の高い輸送手段に切り替えることにより CO_2 排出量やコストの削減を目指すとしており、エネルギーの消費に関する取り組みが記載されている。

図表４　機会の回答率

業種名	CDP回答企業数	資源の効率	エネルギー源	製品及びサービス	市場	回復力
食品	25	32%	20%	80%	36%	8%
エネルギー資源	5	0%	40%	80%	20%	0%
建設・資材	34	18%	24%	91%	24%	6%
素材・化学	53	28%	17%	87%	21%	8%
医薬品	13	46%	38%	62%	31%	31%
自動車・輸送機	31	29%	29%	87%	6%	19%
鉄鋼・非鉄	11	18%	36%	91%	9%	0%
機械	26	35%	12%	88%	27%	4%
電機・精密	67	28%	28%	84%	19%	3%
情報通信・サービスその他	41	24%	22%	66%	27%	12%
電気・ガス	9	11%	89%	78%	33%	22%
運輸・物流	21	52%	57%	71%	29%	19%
商社・卸売	8	13%	38%	75%	25%	13%
小売	17	41%	41%	82%	24%	24%
銀行	11	27%	27%	82%	55%	9%
金融（除く銀行）	15	13%	27%	47%	73%	33%
不動産	7	43%	29%	86%	43%	14%

（出所）2021 年 CDP 気候変動に関する質問書の回答データより日興リサーチセンター作成

「エネルギー源」では「電気・ガス」が 90%近くあり、「運輸・物流」も高い。両業種は、事業が化石燃料に大きく依存している業種である。回答では、どちらの業種も再生可能エネルギーの拡大が記載されているが、「電気・ガス」では、脱炭素社会における CO_2 排出量削減において、競合他社との競争に打ち勝つため、「運輸・物流」では、再生可能エネルギーの普及などに伴うコスト削減のためと回答の内容は異なり、業種の特徴が表れている。

「製品及びサービス」は「金融（除く銀行）」以外の業種の回答率が 50%を超えている。反対に「市場」は全体的に高くないが、「金融（除く銀行）」と「銀行」が高くなっており、金融業の回答率が高い。両業種の回答を確認すると、グリーンボンドの発行や ESG ファンドの設定などが記載されており、気候変動に関連する新たな金融商品を開拓していることが窺える。

4. おわりに

本稿では、TCFD 提言をもとに企業の気候関連のリスクと機会を整理し、CDP のデータを用いて気候関連のリスクと機会の項目ごとに業種別の回答率を集計し、各項目の特徴を確認し、業種ごとの傾向について考察した。各項目で回答率の高い業種が異なっており、例えば、リスクでは、企業が今後の規制強化を想定していること、機会では、金融業が気候変動を新たな市場として開拓していることなど、業種の特徴が反映されていることに言及した。

今後の課題として、気候関連のリスクと機会の回答に関して更に詳細に分析することが挙げられる。本稿では、CDP の特定のリスクと機会の有無に関する質問に対する回答をもとに集計を行ったが、CDP では他にも事象の発生する可能性や影響の大きさなどの質問に対する回答のような定量的なデータや、リスクと機会に関する説明を求める質問への回答のような定性的なデータもある。これらを分析するこ

とで、企業が捉えているリスクと機会について更に有用な情報を得ることができる可能性がある。また、今年度からプライム市場上場企業は TCFD 提言に準拠した気候関連情報の開示が求められており、開示する企業が大幅に増えることが予想される。CDP でも質問書の送付対象がプライム市場上場企業全社に拡大される予定がある（CDP［2022]）。気候変動に関する情報が増えることで、より信頼性が高く有益な分析ができると考える。今後も気候変動に関する情報を活用して、有益な分析情報の発信に努めたい。

参考文献

CDP［2021］,「2021 年 CDP 気候変動質問書　入門編」
https://cdn.cdp.net/cdp-production/comfy/cms/files/files/000/004/597/original/2021_CC%E5%9F%BA%E7%A4%8E%E7%B7%A8Webinar%E8%B3%87%E6%96%99.pdf

CDP［2022］,「対象企業拡大リリース」
https://cdn.cdp.net/cdp-production/comfy/cms/files/files/000/005/540/original/CDP2022%E5%AF%BE%E8%B1%A1%E4%BC%81%E6%A5%AD%E6%8B%A1%E5%A4%A7%E3%83%AA%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%B9_web_final.pdf

TCFD［2017］,「気候関連財務情報開示タスクフォースによる提言（最終版）」
https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2020/10/TCFD_Final_Report_Japanese.pdf

東京証券取引所［2021］,「コーポレートガバナンス・コード」
https://www.jpx.co.jp/news/1020/nlsgeu000005ln9r-att/nlsgeu000005lne9.pdf

日本取引所グループ［2021］,「TCFD 提言に沿った情報開示の実態調査」
https://www.jpx.co.jp/corporate/news/news-releases/0090/nlsgeu00000610sr-att/TCFDsurveyJP.pdf

環境省［2021］,「TCFD を活用した経営戦略立案のススメ～気候関連リスク・機会を織り込むシナリオ分析実践ガイド ver3.0～」
http://www.env.go.jp/policy/policy/tcfd/TCFDguide_ver3_0_J_2.pdf

（END）

国内株式のバリュエーションと CO_2 排出量の関係

2022 年 5 月

投資工学研究所　　成田　和弥

1.　はじめに

2021 年 10 月末から 11 月にかけて英国で第 26 回気候変動枠組条約締約国会議（COP26）が開催され、温室効果ガス排出量削減方針が表明され、「グラスゴー気候合意」が採択されるなど、世界的に温室効果ガスを抑制する機運が高まっている。

日本においても、温室効果ガスの排出を 2030 年度に 46%削減（2013 年度比）、そして、2050 年に全体としてゼロにする、いわゆるカーボンニュートラルを目指すことを政府が宣言し、官民をあげて排出削減のために様々な取り組みを進めている。企業の気候変動に関する開示も広がっており、東京証券取引所における「プライム市場」の上場企業は、TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）の提言またはそれと同等の国際的枠組みに基づく気候変動関連の情報開示が求められることになった。

カーボンニュートラル社会への移行では、企業には既存の技術や製品の陳腐化、社会の需要の変化に対応するために生じるコストの増加などのリスクがある一方、新たな事業や技術革新による収益性の向上などの機会もある。そのため、気候変動に関連する情報が、株式市場における企業の評価にも影響することが考えられる。気候変動関連の情報開示では、インターナルカーボンプライシング（杉浦（2022））や気候変動に関するリスクと機会（川崎・後藤（2022））などの拡充が進んでいるが、本稿では、企業の CO_2 排出量に焦点を絞り、株式のバリュエーション指標の一つである PBR と CO_2 排出量の関係について調査する。

2.　業種別の PBR と CO_2 排出量の関係

企業の事業活動に伴う CO_2 排出量の多寡や排出削減の難易度は産業分野によって異なる。そこで、業種別の CO_2 排出量を俯瞰した後、業種別の PBR と CO_2 排出量の関係を確認する。

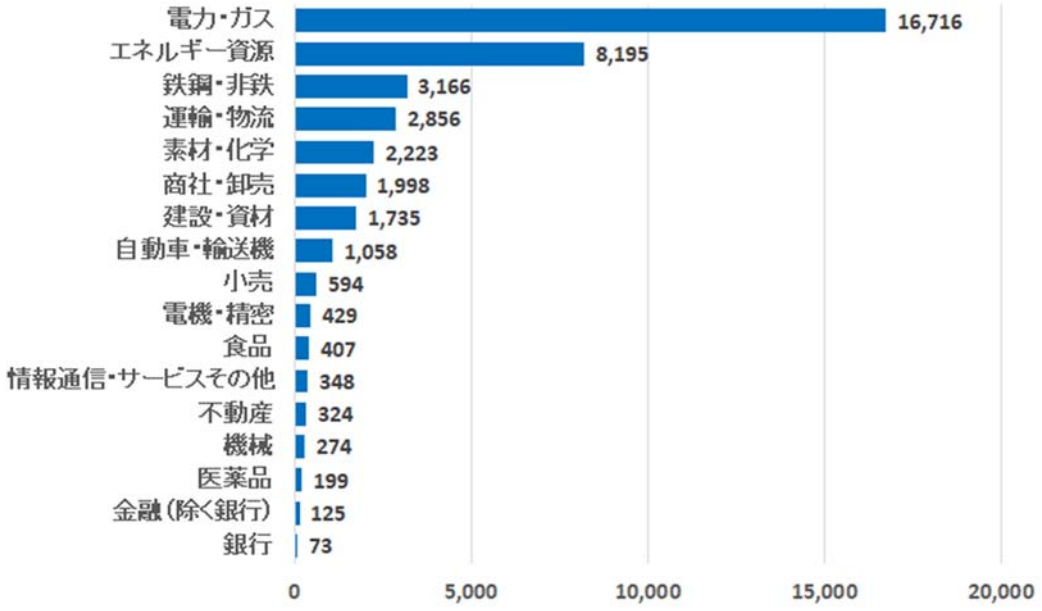
CO_2 排出量は、2021 年の CDP のデータを用いる[1]。前述の TCFD 提言等による情報開示が求められる「プライム市場」に上場している企業のうち、2021 年の CDP の質問に対して SCOPE1 と SCOPE2

[1] CDP は、企業や自治体などに対して気候変動をはじめとする環境課題に関する開示を求める英国の非政府組織（NGO）である。本稿では CDP がグローバルな企業に求める質問書への回答のうち、日本企業のデータを用いる。質問に回答する日本企業は年々増加しており、2021 年時点では 536 社が回答している。
CDP の質問に回答する企業は、環境対策などに積極的な日本を代表する企業が多く、サンプルとしてはバイアスがあることに留意されたい。

の CO_2 排出量を報告している企業は 366 社であり、これらの企業を集計の対象とする[2,3]。企業の CO_2 排出量は、SCOPE1 と SCOPE2 の合計値を用いる[4]。

東証 17 業種別の CO_2 排出量の平均値を図表 1 に示す[5]。「電力・ガス」の排出が他の業種と比較して特に多い。

図表 1　業種別 CO_2 排出量の平均値（1 社当たり）（SCOPE1＋2、千 tCO_2）



（出所）CDP より日興リサーチセンター作成

同じ業態であれば企業の規模が大きいほど CO_2 排出量が多い傾向があるため、CO_2 排出量（tCO_2）を売上高（百万円）で割った「炭素強度」を確認する（図表 2）。炭素強度は売上高 100 万円に対してどれだけ CO_2 を排出しているかを示す。各企業の CO_2 排出量の計測期間に合わせた決算期の売上高を用いて、「業種ごとの CO_2 排出量の合計値」÷「業種ごとの売上高の合計値」によって業種別の炭素強度を計算した。

図表 1 の CO_2 排出量と同様に「電力・ガス」が特に多く、次に「鉄鋼・非鉄」、「素材・化学」、「運輸・物流」、「エネルギー資源」、「建設・資材」の順に多い。

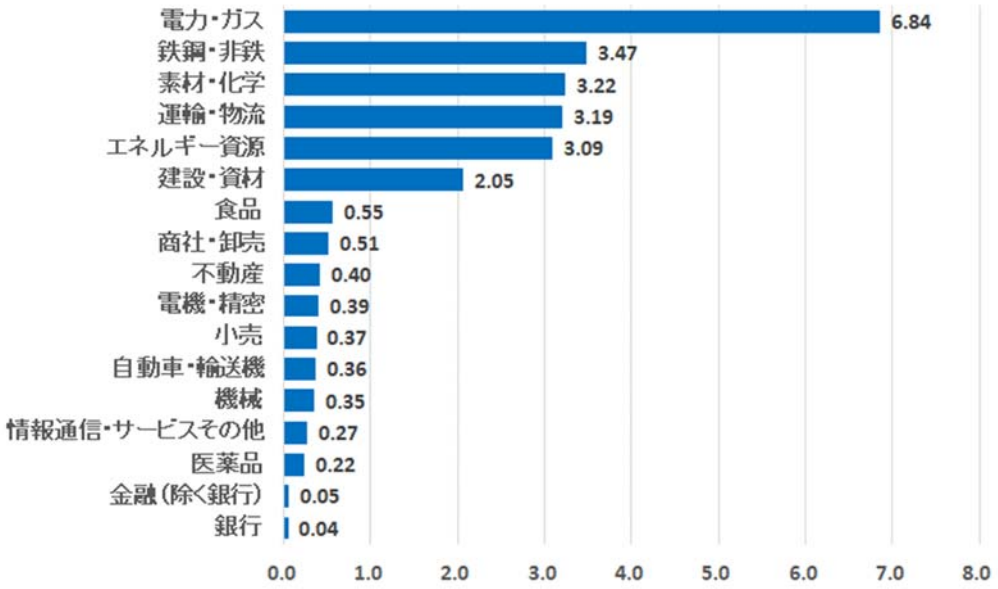
[2] 東京証券取引所が新しい市場区分に再編した 2022 年 4 月 4 日時点で「プライム市場」に上場している企業が対象である。

[3] CO_2 排出量のうち、SCOPE 1 は事業者自らの直接排出（燃料の燃焼など）であり、SCOPE 2 は他社から供給された電気・熱・蒸気の使用に伴う排出である。CO_2 排出量は 1 年間の排出量である。

[4] 原材料の供給業者や製品の使用者などのサプライチェーンによる排出である SCOPE3 は、報告企業による集計方法の差異がある。本稿では企業間の比較が必要であるため、SCOPE3 は用いない。

[5] 東証 17 業種分類は、証券コード協議会が定める企業の業種分類の 1 つであり、国内株式の業種分類として広く用いられている。本稿ではすべてこの業種分類を用いる。

図表 2　業種別炭素強度（SCOPE1＋2、tCO_2 / 売上高(百万円)）

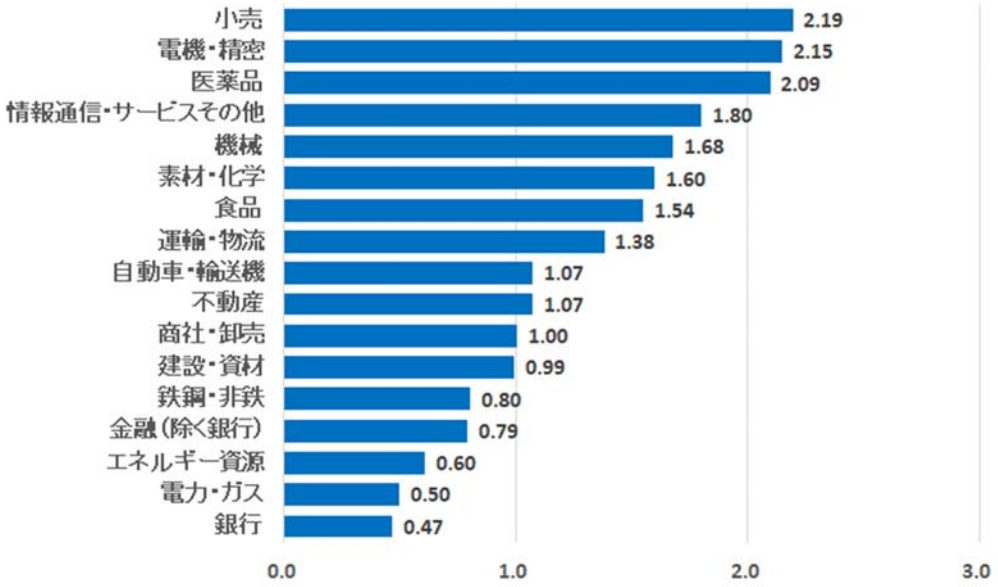


（出所）CDP、東洋経済新報社より日興リサーチセンター作成

株式バリュエーション指標の PBR を図表 3 に示す。東京証券取引所が新しい市場区分に再編した 2022 年 4 月 4 日における対象企業の時価総額とその時点で公表されている各企業の直近の決算期の純資産をそれぞれ業種別に合計し、「業種ごとの時価総額の合計値」÷「業種ごとの純資産の合計値」によって業種別の PBR を計算した。

業種別 PBR は、「小売」、「電機・精密」、「医薬品」が高く、「銀行」に続いて「電力・ガス」、「エネルギー資源」といった CO_2 排出量や炭素強度が多い業種の PBR が低い。

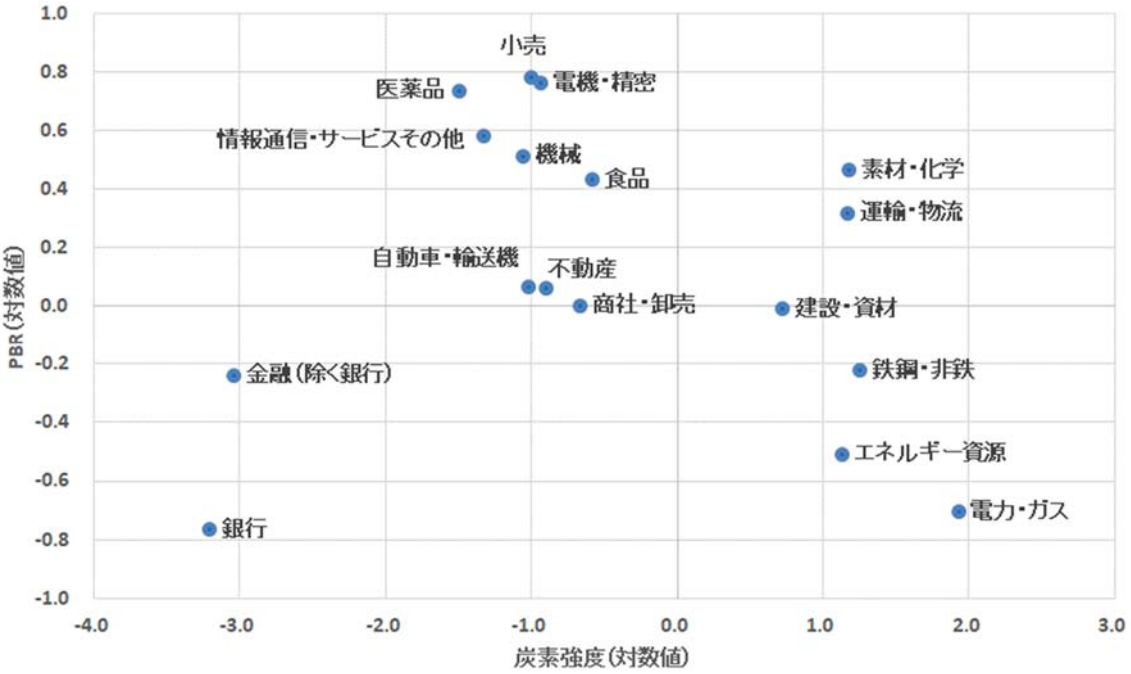
図表 3　業種別 PBR



（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

最後に業種別の PBR と炭素強度の関係を図表 4 に示す。図表 4 の横軸は図表 2 の業種別炭素強度の対数値、縦軸は図表 3 の業種別 PBR の対数値である[6]。炭素強度が少なく、PBR は低い「銀行」、「金融(除く銀行)」を除くと、炭素強度と PBR は右肩下がりの傾向にあり、業種別では炭素強度が多いほど PBR が低いことが見て取れる。

図表 4　業種別 PBR と炭素強度



（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

3.　個別企業の PBR と CO_2 排出量の分析

3.1.　分析に用いたデータと分析方法

PBR と CO_2 排出量の関係について、個別企業でも炭素強度が多いほど PBR が低い傾向があるかを確認する。図表 4 で他の業種と傾向が異なる「銀行」、「金融(除く銀行)」以外の企業（341 社）を対象にして、各企業の PBR の対数値を目的変数、炭素強度の対数値を説明変数とした単回帰分析を行う。

図表 5 は分析に用いた PBR と炭素強度の平均値、標準偏差、最小値、最大値である[7]。

[6] 対数は自然対数である。

[7] PBR と炭素強度は自然対数をとる前の値である。平均値は個別企業ごとに計算した PBR と炭素強度の単純平均であり、前章の業種別の値とは異なり、順位も同じではない。

図表 5　PBR と炭素強度の記述統計

業種名	企業数	PBR				炭素強度			
		平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値
食品	24	1.68	0.98	0.61	4.69	0.55	0.36	0.07	1.79
エネルギー資源	5	0.59	0.06	0.50	0.65	3.94	3.50	0.83	9.95
建設・資材	32	0.96	0.49	0.25	2.55	2.89	8.17	0.01	37.17
素材・化学	50	1.57	1.28	0.22	5.18	2.88	4.32	0.03	21.81
医薬品	11	2.32	1.50	0.85	5.81	0.24	0.21	0.08	0.73
自動車・輸送機	29	0.78	0.31	0.31	1.49	0.59	0.46	0.12	1.73
鉄鋼・非鉄	11	0.73	0.38	0.19	1.44	3.15	3.09	0.20	8.97
機械	24	1.42	1.12	0.33	4.43	0.42	0.32	0.08	1.10
電機・精密	64	2.13	1.69	0.28	7.83	0.50	0.50	0.01	2.51
情報通信・サービスその他	35	2.35	2.31	0.38	11.45	0.29	0.29	0.01	1.05
電力・ガス	8	0.56	0.21	0.20	0.85	11.99	18.59	0.10	56.40
運輸・物流	20	1.51	0.68	0.98	3.41	3.44	4.46	0.02	14.75
商社・卸売	7	0.85	0.19	0.63	1.09	0.46	0.41	0.07	1.18
小売	15	1.75	1.41	0.21	5.34	0.34	0.34	0.06	1.48
銀行	10	0.46	0.11	0.23	0.58	0.06	0.03	0.02	0.10
金融（除く銀行）	15	0.96	0.88	0.33	4.02	0.06	0.14	0.00	0.55
不動産	6	1.10	0.33	0.78	1.66	0.64	0.47	0.24	1.41
全体	366	1.51	1.38	0.19	11.45	1.52	4.51	0.00	56.40

（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

3.2. 分析結果

各企業の PBR の対数値を目的変数、炭素強度の対数値を説明変数とした単回帰分析の結果を図表 6 に示す。炭素強度の係数はマイナスであり、t 値の絶対値も大きく、個別企業においても炭素強度が多いほど、PBR が低い傾向（負の相関関係）があると言える。

図表 5 からわかるように炭素強度の平均値は業種によって差異が大きい。そこで、業種による影響を考慮するために説明変数を中心化（各企業の値からその企業が属する業種の平均値を引く）した単回帰分析の結果が図表 7 である[8]。

さらに、炭素強度のばらつき（標準偏差）も業種によって差異が大きいことも考慮して説明変数を標準化（各企業の値からその企業が属する業種の平均値を引き、その企業が属する業種の標準偏差で割る）

[8] 業種ごとの企業数が少ない業種が多いため、同じ業種内での炭素強度と PBR の関係を調べるための工夫として、本稿では説明変数である炭素強度の対数値について中心化と標準化をして業種ごとの分布を考慮した上で単回帰分析を行い、係数の符号と t 値の絶対値を確認した。

した単回帰分析の結果が図表 8 である。

図表 7、8 ともに炭素強度の係数はマイナスであり、t 値の絶対値も大きく、業種による炭素強度の分布の差異を考慮しても炭素強度が多いほど、PBR が低い傾向が確認できる。

図表 6 単回帰分析の結果（決定係数：0.13）

	係数	標準誤差	t 値	P 値
切片	**0.04**	**0.04**	**1.08**	**0.28**
炭素強度（対数値）	**-0.18**	**0.02**	**-7.09**	**0.01 未満**

（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

図表 7 説明変数を中心化した単回帰分析の結果（決定係数：0.07）

	係数	標準誤差	t 値	P 値
切片	**0.18**	**0.04**	**4.79**	**0.01 未満**
炭素強度（対数値）	**-0.15**	**0.03**	**-4.94**	**0.01 未満**

（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

図表 8　説明変数を標準化した単回帰分析の結果（決定係数：0.07）

	係数	標準誤差	t 値	P 値
切片	**0.18**	**0.04**	**4.79**	**0.01 未満**
炭素強度（対数値）	**-0.19**	**0.04**	**-4.88**	**0.01 未満**

（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

4. 考察

本稿で分析の対象としたデータでは、「銀行」、「金融(除く銀行)」を除くと、2 章の業種別に集計した結果と 3 章の単回帰分析の結果の両方で炭素強度と PBR の間には負の相関関係があることを確認した。そして、業種ごとの炭素強度の分布の違いを考慮して説明変数について中心化や標準化をした単回帰分析でも係数がマイナスであり、t 値の絶対値が大きいことから業種内でも炭素強度と PBR の間には負の相関関係があることが窺える。ただし、現時点では決定係数は 0.07 と高くない。今後、企業・投資家のカーボンニュートラルに向けた取り組みがますます進むなかで相関関係が高まっていくのかどうか注視したい。

本稿で得られた結果は直近のデータを用いた結果であるが、炭素強度や PBR は通常、短期的な変化は小さい。例えば、過去 10 年（2012 年 3 月末、2017 年 3 月末、2022 年 4 月 4 日）で PBR の順位が大きく変化した業種は少ない（図表 9）[9]。直近で炭素強度が多い企業は資本集約型産業であり、以前か

[9] 2022 年 4 月 4 日の企業を基準にしているため、2012 年 3 月末、2017 年 3 月末には集計の対象外になる企業がある。

ら PBR が低い傾向にある。また、直近で PBR が高い企業は知識集約型産業であり、以前から PBR が高い傾向が見られる。PBR は企業の長期的な利益や成長性、事業の継続性を反映して決まることを考えると本稿で得られた結果は気候変動への対応だけでなく、長期的な産業構造や業態の変化の不確実性の一部を CO_2 排出量が表していると解釈する方が妥当かもしれない。

図表 9　業種別 PBR と順位

業種名	2012 年 3 月末		2017 年 3 月末		2022 年 4 月 4 日	
	値	順位	値	順位	値	順位
小売	**1.42**	**5**	**1.86**	**4**	**2.19**	**1**
電機・精密	**1.44**	**3**	**1.96**	**3**	**2.15**	**2**
医薬品	**1.49**	**1**	**2.20**	**1**	**2.09**	**3**
情報通信・サービスその他	**1.03**	**11**	**1.68**	**7**	**1.80**	**4**
機械	**1.44**	**4**	**1.69**	**6**	**1.68**	**5**
素材・化学	**1.19**	**8**	**1.73**	**5**	**1.60**	**6**
食品	**1.28**	**7**	**2.19**	**2**	**1.54**	**7**
運輸・物流	**1.16**	**9**	**1.46**	**8**	**1.38**	**8**
自動車・輸送機	**1.29**	**6**	**1.16**	**11**	**1.07**	**9**
不動産	**1.47**	**2**	**1.39**	**10**	**1.07**	**10**
商社・卸売	**0.95**	**12**	**0.86**	**14**	**1.00**	**11**
建設・資材	**1.09**	**10**	**1.45**	**9**	**0.99**	**12**
鉄鋼・非鉄	**0.91**	**13**	**0.99**	**12**	**0.80**	**13**
金融（除く銀行）	**0.90**	**14**	**0.94**	**13**	**0.79**	**14**
エネルギー資源	**0.86**	**15**	**0.66**	**16**	**0.60**	**15**
電力・ガス	**0.78**	**16**	**0.72**	**15**	**0.50**	**16**
銀行	**0.67**	**17**	**0.62**	**17**	**0.47**	**17**

（注）2022 年 4 月 4 日時点の業種別 PBR で降順
（出所）CDP、東洋経済新報社、東京証券取引所より日興リサーチセンター作成

5. おわりに

本稿では株式のバリュエーション指標の一つである PBR と CO_2 排出量の関係について確認した。その結果、業種別では「銀行」、「金融(除く銀行)」を除いて、炭素強度が多いほど PBR が低い傾向があり、個別企業においても炭素強度が多いほど PBR が低い傾向があることを確認した。

