

「三本の矢」が拓く企業の気候変動リスクマネジメント —産学官の叡智が推進する物理的リスクと適応策評価—

創発戦略センター スペシャリスト 新美 陽大

目 次

1. 検討遅れる気候変動物理的リスクへの適応策
 - (1) 気候変動リスク顕在化による気象災害の被害拡大
 - (2) 検討が遅れる企業の物理的リスク
 - (3) 企業の物理的リスク評価と適応策の検討を阻む障壁

2. 物理的リスクと適応策検討を推進する「三本の矢」
 - (1) リスクマネジメントとして捉える物理的リスク
 - (2) 第一の矢：影響額の算定方法
 - (3) 第二の矢：発生確率の算定方法
 - (4) 第三の矢：推進のための枠組み設計

3. 提言 一産学官による叡智を結集して臨む気候変動
 - (1) 産学官セクター間連携による「三本の矢」
 - (2) 「適応策ラウンドテーブル」と「気候予報士」の重要性
 - (3) おわりに—ONE TEAMで実現する気候強靱社会

要 約

1. 近年、国内外で気象災害による被害が拡大している。被害額などのデータにも、その傾向は如実に表れている。気象災害の拡大は、気候変動リスク顕在化の一端と見ることができる。
2. 気候変動が経済社会のシステミックリスクになるとの懸念を踏まえ、金融界が中心となり、すべての企業は気候変動によるリスクと機会を財務的な観点から分析および公表すべきとした「TCFD提言」が策定され、多くの企業が取り組みを活発化させている。
3. 近年の気象災害による物理的リスクは、企業収益にも実害を及ぼす形で顕在化している。
4. 企業は、気候変動によるリスク把握と対策を万全とするため、物理的リスクの評価と適応策の検討を急ぐ必要がある。ところが、「情報」と「資金」の二つの障壁が、検討を阻んでいる。
5. これらの障壁を打破するカギは、物理的リスクの定量評価により、被る損失と適応策との「投資対効果」を明確化することである。ただし、既往研究は企業によって各々に異なる物理的リスクと適応策の検討には適さず、新たな評価手法を開発する必要がある。
6. 企業の物理的リスク評価を、一般的なリスクマネジメント手法に基づき整理すると、財務モデルから「1回当たりの影響額」、気候モデルから「発生確率」の算定が必要となる。さらに、物理的リスクと適応策との定量評価手法を推進するには、「全般に亘る枠組み設計」が重要である。これらを「三本の矢」とする。
 - 「影響額の算定方法」では、公開データや企業の経験値を基に、物理的リスクの影響フローを整理したうえで重要項目を選定し、併せて影響を定量化するための前提条件である「閾値」と「定数」を設定する。
 - 「発生確率の算定方法」では、公開データを基に、企業の物理的リスク評価に十分な分解能を持ち、発生確率を分析可能な気候変動予測データセットを開発する。
 - 「推進のための枠組み」では、上記「影響額の算定方法」および「発生確率の算定方法」の成果を採り入れた評価ツールを開発するとともに、適応策タクソノミーを策定してファイナンスを促進する。
7. 「三本の矢」の開発には、産学官それぞれのセクターが、ニーズとシーズを持ち寄って連携することが必須である。
8. 産学官の連携のために、まず「適応策ラウンドテーブル」の開催を提案する。また、各セクター間のコーディネーターを「気候予報士」が担うことで、情報の連携や制度の運用における連携が強まり、ONE TEAMで物理的リスクの評価および適応策の実施を進めることができるだろう。

1. 検討遅れる気候変動物理的リスクへの適応策

(1) 気候変動リスク顕在化による気象災害の被害拡大

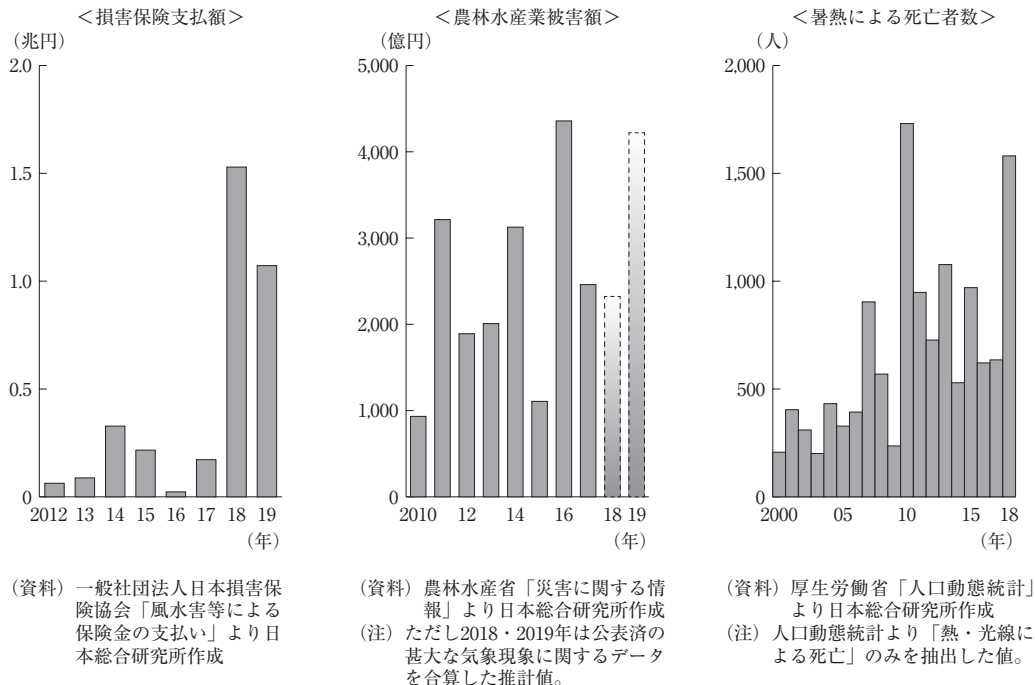
A. 国内外で拡大する気象災害による被害

近年、日本列島は相次ぐ気象災害に見舞われている。2018年の西日本を中心とした「平成30年7月豪雨」や台風21・24号による暴風・高潮、2019年には台風15・19・24号による大雨や暴風が、極めて広い範囲に甚大な被害を及ぼした。また、2020年には「令和2年7月豪雨」により、西日本から東日本の広い範囲が長期間に亘る大雨となった。

気象災害による被害拡大は、様々な統計データに現れている。例えば、損害保険会社の保険支払額や農林水産業への被害額、さらには猛暑によると見られる熱中症死亡者数は、いずれも近年増加傾向にある（図表1）。気象災害は、私たちの生活の様々な側面において、大きな実害を与えるリスクと捉えることができる。同様に海外でも、大雨・熱波・干魃・森林火災など、次から次へと場所や種類を変えて気象災害が発生している。気象災害による被害を金額で見ると、年間平均1,200億ドル（約13兆円）にも上り、2017年には3,000億ドル（約33兆円）を超えて過去最悪の記録を更新した（注1）。