CO_2 排出量が多い企業は、資本集約型産業であり、長期的な産業構造や業態の変化の不確実性が大きい。CO_2 排出量はそのようなリスクの一面を表しているのかもしれない。カーボンニュートラル社会への移行における株式市場の機能として、投資家の投資判断に気候変動に関するリスクと機会が考慮され、企業の評価に反映し、資本配分等の金融面から寄与することが期待される。気候変動関連の情報を開示

する企業が増え、「インターナルカーボンプライシング」や「気候変動に関するリスクと機会」など開示内容の拡充が進むが、CO_2排出量以外を用いた分析は今後の課題としたい。

参考文献

杉浦康之(2022),「日本企業のインターナルカーボンプライシングの動向について」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/11227/

川﨑正勝・後藤誠也(2022),「気候変動関連リスクと機会に関する一考察 ～業種による傾向分析～」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/11290/

（END）

脱炭素社会における企業の存続確率モデル

2021 年 12 月
投資工学研究所 主任研究員　　本山　真

1．はじめに

地球温暖化の進行に対する危機感が高まる中、企業は温室効果ガスの削減に向けた取り組みを進めている。気候変動に関する企業の開示も広がっており、2022 年 4 月の東京証券取引所における市場構造の見直し後の市場区分が「プライム市場」の上場企業は、TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）またはそれと同等の国際的枠組みに基づく気候変動関連の情報開示が求められることになった（日本取引所グループ（2021））。

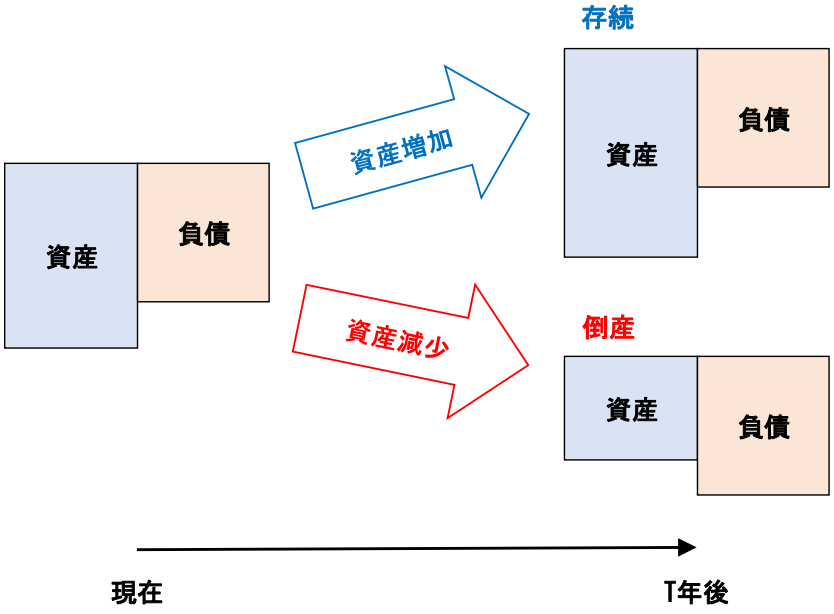
金融機関や機関投資家等の市場参加者が、開示された情報によって企業の温室効果ガスの排出量や気候変動への取り組みを把握し、脱炭素社会に資する企業評価を行い、資本市場における資本配分等の金融面から地球温暖化対策に寄与することが期待される。しかし、温室効果ガスの排出量等の気候変動関連の情報を証券分析や企業評価に反映する方法を確立することはこれからの課題である。

本稿では、脱炭素社会における企業の計量的な分析方法の一つの試案として、オプション理論を応用した企業の存続確率モデルを提示する。2 章でリスクフリーレートを用いたモデル、3 章で期待リターンを用いたモデルを定式化した後、4 章で計算例を示し、具体的な利用方法を検討する。

2．リスクフリーレートを用いた企業の存続確率モデル

オプション理論を応用して企業の倒産確率を導出するモデルは、1990 年代後半から現在に至るまで金融機関のリスク管理等の実務で広く用いられている。バランスシートをもとに、資産を原資産、負債を権利行使価格、純資産をコールオプションとみなし、T年後に資産が負債を上回れば企業が存続し、資産が負債を下回ったら倒産と考える（図表 1）。T年後の資産の分布により負債を下回る確率として倒産確率が計算される。

図表１　T年後の企業の存続と倒産のイメージ



（出所）日興リサーチセンター作成

リスクフリーレートを用いた企業の倒産確率モデルは以下のように定式化される（森平（2009）、Bouchet and Le Guenedal（2020））。

$$E = AN(d_1) - De^{-rT}N(d_2) \tag{1}$$

$$\sigma_E = \frac{AN(d_1)}{E}\sigma_A \tag{2}$$

ここで、

$$d_1 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + (r + \frac{{\sigma_A}^2}{2})T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$d_2 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + (r - \frac{{\sigma_A}^2}{2})T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_D = 1 - N(d_2)$$

満期までの期間をTとし、Eは現時点の株式の時価総額、負債Dは現時点で確定しているバランスシート上の負債であり、σ_Eは株式のボラティリティ、rはリスクフリーレートである[1]。資産A、資産のボラテ

[1] 株式の時価総額やボラティリティを利用するため、上場企業が計算対象になる。

ィリティσ_Aが未知数であり、(1)式と(2)式の非線形連立方程式の解を用いて、倒産確率P_Dを計算する。ここで、$N(\cdot)$は標準正規分布の確率分布関数である。

本稿では、脱炭素社会における企業活動の継続性に主眼を置き、倒産確率ではなく、企業の存続確率P_Sとして次式で計算する。

$$P_S = 1 - P_D = N(d_2)$$

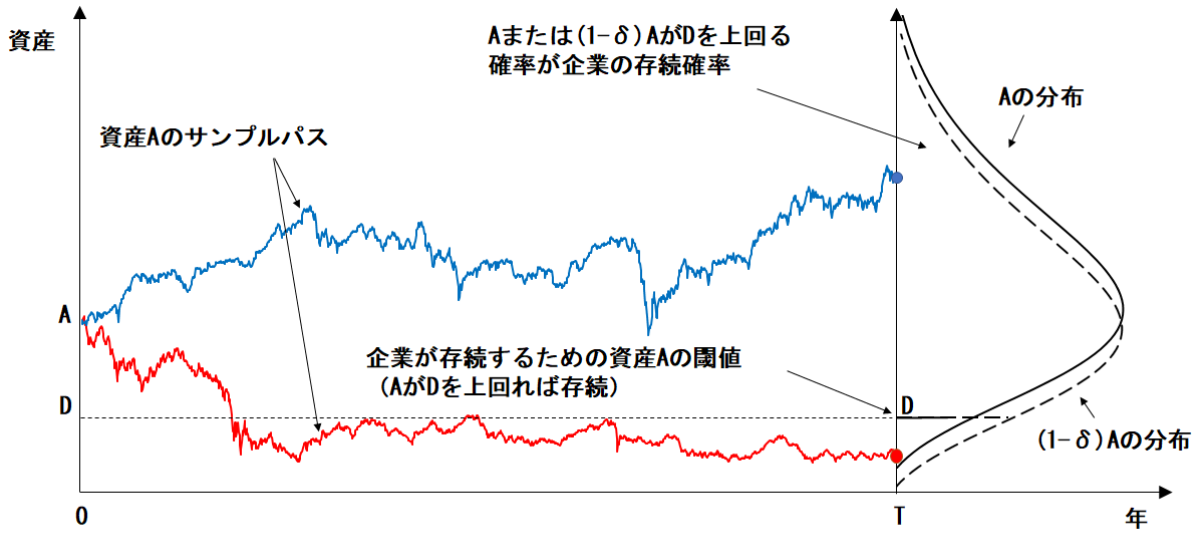
そして、気候変動リスクを考慮するために温室効果ガスを排出する企業は、資産Aが資産$(1-\delta)A$に減少するとみなして、企業の存続距離$d_2{}'$と存続確率$P_S{}'$を次式で計算する[2]。

$$d_2{}' = \frac{\log\left(\frac{(1-\delta)A}{D}\right) + (r - \frac{\sigma_A{}^2}{2})T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_S{}' = N(d_2{}')$$

資産価額の推移による気候変動を考慮した企業の存続確率のイメージ図が図表 2 である[3]。時点Tで資産価額が負債Dを上回れば企業は存続すると考える。δが大きいほど、$(1-\delta)A$は小さくなり（図表 2 の点線のように下方にシフトし）、企業の存続確率は小さくなる。

図表 2　気候変動リスクを考慮した企業の存続確率



（出所）日興リサーチセンター作成

[2] 本稿では、d_2、$d_2{}'$を企業の存続距離と呼ぶ。存続距離が長い（大きい）ほど、存続確率は高くなる。

[3] 満期までの期間中に資産価額が閾値（負債）を下回ることがあるが、本稿のモデルは時点Tに閾値を上回るかどうかだけで企業の存続を判断するモデルである。

ここで、δは気候変動リスクのシナリオとして炭素価格とは関係のない先験的な値とすることも考えられるが、Bouchet and Le Guenedal（2020）では、炭素価格C、二酸化炭素排出量M、EBITDA（Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization） $EBITDA$を用いて以下としている[4]。

$$\delta = \frac{C \cdot M}{EBITDA}$$

これを以下のように書き直すと、二酸化炭素を排出する費用を考慮する前の EBITDA と考慮した後の EBITDA の比率で資産Aを調整させていると解釈できる。

$$1 - \delta = \frac{EBITDA - C \cdot M}{EBITDA}$$

本稿ではδについて、Bouchet and Le Guenedal（2020）と異なる考え方で、カーボンプライシングを導入する。具体的には、現時点で二酸化炭素を排出する権利を金額$\delta \cdot A$で購入し、満期までの期間で二酸化炭素を排出して権利を使い切るとみなして、δを次式として気候変動リスクを考慮した企業の存続確率を計算する[5]。

$$\delta = \frac{C \cdot M \cdot T}{A} \tag{3}$$

3. 期待リターンを用いた企業の存続確率モデル

さらに、本章ではリスクフリーレートの代わりに資産の期待リターンμ_Aを用いるモデルを考える。森平（2009）では、株式の期待リターンμ_Eを既知とし、資産A、資産のボラティリティσ_A、資産の期待リターンμ_Aの 3 変数を未知数として、以下の(4)式から（6）式の 3 つの非線形連立方程式を解くモデルが示されている。本稿では同様の定式化で企業の存続確率P_Sを計算する。

$$E = AN(d_1) - De^{-\mu_A T}N(d_2) \tag{4}$$

$$\sigma_E = \frac{AN(d_1)}{E}\sigma_A \tag{5}$$

[4] 炭素価格は、1 トンの二酸化炭素の排出に対する価格。二酸化炭素排出量は、1 年当たりの排出量であり、メタン等の二酸化炭素以外の温暖化効果ガスを二酸化炭素換算した値を含むものとする。

[5] ここでは、企業の二酸化炭素排出量に上限（キャップ）を設定するのではなく、二酸化炭素の全排出量に経済的な負担が必要になると考えている。
本稿では、炭素価格や 1 年当たりの二酸化炭素排出量を一定として計算する。(3)式を変形した$\delta \cdot A = C \cdot M \cdot T$が定数であるため、時点$T$における気候変動リスクを考慮した企業の資産の分布は、資産Aの分布から$C \cdot M \cdot T$を減じたものになるが、この分布も近似的に対数正規分布に従うとみなして、企業の存続確率を計算する。

$$\log(\mu_E) = \log(r) + \frac{AN(d_1)}{E}[\log(\mu_A) - \log(r)] \tag{6}$$

ここで、

$$d_1 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + (\mu_A + \frac{{\sigma_A}^2}{2})T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$d_2 = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + (\mu_A - \frac{{\sigma_A}^2}{2})T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_S = N(d_2)$$

本稿の計算では、株式の期待リターンμ_Eは PER の逆数（益回り）とし、当期利益NIにより、

$$\mu_E = \frac{NI}{E}$$

とする。そして、気候変動リスクを考慮した株式の期待リターン$\mu_E{}'$は、

$$\mu_E{}' = \frac{NI - C \cdot M}{E}$$

とし、資産A、資産のボラティリティσ_A、資産の期待リターン$\mu_A{}'$の 3 変数を推計し、気候変動リスクを考慮した企業の存続距離$d_2{}'$と存続確率$P_S{}'$は次式で計算する[6]。

$$d_2{}' = \frac{\log\left(\frac{A}{D}\right) + (\mu_A{}' - \frac{{\sigma_A}^2}{2})T}{\sigma_A\sqrt{T}}$$

$$P_S{}' = N(d_2{}')$$

[6] $\mu_E{}'$は気候変動リスクを考慮した株式の益回りであり、逆数は気候変動リスクを考慮した PER になる。株主から見た企業の収益性の指標として広く用いられている ROE についても同様の計算ができる。PER や ROE は企業の存続確率と比較して単純な指標ではあるが、これらの計算にもカーボンプライシングを導入することによって、気候変動リスクを考慮した値を計算することができる。

4. 計算例と考察

本章では、2 章と 3 章で定式化した企業の存続確率モデルの計算例を示し、具体的な利用方法を検討する。まずは、2 章のリスクフリーレートを用いた企業の存続確率モデルについて、図表 3 の値を用いて計算する[7]。

図表 3　企業の存続確率モデルに代入する値

変数名	値
株式時価総額（億円）	10,000
負債価値（億円）	15,000
株式のボラティリティ(%)	30
年限（年）	5
リスクフリーレート（%）	0.01
二酸化炭素排出量（万トン/年）	200

（出所）日興リサーチセンター作成

気候変動リスクを考慮しなかったときの 5 年後の企業の存続確率は、図表 4 の 95.60%となる。2 章の方法で気候変動リスクを考慮するため、炭素価格を 3,000 円、10,000 円、20,000 円の 3 通りを仮定すると、5 年後の企業の存続確率として、図表 5 の 95.17%（炭素価格を 3,000 円とした場合）、94.03%（炭素価格を 10,000 円とした場合）、91.96%（炭素価格を 20,000 円とした場合）が得られる。

図表 4　気候変動リスクを考慮しなかったときの存続距離と存続確率

炭素価格（円）	存続距離d_2	存続確率P_S（%）
-	1.71	95.60

（出所）日興リサーチセンター作成

図表 5　気候変動リスクを考慮したときの存続距離と存続確率

炭素価格（円）	存続距離$d_2{}'$	存続確率$P_S{}'$（%）
3,000	1.66	95.17
10,000	1.56	94.03
20,000	1.40	91.96

（出所）日興リサーチセンター作成

[7] 負債価値としてバランスシート上のどの値を用いるか、株式のボラティリティをどのように推計するか等が問題となるが、本稿では議論しない。二酸化炭素排出量は、分析の目的や開示の状況によって Scope1（直接排出量）、Scope2（エネルギー起源間接排出量）、Scope3（その他間接排出量）の値を利用することを想定している。

カーボンプライシングを導入すると二酸化炭素を排出する企業は、存続確率が低下する。そして、炭素価格が高いほど、存続確率は低くなる。本格的な炭素税や排出量取引が導入される前でも、金融機関や機関投資家等は独自のカーボンプライシングを導入すれば、炭素価格に応じた投融資先の信用リスクの評価等が可能になる[8]。また、炭素価格には国内外の排出量取引の価格（後藤・川﨑（2021））や炭素税を用いることもでき、DICE モデル（Nordhaus and Sztorc (2013)、伊藤（2021））やマクロ経済成長モデル（本山（2021））等による炭素価格を用いることも考えられる[9]。

また、存続確率を額面 100 円の割引債の現在価値とみなし、年限に応じたリスクフリーレートで割り引けば、資金調達コストを表す指標として金融機関と企業（発行体、融資先）の双方が利用できるだろう。

さらに、排出削減のシミュレーションに用いることもできる。炭素価格を 10,000 円として、図表 3 の値を用いて、二酸化炭素排出量は 50 万トン/年（150 万トン/年の削減）、100 万トン/年（100 万トン/年の削減）、200 万トン/年（削減なし）の 3 通りを仮定すると、5 年後の企業の存続確率は、図表 6 の 95.25%（二酸化炭素排出量を 50 万トン/年とした場合）、94.87%（二酸化炭素排出量を 100 万トン/年とした場合）、94.03%（二酸化炭素排出量を 200 万トン/年とした場合）になる。カーボンプライシングの導入を前提にすると、排出削減によって存続確率が高まる。二酸化炭素の排出削減にはコストがかかるが、企業評価の向上、信用リスクの低減、資金調達コストの低下等とのトレードオフを定量化することができる[10]。

図表 6　二酸化炭素の排出を削減したときの存続距離と存続確率（炭素価格が 10,000 円の場合）

二酸化炭素排出量（万トン/年）	存続距離$d_2{}'$	存続確率$P_S{}'$（%）
50	1.67	95.25
100	1.63	94.87
200	1.56	94.03

（出所）日興リサーチセンター作成

ここまでは、二酸化炭素の排出量はプラスの値であることを前提としたが、マイナスの値でも計算できる[11]。二酸化炭素を回収・貯留等を行う企業の評価で活用されれば、カーボンニュートラル、そして

[8] 金融機関の本源的なリスクである信用リスクを発生させる要因（リスクドライバー）として、気候変動リスクを組み込むことができる。企業内で独自に炭素価格を導入し、部門間の取引や投資判断等に用いて低炭素投資・対策を推進する仕組みをインターナル・カーボンプライシングと呼ぶが、ここでは金融機関や機関投資家等が投融資先の評価に用いるインターナル・カーボンプライシングと言えよう。炭素価格が高いほど、投融資先の評価が厳しくなる。

[9] 気候モデルと経済モデルを組み合わせた統合評価モデルによって得られる炭素価格を用いれば、世界的な気温上昇の上限の目標（例えば、1.5 度以下等）や二酸化炭素の排出削減目標（例えば、2050 年カーボンニュートラル等）と整合的な炭素価格を前提とすることもできるだろう。

[10] ここでは、二酸化炭素の削減コストによる資産への影響は無視している。削減コストが計算できれば、(3)式で考慮することが可能である。

[11] 二酸化炭素の排出量がマイナスとは、二酸化炭素の回収・貯留等を行い、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を減少させることを意味する。

カーボンネガティブへの道も開かれる。2 章の定式化において、現時点で二酸化炭素を排出する権利を金額$\delta \cdot A$で購入することを考えたが、ここでは$\delta \cdot A$で売却できる企業を考える。炭素価格を 10,000 円として、図表 3 の値を用いて、企業全体の活動によるネットの二酸化炭素回収量を 50 万トン/年、100 万トン/年、200 万トン/年の 3 通りを仮定すると、5 年後の企業の存続確率として、図表 7 の 95.93%（二酸化炭素回収量を 50 万トン/年とした場合）、96.23%（二酸化炭素回収量を 100 万トン/年とした場合）、96.77%（二酸化炭素回収量を 200 万トン/年とした場合）が得られる。図表 4 の気候変動リスクを考慮しなかったときの存続確率である 95.60%より大きくなり、二酸化炭素を回収・貯留等を行う企業の評価が高まる。さらにこのような分析を行うことによって、二酸化炭素排出企業と回収・貯留等を行う企業をマッチングし、二酸化炭素を排出する権利の価格等の条件の交渉材料にすることができるだろう。

図表 7　二酸化炭素の回収・貯留等を行う企業の存続距離と存続確率
（炭素価格が 10,000 円の場合）

二酸化炭素回収量（万トン/年）	存続距離$d_2{}'$	存続確率$P_S{}'$（%）
50	1.74	95.93
100	1.78	96.23
200	1.85	96.77

（出所）日興リサーチセンター作成

最後に、3 章の期待リターンを用いた企業の存続確率モデルについて、図表 3 のリスクフリーレートを図表 8 の値に変更し、当期利益を用いて計算した結果が図表 9、10 である[12]。リスクフリーレートを用いた企業の存続確率モデルよりカーボンプライシングの導入の影響は小さいが、炭素価格が高いほど、存続確率は低くなることが確認できる。

図表 8　期待リターンを用いた企業の存続確率モデルに代入する値

変数名	値
リスクフリーレート（%）	1.0
当期利益（億円）	1,000

（出所）日興リサーチセンター作成

[12] リスクフリーレートの自然対数を使うため、マイナス金利を含めてリスクフリーレートが小さい場合、このモデルでは計算することができない。ここでは計算が可能な 1.0%とした。

図表 9　気候変動リスクを考慮しなかったときの存続距離と存続確率
（期待リターンを用いた企業の存続確率モデル）

炭素価格（円）	存続距離d_2	存続確率P_S（%）
-	1.75	96.02

（出所）当社作成

図表 10　気候変動リスクを考慮したときの存続距離と存続確率
（期待リターンを用いた企業の存続確率モデル）

炭素価格（円）	存続距離$d_2{}'$	存続確率$P_S{}'$（%）
3,000	1.75	96.01
10,000	1.75	95.98
20,000	1.74	95.93

（出所）日興リサーチセンター作成

5. おわりに

脱炭素社会における企業の分析方法としてオプション理論を応用した企業の存続確率モデルを定式化し、計算結果を示しながら、利用方法を検討した。具体的な利用方法としては、①金融機関や機関投資家等の投融資先の評価、②資金調達コストの分析、③二酸化炭素の排出削減に関するシミュレーション、④二酸化炭素排出企業と回収・貯留等を行う企業のマッチングに言及した。

脱炭素社会においてカーボンニュートラル、そしてカーボンネガティブを達成するためには、資本市場において資本配分の基礎となる企業評価の転換が大きな役割を果たすと考える。企業の排出削減努力を評価し、二酸化炭素の回収・貯留等を行う企業を育成し、資金調達がしやすくなる仕組みに寄与するために企業評価の方法をさらに議論していく必要があるだろう。

参考文献

Bouchet, Vincent and Le Guenedal, Théo (2020), “Credit Risk Sensitivity to Carbon Price”, https://ssrn.com/abstract=3574486

Merton, Robert C. (1974), “On the Pricing of Corporate Debt: The Risk Structure of Interest Rates.”, Journal of Finance

Nordhaus, W.D., and Sztorc, P. (2013), “DICE 2013R: Introduction and User’s Manual”, http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf

阿竹敬之(1998),「オプション・プライシング・アプローチとニューロ・ファジー・モデルでの倒産予測

可能性の実証研究」,『JAFEE1998 夏季大会予稿集』,日本金融・証券計量・工学会
伊藤央峻(2021),「DICE モデルによるカーボンプライシング」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/10425/
ウィリアム・ノードハウス（2015）,「気候カジノ」,日経 BP
大嶋秀雄(2021a),『ＮＧＦＳの気候シナリオが示す「2050 年脱炭素」の世界～民間企業で行うリスク分析に向けて求められること～』, 日本総研 Research Focus
https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39241
大嶋秀雄(2021b),「秩序ある 2050 年カーボンニュートラルに不可欠な経済影響の把握― 金融・企業連携によるシナリオ分析が急務―」, 日本総研 Research Focus
https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39426
大嶋秀雄(2021c),「中小企業の脱炭素のカギを握る銀行セクター ～多面的支援を行う仕組みづくりが急務～」, 日本総研 Research Focus
https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=101813
後藤誠也・川﨑正勝(2021),「EU ETS を参考にした排出量取引市場の多期間分析」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/10487/
鈴木茂央(1996),「信用リスクと社債評価－デフォルト率・回収率を考慮した社債評価と日本市場の実証分析」,『証券アナリスト・ジャーナル』
常泉和也(2021),「金融機関の気候変動に関する開示状況調査」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/10728/
日本取引所グループ(2021),「TCFD 提言に沿った情報開示の実態調査」
https://www.jpx.co.jp/corporate/news/news-releases/0090/nlsgeu00000610sr-att/TCFDsurveyJP.pdf
前田章(2009),「排出権制度の経済理論」,岩波書店
本山真(2021),「気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル」,日興リサーチレビュー
https://www.nikko-research.co.jp/library/10496/
森平爽一郎(2009),「信用リスクモデリング-測定と管理-」,朝倉書店

（END）

金融機関の気候変動に関する開示状況調査

2021 年 12 月

資産運用研究所　　常泉 和也

1. はじめに

地球温暖化による気候変動が財務へ与える影響を把握する手段の一つとしてシナリオ分析の取り組みが始められている。シナリオ分析に適用可能な気候変動シナリオについては、様々な国際機関が複数のシナリオを公表している。直近では 2021 年 6 月に「気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク」（Network for Greening the Financial System：以下、NGFS）が 2 回目の「中央銀行および監督当局向け NGFS 気候シナリオ」を公表した。これは、気候変動が各国・地域の経済と金融システムに与える影響を複数のシナリオとして示したものである。その後、8 月には「気候変動に関する政府間パネル」（Intergovernmental Panel on Climate Change：以下、IPCC）が第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書を公表した。これは、気候システムおよび気候変動の自然科学的根拠についての評価を、「代表的濃度経路」（Representative Concentration Pathway：以下、RCP）に基づくシナリオで示したものである。さらに、10 月には「国際エネルギー機関」（International Energy Agency：以下、IEA）が毎年公表している「世界エネルギー展望」（World Energy Outlook）の 2021 年度版を公表した。これは、世界のエネルギー動向とその需給、気候変動・環境、エネルギーアクセス等への影響を詳細に検討し、シナリオベースの分析による将来のエネルギー像を示すものである。

一方、わが国における最近の金融機関向け気候変動政策においては、日本銀行が 2021 年 9 月に気候変動対応を支援するための資金供給オペレーションの実施を発表し、民間における気候変動対応を支援することになった。これは、TCFD の提言する 4 項目（ガバナンス、戦略、リスク管理、指標と目標）および投融資の目標・実績を開示している金融機関を対象として、貸付利率 0%、貸出促進付利制度上のカテゴリーⅢ（0%付利）適用、補完当座預金制度上の「マクロ加算 2 倍措置」を適用した貸付を行うものである。

そこで本稿では、投資家向けの気候変動情報の開示方法を示した TCFD 提言を踏まえ、銀行[1]が気候変動への対策について現状どのような開示をしているか、さらにシナリオ分析にどのように取り組んでいるかについて調査した。

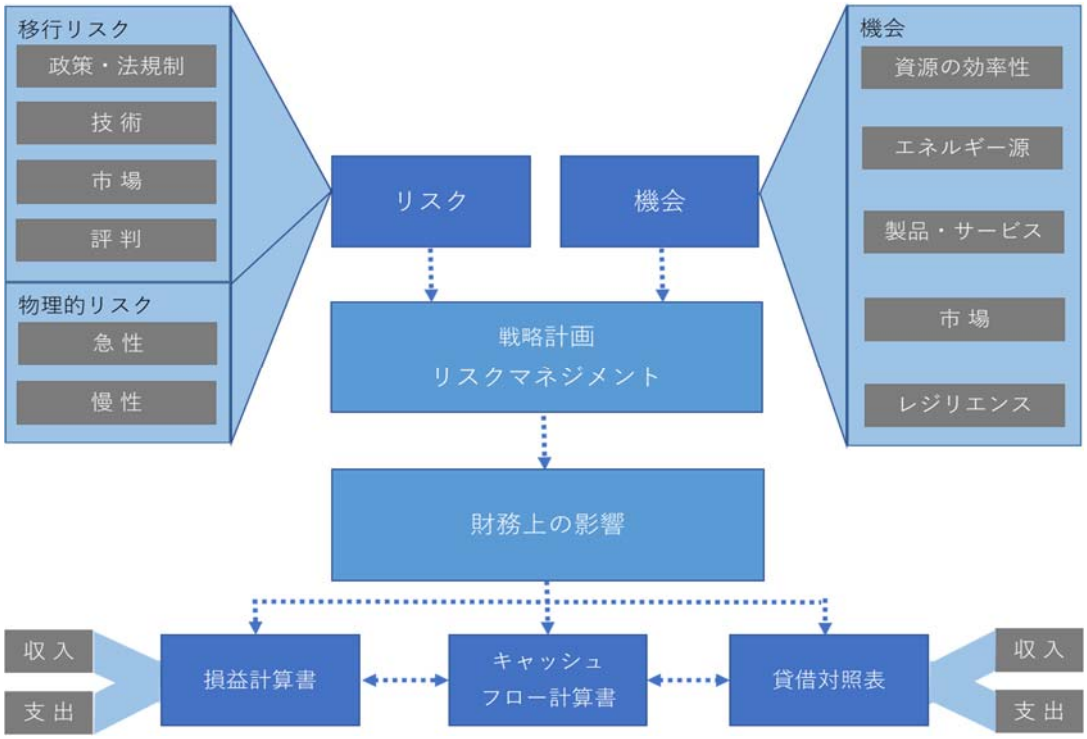
[1] 本稿において「都市銀行」は三菱 UFJ 銀行、みずほ銀行、三井住友銀行、りそな銀行、埼玉りそな銀行の 5 行、「地方銀行」は一般社団法人全国地方銀行協会会員行の 62 行（2021 年 3 月末時点）、「第二地方銀行」は一般社団法人第二地方銀行協会加盟行の 38 行（2021 年 3 月末時点）。

2. TCFD 提言の概要

TCFD は、Task Force on Climate-related Financial Disclosures（気候関連財務情報開示タスクフォース）の略称であり、各国の中央銀行総裁および財務大臣からなる金融安定理事会が設立した投資家等に適切な投資判断を促すための効率的な気候関連情報開示を企業等へ促す民間主導の作業部会である。TCFD の重要な目的は気候変動のリスクおよび機会が企業等にもたらす財務的影響についての開示情報を拡充させることであり、全セクターおよび各国、各地域の企業等に広く適用可能な気候関連財務情報開示に関する提言を策定し、2017 年 6 月に報告書を公表した。

まず、TCFD 提言による気候関連のリスクと機会の全体像を図表 1 に示す。ここで、気候関連のリスクは「移行リスク」、「物理的リスク」の 2 つに大別される。「移行リスク」とは、低炭素経済への移行に関するリスクであり、気候変動に関する政策・法規制、技術開発、市場動向、評判等の変化によってもたらされるものである。「物理的リスク」とは、気候変動によって物理的に変化するリスクであり、異常気象の深刻化や増加（急性）、平均気温の上昇、海面上昇（慢性）といったことによってもたらされるものである。

図表 1　気候関連のリスクと機会の全体像



（出所）TCFD「Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures」より
日興リサーチセンター作成

TCFD が策定した全セクターおよび各国、各地域の企業等に広く適用可能な気候関連財務情報開示に関する提言は、「ガバナンス」、「戦略」、「リスク管理」、「指標と目標」という 4 つの中核的要素を中心に

構成されている。これら 4 つの要素は主要な気候関連の財務情報開示（＝推奨される開示）によって裏付けられており、投資家等が気候関連のリスクと機会についてどのように考え、評価するかを理解するのに役立つように枠組みを構築している。TCFD による提言と推奨される開示の内容を図表 2 に示す。

図表 2　TCFD による提言と推奨される開示[2]

ガバナンス	戦略	リスク管理	指標と目標
気候関連のリスクと機会に関する組織のガバナンスを開示する	気候関連のリスクと機会がもたらす組織の事業、戦略、財務計画への実際の影響及び潜在的な影響を開示する	気候関連リスクについて、組織がどのように特定、評価、および管理しているかについて開示する	気候関連のリスクと機会を評価および管理する際に用いる指標と目標について開示する
推奨される開示	推奨される開示	推奨される開示	推奨される開示
気候関連のリスクと機会に関する取締役会による監督体制を説明する	組織が特定した、短期・中期・長期の気候関連のリスクと機会を説明する	組織が気候関連のリスクを特定し評価するプロセスを説明する	組織が、自らの戦略とリスクマネジメントに即して、気候関連のリスクと機会を評価する際に用いる指標を開示する
気候関連のリスクと機会を評価しマネジメントするうえでの経営陣の役割を説明する	気候関連のリスクと機会が組織の事業、戦略、財務計画に及ぼす影響を説明する	組織が気候関連リスクをマネジメントするためのプロセスを説明する	Scope1、Scope2、組織に当てはまる場合はScope3のGHG（温室効果ガス）排出量と関連リスクについて開示する
	2°C以下のシナリオを含む異なる気候関連のシナリオを考慮して、組織戦略のレジリエンスを説明する	組織が気候関連リスクを特定、評価、マネジメントするプロセスが、組織の全体的なリスク管理にどのように統合されているか説明する	組織が気候関連リスクと機会をマネジメントするために用いる目標、および目標に対する実績を開示する

（出所）TCFD「Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures」より
日興リサーチセンター作成

3.　気候変動対策への取り組み状況

TCFD 提言への賛同を始めとした銀行の気候変動対策の取り組み内容は、統合報告書・ディスクロ―ジャー誌や HP で開示されている。

気候変動対策の開示の一つとして SDGs[3]においては、各行が SDGs 宣言を制定するとともにマテリアリティ（重要課題）をテーマごとに設定している。マテリアリティのテーマは各行それぞれであるが、SDGs の 13 番目の目標である「気候変動に具体的な対策を」については、環境保全に関するテーマとして組み入れられていることが多い。本稿の分析対象行においては、都市銀行 5 行、地方銀行 55 行、第二地方銀行 31 行が SDGs 宣言[4]を公表しており、都市銀行 5 行、地方銀行 58 行、第二地方銀行 31 行が 2021 年 3 月期の統合報告書・ディスクロ―ジャー誌もしくは HP（2021 年 10 月末時点）で 13

[2] 「指標と目標」の推奨される開示にある Scope3 基準は、サプライチェーン上の活動に伴う GHG（温室効果ガス）排出量に関する指標であり、「Scope1」は事業者自らによる温室効果ガスの直接排出、「Scope2」は他社から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出、「Scope3」は Scope1、Scope2 以外の間接排出（事業者の活動に関連する他社の排出）を示す。

[3] Sustainable Development Goals（持続可能な開発目標）の略称であり、2015 年 9 月に国連サミットにて採択された「誰一人取り残さない」持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現のため、2030 年を年限とする 17 の国際目標。

[4] 「サステナビリティ宣言」、「サステナビリティ方針」等、SDGs 宣言と同様の意味合いを持つ名称を含む。本章におけるその他の項目についても、それぞれ同様の意味合いを持つ名称を含む。

番目の目標である「気候変動に具体的な対策を」に言及している。

TCFD 提言においては、4 つの開示基礎項目である「ガバナンス」、「戦略」、「リスク管理」、「指標と目標」について、気候関連リスクと機会の考え方に基づく説明が求められている。本稿では「ガバナンス」の指標を「SDGs 宣言」、「環境方針」の 2 項目、「戦略」の指標を「移行リスク」、「物理的リスク」、「炭素関連資産割合」の 3 項目、「リスク管理」の指標を「投融資方針（投融資ポリシー）」の 1 項目、「指標と目標」の指標を「温室効果ガス排出量削減目標」、「サステナブル・ファイナンス実行目標」の 2 項目と位置づけ、TCFD 提言の賛同表明の有無にかかわらず、2021 年 3 月期の統合報告書・ディスクロ―ジャー誌もしくは HP（2021 年 10 月末時点）におけるそれぞれの開示状況を調査した。

図表 3 は各行の指標ごとの開示状況である。TCFD 提言への賛同表明は、本稿の分類による都市銀行が 5 行、地方銀行が 40 行、第二地方銀行が 12 行となっており、2021 年 3 月期の統合報告書・ディスクロ―ジャー誌の公表以後も賛同表明が相次いでいるが、開示基礎項目の内容を見ると地方銀行、第二地方銀行の開示が少ない。また、「戦略」項目では気候関連リスクと機会が与える影響を評価するためにシナリオ分析による「移行リスク」、「物理的リスク」に関する定量的な情報開示が推奨されているが、銀行全体では、まだ一部のみしか実施されていない。

図表 3　指標ごとの開示状況

	TCFD提言賛同表明	基礎項目							
		ガバナンス		戦略			リスクと管理	指標と目標	
		SDGs宣言	環境方針	移行リスク	物理的リスク	炭素関連資産割合	投融資方針（投融資ポリシー）	温室効果ガス排出量削減目標	サステナブル・ファイナンス実行目標
都市銀行（5行）	5行	5行	5行	定量：3行 定性：2行	定量：3行 定性：2行	5行	5行	5行	5行
地方銀行（62行）	40行	55行	34行	定量：4行 定性：4行	定量：6行 定性：2行	9行	29行	21行	16行
第二地方銀行（38行）	12行	31行	13行	定量：1行 定性：3行	定量：1行 定性：3行	2行	4行	4行	3行

（出所）各行の開示資料より日興リサーチセンター作成

次に、各行における気候変動対策の取り組みとして、TCFD 提言への対応状況について調査した。4 つの開示基礎項目である「ガバナンス」、「戦略」、「リスク管理」、「指標と目標」の分類ごとの取り組み例を図表 4 に示す。

都市銀行と地方銀行（第二地方銀行を含む）では性質が異なる内容もあるが、それぞれの項目に関する特徴についてまとめると以下のようになる。「ガバナンス」では、「環境方針」や「サステナビリティ方針」を制定したうえで、サステナビリティに関する役職（CSuO:Chief Sustainability Officer）や担当部署を設置し、取締役会や経営トップを委員長とするサステナビリティ委員会等への報告を実施する

体制を構築している銀行が多い。「戦略」では、気候変動に関するリスクと機会が銀行経営に与える影響の認識について説明したうえで、移行リスク、物理的リスクに関するシナリオ分析を実施している銀行が多い。あわせて、再生可能エネルギー関連融資や顧客の脱炭素社会への移行を支援する金融商品、サービスの提供を通じた脱炭素社会への移行に伴うビジネスの成長機会についての言及もしている。「リスク管理」では、気候関連リスクを統合リスク管理へ統合させることや、気候関連リスクを踏まえた投融資方針を策定し、その具体的な取り組み内容について説明している銀行が多い。「指標と目標」では、CO_2 排出量の推移と今後の削減目標、サステナブル・ファイナンスおよび環境系ファイナンスの実行額目標、再生可能エネルギー投融資残高、貸出金等に占める炭素関連資産割合を開示している銀行が多い。

図表４　TCFD 提言への取り組み例

	取り組み例
ガバナンス	・環境方針、サステナビリティ方針を制定
	・中期経営計画において、気候変動への対応を含むSDGsへの取組強化を重要戦略として組み込む
	・グループCSuO（Chief Sustainability Officer）を設置
	・取締役会、経営会議、サステナビリティ委員会、リスク委員会等において、気候変動問題への取り組みについて報告
	・気候関連のリスクと機会の識別・評価・管理に関する重要事項は、グループSDGs推進委員会において一元的に管理
戦略	・気候変動に起因するリスクが、事業運営、戦略、財務計画に影響を与えることを認識
	・気候関連リスクとして、移行リスクと物理的リスクを認識
	・移行リスク、物理的リスクに関するシナリオ分析の実施
	・気候関連の機会の認識として、脱炭素社会への移行（トランジション）や気候変動対応を支援するビジネス機会の拡大
	・グループベースでの戦略的取組（投融資ポートフォリオにおけるGHG(温室効果ガス)排出量算定、脱炭素化ビジネス推進など）
リスク管理	・気候変動に伴うリスクを、グループSDGs推進委員会にて毎年定期的に識別・評価し、四半期ごとに管理
	・気候変動リスクの特定、統合リスク管理への統合
	・取引先の事業活動に及ぼす信用リスクや拠点にかかるオペレーショナル・リスクを中心に総合的な管理を実施
	・「社会的責任投融資にかかる取り組み」などにより、金融の役割を通じてカーボンニュートラル社会を実現していくための管理を強化
	・地球温暖化等気候変動リスクを含む地球環境に影響を及ぼす特定のセクターに関する融資ポリシーを公表
指標と目標	**・CO_2排出量の推移と削減目標を公表（2030年度末までにCO_2排出量を実質ゼロ、2030年度2013年度比CO_2 50%削減等）**
	・サステナブルファイナンス及び環境系ファイナンスの実行額目標を公表（2030年度までに2兆円うち環境系ファンナンスを1兆円等）
	・再生可能エネルギー関連投融資残高を公表（太陽光発電、バイオマス発電、風力発電、水力発電等）
	・貸出金等に占める炭素関連資産の残高、割合を公表
	・石炭火力発電向け貸出金残高と削減目標を公表
	・電力使用量の実績値と削減目標を公表

（出所）各行の開示資料より日興リサーチセンター作成

TCFD では、「戦略」項目において気候関連のリスクと機会が財務へ与える影響を評価するためにシナリオ分析による情報開示を推奨し、技術的補足文書で気候関連シナリオの種類、シナリオ分析の適用、およびシナリオ分析を実装する場合の主要課題を提供している。分析に適用できるシナリオの種類は複数あるが、本稿の分析対象の銀行が実際に適用しているシナリオについて、移行リスクに関するシナリ

オを図表 5、物理的リスクに関するシナリオを図表 6 に示す。移行リスクに関するシナリオは IEA、NGFS のシナリオ、物理的リスクに関するシナリオは IPCC のシナリオが用いられている。

図表 5　移行リスクに関するシナリオの概要

IEAシナリオ	気温上昇予測（2050年）	概　要
持続可能な開発シナリオ（SDS）	2.0℃以下	クリーン・エネルギー政策と投資の積極的な推進により、パリ協定等の持続可能な開発目標を完全に達成するためのエネルギーシステムが軌道に乗るシナリオ
Net-Zero Emissions（1.5℃シナリオ）	1.5℃	持続可能な開発シナリオ（SDS）の分析を拡張させたもので、今世紀半ばまでにCO_2排出量の実質ゼロ化を目標とするシナリオ
NGFSシナリオ	**気温上昇予測（2050年）**	**概　要**
Net Zero 2050（1.5℃シナリオ）	1.5℃	厳格な気候政策と革新を通じて地球温暖化を1.5℃に制限し、2050年頃に世界のCO_2排出量が正味ゼロに達するシナリオ
Current Policies（3℃シナリオ）	3.0℃	現在実施されている政策のみが継続されることを前提とするシナリオ

（出所）IEA「World Energy Outlook 2021」、NGFS「NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021」より日興リサーチセンター作成

図表 6　物理的リスクに関するシナリオの概要

IPCCシナリオ	気温上昇予測（2100年）	概　要
RCP2.6（2℃シナリオ）	2.0℃以下	非常に多くの気候変動対策が取られ、温室効果ガス濃度は2100年以前にピークをつけ、その後減少するシナリオ
RCP8.5（4℃シナリオ）	4.0℃	有効な気候変動対策が取られず、2100年の温室効果ガス濃度が1,000ppmを超えるシナリオ

（出所）IPCC「AR5 Synthesis Report」より日興リサーチセンター作成

最後に、「戦略」におけるシナリオ分析において、先行して実施している銀行の開示例を示す。図表 7 は移行リスクに関する開示内容、図表 8 は物理的リスクに関する開示内容である。

移行リスクのシナリオは 2020 年度まで IEA の持続可能な開発シナリオが大半であったが、2021 年 6 月に NGFS の 2 回目の気候シナリオが公表されると、これを採用する動きが出てきた。対象セクター、分析期間はどの銀行も概ね同様となっているが、分析手法は各行様々であり、定量分析ではなく定性分析を実施している銀行も一部あった。

物理的リスクのシナリオは、IPCC の RCP2.6、RCP8.5 の双方か、RCP8.5 の単独とのどちらかとなっていた。分析内容は全て風水災に関する内容であるが、別途慢性リスクとして熱中症・感染症の増加リスクについて期間 100 年の分析をしている銀行もあった。分析手法は移行リスク同様に各行様々であ

るが、地方銀行では営業地域における過去の被災データ、ハザードマップを用いた被害推定に基づき不動産担保の損壊等に起因する担保価値影響額の推計値を算出している銀行が多い。

図表７　シナリオ分析の分析内容（移行リスク）

	移 行 リ ス ク
シナリオ	IEA：持続可能な開発シナリオ（2℃シナリオ）
	IEA：Net-Zero Emissions（1.5℃シナリオ）
	NGFS：Net Zero 2050（1.5℃シナリオ）
	NGFS：Current Policies（3℃シナリオ）
対象セクター	エネルギー、電力ユーティリティ、石油・ガス、石炭、自動車
分析期間	2050年まで
分析手法	個社レベルのボトムアップ手法とセクターレベルのトップダウン手法を組み合わせて評価する統合的アプローチ
	BS / PLを用いたサンプル企業分析により事業継続性を評価し、セクター全体の与信コストを試算
	GHG(温室効果ガス)排出量抑制に応じた炭素価格・資源価格や需給環境の変化等のリスクファクターが業績に与える影響の分析結果をストレステストモデルに反映
	気候変動シナリオよる将来予測データおよび炭素税の予測データ等を使用し融資先に対する財政状態や経営成績に関する変化の予想を行い、与信関係費用の変化を分析
	移行シナリオに基づき、対象セクターについて将来の業績変化を予想し、格付や信用コストへの影響を推計

（出所）各行の開示資料より日興リサーチセンター作成

図表８　シナリオ分析の分析内容（物理的リスク）

	物 理 的 リ ス ク
シナリオ	IPCC：RCP2.6（2℃シナリオ）
	IPCC：RCP8.5（4℃シナリオ）
分析内容	風水災
	急性リスク（台風・豪雨による風水災のリスク）、慢性リスク（熱中症・感染症の増加リスク）
分析期間	2050年まで
	急性リスク50年、慢性リスク100年
分析手法	水害発生時の被害推定の分析を実施し、水害の発生が与信先に与えるデフォルト確率の変化を用いて与信ポートフォリオへの影響を計測
	急性リスク（直接影響）：建物の損傷率 ✕ 担保資産（建物）データ
	急性リスク（間接影響）：期待営業停滞日数 ➡ 平均以上の事業停滞長期化が見込まれるポートフォリオ ✕ 一定水準の業績悪化ストレス
	慢性リスク：熱中症・感染症の増加 ➡ 労働投入量の減少 ➡ GDP成長率低下
	水災による事業法人における担保価値の毀損、財務状況の悪化に伴う債務者区分の劣化の経路による与信関係費用を算出し、気候変動シナリオごとの洪水発生確率を勘案し与信関係費用を算出
	風水災による営業地域の被災データおよび気候変動シナリオに基づく将来的な台風による被災状況に関する試算等により不動産（建物）担保の損壊等による担保価値影響額
	営業地域の主要河川流域において、気候変動に起因する大規模水害が発生した場合の顧客の業績悪化および担保価値の毀損の影響
	風水災モデルを使用し、与信先の担保物件や事業所等の所在地・構造等に応じた影響度を推計
	台風・豪雨によって保有する担保不動産の損傷に起因する価値毀損の推計結果（直接影響）および建物の損傷に起因する顧客の事業停滞日数の推計結果（間接影響）

（出所）各行の開示資料より日興リサーチセンター作成

4. まとめ

銀行の気候変動対策に関する開示内容について、TCFD 提言に基づく取り組みを中心に調査をした。SDGs 宣言については、都市銀行において 5 行全てが公表しており、地方銀行は 62 行中 55 行、第二地方銀行は 38 行中 31 行が公表している。SDGs の 13 番目の目標である「気候変動に具体的な対策を」についての言及は、都市銀行が 5 行全て、地方銀行は 58 行、第二地方銀行は 31 行となっている。次に、TCFD より提言された 4 つの開示基礎項目である「ガバナンス（SDGs 宣言を除く）」、「戦略」、「リスク管理」、「指標と目標」における各開示項目については、都市銀行では一部の項目を除き 5 行全てが公表している一方、地方銀行では項目によって 8 行～34 行の開示、第二地方銀行では項目によって 2～13 行の開示に留まっている。TCFD 提言に基づく開示に向けた取り組みについては、都市銀行、一部の地方銀行が先行して始めており、その他の地方銀行、第二地方銀行については検討段階、もしくはこれから取り組みを始めていく状況にあるといえる。

異常気象の発生等その影響が甚大となっている気候変動リスクに備えるためにはシナリオに基づく対策が重要になるが、本稿にて分析対象とした銀行の 2021 年 3 月期の統合報告書・ディスクロ―ジャー誌、HP 等における開示では取り組み状況に大きな差があった。しかし、2021 年 9 月には日本銀行が気候変動対応を支援するための資金供給オペレーションを策定しており、貸付対象先に TCFD の 4 項目の開示を要件としていることからも、今後ますます開示が広がっていくと考えられる。TCFD 提言における開示を始めとした気候変動対策に関する銀行の動向については、今後も引き続き注視していきたい。

参考文献

TCFD[2017], Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures
https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf

NGFS[2021], NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021
https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2021/08/27/ngfs_climate_scenarios_phase2_june2021.pdf

IPCC[2014], AR5 Synthesis Report
https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

IEA[2021], World Energy Outlook 2021
https://iea.blob.core.windows.net/assets/888004cf-1a38-4716-9e0c-3b0e3fdbf609/WorldEnergyOutlook2021.pdf

日本銀行[2021], 「気候変動対応を支援するための資金供給オペレーション基本要領」の制定等について
https://www.boj.or.jp/announcements/release_2021/rel210922a.pdf

（END）

金融機関の金利リスク計測における
NGFS の気候シナリオの活用

2022 年 2 月

資産運用研究所　　常泉 和也

1．はじめに

2021 年 6 月、「気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク」（Network for Greening the Financial System : 以下、NGFS）が「中央銀行および監督当局向け NGFS 気候シナリオ」を公表した。これは、気候変動が各国・地域の経済と金融システムに与える影響を複数のシナリオとして示したものである。NGFS は 2020 年 6 月に 1 回目の気候シナリオを公表しており、今回は各国の脱炭素に向けた政策、最新のマクロ経済データ等を含めた 2 回目のシナリオ公表となる。

本稿では、NGFS による日本を対象とした気候シナリオに基づき、公表された 6 つのシナリオの概要、経済的影響（長期金利の変化）の概略を説明した上で、NGFS が気候シナリオに基づき推計した日本の将来の長期金利の推移から直近の国内金利のイールドカーブを推計することで、金融機関の金利リスク管理として気候シナリオを活用するための一つの材料を提示する。

2．NGFS 気候シナリオの概要

今回発表された NGFS の気候シナリオには、気温、気候政策、二酸化炭素排出量等がどのように変化するかによって、物理的リスク、移行リスクが異なる 6 つのシナリオが設定されている。ここでいう物理的リスクとは、気候変動によって物理的に変化するリスクであり、異常気象の深刻化や増加、平均気温の上昇、海面上昇等によってもたらされるものである。一方、移行リスクとは、低炭素経済への移行に関するリスクであり、気候変動に関する政策・法規制、技術開発、市場動向、評判等の変化等によってもたらされるものである。

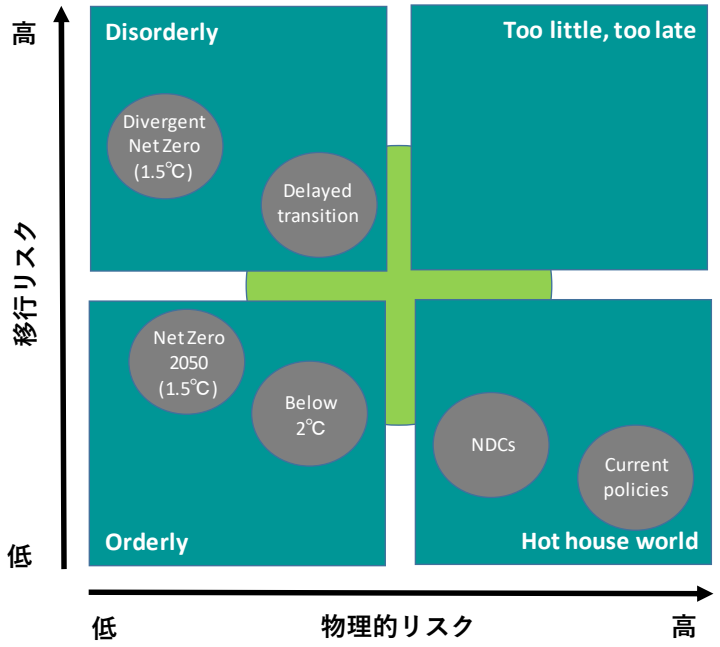
シナリオごとの定義、分類、特徴について図表 1、2、3 に纏めた。図表 3 では、物理的リスクに影響を与える要素を「気温上昇の水準」、移行リスクに影響を与える要素を「気候変動政策の動向」、「技術革新の速さ」、「二酸化炭素除去の技術利用」、「気候変動政策に対する取組への地域差」とし、各項目に対するシナリオごとの特徴を示している。

図表１　気候シナリオの定義

気候シナリオの定義	
Net Zero 2050	厳格な気候政策と革新を通じて地球温暖化を1.5°Cに制限し、2050年頃に世界のCO_2排出量が正味ゼロに達するシナリオ。米国、EU、日本などの一部の地域では、すべての温室効果ガス（GHG）排出量で正味ゼロに達する。
Below 2°C	気候政策の厳格さが徐々に高まり、67％の確率で地球温暖化が2°C未満に制限されるシナリオ。
Divergent Net Zero	2050年頃にCO_2排出量が正味ゼロに到達するが、産業間で相違する政策が導入されることによりコストが上昇し、石油使用の段階的廃止が早まるシナリオ。
Delayed Transition	CO_2の年間排出量が2030年まで減少しないことを前提とするシナリオ。CO_2除去は制限され、温暖化を2°C未満に制限するには強力な政策が必要となる。
Nationally determined Contributions（NDCs）	まだ実施されていない場合も含め、すべての公表された政策（＝国が決定する貢献）が含まれるシナリオ。
Current Policies	現在実施されている政策のみが継続されることを前提とするシナリオ。物理的なリスクが高くなる。

（出所）NGFS「NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021」より
日興リサーチセンター作成

図表２　気候シナリオの分類



（出所）NGFS「NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021」より
日興リサーチセンター作成

図表 3　気候シナリオの特徴

カテゴリー	シナリオ	物理的リスク	移行リスク			
		気温上昇	気候変動政策	技術革新	二酸化炭素除去	気候変動政策の地域差
Orderly	Net Zero 2050	1.5℃	早い 円滑	早い	中程度	中程度
	Below 2℃	1.7℃	早い 円滑	緩やか	中程度	低い
Disorderly	Divergent Net Zero	1.5℃	早い 産業間で相違	早い	低い	中程度
	Delayed Transition	1.8℃	遅い	2030年まで遅い それ以降早い	低い	高い
Hot House World	NDCs	～2.5℃	国が決定する貢献	遅い	低い	低い
	Current Policies	3℃+	既存の政策	遅い	低い	低い

（注）色分けは、マクロ財務リスクの観点からリスクの高低を表している（■：リスク高、■：リスク中、■：リスク低）
（出所）NGFS「NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021」より日興リサーチセンター作成

3. NGFS 気候シナリオによる長期金利への影響

NGFS は気候変動が経済に与える影響について、気候シナリオごとの NiGEM NGFS v1.21 モデル[1]によるマクロ経済変数のシミュレーション結果を国、地域ごとに提示している。