このように、気象災害による被害は国内だけでなく海外でも、人間社会に実際に被害を及ぼしており、その範囲や規模を拡大させつつあることにもはや疑う余地はないといえる。

（図表1）気象災害による主な影響推移



B. 気象災害の拡大は気候変動リスク顕在化の表れ

近年の気象災害による被害拡大は、急速な地球温暖化およびそれに伴う気候変動がもたらす結果であること、また、人間活動が過剰に排出する温室効果ガスが地球温暖化の原因であることは、多くの研究

結果に基づく科学的知見から高い蓋然性を持つと認識されている（IPCC [2014a]）。ただ、今後の地球温暖化および気候変動の予測や気象災害への影響については様々な見解が示されており、認識が共通化されるには至っていない。

しかし、気候変動を「リスク」として捉えると、対応方針は自ずと定まる。リスクとは「不確実性が目的に与える影響」と定義される（ISO [2018b]）が、重要なことは「不確実性」の取り扱いにある。すなわち、一般的にリスクに対しては、リスクが発現するか否かが問題なのではなく、発現する可能性があるならば適切にリスクの特定・分析・評価を行い、リスク発現時の被害を最小限とするための対策を採ることが求められる。

すなわち、気候変動というリスクに対しては、気候変動が進むかあるいは進まないかという単純な二元論ではなく、気候変動が進み気象災害が一層拡大するリスクに対して、いかに適切な対応を採るかを議論することこそが重要と考える。

(2) 検討が遅れる企業の物理的リスク

A. 企業や金融機関・投資家が懸念を強める気候変動リスク

本稿では、気候変動の原因である温室効果ガスの主要排出源の一つであり、同時に、その結果として起こる気候変動の影響を大きく受ける立場の民間企業に焦点を当てる。企業にとって気候変動リスクは、最も憂慮すべき事象の一つとして、国際的に共通認識されるようになってきているからである（World Economic Forum [2020]）。

他方で、各国の中央銀行や金融当局は、2017年にNGFS（気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク）を設立するなど、気候変動リスクに対して深い憂慮を有している。様々なリスクの適切な制御が事業継続に直結する金融機関や投資家にとって、気候変動リスクは「ブラック・スワン（ナシーム・望月 [2009]）」に相当する最重要のリスク要因である。なぜなら、気候変動リスクはひとたび発現すれば甚大な影響を及ぼすにもかかわらず、影響評価が未だ十分には行われていないからである。

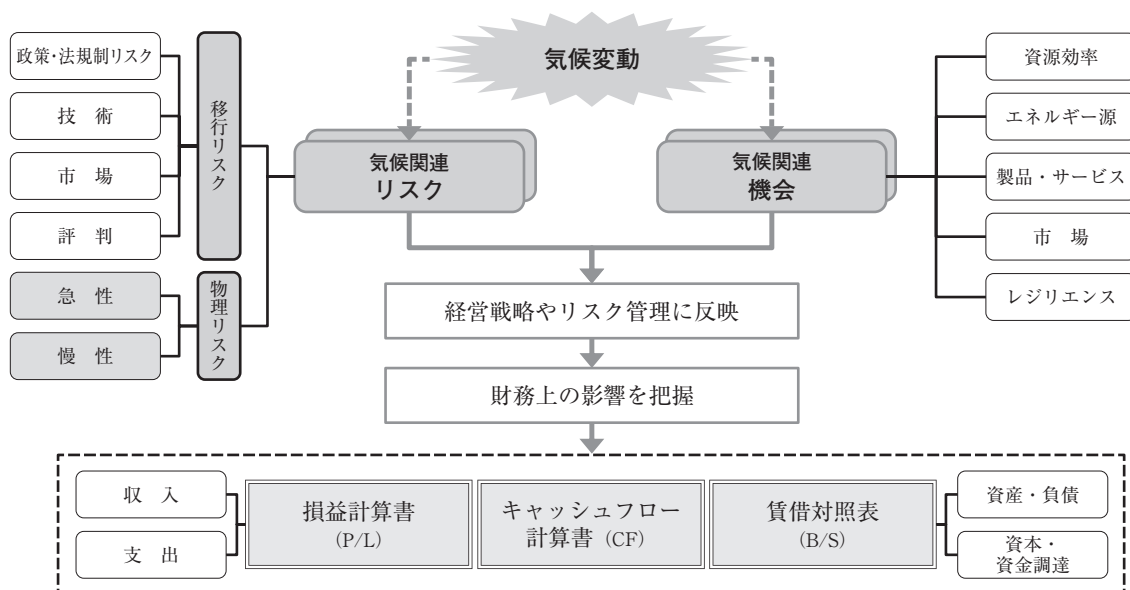
B. TCFD提言が目指す企業と金融機関・投資家との対話進展

このような懸念を背景に、G20財務大臣・中央銀行総裁会議の要請を受けたFSB（金融安定理事会）が設置した「TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）」が2017年に取りまとめたのが、最終報告書「TCFD提言（TCFD [2017]）」である。

TCFD提言では、気候変動による影響をリスクと機会の両面から評価し、さらにリスクを移行リスクと物理的リスクに分類している（注2）。企業や金融機関・投資家は、TCFD提言によって、気候変動という極めて広い範囲に及ぶ影響評価を適切に分類し、理解を深めることができるようになった。

さらに、気候変動影響評価のゴールを、企業財務にまで踏み込んで示したこともTCFD提言の特徴である。気候変動に対する取り組みの情報開示は、従来は温室効果ガス排出量（例えばトン単位）であったところ、TCFD提言では損益計算書上の収益への影響（例えば円単位）が求められている。気候変動を含むESG（環境・社会・ガバナンス）への取り組みは「非財務情報」ともされるが、TCFD提言が気候変動に焦点を当て「財務情報」としての評価手法を示したことは注目すべき点である。これにより、

(図表 2) TCFD提言における気候変動評価フロー



(資料) TCFD [2017] を基に日本総合研究所作成

金融機関や投資家は企業の取り組みに対する理解を進め、結果として企業と金融機関・投資家との対話が一層進展する効果を狙っているからである。

C. 遅行する物理的リスクの検討

前述のとおり、TCFD提言に依れば企業の事業活動における気候変動リスクは「移行リスク」と「物理的リスク」の2種類に分類される(図表3)が、現状における企業の検討状況は、移行リスクに比べて物理的リスクが、圧倒的に遅れている。例えば、世界全体の企業が特定している自社の気候変動リスクのうち、物理的リスクは移行リスクの約半分に留まるとされた調査結果もある(CDP [2019])。

この理由は、移行リスクと物理的リスクとで、企業が想定する顕在化のタイミングが異なるためと考えられる。最も多くの企業が想定する気候変動リスク顕在化の時期は、移行リスクが「現在の近傍」なのに対して、物理的リスクは「長期の未来」である。事実、欧米の年金基金の間で、化石燃料関連企業を投資先から除外する「ダイベストメント」の動きが拡がりつつあることを典型に、移行リスクが現在進行形で企業に及んでいると見られる事例も確認できる。