NGFS は長期金利について、炭素価格[2]によって引き起こされるインフレ圧力と、移行に拍車をかける投資需要の増加によって上昇すると説明[3]している。図表 4 は 2021～2050 年の 30 年間の日本におけるシナリオごとの長期金利の推移である。すべてのシナリオにおいて年数が経過するにつれ長期金利が上昇しているが、Net Zero 2050 シナリオ、Below2℃シナリオ、NDCs シナリオ、Current Policies シナリオの 4 つのシナリオでは 2050 年時点での長期金利が 4%以下の水準に抑えられている一方、物理的リスクが低く移行リスクが高い Divergent Net Zero シナリオ、Delayed transition シナリオの 2 つのシナリオは 2030 年前後から比較的上昇幅が大きくなっている。Divergent Net Zero シナリオは早期に気候変動施策が導入されるも産業間で導入される政策に相違があり二酸化炭素除去も低水準となることから移行リスクが増加し、2021 年に 0.18%であった長期金利が 2035 年には 3.52%まで上昇している。Delayed transition シナリオは気候変動政策の遅延から急速な対応を余儀なくされ気候変動

[1] 「National institute Global Econometric Model」の略称であり、イギリスの National Institute of Economic and Social Research が開発したグローバルマクロ経済モデル。NiGEM モデルの詳細については、「NiGEM の紹介と概要」（https://nimodel.niesr.ac.uk/public/articlesintro.pdf）、「技術的文書」（https://nimodel.niesr.ac.uk/public/NiGEM technical document 2021.pdf）を参照されたい。

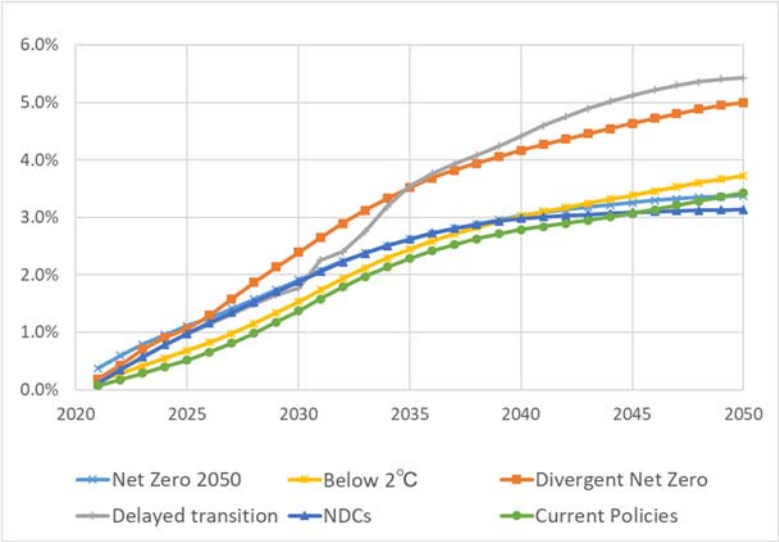
[2] NGFS は炭素価格を気候変動政策の尺度としており、炭素価格が高いほどより厳格な気候変動政策を意味している。

[3] NGFS の気候シナリオによる経済的影響の詳細については、「中央銀行および監督当局向け NGFS 気候シナリオ」（https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_phase2_june2021.pdf）、「技術的文書」（https://www.ngfs.net/sites/default/files/ngfs_climate_scenarios_technical_documentation__phase2_june2021.pdf）を参照されたい。

政策に対する地域間格差も大きくなることから移行リスクが増加し、技術革新の転換点となる 2030 年に 1.77%であった長期金利が 2035 年には 3.53%まで上昇しており、2050 年には 5.43%と 6 つのシナリオで最大となっている。

気候シナリオによる予測では、物理的リスク、移行リスクの高低にかかわらず長期金利は上昇するが、物理的リスクである 2100 年までの気温上昇に対する移行リスクの違いにより上昇ペースが異なることを示している。つまり、気候変動政策を実行するにあたり産業間や地域によって政策に相違があること、早期に実施すべき開始時期が遅延したりすることで不確実性が高まり、長期金利の水準に関して影響が出てくるものと考えられる。

図表 4　気候シナリオごとの長期金利の推移



（出所）NGFS「NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021」より
日興リサーチセンター作成

4．現時点におけるイールドカーブ比較

NGFS の気候シナリオに基づく長期金利の将来予測を現時点におけるリスク管理に活用するために、NGFS の長期金利のシミュレーション結果（図表 4）から、2022 年末のイールドカーブを推計する。なお、推計にあたって NGFS の長期金利のシミュレーション結果を 10 年スポットレートとみなす。

この長期金利のシミュレーション結果を前提とするならば、（4.1）式で示すように、ある時点の 10 年スポットレートで 10 年保有し、10 年後の 1 年物フォワードレートでさらに 1 年運用した場合と、ある時点の 1 年物フォワードレートで 1 年運用し、1 年後にその時点の 10 年スポットレートでさらに 10 年運用した場合の結果は均衡する。

$$(10 \times R_t + f_{t+10}) = (f_t + 10 \times R_{t+1}) \tag{4.1}$$

R_t ： 時点 t における 10 年スポットレート（$t = 0,1,2,\cdots,28$）

f_t ： 時点 t における 1 年物フォワードレート（$t = 0,1,2,\cdots,28$）

この関係性により、2022 年から 2050 年までの 29 年間の 10 年スポットレートから（4.1）式において左辺と右辺の差の二乗和が最小となるように、各時点における 1 年物フォワードレート f_t を推計する。なお、現時点である 2022 年の 1 年物フォワードレートは 2022 年 1 月末時点の実際の 1 年スポットレートとし、2050 年以降の 10 年スポットレートは 2050 年の数値と等しいとする。

このように推計した 2022 年～2050 年の各時点の 1 年物フォワードレートから、2022 年末時点での各年限のスポットレートを算出する（4.2）。

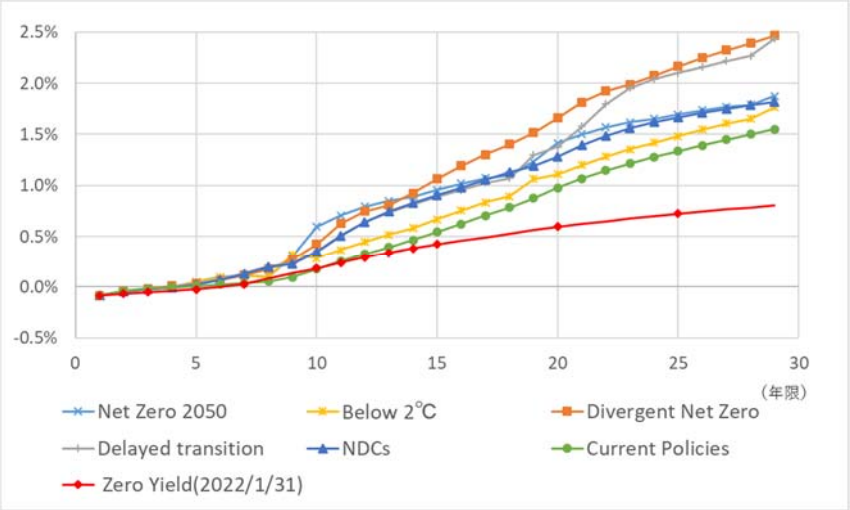
$$r_t = \sum_{i=1}^{t} f_i \Big/ t \tag{4.2}$$

r_t ： 時点 0 における t 年スポットレート（$t = 1,2,3,\cdots,29$）

f_i ： 時点 i における 1 年物フォワードレート

上記にて算出した各シナリオに基づく 2022 年末時点のイールドカーブと、現在（2022 年 1 月 31 日時点）のイールドカーブを図表 5 に示す。全体の特徴では、Current Policy シナリオの年限 10 年前後を除き、各シナリオが現在のスポットレートを上回った。個別の特徴としては、年限 10 年でのスポットレートを比較すると Net Zero 2050 シナリオが 0.60%と最も高くなっているのに対して、年限 29 年でのスポットレートを比較すると Divergent Net Zero シナリオが 2.47%、Delayed transition シナリオが 2.44%となる一方、Net Zero 2050 シナリオは 1.87%となった。気候変動政策において産業間での相違がある、あるいは遅延することで、気候変動政策を迅速かつ円滑に推進する場合よりも、年限が長期化するほど現在のスポットレートとの差異が大きくなるということを示している。

図表 5　気候シナリオに基づく 2022 年末時点のイールドカーブ



（出所）NGFS「NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021」、
Refinitiv より日興リサーチセンター作成

5. まとめ

気候変動のシナリオをどのように金融機関のリスク管理に導入していくかという観点から、NGFS の気候シナリオに基づく日本の長期金利の将来予測を近い将来のイールドカーブへと変換し、現在のイールドカーブとの比較を行った。本稿のような分析手法を用いることで、気候シナリオが金融機関の金利リスク管理の一つの材料となるのではないだろうか。

常泉[2021]では国内銀行の気候変動に関する開示状況を調査したが、現状ではシナリオ分析を実施している銀行は少数であった。一方、NGFS が 2021 年 10 月に発表した「各国当局および中銀による気候シナリオ分析の実施に係るプログレスレポート」では、NGFS メンバーである 30 の各国当局および中銀のうち、気候シナリオによるシナリオ分析を実施済と回答した先は 4 件、19 件が実施中、6 件が計画中と回答していることからも、今後各国でますます気候シナリオを用いたシナリオ分析が実施されていくと考えられる。シナリオ分析をはじめとした気候変動に対する国内銀行のリスク管理の動きを注視しつつ、気候シナリオが銀行の預貸の時価（ΔEVE）や収益（ΔNII）に与える影響の分析については、今後の課題としたい。

参考文献

NGFS[2021a],　NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors June 2021
https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2021/08/27/ngfs_climate_scenarios_phase2_june2021.pdf

NGFS[2021b],　NGFS Climate Scenarios Database Technical Documentation V2.2
https://www.ngfs.net/sites/default/files/ngfs_climate_scenarios_technical_documentat

ion__phase2_june2021.pdf
NGFS[2021c], Scenarios in Action A progress report on global supervisory and central bank climate scenario exercises October 2021 https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/scenarios-in-action-a-progress-report-on-global-supervisory-and-central-bank-climate-scenario-exercises.pdf
大嶋秀雄[2021a], 「NGFS の気候シナリオが示す「2050 年脱炭素」の世界 ～民間企業で行うリスク分析に向けて求められること～」, 日本総研 Research Focus https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39241
大嶋秀雄[2021b], 「秩序ある 2050 年カーボンニュートラルに不可欠な経済影響の把握―金融・企業連携によるシナリオ分析が急務ー」, 日本総研 Research Focus https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39426
大嶋秀雄[2021c], 「中小企業の脱炭素のカギを握る銀行セクター～多面的支援を行う仕組みづくりが急務～」, 日本総研 Research Focus https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=101813
佐志田晶夫[2021], 「NGFS の「気候シナリオ分析に係るプログレスレポート」の紹介」 https://www.jsri.or.jp/publish/topics/pdf/2111_03.pdf
アセットマネジメント One[2018], 「資産運用のパフォーマンス測定」, 金融財政事情研究会
常泉和也[2021], 「金融機関の気候変動に関する開示状況調査」, 日興リサーチレビュー https://www.nikko-research.co.jp/library/10728/

（END）

ネットゼロを実現するカーボン・オフセット

2022 年 5 月
社会システム研究所 主任研究員　　寺山　恵

1.　はじめに

2021 年英国グラスゴーで開かれた COP26（気候変動枠組条約締約国会議）において、地球の平均気温の上昇を、産業革命以前より 1.5℃に抑えることを目標とすることが合意された。IPCC 特別報告書によると、1.5℃目標達成のためには、2030 年までに温室効果ガス排出を 2010 年比 45%削減、2050 年頃には実質的にゼロ排出を達成することが必要とされる（環境省、2018）。

この 1.5℃シナリオをふまえ、 国や地域だけでなく、地方自治体や都市、グローバル企業からもネットゼロ宣言が相次いでいる。Black, R., et al. (2021) によると Forbes Global 2000 企業のうち、21%以上がネットゼロを宣言しているという。この企業の「ネット（実質）」ゼロ排出を達成する手段としてカーボン・オフセットが注目されている。物理的に削減しきれない温室効果ガスはオフセットする必要があるからだ。

2.　カーボン・オフセットとは

カーボン・オフセットとは、自らの温室効果ガス排出を、どこか別の場所で行われた温室効果ガス排出削減で埋め合わせることをいう。

オフセットの考え方は、京都議定書における京都メカニズムと呼ばれた柔軟化措置に由来する。京都議定書では、法的拘束力のある温室効果ガス排出削減の目標が、先進国各国に割り当てられていた。各国が削減目標の達成にあたって、物理的な温室効果ガス排出削減以外にも、排出削減として加算できるものが京都メカニズムとして定められた。

代表的な京都メカニズムのひとつである Clean Development Mechanism（CDM）は、途上国での温室効果ガス削減プロジェクトを先進国が行った場合、その温室効果ガス削減量を当該先進国の温室効果ガス削減として認めるというものだ。温室効果ガス排出削減の目標は先進国にのみ割当てられて、途上国にはなかった。例えば、日本の削減目標は 1990 年比マイナス 6%であったが、日本では 80 年代に省エネがすすんでおり、1990 年比では国内には削減できる余地がすでに少なかったとされる。途上国での温室効果ガス削減プロジェクトは、日本でさらなる削減を目指すより効率的であるし、目標のない途上国における温室効果ガス削減をすすめるインセンティブにもなる。また、途上国のプロジェクトは、環境保護や経済開発面の効果も期待できる。

実際、京都議定書の約束期間である 2008 年から 2012 年の間の平均的な日本の物理的温室効果ガス

排出量は基準年比 1.4%増加したが、CDM など京都メカニズムによるカーボン・クレジットで 5.9%、さらに森林等吸収量で 3.9%をオフセットしたことにより、基準年比マイナス 8.4%と計算でき、日本は目標を達成した[1]。

3. 自主カーボン・クレジット市場

京都議定書の第一約束期間が 2012 年に終了すると、それ以降、法的な削減目標が設定されることはなかった。そのため、先進国は削減目標達成のため、CDM 認証のカーボン・クレジットを集めてオフセットする必要はなくなった。2020 年から有効となっているパリ合意においては、途上国も含め、すべての国が自主的な削減目標（Nationally Determined Contribution, NDC）を掲げるが、NDC 達成に法的な義務はない。NDC は自主目標であるから、国家間で温室効果ガス排出のやり取りを前提にした目標設定はしないと考えられる。したがって、国際的な制度としてのオフセットを目的としたカーボン・クレジットは現在では取引されていない。

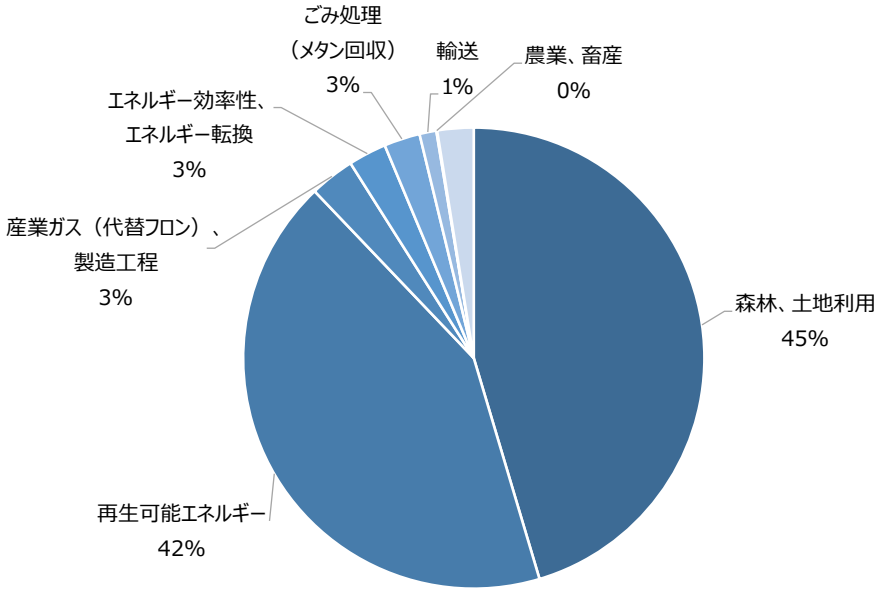
しかし、オフセットの考え方は残り、カーボン・クレジットがオフセットを求める民間の個人や企業などの間で自主的に取引されている。各国地域や地方自治体で運営されているキャップ・アンド・トレーディングの排出権取引プログラムは、それぞれ独自に定義した排出権（クレジット）を参加者に割当てる。当該クレジットはプログラム内でのみ有効で、原則、クレジットのやり取りは参加者間に限定される。一方、自主カーボン・クレジット市場では、そのような取り決めは一切ない。誰でもカーボン・クレジットの発行ができ、購入者を見つければそのクレジットの販売することができる。

オフセット・プロジェクト

自主カーボン・クレジット市場のカーボン・クレジットは、オフセット・プロジェクトが発行する。オフセット・プロジェクトは、温室効果ガス排出を削減するあるいは回避するもので、CDM では 250 以上のオフセット・プロジェクトのタイプが想定されていた。自主カーボン・クレジット市場においても、様々なタイプのオフセット・プロジェクトが存在するが、再生可能エネルギーと森林、土地利用のプロジェクトが最も多い。Forest Trends' Ecosystem Marketplace(2021)によると、2021 年に発行されたカーボン・クレジットでは、この 2 つのタイプで 9 割近くを占める（図表 1 参照）。森林、土地利用とは、光合成による植物の CO_2 吸収作用に由来する CO_2 排出削減であり、具体的には森林破壊の回避活動、新規植林、森林再生などのプロジェクトのことを指す。

[1] 林野庁ウェブサイト(https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/con_3.html)

図表 1　2021 年発行カーボン・クレジットの内訳



（出所）Forest Trends' Ecosystem Marketplace (2021)より日興リサーチセンター作成

カーボン・クレジット認証

自主カーボン・クレジット市場において、第三者機関による認証の取得は必須ではないが、多様なオフセット・プロジェクトを購入側で評価することは難しいため、市場に流通するクレジットのほとんどは認証付きである。クレジットを発行したいオフセット・プロジェクトは、計画段階で認証機関に応募し認証を取得する。

図表 2　主な認証機関

認証基準	プロジェクト数	主なクレジットのタイプ	発行残高 （百万トン CO_2e）
Verified Carbon Standard (VCS)	1,628	45%　再生可能エネルギー 42%　森林 、土地利用	410
Gold Standard	1,249	42%　再生可能エネルギー 26%　燃料変換 13%　エネルギー効率性	97
Climate Action Reserve	274	42%　ゴミ処理 27%　代替フロン 25%　森林、土地利用	69
American Carbon Registry (ACR)	122	43% CCS/CCU 20%　森林、土地利用 15%　製造工程	50

(出所) World Bank. (2020)より日興リサーチセンター作成

それぞれ認証機関は、独自の認証基準を持ち、クレジットのブランドを冠しているが、民間シンクタンクの World Resources Institute は、オフセット・プロジェクトとして認証されるためには、以下の５つの基準を満たす必要があるとしている(World Resources Institute, 2010)。

- ✓ Real（真正）: プロジェクトが実施され、クレジットにトン CO_2e 単位で示された温室効果ガスの削減量が実現していること。
- ✓ Permanent（永続性）: 吸収した温室効果ガスが再び放出されないこと。
- ✓ Additional（付加性）: 新規の温室効果ガスの削減であること。オフセット・プロジェクトがなくても削減されるものはプロジェクトとして成立しない。
- ✓ Verifiable（認証）: 独立した認証機関が定期的にモニタリングし認証していること。
- ✓ Enforceable（実施）: クレジットは（認証機関などに）登録し、厳正に管理され、１クレジットで１トン CO_2e の温室効果ガス排出をオフセットすること。2 重オフセットを防ぐ。

カーボン・クレジット購入

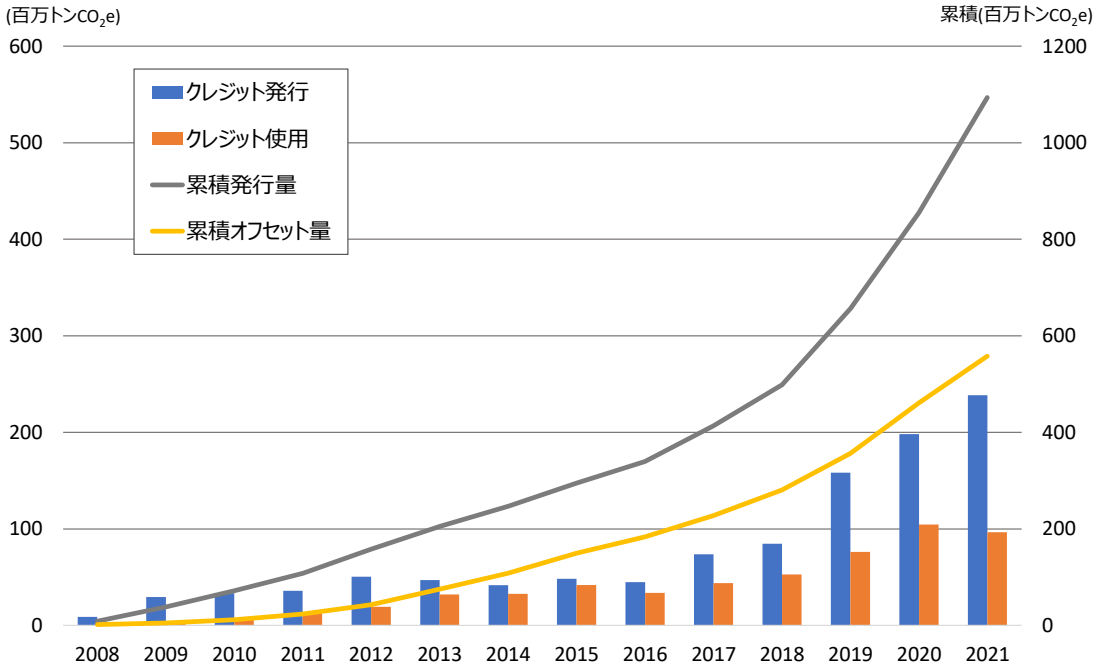
認証機関に登録されたオフセット・プロジェクトが、実際に稼働すると毎年１年分のオフセット量（単位：トン CO_2e）を証したクレジットが発行される。オフセット・プロジェクトと直接、排出削減購入契約（Emission Reduction Purchase Agreement, ERPAs）を交わし、クレジットを受け取ることもできる。また、認証機関ではオンラインサイトで認証クレジットのリテール販売を行うところもあるが、実際にはクレジットの大半は、クレジット・プロバイダー[2]を通じて企業が購入している。プロバイダーは、オフセット・プロジェクトの開発や認証取得の支援なども行い、テイラーメイドのオフセット・クレジットのパッケージを企業に提案する。

4. 自主カーボン・クレジット市場の拡大

Forest Trends' Ecosystem Marketplace (2021)によると、自主カーボン・クレジット市場は、2016 年ごろまでは 4,000 万トン CO_2e 台で推移していたが、2017 年頃から拡大し始め、2020 年には 1.98 億トン CO_2e のオフセット用のクレジットが発行された。2021 年は 8 月時点で既に 2 .39 億トン CO_2e が発行されており、累積クレジット発行量は 10.9 億トン CO_2e に達するとみられる。また、2019 年、2020 年それぞれ 1 億トン CO_2e が企業のオフセットに利用され、累積では発行クレジットの約半分がオフセットに利用されている。

[2] Climate Care (www.climatecare.org), South Pole (www.southpole.com), CO2balance (www.co2balance.com)など。この 3 社は営利企業。

図表３　オフセット用クレジット発行とクレジット使用



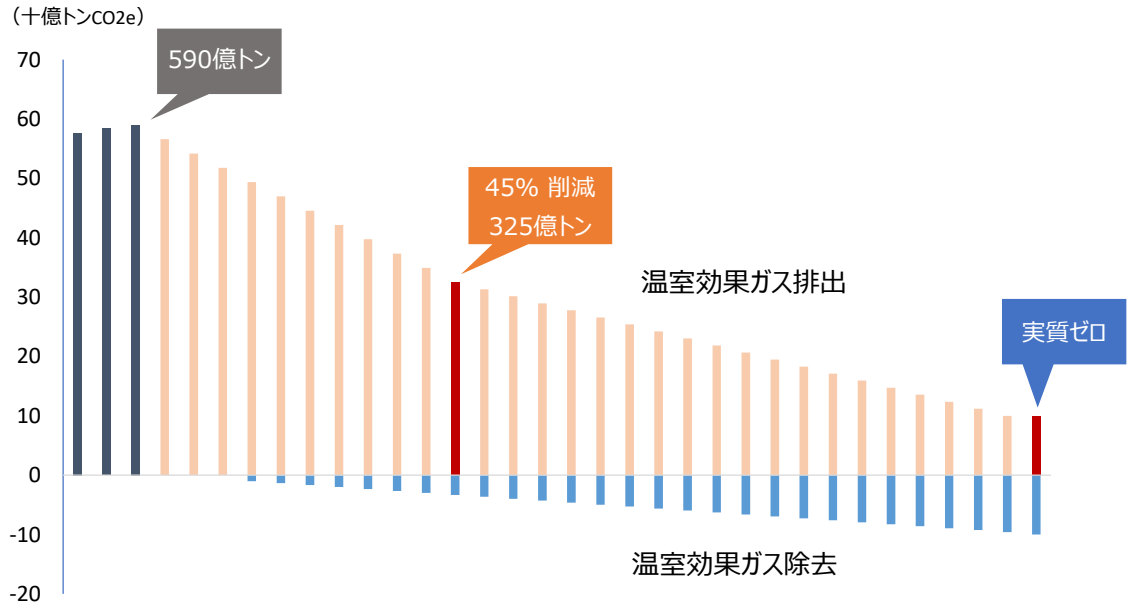
(出所) Forest Trends' Ecosystem Marketplace (2021)より日興リサーチセンター作成

ネットゼロに必要なオフセット量（市場規模）

IPCC[3]第６次評価報告書によると、2019 年の世界の温室効果ガス総排出量は 590 億トン CO_2e 前後と推定されている。これを起点として 1.5℃目標と整合的な排出削減経路では、2030 年には排出量を半減させるが、2050 年にはどうしても削減しきれない残余排出量が残ると考えられている。この残余排出量をオフセットすることにより、ネットゼロが実現する。McKinsey & Company (2021)は、2050 年の残余排出量を 100 億トン CO_2e 程度と予想しており、同量のオフセットがクレジットによって提供されるとして、自主カーボン・クレジット市場は 100 億トン CO_2e 規模へ拡大する可能性があるとしている。

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル)

図表４　2050 年ネットゼロ達成に向けた温室効果ガス排出削減経路のイメージ図



（出所）日興リサーチセンター作成

ネットゼロ目標を掲げる企業においても、同様の 1.5℃目標と整合的な排出削減目標を立てている。オフセット・クレジットを積極的に購入することで知られるマイクロソフト社は、2030 年までに排出ネットゼロの達成を目標として掲げている。現在の同社の温室効果ガス排出量は年 1,200 万トン CO_2e であるが、2030 年にはこれを 500 万トン CO_2e 程度まで削減するとしている。同時にオフセットを増大させ、2030 年には 500 万トン CO_2e 以上のオフセットを実現し、カーボンネガティブへ突入するとしている。同社は、2022 年度は 150 万トン CO_2e のクレジット購入について 21 のオフセット・プロジェクトと契約した（Microsoft, 2022）。

オクスフォード・オフセット原則

自主カーボン・クレジット市場において取引されているクレジットのほとんどが、再生可能エネルギーや森林、土地利用といったプロジェクトが発行したものである。これらは排出削減を実現するプロジェクトである。オクスフォード大学は、排出削減のオフセットではネットゼロは達成できないと指摘している。最終的に削減しきれない残余排出量は、カーボンを大気中から除去するプロジェクトに由来するクレジットでオフセットする必要があるからだ。オクスフォード大学は、ネットゼロが達成できるよう自主カーボン・クレジット市場の参加者に向けてオクスフォード・オフセット原則を提案している（Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford, 2020）。