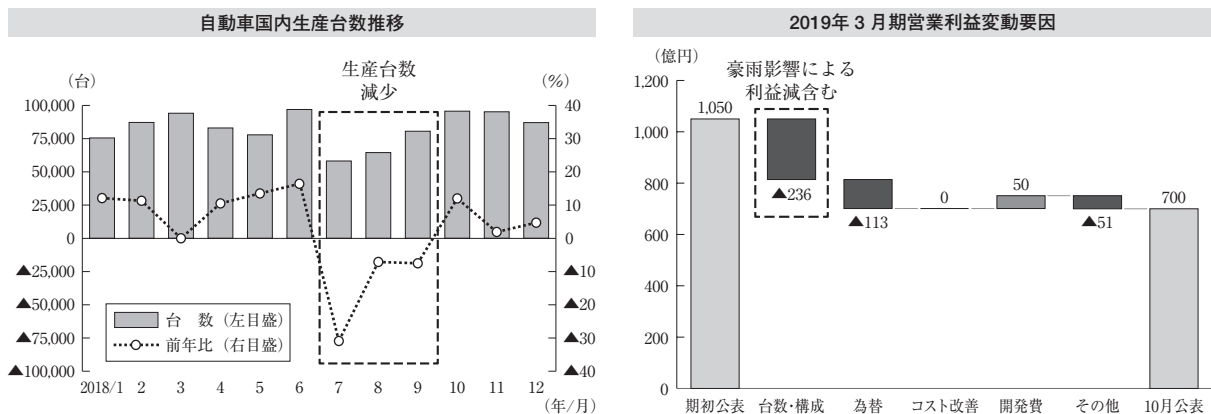
もちろん、物理的リスクが現時点で、すでに顕在化していると思われる事象もないわけではない。例えば、2018年7月の西日本豪雨により、大手自動車メーカーのマツダは主力生産工場が被害を受け、操業を停止せざるを得ない事態となった。自動車出荷台数への影響は約3カ月に亘り、企業収益としても約280億円の損失を発生させた(マツダ株式会社 [2018])。マツダはグループ内在庫の活用や被害を受けていない生産拠点の活用などの対策を講じたが、それがなければ影響はさらに大きかったと想定される。

(図表3) 気候変動リスクの分類

移行リスク 低炭素・脱炭素経済への移行に伴う変化に応じて事業活動が受けるリスク	政策・法規制リスク 排出条件を定める規制や省エネ規制、環境税制、情報開示のルール化、それらの対応に掛かる費用増など
	技術リスク クリーンエネルギーのコスト下落と投資拡大、破壊的技術革新による技術資産の入れ替えなど
	市場リスク 化石燃料価格や消費者の選好、カーボン強度の高い資産を回避しようとする投資家の選好などによる需給バランスや競争状態の変化
	評判リスク 気候変動への対応を巡るブランドイメージの悪化
物理リスク 気象現象によって事業活動が受けるリスク	急性的リスク サイクロン、ハリケーン、洪水などの極端な気象現象の過酷さの高まりを含む気象事象により引き起こされるもの
	慢性的リスク 海面上昇や慢性的な熱波を引き起こす可能性のある気候パターンの長期的な変化（例：より高い温度の持続）

(資料) TCFD [2017] を基に日本総合研究所作成

(図表4) 2018年西日本豪雨による事業活動への影響～マツダの事例



(資料) マツダ株式会社公表資料を基に日本総合研究所作成

遠い先の話として、物理的リスクを潜在的な脅威と認識している企業が多いことも事実である。顕在化した際に事業継続を困難にするリスクのうち、約8割の企業が、気候変動が影響する自然災害リスクを挙げているとの調査もある（株式会社みずほ総合研究所 [2016]）。

ただ、企業にとって、移行リスクが「低炭素・脱炭素経済の実現」という国際社会の合意に基づく共通ルールに依拠して導かれるのに対して、物理的リスクは気候変動の影響を受ける気象現象により被る実被害そのものであり、当然共通ルールは存在しない。いずれも重要なリスクだが、物理的リスクには共通ルールがない故に、業種や地域などそれぞれの企業が事業活動を踏まえ、個別に検討する必要がある。これが、物理的リスクの検討が遅行してしまう背景と言えるだろう。

(3) 企業の物理的リスク評価と適応策の検討を阻む障壁

A. 適応策という気候変動リスクへの対応

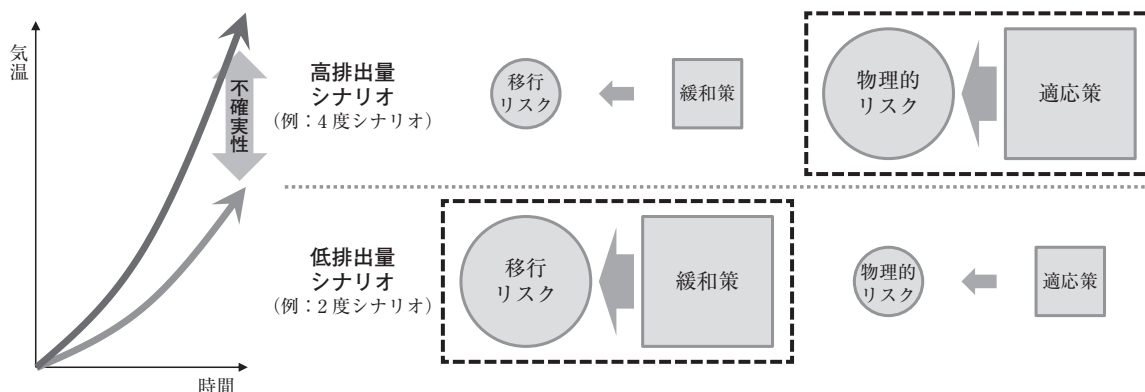
気候変動リスクを低減するための対策は、アプローチの違いにより、気候変動の原因となる温室効果ガスの濃度を下げる対策である「緩和策」と、気候変動により発生する現象への対策である「適応策」とに分類されている（ISO [2018a]）。

将来の気候の予測は、主に人間社会が排出する温室効果ガスを変数とした、複数のシナリオによって示される。このうち、妥当性が広く認知されているのは、いわゆる「2度シナリオ」を含む温室効果ガス排出量を低く抑えるシナリオ（低排出量シナリオ）と、「4度シナリオ」を含む温室効果ガスの排出量抑制がほとんど進まないシナリオ（高排出量シナリオ）である。移行リスクと物理的リスクについて見ると、移行リスクは低排出量シナリオ、物理的リスクは高排出量シナリオで、それぞれ最大になると考えられる。

ここで留意したいのは、低排出量シナリオと高排出量シナリオとの間には、気候変動リスクの持つ不確実性の幅が存在することである。特に企業の立場から見れば、どのシナリオが正しいのかではなく、どのような幅を見てリスクに備えるべきかが、検討のポイントになると考えられる。すなわち、気候変動リスクへの対応策としては、緩和策が奏功したことで実現する低排出量シナリオにおける移行リスクに対するものと、高排出量シナリオにおける物理的リスクに対するもの（適応策）とを併せて検討することが、それぞれ最大のリスクに対して十分な対応策を備えたことになり、このような企業こそが将来の気候変動に対して真に強靱であると言える（図表5）。

ところが、前述の通り、多くの企業は気候変動リスクのうち移行リスクの検討を先行させて、物理的リスクの検討を後回しにしているきらいがあり、適応策も十分に検討されているとは言えない。物理的リスクおよび適応策の検討なくしては、将来の気候の不確実性に対して十分対応できるとは言えない状況が生まれてしまっている。