オクスフォード・オフセット原則では、企業はまずは自らの温室効果ガス排出の削減に取組むべきであり、先に削減のオフセットありきではないとする。排出削減のオフセットは、大幅な削減が求められ

るトランジションにおいて一時的に利用されるだろうが、最終的に削減しきれない残余排出量の部分は、カーボン除去・クレジットによってオフセットされる。したがって、二酸化炭素を大気中から除去するカーボン除去クレジットへのシフトを提案している。

前出のマイクロソフト社が購入した 150 万トンのクレジットのうち 149 万トンは森林、土地利用のプロジェクトであり、削減・クレジットである。しかし、2030 年のカーボンネガティブ時には、500 万トン以上のオフセットが予定されているが、全量カーボン除去・クレジットを利用する計画である。

5. カーボン除去・クレジットとは

カーボン除去 (Carbon Dioxide Removal, CDR)とは、大気中から二酸化炭素を回収し、土壌や海洋、製造物に半永久的に閉じ込めることを指し、マイナスの CO_2 排出(Negative CO2 Emission)とも呼ばれる。

Puro.earth は、カーボン除去のオフセット・プロジェクト専門の認証機関であり、カーボン除去・クレジット(CO_2 Removal Certificate, CORCs)を発行している。CORC s 対象となるオフセット・プロジェクトは、二酸化炭素を大気中から回収し、50 年以上閉じ込めるなどの条件を満たしたもので、1) バイオ炭、2)炭酸含有コンクリート、3)木造建造物、4)地質的炭素貯留の 4 種類である。

図表 5　CORC s 対象カーボン除去・プロジェクト

バイオ炭 (Biochar)	生物資源を材料とした、生物の活性化および環境の改善に効果のある炭化物。土壌改良用の木炭などは、植物が吸収した CO_2 を長期間に亘って土中に固定する。
炭酸含有コンクリート (Carbonated Building Elements)	製鉄の鉱滓などから製造されるコンクリートで、製造過程で排出する以上の CO_2 を含有する。
木造建造物 (Wooden Building Elements)	欧州では木造建築の耐久年数は 50 年と定められている。木造建築は森林が吸収した CO_2 を長期間に亘って固定する。
地質的炭素貯留 (Geologically Stored Carbon)	DAC や BECCS に地中貯留を組み合わせたもの。 *Direct Air Capture (空気から CO_2 分離回収) *BECCS

（出所）Horta, E. (2020)より日興リサーチセンター作成

しかし、多くのカーボン除去のプロジェクトは、スタートアップあるいは研究開発の段階であるものが多く、CORC s のような認証を取得したクレジットを発行できていない。そのため、自主カーボン・クレジット市場においてカーボン除去・クレジットはほとんど流通していない。

6. オフセット・クレジットの価格

Forest Trends' Ecosystem Marketplace (2021)によると、2021 年度の流通クレジットは、約 2.4 億トン CO_2e であり、平均単価は 3.13 ドル/トン CO_2e、市場規模は 7.48 億ドルとみられる。2020 年の平均単価は、2.51 ドルと新型コロナウィルスの感染拡大による経済的な落ち込みの影響を受けて、2019 年の 3.07 ドルより低下したが、2021 年は 3.13 ドルと 2019 年のレベルに戻している。自主カーボン・クレジット市場におけるクレジットの価格は、３年間を見る限り上昇傾向はない。

2021 年のクレジットの種類別にみると、大半を占める森林、土地利用が 4.73 ドルと最も高い価格で取引されている。一方、再生可能エネルギーやエネルギー効率性、エネルギー転換などは 1 ドル台であり、ほとんど最低価格の様相である。

図表６　クレジット流通量、単価、出来高（３年間）

	取引量 （百万トン）	単価 （米ドル）	出来高 （百万米ドル）
2019年全体	104	3.07	320
2020年全体	188	2.51	473
2021年全体	239	3.13	748
（2021年内訳）			
森林、土地利用	115	4.73	544
再生可能エネルギー	80	1.11	88
産業ガス（代替フロン）、製造工程	1	2.93	4
エネルギー効率性、エネルギー転換	16	1.50	24
ごみ処理（メタン回収）	3	3.93	11
輸送	2	1.00	2
農業、畜産	3	1.35	5
その他	19	3.75	71

(出所) Forest Trends' Ecosystem Marketplace (2021)より日興リサーチセンター作成

カーボン除去・クレジットの価格

現状、カーボン除去・クレジットは市場にはなく、多くのカーボン除去・プロジェクトはスタートアップあるいは研究開発の段階である。Stripe 社[4]は、2020 年より Stripe Climate プログラムを立ち上げ、カーボン除去・プロジェクトに投資している。2020 年は 100 万ドルのカーボン除去・クレジットを購入する契約を４つのカーボン除去・プロジェクトと交わし、2021 年は 6 プロジェクトと合計 275 万ドルの契約を結んだ。

[4] 米国の金融サービスと SaaS 企業。ネットショップの決済処理ソフトウェアなどを提供している。

図表７　Stripe Climate 投資のカーボン除去・プロジェクト（2021 年）

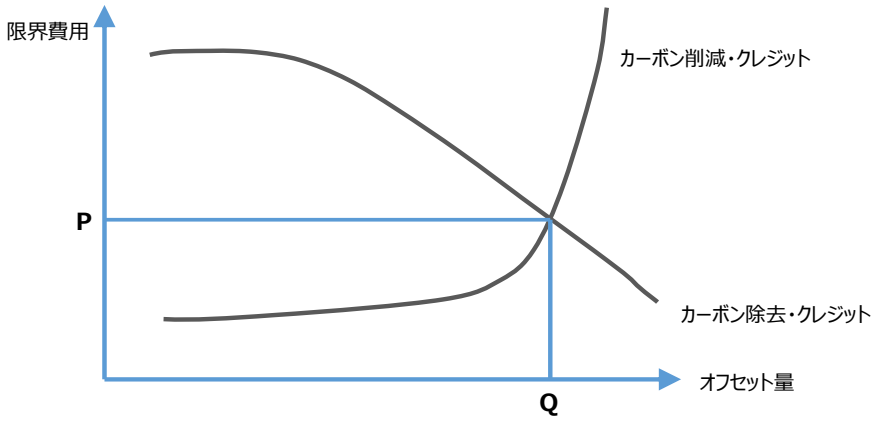
プロジェクト名	カーボン除去の内容	除去クレジット単価（ドル/トン CO_2e）
Carbon Built	希釈した CO_2 で大理石を形成	260
Heirloom	DAC から鉱化し貯蔵	2,054
Running Tide	昆布を養殖し海洋に沈める	250
Seachange	電気化学的実験海水に CO_2 を溶かし込む	1,370
Mission Zero	DAC+貯留	319
The Future Forest Company	Mineral Weathring 実験（カーボン除去ではない） 玄武岩を破壊して森林に撒き、CO_2 吸収を計測	200

（出所）Stripe.(2021)より日興リサーチセンター作成

ネットゼロを達成するカーボンプライシング

自主カーボン・クレジット市場で取引されている削減・クレジットは、排出削減の限界費用とみることができる。ある企業では、温室効果ガス排出の削減余地が十分ある場合、まずは費用ゼロの削減をすすめると考えられる。次に、費用ゼロの削減策が尽きると、費用が発生する削減にも取組むが、費用の安いものから順次取り組むと考えられる。追加的な削減の費用と自主カーボン・クレジット市場のクレジット価格を比較し、クレジット価格の方が安くなった時点で、クレジットを購入しオフセットする。したがって、クレジット価格は、企業の排出削減の限界費用と一致する。2021 年のクレジット価格は 3.13 ドルであったことから、この時点の企業の排出削減の限界費用は 3.13 ドルと考えることができる。今後、1.5℃目標に整合的な排出削減経路に沿って削減を進めると、排出削減の限界費用は高次関数的に増加していくだろう。

図表８　ネットゼロ時のカーボン価格（モデル図）



（出所）日興リサーチセンター作成

一方、除去・クレジット市場はまだ成立しているとは言い難いかもしれないが、Stripe Climate プログラム採用のカーボン除去・プロジェクトのクレジット単価は 250 ドル～2,054 ドルである。今後、技術が進展し、量産化されていくにつれ追加的なカーボン除去の費用は低下していくと考えられる。最終的に、排出削減の限界費用とカーボン除去の限界費用が一致するところで、残存排出量(Q)とカーボン除去によるオフセット量(Q)が一致し、ネットゼロが達成される。このときのカーボン価格(P)は、3.13 ドルと 2,054 ドルの間にある。どのようなオフセット量（Q）とカーボン価格（P）の組み合わせが実現するかは、削減技術と除去技術の進展度合いによると考えられる。除去技術が相応にすすめば、比較的大きな残存排出量を残してネットゼロが達成されるが、除去技術がすすまなければ、残存排出量は限りなくゼロに近づき、カーボン価格（P）は上昇するだろう。

7. まとめ

自主カーボン・クレジット市場は企業のオフセットニーズから拡大しているが、ほとんどが排出削減をオフセットするクレジットである。ネットゼロまでのトランジションにおいて、排出削減クレジットによって、企業の排出削減をオフセットすることは可能であるが、ネットゼロ時点に残る削減しきれない温室効果ガス排出は、カーボン除去・クレジットによってのみオフセットできると考えられる。現在、削減クレジットは平均 3 ドル程度で取引されているが、企業にコストのかからない削減余地がまだ十分あることを示していると考えられる。削減が進展すると削減クレジットの価格は上昇し、ネットゼロ達成時には、カーボン除去・クレジットの価格と一致すると考えられる。

参考文献

Black, R., Cullen, K., Fay, B., Hale, T., Lang, J., Mahmood, S., Smith, S.M. (2021). Taking Stock: A global assessment of net zero targets, Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero.

Forest Trends' Ecosystem Marketplace. (2021) 'Market in Motion'. State of Voluntary Carbon Markets 2021. Installment 1. Washington DC: Forest Trends Association

World Bank. (2020, May) State and Trends of Carbon Pricing 2020. World Bank. Washington DC. Doi: 10.1596/978-1-4648-1586-7.

World Resources Institute. (2010) The Bottom Line on Offsets. Retrieved from https://www.wri.org/research/bottom-line-offsets

McKinsey & Company. (2021) A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge. Retrieved from https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge.

Microsoft. (n.d.). Microsoft will be carbon negative by 2030 - The Official Microsoft Blog. Retrieved from https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/

Microsoft. (2022). Microsoft Carbon Removal: An Update with Lessons Learned in Our Second Year. Retrieved from https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RE4QO0D

Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford. (2020) The Oxford Principles for Net Zero Aligned Carbon Offsetting. Retrieved from https://www.smithschool.ox.ac.uk/publications/reports/Oxford-Offsetting-Principles-2020.pdf

Horta, E. (2020) How can carbon removal help companies become carbon neutral?. ForTheDoers Blog. Retrieved from https://www.fortum.com/about-us/blog-podcast/forthedoers-blog/how-can-carbon-removal-help-companies-become-carbon-neutral#:~:text=CO2%20Removal%20Certificates%20are%20digital,from%20cradle%2Dto%2Dgate.

Stripe. (2021) Stripe commits $8M to six new carbon removal companies.ニュースルーム. Retrieved from https://stripe.com/newsroom/news/spring-21-carbon-removal-purchases

環境省.(2018) 1.5℃特別報告書　政策決定者向け要約（SPM）の概要 . Retrieved from https://www.env.go.jp/press/files/jp/110087.pdf

環境省. (2022) IPCC AR6/WG3 報告書の政策決定者向け要約の概要 . Retrieved from https://www.env.go.jp/press/files/AR6WG3_SPM.pdf

（END）

日本企業のインターナルカーボンプライシングの動向について

2022 年 4 月

社会システム研究所 主任研究員　　杉浦　康之

1. インターナルカーボンプライシングについて

インターナルカーボンプライシング（Internal carbon pricing、以降 ICP）とは、企業自らが気候リスクを経営に反映させるために導入する、主に二酸化炭素への価格付けのことを指す。近年の気候変動に対する意識の高まりや排出関連の規制が将来強化される見込みなどから、気候変動に影響を及ぼす二酸化炭素を排出し続けることを財務的なリスクとして捉える。そして、このようなリスクを軽減するため、二酸化炭素を金銭的に評価し、それを設備投資や事業機会など、長期的な経営の意思決定に反映する。すなわち ICP とは企業自らが低炭素へ移行し、それを管理する手法の一つである。

2014 年初期の調査では、世界で 150 の企業が ICP を導入していた（CDP(2014)）。導入当初のインターナルカーボンプライス（以下、ICPs）は 0.1~360 USD/トンであり、まだ広範で一般化された方法が確立されていなかった。そのため、WBCSD（持続可能な開発のための世界経済人会議）は 2015 年にガイドラインを公表し、ICP を導入した世界 14 企業の具体的な事例、カーボンプライスを設定するまでの企業内での一連のプロセスを紹介するなど、実践的なガイドラインを提示した（WBCSD(2015)）。こうした取り組みにより、2020 年時点では世界で 853 社が導入している（CDP（2020））。

非財務情報の開示でも ICP の導入とその開示を提言している。TCFD（気候変動財務情報タスクフォース）は 2017 年に公表した開示の実務書”Implementing the recommendations of the task force on climate-related financial disclosures”の中で、指標と目標（Metrics and Targets）に関する開示の一つとして、戦略とリスク管理に沿って評価する際に ICPs の開示を提言している。これに続き、ISSB（国際サステナビリティ基準審議会）も 2021 年に公表した気候関連開示のプロトタイプ”Climate-related Disclosures Prototype”の中で TCFD と同様に、指標の一つとして開示を求めている。

日本では、環境省が 2020 年 3 月に「インターナルカーボンプライシング活用ガイドライン」を公表し、ICP の導入の意図、価格設定のプロセスや ICP の活用方法、価格の運用プロセスなどの紹介だけでなく、海外企業の事例や「インターナルカーボンプライシング活用支援事業参加企業」に応募した国内企業 13 社の導入ケースを紹介している。

以下では、インターナルカーボンプライシング導入の意図とその事例について紹介し、さらに日本企業における直近 3 年間の ICP 導入状況や、ICPs の状況について確認する。

2. ICP 導入の意図と事例

企業が ICP を導入する意図について、WBCSD(2015)によれば、「将来の企業の意思決定に反映させる」ことと「企業の現在の炭素排出削減を促す」ことの 2 つが挙げられている。以下では、この 2 つの意図について説明する。

① 将来の企業の意思決定に反映させる

「将来の企業の意思決定に反映させる」とは、資本投資（設備投資）、リスク管理、戦略的な計画（エネルギー効率の高い製品開発など含む）など長期的な企業経営の意思決定の中で、将来排出される二酸化炭素を金銭的に加味して事業評価を行うことを指す。このとき、ICPs は実質的な費用に基づくのではなく、例えば二酸化炭素の排出削減によって産業革命以降の気温上昇を 2100 年までに 2 度未満に抑えることができると想定した時に見積もられる炭素の社会的費用（Social cost of carbon）や将来生じる可能性のある炭素税など、仮想的な価格を用いる。ICPs を反映させることで、設備投資や新しい事業プロジェクトの採用において、炭素効率の低い事業から高い事業に転換することが狙いである。WBCSD(2015)は、このような意図で利用する際の炭素価格を Shadow price と呼んでいる。こうした将来の企業の意思決定に反映させた事例として、以下の 2 つを紹介する。

【事例 1 ：ルノーの vehicle projects[1]】

フランスの自動車会社ルノーは、ICPs を 1 トン当たり 450 ユーロ（450 ユーロ/トン）と設定している。この価格は、欧州の企業別平均燃費基準（CAFE）やその他地域における炭素排出関連規制などの規制を考慮した価格であり、排出削減に関連した技術開発についての決定の際に用いる。

【事例 2 ：トタル[2]】

フランスのエネルギー企業であるトタルは、石炭からガスへの転換を促進し、CCUS 技術への投資を促すことを目的に、ICP を 2008 年から導入している。ICPs は当初 25 ユーロ/トンで設定し、2016 年からは 30~40USD/トンと設定している。同社では、化石燃料の排出について 50%削減することを目指している。

② 企業の現在の炭素排出削減の行動を促す

「企業の現在の炭素排出削減の行動を促す」とは、エネルギーを効率化するなど、不必要なエネルギーの利用を抑制するなど、炭素排出を抑制するように企業内の行動を変革することを指す。こうした価格は、排出削減に実質的にかかる費用（見込み額なども含む）や EU-ETS などの排出権取引価格などでの排出権購入価格などを基にしている。WBCSD（2015）では、この価格を Carbon Fee と呼

[1] https://www.renaultgroup.com/en/2020-Universal-Registration-Document/162/

[2] I4CEO(2016)参照

んでおり、その事例として以下が挙げられる。

【事例３：マイクロソフト[3]】

マイクロソフトでは、2013 年より社内炭素費用制度を導入し、各事業ユニット（データセンター、オフィス、研究所、製造、飛行機を利用した出張）で生じる炭素排出を金銭的に評価している。開始当初は 4~5 USD/トンと設定し、2019 年からは 15 USD/トンとしている。各事業ユニットで排出量を基に集められた資金（Carbon fee investment fund）をもとに、100 億キロワット以上のグリーン電力（うち 30 億キロワットは再生エネルギー）を購入している。また、当資金は 60 万トンの二酸化炭素をカーボンオフセットプロジェクトにも充当し、総計で 750 万 CO_2-e トン程度の削減に貢献している。同社では、2030 年までにカーボンネガティブを目指している。

【事例４：ルノーの industrial installations[4]】

ルノーは、上述の“vehicle projects“とは別に、自動車製造時の直接的な排出を削減することを目的に ICP を導入している。ICPs は、エネルギー市場や EU-ETS などの価格を参照し、25 ユーロ/トン（2020 年時点）と設定している。

3. 日本企業の ICP の導入の状況と価格

次に、日本企業の ICP 導入の状況と価格について確認する。ここでは CDP（カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト）が提供する 2019 年から 2021 年の 3 年間のデータを用いる。CDP はグローバルで、気候変動に関する開示を求める非営利団体であり、各企業は任意で回答している。CDP に回答する日本企業は年々増加しており、2021 年時点では 536 社が回答し、このうち上場企業は 402 社である（図表 1 参照）。

図表 1　CDP 回答企業数

質問年	回答社数	うち上場企業
2019	427	317
2020	506	364
2021	536	402

（出所）日興リサーチセンター

CDP 回答企業のうち、ICPs を導入した日本企業の社数（複数の ICPs を設定している企業を含むため、延べ数）を確認すると、2019 年が 78 社、2020 年が 96 社、2021 年が 126 社となっており、合

[3] 以下を参照。https://blogs.microsoft.com/on-the-issues/2019/04/15/were-increasing-our-carbon-fee-as-we-double-down-on-sustainability/,https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/financing-for-climate-friendly/microsoft-global-carbon-fee , Addicott et al.（2019）など

[4] 脚注 3 参照。

計 300 社が確認された。ただし、通貨単位（円、ドル、ユーロなど）/トン以外の単位（円/Kw など）で回答している企業、また価格については未回答としている企業なども含まれている。そのため、以降の分析ではデータの統一性という観点から、未回答企業と通貨単位/トン以外で回答していると確認された企業を除外し、延べ 297 社について言及する。

ICP 導入 297 社の特徴は以下のとおりである。ICP 導入企業のうち上場しているのは 292 社と、ほとんどが上場企業である。規模については、時価総額[5]5,000 億円以上の企業が 225 社、そのうち 1 兆円以上の企業が 146 社であった。したがって、現在の ICP 導入は大規模時価総額の上場企業が中心となっている。

図表 4 は 3 年間と全体の ICPs の記述統計量である。ICPs 回答企業の多くは円ベースでの回答であるが、一部はドル、ユーロなどで回答している。これら価格については、各企業による回答日の前月末仲値を用いて円に換算している。全 297 社の平均値は 14 万 5,259 円、中央値で 5,000 円、最小で 200 円、最大で 2,000 万円であった。経年変化をみると、平均値は 2019 年の 38,978 円/トンから 2021 年の 276,934 円/トンと大幅に上昇している。中央値でも、2019 年では 3,500 円/トンに対し、2021 年では 5,000 円/トンと変化している。25%点（下位 1/4）でも同様の傾向（1,500 円/トンから 2,600 円/トン）が確認されたが、75%点（上位 1/4）では 15,000 円/トンから 10,000 円/トンに落ちている。したがって、価格の上位・下位を除けば、ICPs 全体では年々高く設定される傾向にあると同時に価格の範囲も狭まりつつある。

なお、Stiglitz and Stern(2017)が 2020 年の炭素価格[6]を USD40～80/tCO_2（1 ドル 110 円とすれば、4,400～8,800 円/t-CO_2）としていたことと比べると、日本企業の ICPs はやや広範な価格帯である。

図表 4　炭素価格（円/トン）の記述統計量

年	_N_	平均	標準偏差	最小	25%点	中央値	75%点	最大
2019	77	38,978	134,739	200	1,500	3,500	15,000	1,000,000
2020	95	54,250	236,166	200	2,000	4,700	14,000	2,000,000
2021	125	276,934	2,046,029	200	2,600	5,000	10,000	20,000,000
全体	297	145,259	1,337,599	200	2,000	5,000	12,500	20,000,000

（出所）日興リサーチセンター

こうした ICPs に対して、CDP では価格のタイプを設定している。価格のタイプとして Shadow price、Implicit price、Internal fee、Internal trading、Off set の 5 つを設け、回答企業は、その中から複数選択できる（図表 3 参照）。

[5] ここでは決算期間 1 年間の平均値を基にしている。
[6] ここでは単位がトンではなく CO2 トンを利用している。

図表３　CDP による炭素価格のタイプ

炭素価格のタイプ	定　　義
Shadow price	オペレーションやサプライチェーン上のリスクと機会を反映し、理論上のコストを計上した価格。将来の資本投資の意思決定に影響する
Implicit price	排出量削減または再生可能エネルギー目標を基に、削減した CO2 換算トン当たりの削減・調達費用額
Internal fee	事業部門ごとに炭素排出量に応じて課金する際の価格。これらのプログラムで集めた資金をクリーン・テクノロジーなどに活用する
Internal trading	社内取引メカニズムによって、事業部門ごとに割り当てられた炭素クレジットを取引する際の価格
Off set	炭素市場にて自主的に排出権を購入し、相殺する際の価格

（出所）日興リサーチセンター

しかし、ICP の導入は WBCSD(2015)が示すように、2 つの意図が考えられる。すなわち、①「将来の企業の意思決定に反映させる」こと（Shadow price）と②「企業の現在の炭素排出削減の行動を促す」こと（Carbon fee）である。上記 5 つの価格のタイプを分類すれば、CDP が定義する Shadow Price のみが①に該当し、残りの 4 つ（Implicit price、Internal fee、Internal trading、Off set）は②に該当する。この二つのタイプの価格の導入状況を確認すると、ICP 導入企業のうち 5 割（167 社）は Shadow price を採用している。また、このうち 146 社は Shadow price のみを選択しており、ほとんどの企業は Carbon fee と併用していない。

4.　ICP 導入の意図とインターナルカーボンプライス

ここでは、上述の二つの意図である、Shadow price と Carbon fee の価格がどのように分布しているのかを確認する。一部の企業は Shadow price と Carbon fee を同時に選択しているが、ここでは重複したデータを含めて分析を行う。

図表 5 は、Shadow price と Carbon fee の記述統計量である。Shadow price の平均は 12,487 円/トンに対し、Carbon fee は 280,700 円/トンと高い。だが、中央値を比較するとそれぞれ、5,000 円/トン、4,329 円/トンと価格差がほとんどない。さらに、25%点と 75%点を見ると、Carbon fee が Shadow price に比べ価格の幅が広いことがわかる。

図表５　ICP 導入の動機と記述統計量

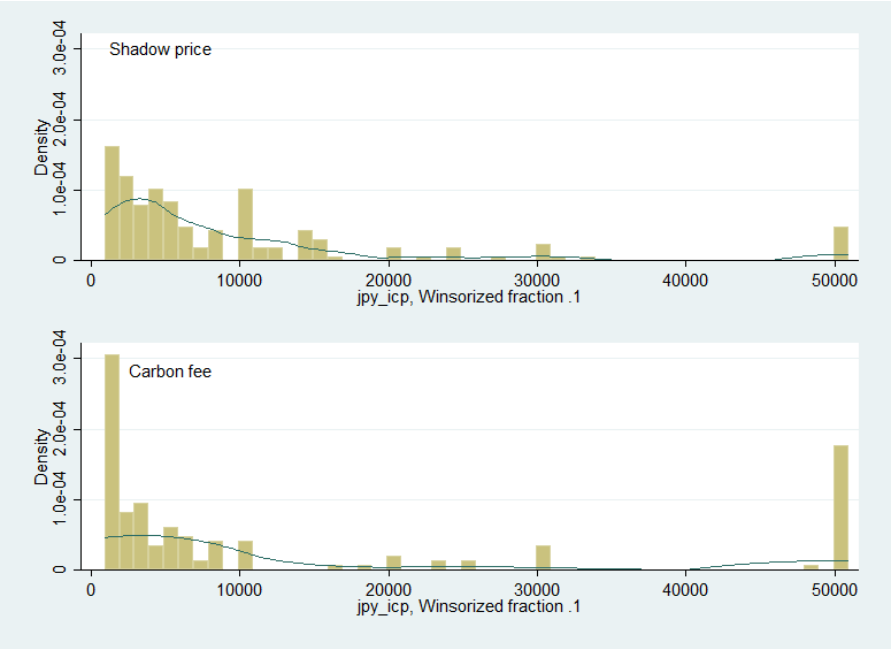
価格のタイプ	_N_	平均	標準偏差	最小	25%点	中央値	75%点	最大
shadow price	167	12,487	28,074	289	2,500	5,000	10,500	200,000
carbon fee	147	280,700	1,894,713	200	1,500	4,329	20,000	20,000,000
全体	297	145,259	1,337,599	200	2,000	5,000	12,500	20,000,000

（出所）日興リサーチセンター

さらに、二つの価格のタイプの分布を確認するため、Shadow price、Carbon fee のヒストグラムと推定された確率分布（カーネル密度推定）を確認した（図表 6 参照）。なお、価格の幅が非常に広いため、上下 10%点でウィンザライゼーション（上位 10%点を上回る値、下位 10%点を下回る値を各 10%点の値に変換する異常値処理の方法）を行った。

図表からも、Carbon fee と Shadow price の分布の違いが確認される。ヒストグラムから確認できるように、Carbon fee では、900 円/トン（全体の 10%点）以下や 5 万円/トン（全体の 90%点）を超える価格の設定、3 万円/トン付近（全体の 75%点を超える価格）の価格を設定する企業も相対的に多い。こうした価格は、参照する価格（排出権取引価格や炭素税など）の違いや企業が実質的にかけたコストによる違いが影響していると考えられる。

図表 6　各導入の意図に対する価格分布



（出所）日興リサーチセンター

5.　まとめ

本稿では、日本企業のインターナルカーボンプライシングの導入について確認した。ICP は上場する大型企業が主に導入して、その数も増加傾向にある。その価格は、200 円/トンから 2,000 万円/トンと幅広く設定されている。

ICPs を Shadow price と Carbon fee の二つの意図に分けて、分布を比較すると、Carbon fee は分布する価格の幅が広く、さらに 900 円以下や 5 万円以上といった価格を設定する企業が Shadow price に比べ相対的に多い。Carbon fee がこのような分布となるのは、参照する価格（排出権取引価格や炭素税など）の違いや企業が実質的にかけたコストの違いなどが影響していると考えられる。

だが、2 つの分布の違いは、その利用目的による影響も考えられる。Carbon fee は実質的なコストを示しているのに対し、Shadow price は企業価値や事業選択などの意思決定に気候変動を反映することで、将来の投資行動に変化をもたらす意図がある。つまり、Shadow price の価格の決定には、将来の排出削減のシナリオだけでなく、企業やセクターの競争力やガバナンスといった固有の問題など様々な影響が考えられる。さらに、そうした価格を基にした意思決定は、企業価値にも影響を与える可能性がある。ICPs の価格決定の背景や ICP の導入の効果などを今後さらに分析していくことが必要となるであろう。

参考文献

Addicott, E., A. Badahdah, L. Elder, and W. Tan (2019). Internal Carbon Pricing: policy framework and case study.