（図表5）気候変動シナリオにおけるリスクと対策の対応関係



（資料）日本総合研究所作成

B. 物理的リスクと適応策の検討を妨げる二つの障壁

物理的リスクの評価および適応策の実施は、以前から重要性が認識されていたものの、推進の妨げと

なる「障壁」の存在もまた指摘されている。例えば、IPCC [2014b] では適応策推進を妨げる制約を、GCA・UNEPFI [2020] では適応策を推進するための資金調達における制約を、それぞれ複数の分野に分けて示している。

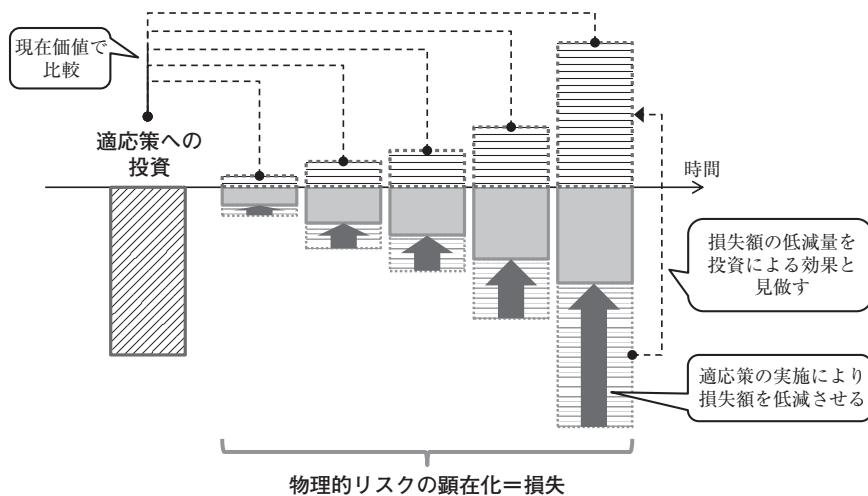
これらの既往分析や、前述の物理的リスクおよび適応策に関する課題を纏めると、企業の立場から必要なのは「情報」と「資金」の障壁打破だと考える。企業が自社の物理的リスクを評価するための「情報」と、リスクに対応する適応策を推進するための「資金」とが得られれば、顕在化しつつある物理的リスクへの対応として適応策の実施に着手でき、TCFD開示による物理的リスクや適応策の評価が進み、結果として制度設計や市場拡大に繋がると考えられる。

C. 物理的リスク定量評価による「投資対効果」明確化の重要性

それでは、「情報」と「資金」の障壁を打破するカギは何か。それは、物理的リスクの定量評価であると考えられる。適応策を将来のリスクを低減するための投資行動と見れば、物理的リスクに対する適応策の要否を投資対効果に基づき判断することが極めて重要と考えられるからである。具体的には、以下の手順で適応策の効果を評価することができよう。物理的リスクの定量評価結果は、将来の損失額（注3）であると見ることができる。また、適応策の目的は将来の損失額を減らすことになる。このとき、適応策による効果は将来に亘る損失額の低減分であるため、毎年発生が見込まれる効果をそれぞれ現在価値で割り戻した金額の合計値と、適応策実施に必要な投資額との比率が、物理的リスクと適応策における「投資対効果」と定義できる（図表6）。

物理的リスクの定量評価によって、適応策の投資対効果が算定されれば、適応策を実施する企業は、適応策の要否が判断できる手段を得ることになり「情報」の障壁が打破される。加えて、金融機関や投資家など社外のステークホルダーにとっては、適応策の投資適格性を客観的に測る手段が得られることになり、「資金」の障壁も打破されることが期待できる。

（図表6）物理的リスクと適応策における投資対効果の評価方法



（資料）日本総合研究所作成

D. 求められる物理的リスク定量評価の新技术法

気候リスクを定量評価する試みは、すでに様々な成果が公表されている。例えば、「スターンレビュー」によれば、気候変動の影響を回避する行動をしない場合には、GDPの5～20%に相当する被害を毎年受けるとしている（Nicholas Stern [2007]）。また、国立環境研究所をはじめとする研究グループによれば、気候変動による経済的な被害額は、世界全体では最悪の場合GDPの3.9～8.6%に相当すると推計している（Takakura et al, [2019]）。

ただし、これらの成果は世界全体を対象としたマクロ経済的手法を用いており、企業別の対策検討には適していない。また、IPCC [2014b] も気候変動による被害額の推計は「予測困難である」と言及しており、国際的に定まった認識があるとは言えない。

以上で述べたように、物理的リスクの定量評価手法はいまだ定まっていない。企業ごとに異なる物理的リスクを定量評価し、最適な適応策を検討するためには、新たな手法を開発する必要がある。

（注1）CRED（ルーバン・カトリック大学疫学研究所）EM-DAT（災害データベース）の自然災害被害額のうち「洪水」「暴風雨」「旱魃」を気候変動と関係の深い災害として抽出。

（注2）本稿以下では、「移行リスク」は気候変動リスクのうち移行リスクを、「物理的リスク」は気候変動リスクのうち物理的リスクを指すものとする。

（注3）気候変動はポジティブリスクとして企業の収益となる場合もあるが、本稿ではもっぱらネガティブリスクとして企業の損失となるものと取り扱う。

2. 物理的リスクと適応策検討を推進する「三本の矢」

(1) リスクマネジメントとして捉える物理的リスク

A. 「影響額」と「発生確率」による物理的リスク定量化

リスクマネジメントは、企業を取り巻く様々なリスクを、適切に制御するために開発された体系的な手法である。あらゆるリスクに対して潜在的リスクの洗い出しや対応の検討を進めることで、「想定外」の事態に陥ることを回避し、事業活動を安定して継続するための手段といえる。

本稿では、リスクマネジメントの手法から、物理的リスクを適切に制御するための3つの手法を、「三本の矢」として提案する。

リスクマネジメントの定義によれば、リスクを定量化した値は「リスク量」と呼ばれ、数式としては「事象発生1回あたりの影響額」（Consequence）と「発生確率」（Likelihood）との掛け算で表される（ISO [2009]）。物理的リスクにおけるリスク量は、物理的リスクの定量評価結果である将来の損失額である。つまり、気候変動により発現する事象について「影響額」と「発生確率」がそれぞれ得られれば、リスク量である将来の損失額を算定することができ、気候リスクにおける投資対効果を測ることが可能になる。

次に、「影響額」と「発生確率」を算定するために、物理的リスクの特定・分析・評価の手法に着目すると、そのプロセスは「社会・経済状況」「温室効果ガス排出量・濃度」「気象現象」「影響」「想定影響額」の5つの検討ステップで構成され则认为する。

このうち、「気象現象」より後のステップについては、企業ごとの周辺環境や事業内容によって各々

異なる財務モデルの構築を検討する必要がある。財務モデルが構築できれば、ある気象現象から企業の資産や事業活動が受ける影響を明らかにし、それらへの影響の度合いを「影響額」として定量評価することができる。これを「第一の矢」とする。

「社会・経済状況」から「気象現象」までのステップは、気候変動のシミュレーションを目的とした気候モデルによって、すでに様々な予測結果が示されている（注4）。気候モデルによる予測結果を複数採用するなどの手法を構築すれば、ある気象現象の「発生確率」を求めることができる。これを「第二の矢」とする。

B. 取り組みを推進する枠組み制度の設計

「第一の矢」と「第二の矢」によって、物理的リスクの定量評価と、それに対応する最適な適応策の検討は可能になるが、これだけでは「情報」と「資金」の障壁を打破するには必ずしも十分ではない。そのため、より広い視点から企業の検討を後押しするための方策を検討する余地がある。

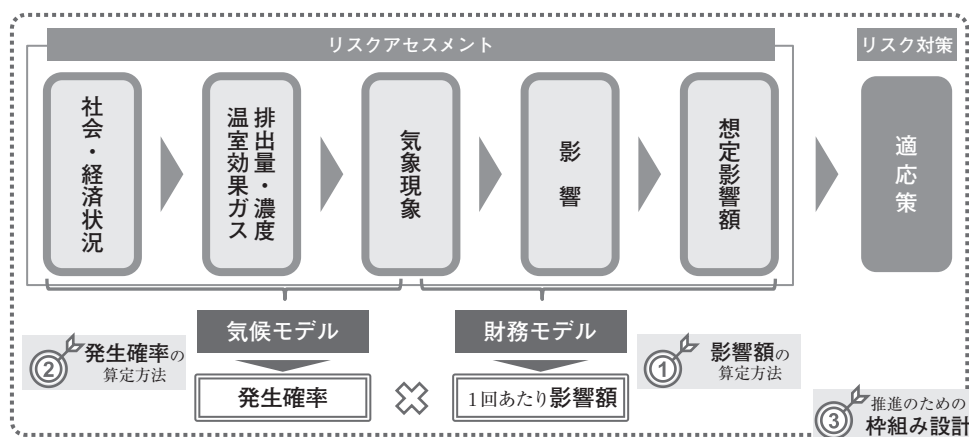
企業ごとに異なる物理的リスクの評価に、情報収集や分析に多大な労力を要することが、「情報」の障壁を生む原因となっている。多くの企業に取り組みを拡げるには、評価の手法だけでなく、評価ツールの整備等による情報収集や分析の支援が必要である。

また、物理的リスクは企業ごとに異なるがゆえに、それぞれの企業が異なる評価基準を設定すると、金融機関や投資家など社外ステークホルダーは容易に物理的リスクや適応策を比較評価することができず、これが「資金」の障壁を生む。物理的リスクの評価基準の統一が、企業と社外ステークホルダーとの認識共有、さらには適応策への資金供給の活発化に繋がるだろう。

このように、「情報」と「資金」との障壁を打破し、物理的リスクの評価と適応策への取り組み拡大を社会全体の強靱性に繋げるには、自律的な推進力を生む枠組み制度の設計が欠かせない。これが「第三の矢」となる。

以下では、これら「三本の矢」のあるべき手法について、それぞれ具体的に検討する。

（図表7）物理的リスクと適応策検討を推進する「三本の矢」



（資料）日本総合研究所作成

(2) 第一の矢：影響額の算定方法

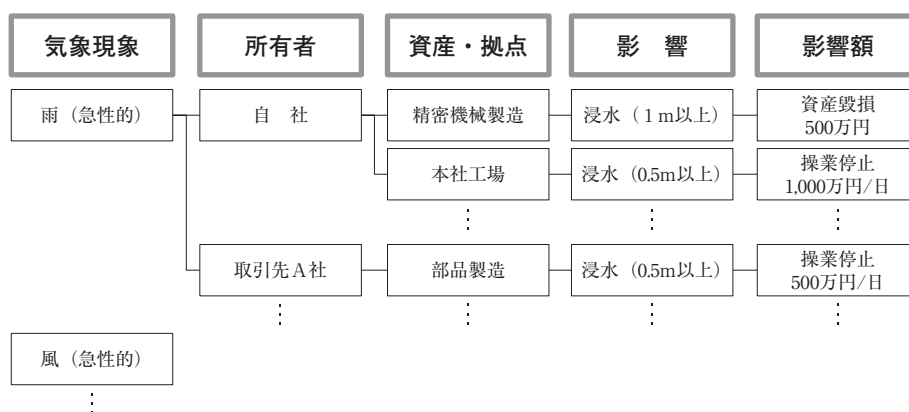
A. 5W1Hを基にした物理的リスクの要素整理

様々な気象災害を対象とした物理的リスクの評価には、体系立てた整理が有用である。そのために、あらゆる情報伝達の基本体系である「5W1H」に準えて考える。

5W1Hとは、When（時）・Where（場所）・Who（人物）・What（物事）・Why（理由）・How（手段）を要素として明らかにすることで、情報伝達を円滑にする手法である。これらの視点から物理的リスクを、When・Whyを「気象現象」、WhoをWhoseと読み替えて「所有者」、What・Whereを「資産・拠点」、Howを「影響」「影響額」の要素で、影響フローとして整理すると分かりやすい（図表8）。

特に、企業の視点からは、誰の・どのような資産や拠点到影響が及ぶかの明示が重要である。なぜなら、TCFD提言も示しているように、損益計算書や貸借対照表のどの項目に影響が及ぶかを具体的に検討することが、最適な対応策検討に繋がるからである。

（図表8）気候変動影響フローの例



（資料）日本総合研究所作成

B. 予測データの種類が気象現象の着眼点は

気候変動が与える影響については、国際的にはIPCC [2014b] やEUタクソミー（EU TEG [2020]）、国内では環境省ほか [2018] などに既往の項目例がある。ただし、企業の日線から事業活動に与える影響を分析する目的には、これらの項目類型は整理されていない。

そこで、3章で後述するように、物理的リスクの定量評価にはシミュレーションによる予測データを用いることから、データの種類から気象現象を整理してはどうだろうか（図表9）。気候変動によって生じる影響は様々だが、その原因となる物理現象の変化は「降水量」「風」「気温」「海面高度」に限定されると考えられる。

また、気象現象の整理は「慢性的現象」と「急性的現象」に分けて考えると分かりやすい。例えば、降水量という同じ物理量についても、慢性的な減少によって起こる干魃と、急性的な増加によって起こる大雨とは、影響や対策が全く異なるからである。

(図表9) 主な予測データ種類ごとの気象災害

		慢性的現象	急性的現象	
降水量	増加		大雨・大雪	地域によって 増減異なる
	減少	干 魃		
風 速	増加		暴 風	熱帯低気圧の強力化
気温 (湿度含む)	増加	暖 冬	熱 波	全体的に上昇
海面高度	増加	沿岸浸食	高 潮	全体的に上昇
その他	↑ 気圧・雲量などは現象の詳細解析に活用			

(資料) 日本総合研究所作成

(注) 予測データの種類はd4PDFマニュアルを参照のうえ選定。

C. 経験知が活きる重要項目選定と定量化手法開発

物理的リスクにより受ける影響は、業種やエリアによって千差万別である。影響フローを用いてあらゆる影響を洗い出したうえで、定量評価を進めるには特に影響が大きいことが想定されるフローを、重要項目として絞り込むことが重要である。