CDP. (2014). Global corporate use of carbon pricing: Disclosures to investors.

CDP. (2020). Putting a price on carbon: The state of internal carbon pricing by corporates globally.

Stiglitz, E. J., and N. Stern. (2017). Report of the High-Level Commission on Carbon Prices.

I4CEO. (2016). Internal carbon pricing: A growing corporate practice.

WBCSD. (2015). Emerging Practices in Internal Carbon Pricing.

（END）

EU ETS を参考にした排出量取引市場の多期間分析

2021 年 10 月
投資工学研究所　　後藤　誠也
川﨑　正勝

1．はじめに

世界的にカーボンニュートラルを目指す動きが活発化している。国内においても、2020 年 10 月に 2050 年カーボンニュートラルの実現を宣言して以来、温室効果ガス排出削減のための技術や制度への関心が高まっている。なかでも、削減に対して経済的インセンティブを与える手法は注目度が高く、例えば、経済産業省は 2022 年から新たな排出量取引の実証開始を目指している[1]。

排出量取引制度とは、排出許可証を意味する「排出枠」や排出削減認定証のような「クレジット」を取引することによって、排出削減を促す制度である。制度対象者全体の排出量を制限することが可能であるが、需給によって変動する炭素価格の安定化が課題になる。例えば、価格の低下は、排出削減に関する技術開発への投資を阻害する恐れがある。排出量取引で先行する欧州では、2005 年の制度開始以来、幾多の改正をおこない価格の安定化に努めてきた。欧州委員会が 2021 年 7 月にまとめた制度改正案（欧州委員会[2021b]）においても、付属資料で需給のショックが価格に及ぼす影響を分析している。

したがって、排出枠やクレジットの需給が変化した時に、炭素価格がどのような影響を受けるのかを理解することは、制度設計者や取引参加者にとって重要である。本稿では、欧州委員会[2021b]と同様に、Quemin and Trotignon[2021]の多期間の総費用最小化モデルを参考にして、需給のショックの炭素価格への影響を調査する。価格変動の方向性や規模が分かれば、制度設計者は価格安定化策の必要性を検討することができ、取引参加者は価格変動リスクを低減することが可能となる。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章では、欧州排出量取引制度で採用されているキャップ＆トレードの仕組みと排出枠の需給について説明を行う。3 章では、欧州委員会が用いたモデルを参考に、問題設定を行う。4 章では、モデルを用いてシミュレーションを行い、需給のショックが価格に与える影響を分析する。最後に、5 章でまとめと今後の課題を述べる。

2．欧州排出量取引制度の概観[2]

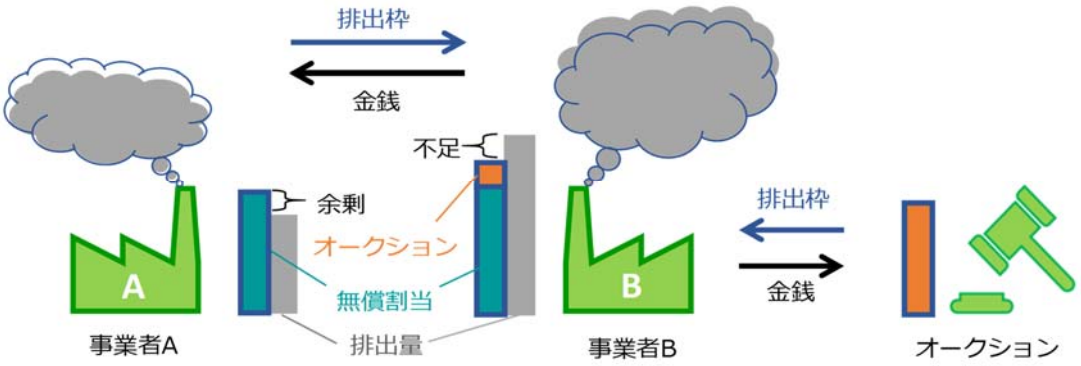
欧州排出量取引制度（European Union Emissions Trading System、以下 EU ETS）は 2005 年に

[1] 経済産業省は 2021 年 2 月から「世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法等のあり方に関する研究会」を実施している。https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral_jitsugen/index.html

[2] 本章は、上野・水野[2019]、EU ETS ハンドブック（欧州委員会[2015]）、制度改正案（欧州委員会[2021b]）、欧州委員会 HP の EU ETS の説明（https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en）を参考にした。

開始された代表的な排出量取引制度である。2030 年までに欧州連合の温室効果ガスの排出量を 1990 年対比で 55%削減するという目標達成に向けた政策の中心として機能している。EU ETS において市場で取引されているものは、排出許可証を意味する排出枠である。EU ETS における排出枠は EUA（European Union Allowance）と呼ばれ、二酸化炭素換算で 1 トンの温室効果ガス（1 tCO_2-eq）を排出する権利である。EUA は毎年発行量にキャップと呼ばれる上限が決まっており、無償割当またはオークションによって配分される。制度に含まれる事業者は、各年に排出する温室効果ガスに相当する EUA を、翌年の 4 月 30 日までに償却しなければならない。排出量に対する過不足を調整するために、EUA を売買取引（トレード）することも可能である。このような仕組みをキャップ＆トレードという。図表 1 はキャップ＆トレードに基づいた排出量取引のイメージ図である。

図表 1　キャップ＆トレードに基づいた排出量取引



（出所）EU ETS ハンドブック（欧州委員会[2015]）より日興リサーチセンター作成

図表 2　キャップ＆トレードの利点

利点	内容
量に関する確実性	温室効果ガス排出量の上限（キャップ）を設定し、事業者全体の排出量を直接制限することが可能。
費用対効果	排出量取引を通じた合理的な価格決定や企業間の排出削減量の柔軟化により、目標達成のための費用最小化が期待される。
財源の獲得	排出枠のオークションが政府の収入源となる。

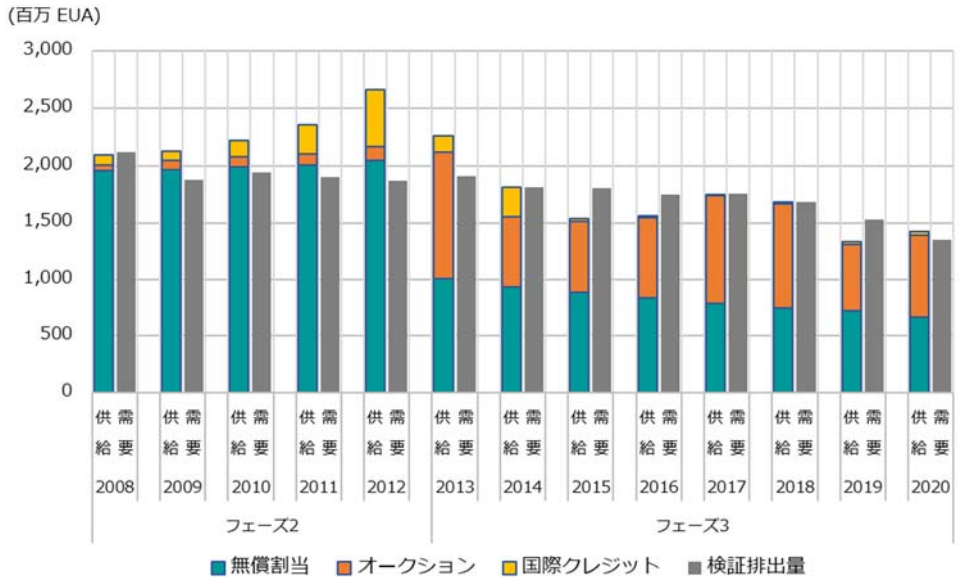
（出所）EU ETS ハンドブック（欧州委員会[2015]）より日興リサーチセンター作成

図表 2 は欧州委員会がキャップ＆トレード型排出量取引制度を採用した背景にある利点である。一つ目の利点として、キャップ＆トレードでは、キャップを設けることで排出量を直接制限できることが挙げられる。カーボンプライシングにおける他の代表的な制度である炭素税では、削減目標が達成される

ことを保証することができない。二つ目に、理想的な市場では、排出枠を取引することで、合理的な価格の決定と企業間の排出削減量の調整ができ、最小の費用で目標を達成することが期待される。炭素税では、排出削減目標を達成するために適切な税率を決定することは困難であり、すべての加盟国が税率に合意することも難題である。また、排出削減を各企業に義務づける政策では、企業間で最適な排出削減量の分担ができず、費用最小化は難しい。最後に、加盟国政府は、排出枠をオークションで売り出すことで収入を得ることができ、排出削減技術へ投資することもできる。

図表 3 はフェーズ 2（2008 年から 2012 年）とフェーズ 3（2013 年から 2020 年）の固定施設[3]における排出枠の供給量と需要量である。フェーズ 2 では、供給の大部分が無償割当だったが、フェーズ 3 からはオークションによる割当が増加し、約半分を占めるようになった。国際クレジットは、過去には京都議定書で規定されたクレジットである ERU と CER に対しては EUA への変換が認められており、2012 年にピークを迎えた。その後、段階的に使用範囲が制限されて減少し、現在のフェーズ 4 では国際クレジットの変換は認められていない。需要は、温室効果ガスの検証排出量によって償却された量を表している。参加国の変化などから単純比較はできないが、排出量に減少傾向があることが確認できる。

図表 3　欧州排出量取引制度の固定施設における排出枠（EUA）の供給量と需要量



（出所）European Environment Agency[4]、EU HP[5]より日興リサーチセンター作成

[3] EU ETS は発電所や産業施設などの固定施設と航空を対象としている。改正案では、海運、道路輸送、建物なども対象となる。

[4] European Union Emissions Trading System (EU ETS) Data from EUTL
https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/european-union-emissions-trading-scheme-16

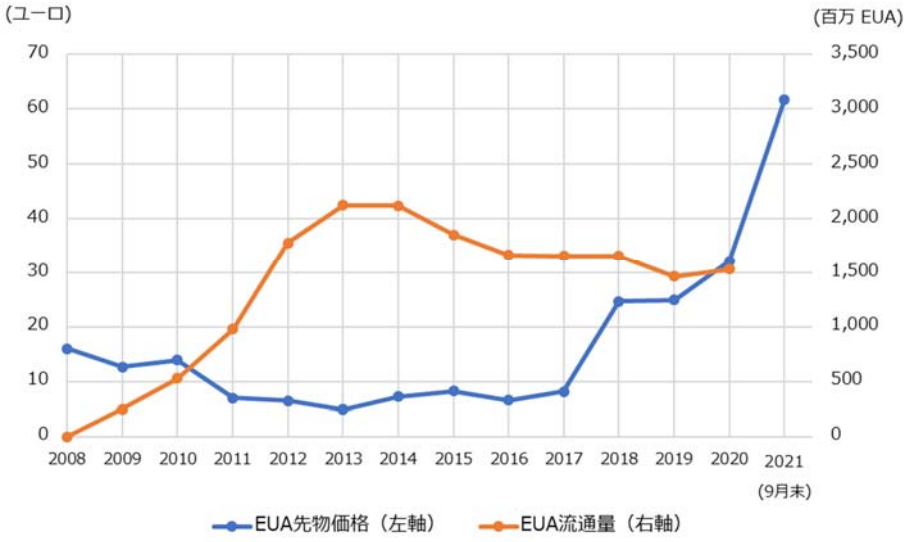
[5] 2013～2020 年の国際クレジット変換量は翌年 4 月 30 日までの値を EU の HP から取得した。「Updated information on exchange and international credits' use in the EU ETS」というタイトルで報道されている。
https://ec.europa.eu/clima/news-your-voice/news/updated-information-exchange-and-international-credits-use-eu-ets-2021-05-25_en

図表 4 は排出枠の先物価格と流通量の推移である。流通量は以下の式で計算される。

$$t\text{年の流通量} = t-1\text{年の流通量} + \left(t\text{年の供給量} - t\text{年の需要量} \right) \quad (\text{式 1})$$

つまり、流通量は供給量から需要量を差し引いた値の累積値である。フェーズ 1 からフェーズ 2 への排出枠のバンキング（持越し）は認められなかったので、フェーズ 1 の終了年である 2007 年の値を 0 として計算する。流通量は欧州委員会からも公表されており、2020 年の値は約 1,579 百万 EUA である（欧州委員会[2021a]）。過去を振り返ると、2013 年頃にかけて流通量が増加し、先物価格は下落した。これは、リーマンショック後の経済環境の悪化による需要減や積極的な国際クレジットの変換による供給増で、排出枠が余剰となったためと考えられる。この状況を踏まえ、欧州委員会は 2014 年から 2016 年にオークションにかけられる排出枠を合計で 900 百万 EUA だけ先延ばしすることを決定し、供給量の調整を図った。その結果、流通量は減少し、価格も安定した。2019 年には、排出枠の流通量の調整を行う市場安定化リザーブ（MSR：Market Stability Reserve）が開始され、先延ばしされた排出枠が留保され、価格の上昇に影響した。直近では価格が 60 ユーロを超え、急激に上昇している。これは、欧州連合の排出削減目標の引き上げに対する反応であり、排出枠の価格には需給の見通しが関係していることが窺える。

図表 4　排出枠の先物価格と流通量



注：2021 年は 9 月末時点、その他は 12 月末時点の値。

（出所）流通量は European Environment Agency、先物価格は FactSet より日興リサーチセンター作成

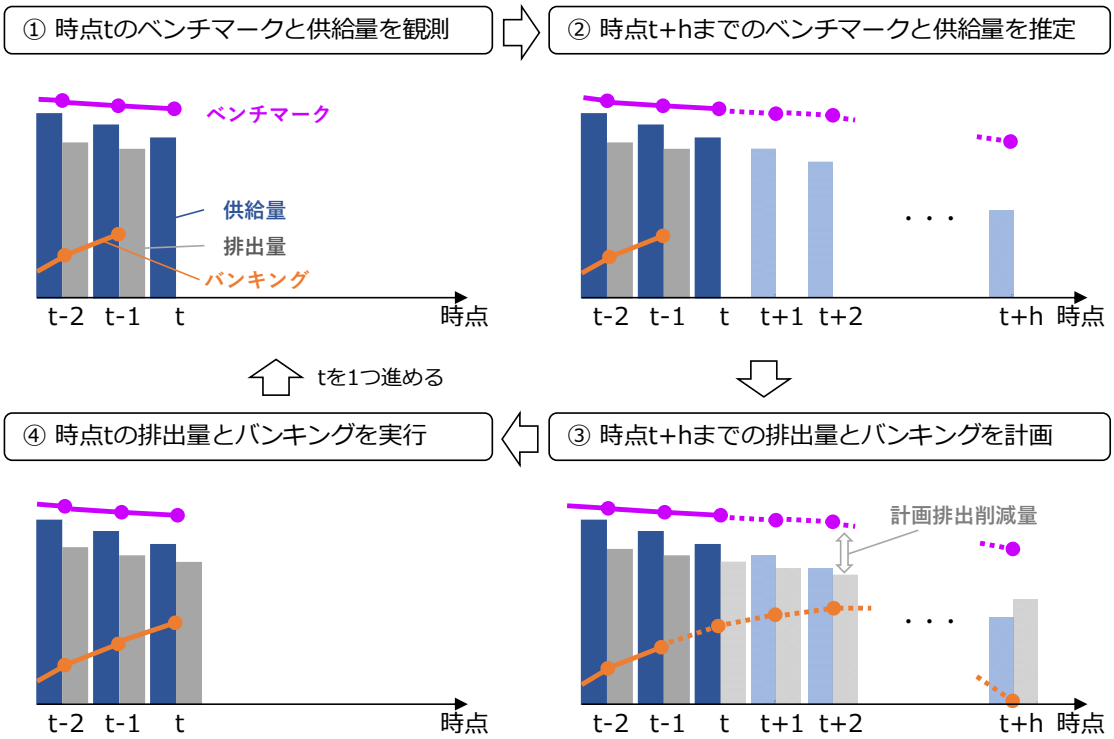
3. 排出量取引の多期間最適化モデル

欧州委員会[2021b]は、Quemin and Trotignon[2021]によるモデルを用いて、市場安定化リザーブ

による調整が入る流通量の閾値等を比較し、EU ETS 改正案の影響を分析した。本稿では、より簡便に市場安定化リザーブが存在しない標準的な排出量取引市場を想定し、モデルの設定を行う。このモデルを用いた分析を行うことによって、炭素価格の安定化のためには、制度などによる需給の調整が重要であることを示す。

現在を時点 0 とし、t年後を時点tとする。排出量取引市場には、温室効果ガスを排出する代表的な事業者を表す主体が 1 つだけ存在するものとする。排出量取引市場がなく、排出削減の努力を全くしない場合に排出される温室効果ガスの量をベンチマークと呼び、時点tの値をu_tで表す。また、時点tにおける排出枠の供給量をs_tとする。以降では、ベンチマークと供給量の初期値を$u_0 = s_0 = 1$とおいて基準化し、時点 0 に対する相対的な値として議論を行う。

図表 5　モデルのイメージ図



（出所）日興リサーチセンター作成

図表 5 はモデルのイメージ図である。事業者は各時点$t \geq 0$において、ベンチマークu_tと供給量s_tを観測する（図表 5 ①）。将来の値は推定を行うものとし、時点tにおけるベンチマークと供給量の推定値は、減少量をそれぞれ$\widehat{RU}_{\tau+1}^{(t)}$、$\widehat{RS}_{\tau+1}^{(t)}$として以下のように定める（図表 5 ②）。

$$\hat{u}_{\tau+1}^{(t)} = \hat{u}_{\tau}^{(t)} - \widehat{RU}_{\tau+1}^{(t)}, \qquad \hat{s}_{\tau+1}^{(t)} = \hat{s}_{\tau}^{(t)} - \widehat{RS}_{\tau+1}^{(t)}, \qquad \tau = t, t+1, \ldots, t+h-1$$

ここで、t 年には実際の値を知ることができるので、$\hat{u}_t^{(t)} = u_t$、 $\hat{s}_t^{(t)} = s_t$である。以降も同様に、推定値を表す変数にはハットをつけ、右上の括弧に推定時点を記述して実績値と区別する。

事業者は、将来の排出削減費用を最小化するように、多期間における排出量と翌年以降に排出枠を持ち越すバンキングの配分を計画するものとする（図表 5 ③）。時点t年に見積もるτ年の計画排出量を$\hat{e}_\tau^{(t)}$とすると、ベンチマークに対する計画排出削減量は$\left(\hat{u}_\tau^{(t)} - \hat{e}_\tau^{(t)}\right)$と表せる。単純化のため、排出削減費用は排出削減量の 2 乗に比例するものとし、費用関数を$C(x) = cx^2/2$とする。ここで、cは定数である。欧州委員会[2021b]と同様にh=10 年後までを考慮に入れ、割引率を$r = 8\%$とする。以上の設定の下で、次の費用最小化問題を考える。

$$
\begin{aligned}
&\text{目的関数：} && \sum_{\tau=t}^{t+h} \frac{C\left(\hat{u}_\tau^{(t)} - \hat{e}_\tau^{(t)}\right)}{(1+r)^{\tau-t}} \quad \longrightarrow \quad \text{最小化} \\
&\text{制約条件：} && 0 \ \le \ \hat{e}_\tau^{(t)} \ \le \ \hat{u}_\tau^{(t)}, \qquad \tau = t, t+1, \dots, t+h \\
& && \hat{b}_\tau^{(t)} \ = \ \hat{b}_{\tau-1}^{(t)} + \hat{s}_\tau^{(t)} - \hat{e}_\tau^{(t)} \ \ge \ 0, \quad \tau = t, t+1, \dots, t+h \\
& && \hat{b}_{t-1}^{(t)} = b_{t-1}
\end{aligned}
$$

制約条件の 2 つ目の式の$\hat{b}_\tau^{(t)}$はバンキングを表しており、排出枠の翌年以降への持越しは可能であるが、前借りはできないように 0 以上という制約を加えている。バンキングは(式 1)の流通量に対応する。排出量取引市場が開始以前にはバンキングはゼロなので、$b_{-1} = 0$とする。

この最小化問題で得られた$\tau = t, \dots, t+h$年の排出量とバンキングのうち、計画時点のt年のみを実行に移す（図表 5 ④）。したがって、以下のように、最適値から実績値を定める。

$$e_t = \hat{e}_t^{(t)\star}, \quad b_t = \hat{b}_t^{(t)\star}$$

翌年の排出量とバンキングは、新たにu_{t+1}とs_{t+1}を観測してから決定するものとする。ベンチマークと供給量の減少量をRU_{t+1}、RS_{t+1}として以下のように計算し、同様の観測と決定を繰り返す。

$$u_{t+1} \ = \ u_t - RU_{t+1}, \qquad s_{t+1} \ = \ s_t - RS_{t+1}$$

完全競争市場の下では価格は限界削減費用に一致する。したがって、価格は次式で計算される。

$$p_t = C'(u_t - e_t) = c(u_t - e_t)$$

定数cにより価格水準が定められ、ここでは、初期価格が 1 となるように$c = (u_0 - e_0)^{-1}$とする。

4. シミュレーション分析

3 章で設定したモデルを使用して、排出量取引市場の環境が変化したときの炭素価格やバンキングへの影響を分析する。

シミュレーションの設定を図表 6 に示す。はじめに、(a) 標準的な設定として、約 30 年後である 2050 年にカーボンニュートラルが達成できるように、排出枠の供給量を一定の下げ幅で減少させる場合を考える。また、Quemin and Trotignon[2021]を参考に、ベンチマークは約 80 年後である 2100 年にかけて一定に減少させる。次に、標準的な設定に対し、（b）供給量の増加、（c）供給減少量の拡大、（d）ベンチマーク減少量の拡大という 3 つの環境の変化がそれぞれ突発的に発生する場合について考える。これらのケースは実際に起こりうるものであり、例えば、EU ETS で 2012 年頃に発生した積極的な国際クレジットの変換による供給量の増加は（b）に、直近の EU ETS の目標の引き上げは（c）に該当している。

図表 7（a）は標準的な設定の下でのシミュレーション結果である。時間が経過するほど大きな排出削減が必要となるため、炭素価格には上昇傾向があるという自然な結果が得られている。バンキングは、はじめは将来に備えて増加するが、一定期間後は供給量を上回る排出に使用されて減少する。

図表 7（b）（c）（d）は環境の変化が発生した場合のシミュレーション結果をまとめたものである。環境の変化は時点 11 に発生することを想定しているため、時点 10 までは図表 7（a）の結果と同じである。炭素価格への影響は、排出枠の需給が環境の変化後にどのように変化したかが重要であると考えられる。超過供給が発生する（b）（d）では、炭素価格に負の影響を与える。一方、超過需要が発生する（c）では、炭素価格に正の影響を与える。

次に、バンキングへの影響について考察する。バンキングは現在と将来における排出枠の平均化であるため、将来に対する現在の相対的な需給が関係していると考えられる。（b）（c）では、現在の供給量の増加や将来の供給量の減少によって、バンキングは増加する。一方、（d）では、将来の需要の減少を通じて、バンキングは減少する。排出枠の需給環境の変化による炭素価格とバンキングへの影響は、常に同方向や反対方向という単純なものにはなっていない。

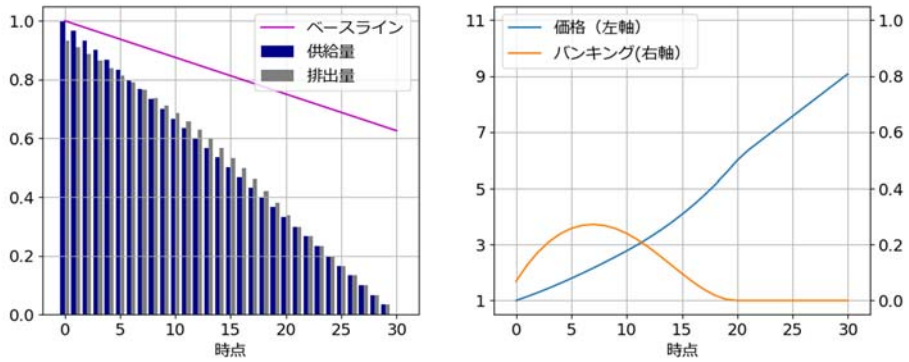
図表 6　シミュレーションの設定

ケース	想定する環境	パラメータの設定
（a）標準的な設定	■ 2050 年カーボンニュートラルの達成に向けて、排出枠の供給量が 30 年後にゼロとなるように減少 ■ ベンチマークは 2100 年頃に排出量ゼロ	$RS_t = \frac{1}{30}$ $\widehat{RS}_\tau^{(t)} = \frac{1}{30}$ $RU_t = \frac{1}{80}$ $\widehat{RU}_\tau^{(t)} = \frac{1}{80}$
	環境の変化	**変更点**
（b）供給量の増加	■ 他市場の排出枠やクレジットの使用許可 ■ 供給量の不透明性による推定との乖離	$RS_{11} = \frac{1}{30} - 0.2 < 0$
（c）供給減少量の拡大	■ 野心的な排出削減目標の設定による制度改正 ■ 炭素価格の引き上げを目的とした政府介入	$RS_t = \frac{1}{30} \times 2$ $\widehat{RS}_\tau^{(t)} = \frac{1}{30} \times 2$ $t \geq 11$
（d）ベンチマーク減少量の拡大	■ 技術革新の進展による排出削減費用の減少 ■ 長期的な経済停滞による需要の減少	$RU_t = \frac{1}{80} \times 2$ $\widehat{RU}_\tau^{(t)} = \frac{1}{80} \times 2$ $t \geq 11$