また、物理的リスクによる影響を定量評価して影響“額”を求めることが、影響フローの要である。そのためには、物理的リスクによる影響に影響額に変換するための前提条件である「閾値」や「係数」を設定する。例えば、三井住友フィナンシャルグループのTCFD開示（株式会社三井住友フィナンシャルグループ [2020]）は、物理的リスクの定量評価を実施・開示した世界的にも先駆的な事例であるが、対象とした水害による影響評価の前提条件には、ハザードマップ（注5）から得られる想定浸水深が「閾値」、浸水深別被害率や営業停止・停滞日数（国土交通省水管理・国土保全局 [2020]）が「係数」に該当する。

さらに、前述の重要項目選定と前提条件設定は、公開データを前提としつつ、企業が有する経験知を最大限活用することが有効である。なぜなら、気候変動による影響は企業の業種や地域によってそれぞれ異なるため、公開データのみでカバーできない影響に関する重要項目選定の視点や、定量評価のための前提条件は、同業あるいは近隣地域における企業の実体験が貴重な情報源となるからである。

(3) 第二の矢：発生確率の算定方法

A. 物理的リスク評価に適した新たなデータセット整備の必要性

企業が物理的リスクの定量評価を自ら進めるためには、評価に必要な解像度や発生確率に関するデータが、専門家でなくても容易に得られる方策を開発すべきである。

そのために、公開データを基に、企業の物理的リスク評価に適した新たなデータセットの整備を提案したい。新たなデータセットは「公開データ」「発生確率が得られる」「高分解能」の各条件を満たす必要があると考える。

B. 発生確率分析が可能な公開データセット「d4PDF」

「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）」は、文部科学省のプログラムにより国内複数の研究機関による共同研究の成果として2016年に公開された、気候変動予測データセットである（注6）。特徴は、複数の数値モデルを基にシミュレーションの初期条件を少しずつ変化させ、従来に比べてはるかに大量の予測結果を得る「アンサンブル予報」によって、気象現象の発生確率分析を可能としたことである。この特徴を活かして、例えば猛暑のように発生する確率は低いが、ひとたび発生すると影響が大きい現象が、気候変動によって発生確率がどれほど変わるのかを分析する、いわゆる「イベント・アトリビューション」の研究が進んでいる。すなわち、気象災害に直結する急性的現象の変化を分析可能にしたという点で、存在意義は大きい。

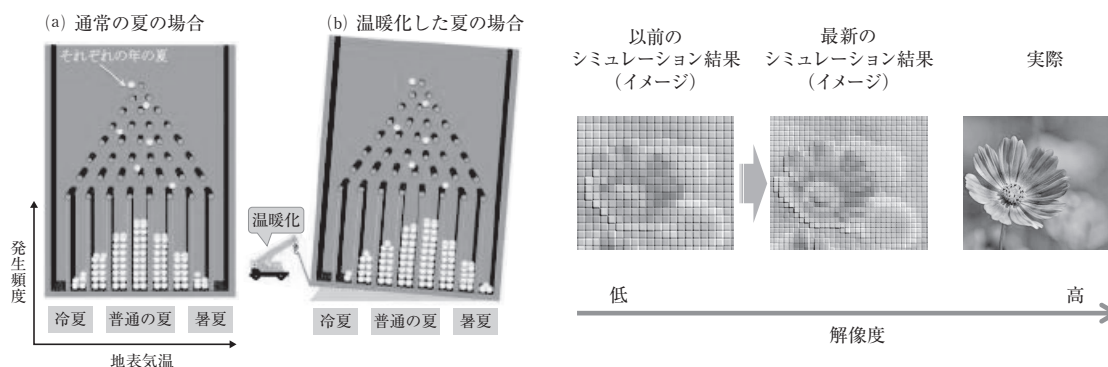
d4PDFは、物理的リスクの評価と適応策の策定のために、気候変動の持つ不確実性の定量評価手法として開発されたことが謳われており（文部科学省ほか [2015]）、本稿の目的に極めて合致したものと言える。新たなデータセットは、d4PDFのような公開データに基づき、発生確率が得られるものをベースとすべきである。

C. ダウンスケーリングによる予測モデル高解像度化

さらに、企業の影響評価に適した時間および空間解像度を得るために、予測データの精緻化を進めるべきである。専門的には「ダウンスケーリング」と呼ばれ、統計的あるいは力学的な手法がある（稲津・佐藤 [2010]）。前述のd4PDFは、最も高い解像度で格子間隔20kmであるが、企業の影響評価に用いるには十分とは言えない。一方で、ダウンスケーリングには、膨大な計算量が必要となるが、企業のニーズと必要な計算量から、最適な格子間隔にまで解像度を高めていく必要があるだろう。

ここで、ダウンスケーリングを実現する手法については、注意すべき点がある。近年、人工知能（AI）を用いたダウンスケーリング手法の開発が活発に進められており、すでに実装される事例も現れている。AIといっても手法は様々であるが、予測結果の精度を高めるために予測モデルが自律・自動的に学習を重ねるといった特徴ゆえに、後から予測過程の説明が困難な場合も多い。一方、TCFD提言が

（図表10） イベント・アトリビューションの事例（左）
およびモデル高解像度化のイメージ（右）



（資料）環境省ほか [2018] を基に日本総合研究所作成

謳うように、気候変動リスク評価がステークホルダーとの対話円滑化が目的であるならば、AIを用いる場合にも予測過程を説明できる、いわゆる「説明可能なAI (XAI)」(注7)を採用すべきである。

(4) 第三の矢：推進のための枠組み設計

A. 物理的リスクと適応策効果を測るツールが必要

物理的リスクや適応策は企業によって異なるため、共通シナリオを基にした検討は難しい。そのため、気候変動に関するデータは共通させつつ、企業ごとの環境に合わせてリスク量や適応策の効果を測定できる「物理的リスク・適応策検討ツール」を開発すべきである。ツールには気候モデルと財務モデルを組み込み、企業ごとの物理的リスクのリスク量算定機能を実装する。ツールの開発により、企業は適応策の推進のための「情報」の障壁を越え、自ら適応策の検討を進められる有効な手法になると考える。

また、ツールの開発に当たっては、企業の業種や地域ごとに、重要項目選定と定量評価のための係数や前提条件を含めた影響フローモデルの参照機能を実装すべきである。これにより、新たに影響評価に着手する企業にとっては、検討を始めるためのハードルを格段に下げることができるだろう。

B. 適応策のためのファイナンスを促進する制度が必要

また、対策推進には自社だけでなく、金融機関や投資家など社外ステークホルダーも含めた「資金」の障壁を越えることも重要である。そこで緩和策の場合は、誰から見ても気候変動の緩和に資する内容であり、そのための投資に適しているかを判断できるようにするため、グリーンボンド原則 (ICMA [2018]) やEUタクソノミー (EU TEG [2020]) に代表されるような共通基準を定めている。緩和策は、温室効果ガスの排出量を削減するか、もしくは排出された温室効果ガスを吸収するかに手法が限定されるため、共通の基準が策定しやすいことも背景にある。