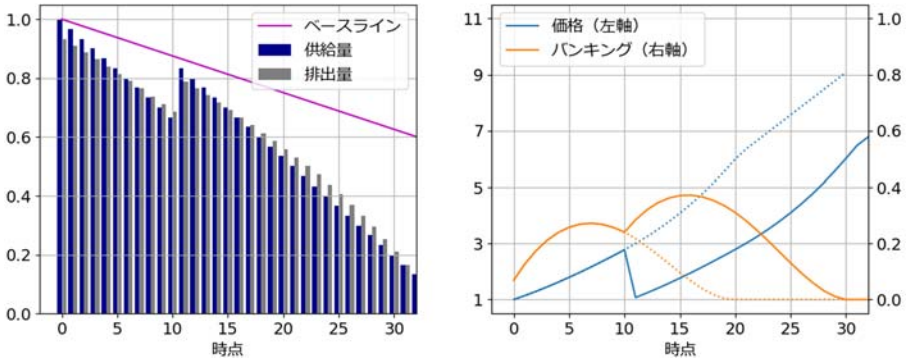
（出所）日興リサーチセンター作成

図表７　シミュレーション結果

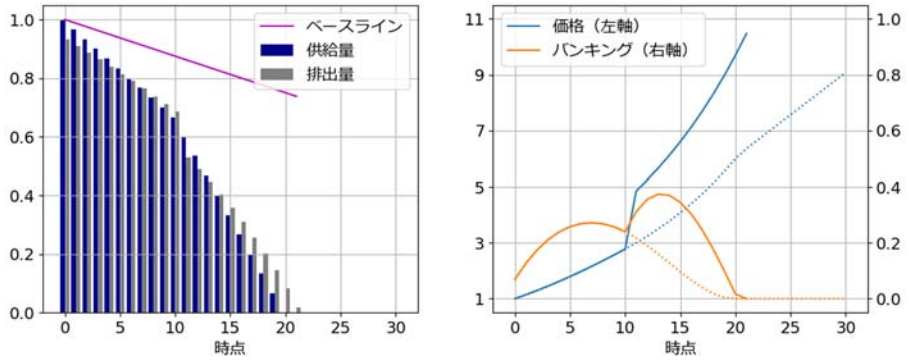
（a）　標準的な設定



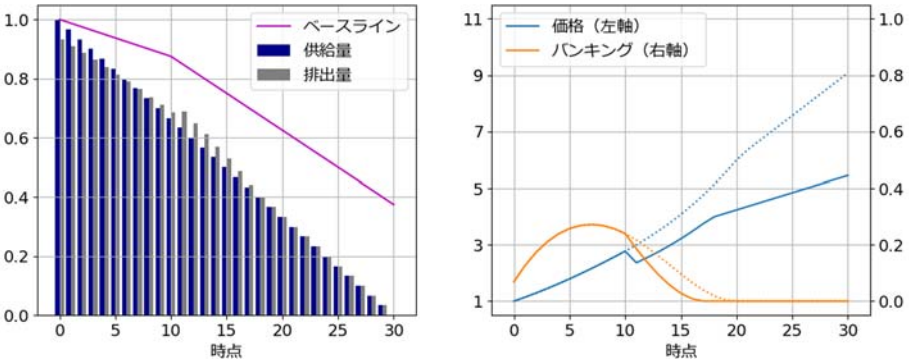
（b）　供給量の増加



（c）　供給減少量の拡大



（d）　ベンチマーク減少量の拡大



（出所）日興リサーチセンター作成

5. まとめ

カーボンニュートラルを達成するための制度の一つである排出量取引市場における価格変動の分析を行った。炭素価格は取引によって決まるため、価格の安定性が問題となる。本稿では、排出量取引で先行する欧州を例にキャップ＆トレードや排出枠について説明し、排出量取引市場の多期間モデルを提示した。さらに、モデルを用いて排出枠の需給に対して様々な環境の変化が生じたときに、炭素価格がどのように変化するかを調べるためにシミュレーションを行った。その結果、排出枠の需給の変化による炭素価格の変動の方向性を確認した。そして、排出枠の翌年度への持越しを意味するバンキングは炭素価格を予測するためのシグナルとはならないことを示した。

今後の課題として、様々な環境の変化が発生した場合にどのような対策が有効なのかといった分析がある。欧州排出量取引制度には 2019 年に開始された市場安定化リザーブという仕組みがあり、需給の安定化を図っている。また、本稿のシミュレーションに用いたモデルには投資という概念がなく、支払った排出削減費用が将来の費用関数に影響を与えない。さらに現実に近いシミュレーションを行うために、投資による将来の削減費用への影響を考慮することも今後の課題としたい。

参考文献

Quemin, S., and R. Trotignon[2021], ”Emissions Trading with Rolling Horizons”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 125, 104099

上野訓弘，水野勇史[2019],「欧州連合域内排出量取引制度の解説」，公益財団法人 地球環境戦略研究機関（IGES）Working Paper

欧州委員会[2015], EU ETS Handbook
https://ec.europa.eu/clima/system/files/2017-03/ets_handbook_en.pdf

欧州委員会[2021a], COMMUNICATION FROM THE COMMISSION, C(2021) 3266 final
https://ec.europa.eu/clima/system/files/2021-05/c_2021_3266_en.pdf

欧州委員会[2021b], Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, COM(2021) 551 final, 2021/0211 (COD)
https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets_with-annex_en_0.pdf

（END）

“Effective Carbon Rates 2021”で見る カーボンプライシング制度の状況

2022 年 5 月

社会システム研究所　　川久保　皓史

1．OECD による Effective Carbon Rates の公表

温室効果ガス削減の経済政策として、国や市場が二酸化炭素に価格を付けて経済主体の自主的な削減を動機づける、いわゆるカーボンプライシング制度の導入が挙げられる。

OECD は、2016 年に“Effective Carbon Rates: Pricing CO2 through Taxes and Emissions Trading Systems”を公表し、各国のカーボンプライシング制度の導入状況を報告した。その後 2018 年、2021 年にも同様の報告書を公表している（OECD(2018),OECD(2021)）。この Effective Carbon Rates（以降、ECR）の報告書では、OECD 加盟国と G20 国の計 44 カ国（全世界で排出される二酸化炭素のおよそ 8 割に該当）のカーボンプライシング制度の状況を調査している。制度の対象は、CO_2 排出削減に効果をもたらすと考えられている燃料税（ガソリン税）、炭素税、排出権取引価格である。

2021 年に公表された ECR の報告書（OECD(2021)）では、国・産業の側面から、カーボンプライシング制度が適用される範囲を指標化した Carbon Pricing Score(CPS)を報告している。以下では、CPS の定義と前提とする考え方について説明し、OECD（2021）で報告された国別、産業別のスコアの状況を確認する。

２．CPS が前提とする Near Term to Net Zero モデル

CPS は、ネットゼロに整合的な炭素価格を使っているカーボンプライシング制度の導入状況を把握する指標である。OECD（2021）では、CO_2 価格としていくつかのモデルを参照しているが、そのうちの一つに Kaufman et al.(2020)の Near Term to Net Zero モデル(以降、NT2NZ)がある。NT2NZ は、2020 年を基準年として、目標年にネットゼロを達成すると想定したときの近い将来での CO_2 価格を推定している。

NT2NZ は、IPCC の第 5 次報告でも採用される Global Change Assessment Model（以降、GCAM）を利用している。GCAM は、複数地域のエネルギー需給（石炭、ガス、石油、再生エネルギーなどの利用やエネルギー価格）の変化、各地域の経済活動（一人当たり GDP、土地利用、農作物の供給）の変化、経済活動に伴って排出される二酸化炭素の増減に応じた気候や環境（気温上昇、大気の変化、水源の枯渇など）の変化がそれぞれ長期的に影響を及ぼすように設計されたモデルである。NZT2NZ では、50 州の米国のデータを与えた GCAM を用いて将来時点の CO_2 価格を推定している。このときの CO_2 価格は、近い将来（2025 年、2030 年）時点の価格である。遠い将来の CO_2 価格は、CO_2 の貯留や回収に関す

る技術など不確実な要素が多く、その状況によって価格が大きく変わってしまう。こうした価格は政策立案者には利用しづらい。そこで、できるだけ近い将来での CO_2 価格を推定することで、政策立案者の利便性を高めている。

3．CPS が設定する CO_2 価格

CPS では、NT2NZ によって推定された価格のうち、3 つの価格を採用している。①2060 年をネットゼロ目標とした場合の 2025 年時点の CO_2 価格（中央値）、②2060 年ネットゼロを目標とした場合の 2030 年時点の CO_2 価格、③2060 年ネットゼロを目標とし、気候政策（大気質の規制など）が不十分であった場合の 2030 年時点の CO_2 価格である[1]。その結果、①を 30 ユーロ/CO_2t、②を 60 ユーロ/CO_2t、③を 120 ユーロ/CO_2t としている（図表 1 参照）。

図表 1　NT2NZ を参照した場合の CO_2 価格の前提

No.	CO2価格（ユーロ/CO2t）	NT2NZを参照した時の前提
①	30	2060年をネットゼロ目標とした場合の2025年時点のCO2価格（中央値）
②	60	2060年ネットゼロを目標とした場合の2030年時点のCO2価格
③	120	2060年ネットゼロを目標とし、気候政策（大気質の規制など）が不十分であった場合の2030年時点のCO2価格

(出所) Kaufman et al.(2020)より日興リサーチセンター作成

ECR では、CO_2 価格が 60 ユーロ/CO_2t としたときに、この価格以上のカーボンプライシング制度が対象としている CO_2 排出量の割合を CPS60 と定義している。例えば、A 国で排出される二酸化炭素のうち、何らかのカーボンプライシング制度によって 60 ユーロ以上の規制がかけられている二酸化炭素の割合が 50%であるとき、CPS60 は 50%と評価される。

OECD（2021）では、CPS60 の結果を中心に報告をしており、「②2060 年ネットゼロを目標とした場合の 2030 年時点の CO_2 価格」を前提に取り組み状況を評価している。以下の分析でも、OECD の仮定を踏襲し、CPS60 を採用する。

4．最新の CPS の状況

ここでは OECD(2021)で報告された CPS60 の状況を確認する。同報告書では、2018 年時点の CO_2 排出量や制度の状況を反映している。図表 2 は OECD 加盟国及び G20 国の計 44 か国の CPS60 の結果である。図表では、参考のため、CO_2 価格に関係なくカーボンプライシング制度を導入しているときの CPS（ここでは CPS0<とする）についても掲載した。44 か国全体の CPS60 は、19%であり、換言すれば、60 ユーロ以上のカーボンプライシング制度が対象とする CO_2 は 44 か国で排出される CO_2 総量

[1] NT2NZ では米ドルベースで推定されているが、OECD のレポートでは参照した価格を基にユーロベースに換算している。

の約 2 割程度であることを意味する。CPS60 の高い国には、スイス（69%）、ルクセンブルク（69%）、ノルウェー（68%）、下位にはブラジル（１%）、インドネシア（２%）、ロシア（７%）などが確認された。なお、日本の CPS60 は 24%と全体平均を上回る結果であった。

図表２　44 か国の CPS60 と CPS0 <の状況

国名	CPS60	CPS0<	国名	CPS60	CPS0<
スイス	69%	75%	ベルギー	34%	75%
ルクセンブルク	69%	92%	フィンランド	34%	51%
ノルウェー	68%	81%	ニュージーランド	33%	81%
スロベニア	57%	81%	メキシコ	30%	55%
アイスランド	57%	80%	チェコ	30%	79%
フランス	55%	79%	ラトビア	29%	47%
アイルランド	53%	92%	スウェーデン	29%	41%
イタリア	51%	85%	エストニア	29%	72%
オランダ	50%	87%	アルゼンチン	28%	74%
韓国	49%	96%	コロンビア	25%	37%
オーストリア	48%	68%	日本	24%	79%
英国	47%	71%	トルコ	24%	39%
ギリシア	47%	91%	米国	22%	37%
スペイン	46%	84%	豪州	20%	22%
デンマーク	45%	61%	**全体**	***19%***	***40%***
リトアニア	45%	63%	チリ	17%	49%
ポルトガル	44%	74%	インド	13%	60%
ドイツ	41%	87%	南アフリカ	13%	14%
スロバキア	36%	72%	中国	9%	19%
イスラエル	36%	97%	ロシア	7%	14%
ポーランド	35%	82%	インドネシア	2%	19%
ハンガリー	35%	65%	ブラジル	1%	8%
カナダ	34%	76%			

(出所) OECD「Effective Carbon Rates 2021」、OECD. Stat より日興リサーチセンター作成

スコア上位国であるスイス（69%）では、電力部門、産業部門などの脱炭素化が進んだことで排出比率が低い。また、道路部門に対する燃料税、家庭・商業部門への炭素税などが高い水準で課されている。ルクセンブルク（69%）では、海外からの通勤者や観光客が多く、他国に比べ、道路輸送部門の排出量が全体の排出量に占める割合が大きい。ノルウェー（68%）では、電力部門や家庭・商業部門への炭素税に加え、同国で排出比率の高い海洋石油産業（産業部門）に対して炭素税と排出権取引制度が共に適用されている。これらの国では、CPS0<のスコアも 75%～92%と高く、カーボンプライシング制度の対象範囲が広いことがうかがえる。これらの国以外にも、欧州、北欧、韓国などのスコアが高く、その要因として排出権取引制度が導入されていることが挙げられる。

他方、スコア下位には、ブラジル、インドネシア、ロシアといった国のほか、中国（9%）、インド（13%）、米国（22%）なども確認された。中国、米国、インド、ロシアは、IEA（2020）によると CO_2 排出量の多い上位国でもある。したがって、排出量の多い国では、60 ユーロを超えるカーボンプライシング制度の導入が部分的であることを示唆している。なお、OECD(2021)によれば、中国は 2021 年に排出権取引制度を導入し、2025 年の CPS60 は 19%(2018 年比+10%)まで上昇すると推定されている。この

スコアを考慮すると、44 か国世界全体の CPS60 は 22%と先ほどの結果を 3 ポイント高めると予想されている。

5. バイオマスを考慮した 2018 年における CPS の状況

上記の CPS60 では、バイオマス燃料からの CO_2 排出を化石燃料などと同様の CO_2 排出として扱っている。だが、バイオマス燃料は燃料生産過程における吸収分とその後の排出が相殺され、カーボンニュートラルであるという仮定も可能である[2]（OECD(2018)）。以下では、そのような仮定に基づく、バイオマス燃料考慮後 CPS60 について確認する。

図表 3 はバイオマス燃料考慮後 CPS60 及び前述の CPS60 との差である。44 か国のバイオマス考慮後 CPS60 は 20%であり、前述の CPS60 から 1 %ポイント増加した。上位国は、スイス（84%）、ノルウェー（77%）、ルクセンブルク（71%）などであり、特にスイスは 15%ポイント増加している。また、スウェーデン（+33%）、フィンランド(+29%)、ラトビア(+28%)では 2 桁のスコア上昇がみられた。これらの国のエネルギー全体に占める再生可能エネルギーの比率はそれぞれ 60.1%、43.8%、42.1%と高く[3]、発電におけるカーボンニュートラルに力を入れている。

他方、スコア下位の国は、 1 %から 5%程度の上昇であり、全体のスコアが大きく変化していない。したがって、排出量の多い国では、バイオマス燃料の利用も低い状況にある。

図表 3　44 か国のバイオマス燃焼考慮後 CPS60

国名	バイオマス燃料考慮後 CPS60	CPS60との差	国名	バイオマス燃料考慮後 CPS60	CPS60との差
スイス	84%	+15%	ニュージーランド	39%	+6%
ノルウェー	77%	+9%	ポーランド	38%	+3%
ルクセンブルク	71%	+2%	カナダ	37%	+3%
リトアニア	70%	+25%	ベルギー	37%	+3%
デンマーク	69%	+24%	イスラエル	36%	±0%
スロベニア	67%	+10%	エストニア	36%	+7%
フランス	63%	+8%	チェコ	34%	+4%
オーストリア	63%	+15%	メキシコ	32%	+2%
フィンランド	63%	+29%	コロンビア	32%	+7%
スウェーデン	62%	+33%	アルゼンチン	30%	+2%
アイスランド	61%	+4%	日本	25%	+1%
イタリア	58%	+7%	チリ	25%	+8%
ラトビア	57%	+28%	トルコ	24%	±0%
ポルトガル	56%	+12%	米国	22%	±0%
アイルランド	55%	+2%	豪州	21%	+1%
オランダ	52%	+2%	**全体**	***20%***	***+1%***
英国	52%	+5%	インド	18%	+5%
韓国	50%	+1%	南アフリカ	14%	+1%
スペイン	50%	+4%	中国	10%	+1%
ギリシア	49%	+2%	ロシア	8%	+1%
ドイツ	45%	+4%	インドネシア	3%	+1%
ハンガリー	42%	+7%	ブラジル	2%	+1%
スロバキア	40%	+4%			

(出所) OECD「Effective Carbon Rates 2021」、OECD. Stat より日興リサーチセンター作成

[2] ただし、各国のバイオマス燃料内訳や、比較可能なデータの収集が困難であり、バイオマス燃料利用によるカーボンニュートラルの取組みが正確に測ることが困難であるという問題がある。

[3] Eurostat https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220119-1

6．産業別 CPS の状況

ECR では、農業・漁業、発電、産業、非道路輸送、家庭・商業、道路輸送の 6 つの部門の CPS を算出している。図表 4 は 6 部門の CPS60 と CPS0＜を記載している。6 部門のうち、道路輸送部門の CPS60 が 80%と最も高く、発電部門と産業部門が 5%と最も低い。

図表４　6 部門の CPS60 の状況

部門	CPS60	CPS0<
農業･漁業	38%	51%
発電	5%	34%
産業	5%	25%
非道路輸送	25%	57%
家庭･商業	10%	23%
道路輸送	80%	95%

(出所) OECD「Effective Carbon Rates 2021」、OECD. Stat より日興リサーチセンター作成

CPS60 の最も高い道路輸送部門は、部門別 CO_2 排出量[4]（図表 5 参照）のなかで、2 番目に多い輸送部門（26%）に含まれる。同部門は、44 か国中 36 か国で CPS60 が 90%以上であり、うち 20 か国は 100%となっている（OECD(2021)）。これは、CPS0＜が 95%であることからもわかる通り、多く国でカーボンプライシング制度の一つとして燃料税を含んでいるためである。

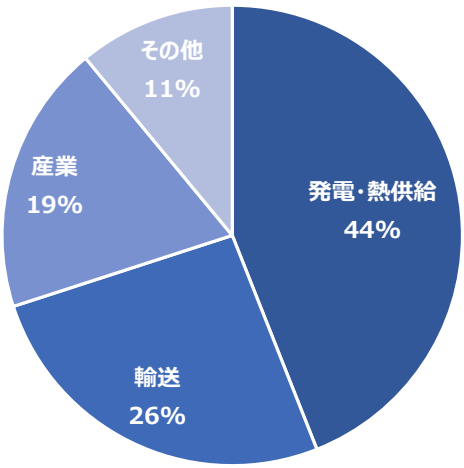
CPS60 の最も低い部門の一つである産業部門は、部門別 CO_2 排出量でも 19%を占めている。CPS0< は 25%とであり、およそ四分の一程度はカーボンプライシング制度の対象となっている。その中でもノルウェー（59%）、スロベニア(44%)、韓国（33%）のスコアは高く、これらの国では、産業部門に対し排出権取引制度を導入している。ただし、欧州や韓国の排出権取引制度では、産業部門における無償割当部分の割合が大きい。仮に、無償割当対象部分をカーボンプライシング制度の対象とみなさなかった場合、44 か国全体の CPS60 は 3%にまで下がる（OECD(2021)）。したがって、部分的にカーボンプライシング制度は導入されているが、ECR が前提とする価格から見ると、その対象はわずかな状況である。

CPS60 の最も低いもう一つの部門である発電部門は、CO_2 排出全体の 44%と最も排出の多い部門でもある。CPS0＜は 34%であり、およそ三分の一がカーボンプライシング制度の対象となっている。このうち、韓国（49%）、アイスランド（47%）、英国（44%）などでは、発電部門に対する排出権取引制度が導入されている。このうち、欧州の排出権取引では、発電部門に対して排出権が無償割当されていない。そのため、産業部門よりも排出量削減の効果が期待される。実際、英国では、2012 年から 2018

[4] リンク先参照。https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2018

年にかけて ECR が 7 ユーロから 36 ユーロ強に上昇した結果、その期間の GHG 排出量は 27%減少している（OECD(2021)）。背景には、排出コストを抑えるために電力会社が従来発電からの転換を進めたことが挙げられる。

図表 5　2018 年の部門別 CO_2 排出割合



(出所) IEA「Global CO2 emissions by sector, 2018」より日興リサーチセンター作成

7. まとめ

OECD が公表する Effective Carbon Rates を基に、44 か国のカーボンプライシングを用いた制度の導入状況について、Carbon Pricing Score を確認した。OECD の 2021 年報告では、CPS のうち、2060 年ネットゼロを目標とした場合の 2030 年時点の CO_2 価格を 60 ユーロ/CO_2t と想定し、60 ユーロ/CO_2t 以上のカーボンプライシング制度が対象とする CO_2 排出量の割合（CPS60）を主要な指標として利用している。

44 か国全体での CPS60 は 19%であり、スイスをはじめとした欧州や北欧などが上位で確認された。また、中国、米国、ロシア、インドなどの CO_2 排出量の多い国では、スコアが低く、60 ユーロ以上のカーボンプライシング制度の導入の割合が低い状況にある。バイオマス燃料をカーボンニュートラルのエネルギーであると仮定した場合でも、これらの国のスコアに大きな変化は確認されなかった。

6 つの排出部門別の CPS60 を確認すると、部門によって大きく異なっている。発電部門や産業部門は CO_2 排出量の割合が多く、CPS60 が 5%と低いのに対し、道路輸送部門は排出の占める割合は大きいが、燃料税などのカーボンプライシング制度により、80%と高いことが確認された。

英国の事例のように、二酸化炭素に適切な価格を与えることで CO_2 削減を誘引する可能性がある。発電部門や産業部門を対象としたカーボンプライシング制度の導入は一部である。1.5 度の気温上昇を抑制するためには、これらの部門に対する適切なカーボンプライシング制度の導入が必要となるであろう。

参考文献

IEA. (2020). CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION 2020 EDITION., https://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/iea-co2-emissions-from-fuel-combustion-statistics_co2-data-en

Kaufman. Noah., Alexander. R. Barron., Wojciech. Krawczyk., Peter. Marsters., and Haewon, McJeon. (2020). A near term to net zero alternative to the social cost of carbon for setting carbon prices., Nature Climate Change. Vol.10., November 2020., p1010-1014.

OECD. (2016). Effective Carbon Rates: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading., OECD Publishing., https://www.oecd-ilibrary.org/taxation/effective-carbon-rates_9789264260115-en

OECD. (2018). Effective Carbon Rates 2018: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading., OECD Publishing., https://www.oecd-ilibrary.org/taxation/effective-carbon-rates-2018_9789264305304-en

OECD. (2021). Effective Carbon Rates 2021: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading., OECD Publishing., https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-0e8e24f5-en

環境省（2007）「IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書概要（公式版） 2007 年 12 月 17 日 version」, https://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/ar4syr.pdf

環境省（2018）「IPCC『1.5℃特別報告書』の概要」, https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/ar6_sr1.5_overview_presentation.pdf

（END）

主要な CO_2 の分離・回収技術とコスト的課題

2022 年 4 月
社会システム研究所　　髙橋 龍生 CFA

1. はじめに

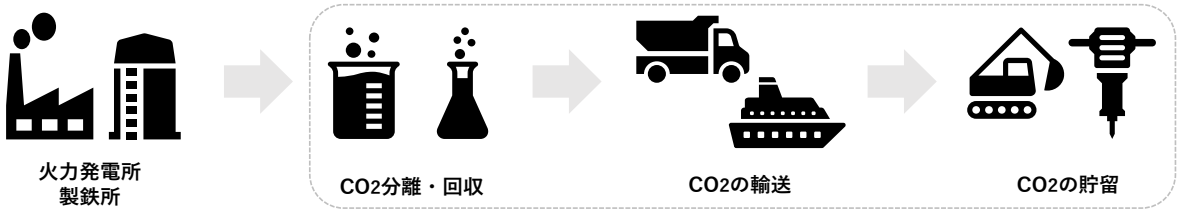
気候変動問題への対応から、世界的に温室効果ガスの排出削減が急務となっている。主要な温室効果ガスである二酸化炭素(以下、CO_2)の世界の年間排出量は約 330 億トンに上る。2015 年に開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21) で採択されたパリ合意により、途上国を含めた世界各国で温室効果ガス排出削減の努力が行われている。

以上を受けて、世界中で火力発電から再生可能エネルギー発電への移行が進みつつある。一方で、石炭や天然ガスといった化石燃料をベースとした火力発電からの即脱却も現実的ではなく、排出された CO_2 を回収し、地中に貯留する Carbon dioxide Capture and Storage(以下、CCS)への注目が集まっている。本稿では、CCS における主要な CO_2 の分離・回収技術を取り上げた上で、同技術の導入において現状指摘されているコスト的課題について概説する。

2. CCS 技術の概要

CCS とは、火力発電所や製鉄所などから排出された CO_2 を分離・回収、輸送し、地中に貯留することにより、CO_2 の大気中への排出を防ぎ、固定化する技術である。したがって、CCS は CO_2 の①分離・回収、②輸送、③貯留、の 3 工程から成り立っている(図表 1)。また、昨今では回収した CO_2 を地下に貯留するだけではなく、水素と化学結合させメタンガスとして再利用するなど、カーボン利用(CC**U**S:Carbon dioxide Capture,**Utilization** and Storage)も進んでいる。

図表 1　CCS の 3 工程



(出所)日興リサーチセンター作成

3. CCS 浸透の背景

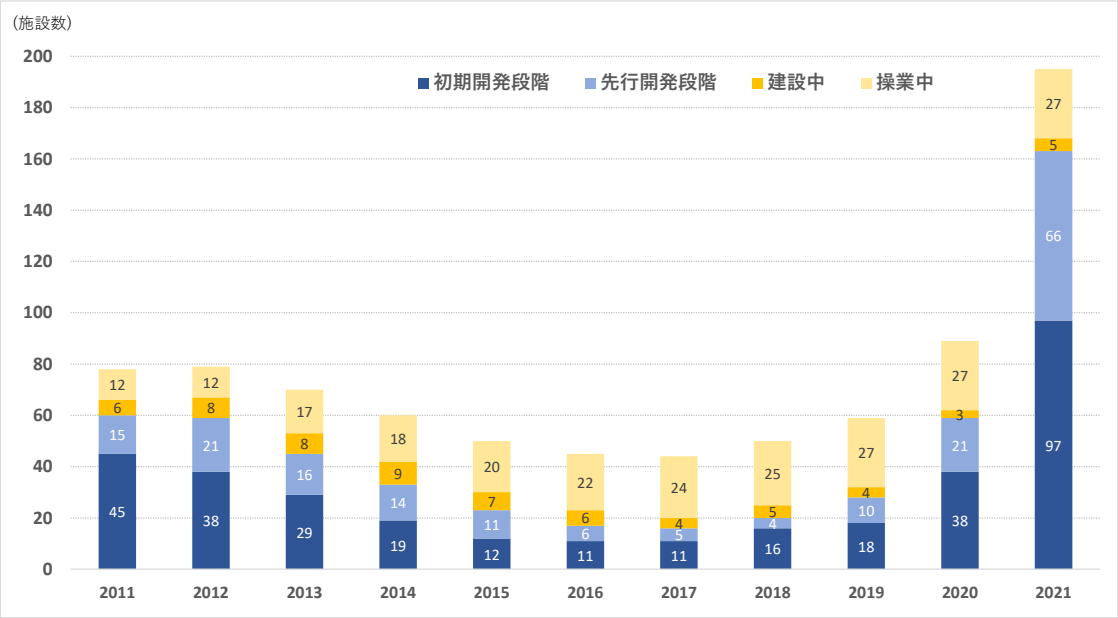
CCS は、排出源から高濃度の CO_2 を大規模に回収、削減できる技術であり、既存の火力発電システ

ムなどとの相性が良く、再生可能エネルギー発電への移行において重要な役割を担うと期待されている。

CCS に初めて焦点が当てられたのは、2005 年の G8 グレンイーグルズ・サミットである。同サミットにおいて、地球温暖化が長期的かつ深刻な人類共通の課題であることが再認識され、温室効果ガス削減のための「グレンイーグルズ行動計画」が策定された。同行動計画において、G8 は IEA(国際エネルギー機関)に対して、「代替エネルギーシナリオおよびクリーンで、賢明かつ競争力のあるエネルギーの将来に関する戦略」について提言を求めた。これを受けて、IEA が 2008 年の洞爺湖サミットで提出した最終報告において、エネルギー効率の向上、再生可能エネルギー、原子力発電の利用拡大以外にも、CCS の実用化が温室効果ガスの削減に寄与するとされた。IEA の同報告を受けて、洞爺湖サミットの G8 共同声明で CCS の実証プロジェクトの支持が表明されたことが、CCS 技術の研究拡大の大きな契機となった。

図表 2 は、世界の CCS プロジェクトの施設数の推移である。2020 年からは急激に開発が進んでいる。なお、日本では 6 件の CCS プロジェクトが進行しており、うち 3 件は火力発電所に CCS を設置するプロジェクトとなっている(図表 3)。