一方、適応策は企業ごとに目的や手段が様々であるため、共通の基準を定めることは困難だった。しかし、物理的リスクの定量評価が可能になれば、「適応策タクソノミー」とも言える定量的な共通基準を策定することができる。これにより、緩和策と同様に様々なステークホルダーの投資を呼び込むことが期待できる。

(注4) IPCC第5次評価報告書では、「温室効果ガス排出量・濃度」を定めたシナリオを用意して、様々な「社会・経済状況」の想定を可能にする、代表濃度経路 (RCP) という手法を採用している。

(注5) 国土交通省 ハザードマップポータルサイト (<https://disaportal.gsi.go.jp/>)

(注6) d4PDFウェブサイト (<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>)

(注7) アメリカ国防高等研究計画局 (DARPA) ウェブサイト (<https://www.darpa.mil/program/explainable-artificial-intelligence>)

3. 提言 一産学官による叡智を結集して臨む気候変動

(1) 産学官セクター間連携による「三本の矢」

物理的リスク評価と適応策推進のための「三本の矢」の開発には、多様な要素が必要となる。民間セクター・研究セクター・公共セクターの「産学官」それぞれの組織が、気候変動に関連するシーズとニーズを持ち寄り、叡智を結集させて開発を進める体制が求められる。以下では、各々の主体におけるシ

ーズとニーズについて論述したい。

民間セクターでは、企業等が有する膨大な経験知は、「三本の矢」を実践的な枠組みとするために必須な要素である。「第一の矢」における影響フローの整理や重要項目の選定は、民間セクターがこれまで気候変動によって実際に被った被害の内容や金額を基にすることで、より実態が反映される。また、気象災害への事業継続計画（BCP）を定めていれば、将来の気候変動にも対応できることを評価したうえで、これを適応策としても良いだろう。このように、民間セクターは物理的リスク評価と適応策検討における経験知の集約点として、「三本の矢」の開発にも重要なシーズを有していると言える。

他方で民間セクターは気候変動影響評価と適応策実施の主体であり、「三本の矢」の主たるユーザーでもある。民間セクターが適応策に積極的に取り組めるような「三本の矢」であるには、民間セクターがニーズを他セクターに伝え、自発的に開発に参加することが重要である。特に、「第三の矢」である評価ツールの開発には、ユーザー目線で使いやすいツールでなくてはならず、民間セクターからの積極的なフィードバックが不可欠である。

教育・研究機関が属する学術セクターは、あらゆる分野が研究成果を「三本の矢」のシーズとして活用できる。国内の大学や研究機関が持つ技術の粋を集結させれば、「三本の矢」の信頼性をより高められる。まず、地球物理学分野は気候変動予測における研究の中心であり、国内の学術セクターが有する世界トップレベルの研究成果は「第二の矢」の開発に大いに活用できる。ダウンスケーリングによる予測モデルの更なる高解像度化や、「イベント・アトリビューション」と呼ばれるアンサンブル予測を用いた気候変動予測技術の開発により、企業の物理リスク評価に適した予測モデルが実現できる。また、農学・土木工学・防災学等の各分野では、気象現象の影響評価や有効な対応策について、従来から調査・研究を進めている。このような分野は、既往研究の成果を影響分析や対応策の検討手法に反映させることで、「三本の矢」の有効性を高める効果に繋がるだろう。さらに、金融工学分野の気候変動との接点は、「気候金融工学」とも言うべき新たな分野を発展させる可能性を秘めている。金融に関する不確定要素に対するリスクマネジメントの手法は、気候変動予測の持つ不確実性に対する手法と親和性が高いためである。具体的には、d4PDFのようなアンサンブル予測による気候変動予測データに、金融工学におけるバリュー・アット・リスク（VaR）評価（日本銀行金融機構局金融高度化センター[2015]）を用いることで、気候変動による資産価値変動を確率論に基づき精緻に予測できる可能性を秘めているとも言える。

他方で、学術セクターは、「三本の矢」の開発に欠かせない役割を担うが、同時に学術セクターにとっても、研究推進の戦略策定のために社会ニーズを把握する重要な場となる。例えば、予測モデルの高解像度化には新たな技術開発や膨大な計算機資源が必要になるが、民間セクターが気候変動影響評価において気象災害の再現度をどの程度必要としているかによって、必要な技術を開発する方針も採れる。また、金融工学におけるVaRを気候変動予測にも用いるには、さらに大量のシミュレーションが必要となるが、もしニーズが明確であれば計算機資源を集中投入することも可能だろう。

官庁・自治体を含む公共セクターは、政策誘導や制度設計により「三本の矢」の有効性を高める重要な役割を担う。これら無くしては、まさに画竜点睛を欠く事態となりかねない。まず、適応策推進のための資金調達に関しては、既存の政策に加えて一層の支援策が必要である。そのためには、「第三の矢」である適応策タクソミーの制定により、適応策の拡大と適応策への資金供給の活発化を促す。また、もうひとつの「第三の矢」である評価ツールの開発においても、主導的な役割を果たすべきである。具体的には、気候変動適応策ポータルサイト「A-PLAT（注8）」において、民間セクターを対象とした公開情報の拡充を求めたい。また新たな動きの一つとして、2022年の公開を目指して議論が進められている「気候予測データセット（気象庁 [2020]）」がある。従来は学術セクターに留まっていた研究成果を、広く民間セクターに普及させる意欲的な取り組みであり、使いやすい形式や公開方法となるよう検討が進むことを期待したい。

他方、公共セクターにとっては、気候変動リスクの適切なマネジメントに繋がる制度設計は、社会全体のレジリエンスを向上させるという、公共セクター本来の役割を果たす意義を持つ。そのためには、これまで進めてきた政策や調査による結果を広く共有し、また将来あるべき姿を民間セクター・学術セクターとの協議を通じて検討すべきである。セクターや省庁間を超越した、幅広い関係構築と柔軟な対応を望みたい。

(2) 「適応策ラウンドテーブル」と「気候予報士」の重要性

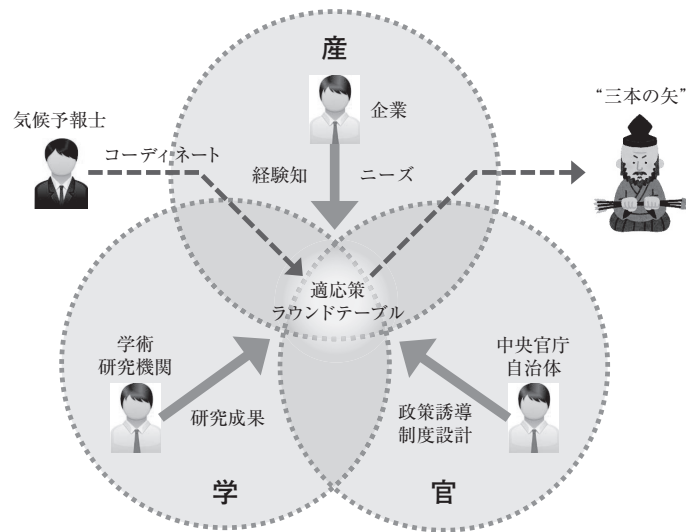
近年、気象災害による被害の顕在化が急速に進みつつあること、他方で気候変動リスクの評価手法や、対応策拡大のための手法が開発されていることに鑑みれば、速やかに「三本の矢」の開発に着手し、適切な気候リスクマネジメントの手法を広く普及させるべきである。

筆者は、「三本の矢」の開発のために、産学官が一堂に会する「適応策ラウンドテーブル」の開催を提案する。産学官の各セクターが、気候変動リスクマネジメントに関するニーズとシーズとを共有したうえで、「三本の矢」が備えるべき要件を定義し、それぞれの役割において開発を進めるための場作りである。有効な適応策の検討のための要素は、実績や成果として産学官の様々な場所に存在する。目的を共有したうえで、これらの要素を有機的に結び付ける場こそが、気候変動リスクの定量評価、および適応策の検討を推進するのではないか。

そして、「適応策ラウンドテーブル」の場および「三本の矢」の実装段階となった暁には、気候リスクマネジメントおよび適応策検討を支援する役割として、気候変動と産学官の各セクターとの橋渡し役を担う「気候予報士」の役割が必要になると想定する。

気候予報士が満たすべき条件は、産学官の気候変動に関する知識を有し、気候変動リスクの適切なマネジメントについての深い理解を有することである。このような要件を備えた気候予報士は、民間セクターにおける気候変動リスクおよび適応策検討を「三本の矢」を活用して支援するだけでなく、学術セクターの研究支援や公共セクターの制度検討支援にも携わり、「三本の矢」を継続的に改善・進化させる役割を果たすだろう。

(図表11) 産学官セクターおよび適応策ラウンドテーブルのイメージ



(資料) 日本総合研究所作成

(3) おわりに—ONE TEAMで実現する気候強靱社会

現在、日本国内における適応策の根幹をなしているのは、2018年に施行された「気候変動適応法（平成三十年法律第五十号）」である。同法では第一条に、その目的を「気候変動適応を推進し、もって現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に寄与すること」と定めている。本稿にて気候変動対策の本質として示した「いまいる場所で、将来に亘って同じ生活を送ること」と趣旨を同じくしていると言える。

また、この目的のために企業の果たす役割としては、第五条に「事業者は、自らの事業活動を円滑に実施するため、その事業活動の内容に即した気候変動適応に努めるとともに、国及び地方公共団体の気候変動適応に関する施策に協力するよう努めるものとする。」と定められている。本稿にて示した「三本の矢」は、企業ごとに異なる事業活動の内容に則した適応策を検討および実施するための、まさに切り札となり得る。

筆者は、地球温暖化および気候変動を避けるべき理由は、私たちが「いまと同じ場所で同じ質の生活を送る」ことが困難になるからだと考える。我々人類は有史以来、気候変動に合わせて住む場所を移動することができたが、現代社会においては国境など様々な制約が存在する。毎年2,000万人もの「気候難民」が発生している（Oxfam International [2019]）ことは、気候変動の本質的な課題を浮き彫りにした一端と言えよう。

日本列島は、毎年のように気象災害による影響を実際に受けており、それに対する対策や研究をたゆまぬ努力で進めてきた経緯を踏まえれば、産官学の各セクターの叡智を、まさにONE TEAMとして結集することで、日本が得意とするボトムアップ型の「日本型」適応策モデルを実現できよう。また、日本発の適応策モデルを基に各国が置かれた状況を反映させれば、日本のみならず世界全体の気候変動に対するレジリエンスをも向上させることができるだろう。それが、気候変動による影響が顕在化しつつ

ある現代に生きる私たちが、健康で文化的な生活を将来の世代に引き継ぐために、果たすべき使命なのではないだろうか。

(注8) 気候変動適応情報プラットフォーム (A-PLAT) ウェブサイト (<https://adaptation-platform.nies.go.jp/>)

(2020. 10. 5)

参考文献

- ・ 稲津将、佐藤友徳 [2010]. 「大は小を兼ねるのか：ダウンスケーリング」、日本気象学会機関誌「天気」57巻 No.4
- ・ 環境省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、気象庁 [2018]. 「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート2018～日本の気候変動とその影響」
- ・ 気象庁 [2020]. 「気候変動に関する懇談会（第3回）資料3-1『気候予測データセットの整備及びその解説書について』」 (http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/kikohendo_kondankai/part3/part3_3_1.pdf)
- ・ 厚生労働省「人口動態統計」 (<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/81-1a.html>)
- ・ 国土交通省水管理・国土保全局 [2020]. 「治水経済調査マニュアル（案）」
- ・ ナシーム・ニコラス・タレブ著、望月衛訳 [2009]. 『ブラック・スワン—不確実性とリスクの本質』
- ・ 日本銀行金融機構局金融高度化センター [2015]. 「VaRの計測と検証」
- ・ 一般社団法人日本損害保険協会「風水害等による保険金の支払い」 (<https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/>)
- ・ 農林水産省「災害に関する情報」 (<https://www.maff.go.jp/j/saigai/>)
- ・ マツダ株式会社 [2018]. 「平成30年7月豪雨にともなう生産等への影響（損失発生）について」 (<https://newsroom.mazda.com/ja/publicity/release/2018/201809/180921a.pdf>)
- ・ 株式会社三井住友フィナンシャルグループ [2020]. 「2020 TCFDレポート」
- ・ 株式会社みずほ総合研究所 [2016]. 「平成27年度中小企業庁委託調査『中小企業のリスクマネジメントへの取組に関する調査報告書』」 (https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000521.pdf)
- ・ 文部科学省、気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、京都大学防災研究所、国立環境研究所、筑波大学、海洋研究開発機構 [2015]. 「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース～利用手引き（抜粋）」
- ・ CRED（ルーバン・カトリック大学疫学研究所）EM-DAT（災害データベース） (<https://public.em-dat.be/>)
- ・ CDP [2019]. “Climate Change Report 2019”
- ・ EU TEG (Technical Expert Group on Sustainable Finance) [2020]. “Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance”
- ・ GCA, UNEP FI [2020]. “Driving Finance Today for the Climate Resilient Society of Tomorrow”

-
- ・ ICMA (国際資本市場協会) [2018]. “Green Bond Principles - Voluntary Process Guidelines for Issuing Green Bonds”
 - ・ IPCC (気候変動に関する政府間パネル) [2014a]. “AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014”
 - ・ IPCC [2014b]. “AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability”
 - ・ ISO (国際標準化機構) [2018a]. ISO 14080:2018 “Greenhouse gas management and related activities - Framework and principles for methodologies on climate actions”
 - ・ ISO [2009]. ISO 31000:2009 “Risk management – Principles and guidelines”
 - ・ ISO [2018b]. ISO 31000:2018 “Risk management – Guidelines”
 - ・ Nicholas Stern [2007]. “The Economics of Climate Change - The Stern Review”
 - ・ Oxfam International [2019]. “Forced from home: climate-fuelled displacement” (<https://oxfamlibrary.openrepository.com/bitstream/handle/10546/620914/mb-climate-displacement-cop25-021219-en.pdf>)
 - ・ Takakura, J., Fujimori, S., Hanasaki, N. *et al*, [2019]. “Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways”, *Nature Climate Change* 9, 737- 741
 - ・ TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures) [2017]. “Final Report: Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures”
 - ・ World Economic Forum [2020]. “The Global Risks Report 2020”