図表 2　世界の CCS プロジェクトの施設数



(出所)IEA の HP より日興リサーチセンター作成

図表 3　日本の CCS プロジェクト

No.	施設名	運用状況	地域	産業	(国の委託)事業者
1	COURSE 50	稼働中	千葉、広島	鉄鋼の生産	日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所、日鉄エンジニアリング
2	EAGLEプロジェクト	完成	福岡	火力発電	電源開発(J-POWER)
3	三川燃焼後回収プラント	稼働中	福岡	火力発電	東芝エネルギーシステムズ
4	長岡プロジェクト	完成	新潟	天然ガスの生成	地球環境産業技術研究機構（RITE）
5	大崎クールジェンプロジェクト	建設中	広島	火力発電	大崎クールジェン(電源開発と中国電力の合弁会社)
6	苫小牧 CCS 実証プロジェクト	稼働中	北海道	水素の製造	日本CCS調査

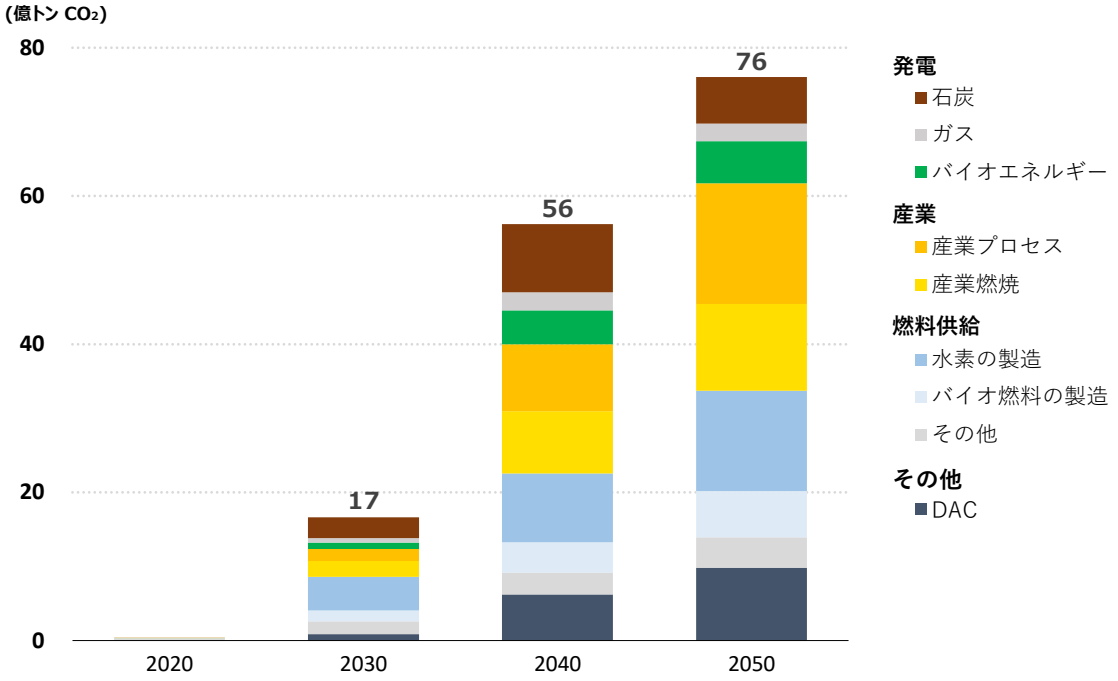
(出所) Global CCS Institute データベースより日興リサーチセンター作成

4. CCS の役割

温室効果ガスの削減努力だけでは、カーボンニュートラルは達成できないため、排出のオフセットおよびネガティブエミッションに CCS は必要不可欠となる。IEA が 2021 年に公表した「*Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector*」で示された 2050 年ネットゼロシナリオにおいては、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーへの移行、電化や省エネによる CO_2 削減がネットゼロに主として貢献するとされている。また、CCUS もネットゼロシナリオにおいて、その利用が前提となっており、2050 年近辺では、年間平均およそ 70 億トン台の CO_2 回収が試算されている(図表 4)。

特に、CCS は、火力発電、鉄鋼やセメントの製造工程など、電化や低炭素による代替が容易ではなく、CO_2 の削減が困難な Hard-to-Abate 産業のカーボンニュートラルに必要不可欠となってくる。また、IEA の同シナリオでは、火力発電や重化学工業から排出された CO_2 の回収だけではなく、大気中の CO_2 を直接回収する DAC(**D**irect **A**ir **C**apture）やバイオエネルギー発電に CCS を付随させた BECCS(**B**io-**e**nergy with **C**arbon **C**apture and **S**torage)などのネガティブエミッション技術の利用拡大も期待されている。さらには、産業プロセスに加え、ブルー水素の生産において発生する CO_2 も CCS の利用により、回収することが見込まれている。

図表 4　IEA の 2050 年ネットゼロシナリオにおける CO_2 回収の使途と各回収量の見込み



(出所)IEA, "*Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector*"より日興リサーチセンター作成

5. 主な CO_2 分離・回収方法

次に、主な CO_2 分離・回収方法について紹介する。環境省の分類によると、CO_2 を分離・回収する方法は、①**燃焼後回収**(Post-Combustion)、②**燃焼前回収**(Pre-Combustion)、③**酸素燃焼**(Oxy-fuel)の 3

種類に大別される。燃焼後回収は、化石燃料を燃焼した後に、火力発電所などから排出される排ガスから CO_2 を分離・回収する。主な燃焼後回収技術としては、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、深冷分離法がある。

また、燃焼前回収は化石燃料から CO_2 と水素を分離生成し、CO_2 を回収した後に水素やアンモニアを燃料に用いる。主な燃焼前回収技術としては、物理吸収法、物理吸着法がある。

最後に、酸素燃焼法は、化石燃料の燃焼に(空気から分離させた)高濃度の酸素を使用し、排ガスの CO_2 濃度を高め、効率的に CO_2 を回収する方法である。上記以外にも、化学ループ燃焼法が検討されている。同回収方法は、化石燃料を酸化鉄などの金属酸化物中の酸素を使って燃焼させる方法であり、空気由来の窒素などが混入せず、排ガスが CO_2 と水蒸気のみとなるため、容易に高濃度の CO_2 を回収できる。

図表 5　CO_2 分離・回収方法の比較

手法		原理	起因力	長所	短所
化学吸収法		化学反応	温度差	・低分圧ガス向き ・炭化水素への親和力が低い ・大容量向き	・吸収液が高価 ・腐食、浸食、泡立ちがある ・適用範囲が限定的 ・再生用熱源が必要
物理吸収法		物理吸収	分圧差 （濃度差）	・高分圧ガス向き ・適用範囲が広い ・腐食、浸食、泡立ちが少ない ・再生熱源を必要としない	・吸収液が高価 ・重炭化水素への親和力が高い
膜分離法		透過	分圧差 （濃度差）	・簡便 ・安価 ・小容量向き	・低純度 ・運転費が高い ・大容量に不向き ・油脂分含有ガスに弱い
深冷分離法		液化・精留	相変化	・高純度精製が可能 ・大容量向き	・装置が複雑 ・建設費が高価 ・運転費が高い
物理吸着法	PSA	吸着	分圧差 （濃度差）	・高純度精製が可能 ・装置が比較的簡易 ・適用範囲が広い	・再生ガスが必要 ・水分の親和性が強い
	TSA	吸着	温度差	・高純度精製が可能 ・適用範囲が広い	・吸着材量が多く、装置が大型化 ・吸着材費用が掛る ・再生用熱源が必要
酸素燃焼法		空気分離	温度差	・高純度精製が可能	・空気分離設備が大型 ・空気分離装置に動力が必要
化学ループ燃焼法		空気分離	温度差	・低消費エネルギー	・装置の耐久性に課題

(出所)環境省　「平成 25 年度シャトルシップによる CCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書」より日興リサーチセンター作成

(1)化学吸収法

化学吸収法は、イオン化学反応を利用して、CO_2 を分離する方法である。イオン結合により、CO_2 を吸収するモノエタノールアミン(MEA)液などのアミン水溶液に排ガスを通して、液中に CO_2 を取り込む。吸収塔内で CO_2 は 40～50℃でアミン水溶液とイオン結合反応を起こし、アミン炭酸塩を生成する。

生成されたアミン炭酸塩を再生塔で 110～130℃まで加熱すると、CO_2 はアミン水溶液から気化し、高濃度の CO_2 を回収することが可能となる。

しかし、化学吸収法では、CO_2 を吸収したアミン水溶液の加熱において、多大なエネルギーを消費するため燃費が悪い点が挙げられる。また、アミン水溶液の漏洩による生態系や人体への影響が懸念されている。したがって、エネルギー効率が良く、CO_2 吸収率が高いアミン水溶液の開発が進められている。

(2)物理吸収法

物理吸収法は、CO_2 をイオン結合させて吸収する化学吸収法とは違い、吸収塔で CO_2 を吸収するポリエチレングリコール系溶液やメタノールなどの吸収液に排ガスを通して、高圧・低温下で物理的に CO_2 を吸収する方法である。そして、再生塔で減圧または加熱し、高濃度の CO_2 を回収する。化学吸収法がイオン結合を利用したのに対して、物理吸収法では圧力や温度を利用して吸収液に CO_2 を取り込む点で異なるが、基本的に装置設備は同様の構造となる。

(3)膜分離法

膜分離法は、排ガスを細かい膜に通して、CO_2 をろ過して取り出す方法である。膜分離法は、高圧力の排ガスからの CO_2 分離においては、上記の化学吸収法および物理吸収法のように加減圧や加熱によるエネルギー消費がなく、最もエネルギー効率の良い回収方法であるため、期待が高まっている。

膜分離は、吸収法とは異なり、エネルギー効率が高い点で優れている。しかし、分離に必要な膜面積を確保するための物理的な空間を要する点やろ過技術の観点から、高濃度の CO_2 を得られない点で難が残っている。

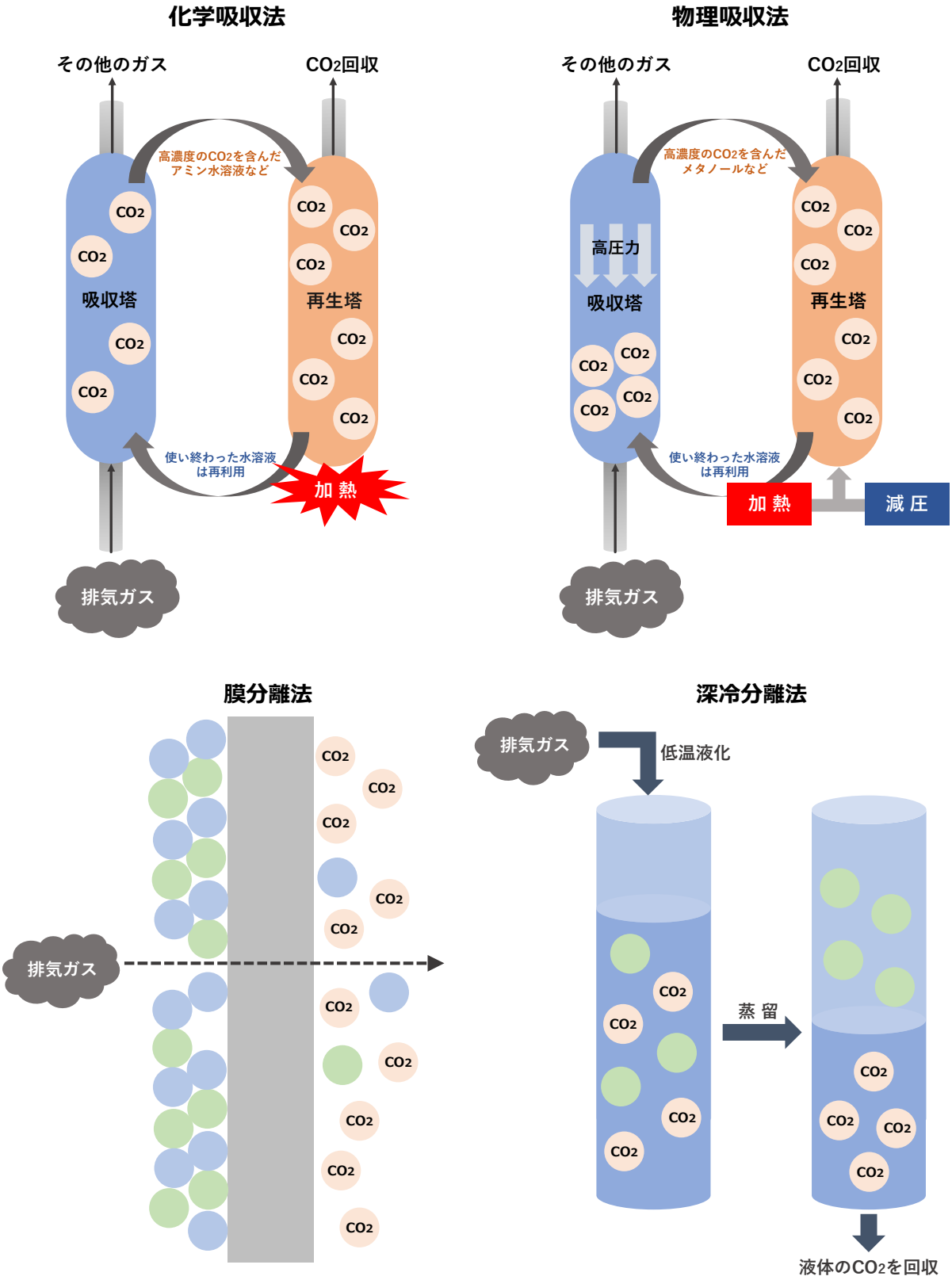
(4)深冷分離法

深冷分離法は、気体の沸点の違いを利用し、排ガスを圧縮および低温液化し、蒸留することで CO_2 を取り出す方法である。しかし、他の分離方法に対して、設備投資コストが高くなることや排ガスの圧縮に必要なエネルギー消費量が大きいため、実用化には至っていない。

(5)物理吸着法

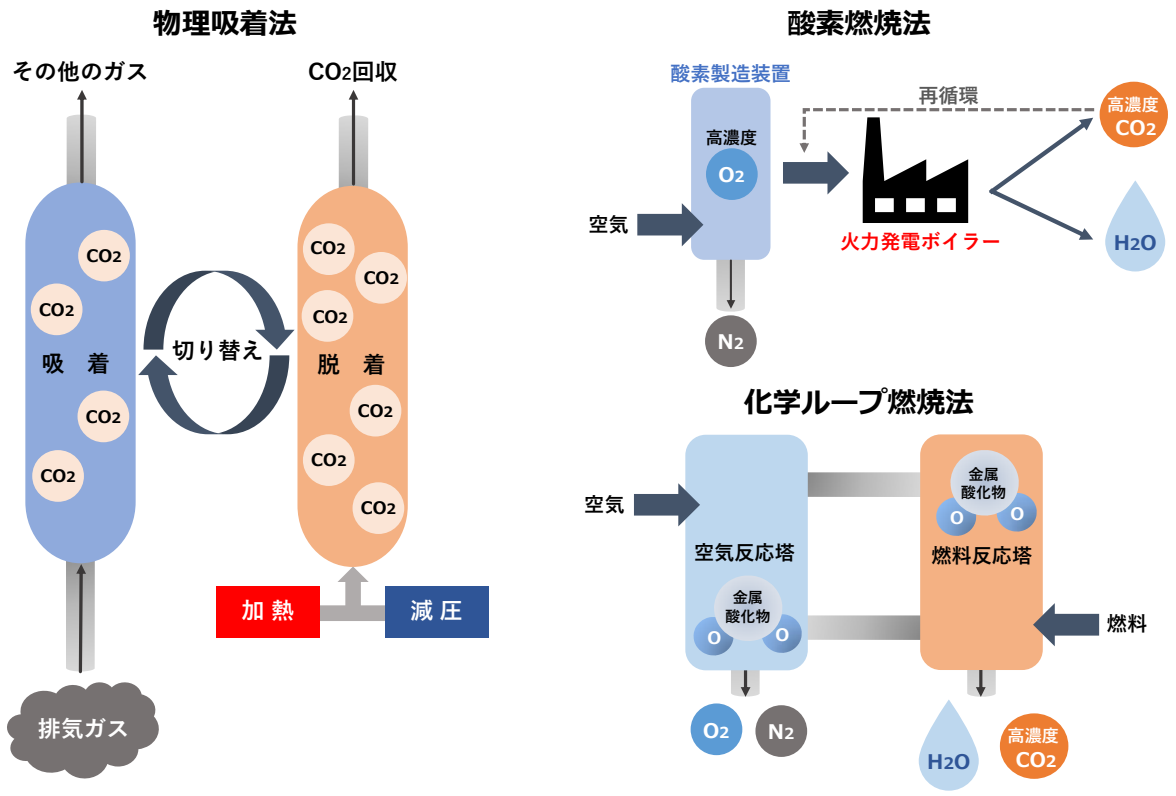
物理吸着法は CO_2 を圧力差と温度差を活用して、他の気体と分離させる方法である。具体的には、ゼオライトや活性炭などの固体の吸着材に排ガスを通して、CO_2 を吸着させて取り出す。また、物理吸着法は、高圧力をかけて、吸着させた CO_2 を低圧下で脱着させて回収する圧力スイング吸着法(PSA)と低温で吸着した CO_2 を高温で脱着させて回収する温度スイング吸着法(TSA)の 2 種類に加えて、両者を併用する PTSA 法がある。物理吸着法は、CO_2 の吸着と脱着の速度をいかに高めることができるのかが重要となってくるため、吸脱着の速度の速い吸着材の開発が急務となっている。

図表 6　各 CO_2 分離・回収方法のイメージ図



※上記のイメージ図は概略図であり、実際はさらに複雑な設備構造・プロセスとなっている。
(出所)日興リサーチセンター作成

図表 6　各 CO_2 分離・回収方法のイメージ図　－つづき－



※上記のイメージ図は概略図であり、実際はさらに複雑な設備構造・プロセスとなっている。
(出所)日興リサーチセンター作成

6. CCS 技術の導入における CO_2 回収コスト

CCS は Hard-to-Abate 産業のカーボンニュートラル達成に前提となっているが、導入にはコスト面での課題が残る。民間企業による CCS 設備の導入の有無は、EU-ETS や J-クレジットなどのカーボンクレジットや炭素税との比較が鍵となってくる。例えば、カーボンニュートラル達成において、CCS の活用よりもカーボンクレジットの購入の方が安価であれば、当然 CCS 設備の導入は普及しないであろう。また、CCS の導入コストが炭素税よりも高ければ、排出した CO_2 の分だけ税金を素直に納めた方が合理的な選択となる。したがって、CCS の普及は技術革新によるコスト低下が大前提となっている。

現状、最も実績があり、確立された CO_2 の回収方法であるアミン水溶液を用いた化学吸収法の CO_2 分離・回収コストは、現行の技術水準では約 4,000～5,000 円台/ t-CO_2 となっている[1]。しかし、過去の実績値ベースでは、米国テキサス州ヒューストンの Petra Nova Carbon Capture プロジェクトにおいて、三菱重工エンジニアリング社が納入した石炭火力発電の世界最大の CO_2回収プラントで約 6,000 円/ t-CO_2 となっている[2]。

[1] 詳細は、Global CCS Institute(2019)「Global Status of CCS 2019」p.65 を参照。
[2] 同上

同プロジェクトは、化学吸収法で CO_2 が回収されており、三菱重工エンジニアリングが関西電力と共同開発した KS-1™という独自のアミン水溶液が使用されている。KS-1™は、従来のアミン水溶液に比べ、高い吸収性能を持ち、水溶液自体の劣化が少なく、吸収塔内の腐食が少ない点で優れている。しかし、同プラントの 1 日あたりの CO_2回収量である 4,776 トンに、1 トンあたりの CO_2回収コストである 6,000 円を乗じて算出する 1 日あたりの総 CO_2回収コスト[3]は約 3,000 万円にも上り、依然としてコスト面での課題が残っている。なお、不採算を理由に、同 CO_2回収プラントは現在稼働していない。

図表 7　Petra Nova Carbon Capture プロジェクトの概要

場所	ヒューストン(米国テキサス州)
事業者	Petra Nova Parish Holdings LLC ➡NRG Energy Inc.とJX石油開発の合弁会社
運転開始	2016年12月
CO_2回収方法	アミン水溶液による化学吸収法
使用アミン水溶液	KS-1™ ➡三菱重工エンジニアリングと関西電力の共同開発
CO_2回収率	90%
CO_2回収量	4,776トン/日
CO_2回収コスト	6,000円台/t-CO2

(出所)三菱重工業および Global CCS Institute から日興リサーチセンター作成

今後の見通しについて、経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、我が国日本の CO_2 分離・回収コストの野心的な将来目標は、2030 年頃までに、低圧ガス向けでは 2,000 円台/ t-CO_2、高圧ガス向けでは 1,000 円台/ t-CO_2 とされた。圧力差を活用できず加熱や減圧などの追加的なエネルギー消費が必要になる低圧の排ガスでは主に化学吸収法および物理吸着法、一方で大気圧との圧力差を活用できる高圧の排ガスでは主に物理吸収法、膜分離法および物理吸着法のさらなる技術発展が期待される。

7. 最後に

再生可能エネルギーへの転換や電化による排出抑制策だけではカーボンニュートラルには十分ではなく、排出された CO_2 を回収・除去する必要がある。とりわけ、CCS は CO_2 の削減が困難な Hard-to-Abate 産業のカーボンニュートラル達成において、重要な役割を果たすことが期待される。

一方、社会的に段階的削減が求められている化石燃料をベースとした火力発電などの高排出産業は座礁化リスクが大きく、それらの延命措置とは言え、CO_2 の回収に莫大な導入・運転コストがかかる CCS への投資は不確実性が高い。加えて、CCS の実用化には CO_2 の分離・回収以外にも、回収した CO_2 の輸送方法および貯留場所の確保などもコストの観点で課題が残っている。

以上から、CCS の普及には、政策当局による実効性のあるロードマップが示された上で、更なるコスト低減に向けた技術革新が促進されるようなファイナンスを含む法制度の確立が不可欠となろう。

[3] CO_2回収コストの内訳は、固定および変動での運転維持コスト、燃料コスト、設備コストから成る。

参考文献

Global CCS Institute(2019), *Global Status of CCS 2019*
https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/12/GCC_GLOBAL_STATUS_REPORT_2019.pdf

IEA(2020), *Energy Technology Perspectives 2020 Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions*
https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf

IEA(2021), *Net Zero by 2050 Roadmap for the Global Energy Sector*
https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

IPCC(2018), *Global Warming of 1.5°C*
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf

National Petroleum Council(2021), *Meeting the Dual Challenge: A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage: Volume III – Analysis of CCUS Technologies*, independently published

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所(2020)「図解でわかるカーボンリサイクル～CO_2を利用する循環エネルギーシステム～」、技術評論社

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所(2021)「図解でわかるカーボンニュートラル～脱炭素を実現するクリーンエネルギーシステム～」、技術評論社

環境省(2014)「平成 25 年度シャトルシップによる CCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書」
https://www.env.go.jp/earth/ccs/attach/mat03.pdf

経済産業省(2021)「カーボンリサイクル技術ロードマップ」
https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.html

地球環境産業技術研究機構(2018)「CCS 技術の新展開」、シーエムシー出版

(END)

【 免責事項 】
本資料は証券その他の投資対象の売買の勧誘ではなく、日興リサーチセンター株式会社（以下「当社」といいます）が情報の提供を目的に作成したものです。本資料は、当社が信頼できると判断した情報源から入手した情報に基づいて作成していますが、これらの情報が完全、正確であるとの保証はいたしかねます。情報が不完全または要約されている場合もあります。本資料に記載する価格、数値等は、過去の実績値、概算値あるいは将来の予測値であり、実際とは異なる場合があります。かかる価格、数値等は予告なしに変更することがありますので、予めご了承くださいますようお願いいたします。本資料は将来の結果をお約束するものでもありませんし、本資料にある情報をいかなる目的で使用される場合におきましても、お客様の判断と責任において使用されるものであり、本資料にある情報の使用による結果について、当社が責任を負うものではありません。本資料は、本資料を受領される特定のお客様の財務状況、ニーズ又は投資目的を考慮して作成されているものではありません。本資料はお客様に対して税金・法律・投資上のアドバイスを提供する目的で作成されたものではありません。投資に関する最終決定は、契約締結前交付書面、上場有価証券等書面、目論見書、お客様向け資料等をよくお読みになり、お客様ご自身の判断でなさるようお願いいたします。
当社が本資料で推奨されている投資や見解と整合しない又は矛盾するコメントを顧客に対して行う場合があります。当社の役職員は、本資料で言及されている証券、その派生商品又は本資料の対象会社の別の証券の売買を行う可能性があります。
本資料は、当社又は当社の関連会社から配布しています。本資料に含まれる情報は、提供されましたお客様限りでご使用ください。
本資料は当社の著作物です。本資料のいかなる部分についても電子的または機械的な方法を問わず、いかなる目的であれ、無断で複製または転送等を行わないようにお願いいたします。本資料に関するお問い合わせは、当社の営業担当者までお願いいたします。
追加情報をご希望の場合にはご連絡ください。
本資料に記載された会社名、商品名またはサービス名等は、当社または各社の商標または登録商標です。

【 金融商品取引法第 37 条（広告等の規制）にかかる留意事項 】
[手数料等について]
当社と有価証券投資等にかかる助言、コンサルティングのお取引をされる場合、所定の手数料等をご負担いただく場合があります。手数料の額は当社の助言内容により異なり、定額の場合、投資助言対象資産額に一定の年率（0.25%～1.00%）を乗じた金額の場合、運用成果に応じた報酬をいただく場合などがありますが、お客様との契約により決定いたします。

[リスク等について]
当社は、お客様との契約に基づいて投資助言を行う場合、当社が信頼できると判断した情報源から入手した市場等の情報と、当社が有効と信ずる分析手法等に基づいて投資助言を行いますが、その正確性や運用の成果を保証するものではありません。金融商品等への投資のご判断はお客様ご自身が行ってください。当社が投資助言を行う金融商品等には、株式相場、金利水準、為替相場、不動産相場、商品相場等の価格の変動等および有価証券の発行者等の信用状況（財務・経営状況含む）の悪化等それらに関する外部評価の変化等を直接の原因として損失が生じるおそれ（元本欠損リスク）、または元本を超過する損失を生じるおそれ（元本超過損リスク）があります。なお、市場デリバティブ取引には、対象となる株式等または指標等の価格変動により損失の額が、お客様が金融商品取引業者等に差し入れた委託証拠金または証拠金の額を上回るおそれ（元本超過損リスク）があります。
投資助言、コンサルティングの内容により手数料等およびリスクは異なりますので、当該サービスの契約締結前交付書面やお客様向け資料、契約書等をよくお読みください。

[商号等]
日興リサーチセンター株式会社
金融商品取引業者 投資助言・代理業　登録番号　関東財務局長（金商）第 915 号
[加入協会名]
一般社団法人日本投資顧問業協会

カーボンプライシング・プロジェクト報告書
2022 年 5 月

発行　日興リサーチセンター株式会社
〒135-8532　東京都江東区木場 1-5-55
深川ギャザリアウエスト 1 棟 4 階
https://www.nikko-research.co.jp/

問い合わせ先　カーボンプライシング研究室
電話：03-5677-7832

本資料は、信頼性の高いデータから作成されておりますが、当社はその正確性・確実性に関し、いかなる保証をするものではございません。本資料は、情報提供を目的としており、投資勧誘を目的としたものではございません。証券投資に関する最終判断は、投資家ご自身の判断でなさるようにお願いいたします。

本資料の著作権は当社に帰属し、本資料の転用および販売は固く禁じられております。

日興リサーチセンター
SMBC日興証券グループ