



目次

第7章 エネルギー・環境の統合的問題

はじめに.....	214
7-1 長期的・世界的視野に立ったエネルギー・気候変動政策.....	215
(1) エネルギーと経済成長の歴史.....	215
(2) エネルギーと気候変動問題.....	218
(3) 地球温暖化、気候変動、気象災害.....	220
7-2 エネルギー・環境分野の科学・技術.....	226
(1) エネルギー・環境分野の技術オプション.....	226
(2) 脱炭素化に向けたエネルギーシステムとその実現に至るリスクマネジメント.....	228
(3) 再生可能エネルギーへの期待と課題.....	229
(4) 持続的なエネルギーインフラの構築・維持に関する政策.....	230
7-3 社会の変容によるエネルギー需要と環境対応.....	231
7-4 エネルギー・環境教育.....	233
7-5 水資源の確保.....	235
(1) 水資源の偏在と需給バランスの危機.....	235
(2) 日本における水利用.....	236
(3) 水資源利用の公平性.....	237
(4) 総合的・統合的な水資源管理をめざして.....	238

はじめに

本章では、現代社会が大規模なエネルギーの利用と環境問題への取り組み強化なくしては成立しなくなっている中、それをよく理解しながら、2050年やそれ以降に向けて、エネルギーおよび地球規模の環境問題をいかにより良い方向に誘導していくかについて論じます。ここでは、エネルギーと環境は一体の問題として捉え、統合的に考察します。

まず、社会とエネルギーの関係について振り返り、現在顕在化してきている気候変動・気象災害等の状況、エネルギーとの関連、政策動向などを踏まえ、2050年に向けて展望します。

次に、エネルギー・環境分野の科学・技術に関し、技術オプション、脱炭素化に向けたエネルギーシステム、リスクマネジメント、再生可能エネルギーへの期待と課題、持続的なエネルギーインフラの構築・維持、関連する科学・技術とそのイノベーションについて述べます。

さらに、需要サイドを中心として、情報技術の進展の影響、エネルギーとサービス等との関係など、社会の変容によるエネルギー需要と環境対応について述べます。また、エネルギー・環境問題を正しく理解することが重要であること、また、このための意思決定は専門家のみで行えるものではないことを踏まえ、課題の総合性、リスク認知、情報リテラシーなどエネルギー・環境教育のあり方について言及します。

最後に、エネルギーとともに安定供給が重要な水資源の確保について、水資源の偏在と需給バランスの危機、日本における水利用、水資源利用の公平性とSDGs、総合的・統合的な水資源管理のための課題・展望について述べます。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

7-1 長期的・世界的視野に立ったエネルギー・気候変動政策

本節では、まず現代社会がエネルギーの進展とどう結びついて発展してきたかを振り返りながら、現在、顕在化してきているエネルギー・気候変動問題の状況、特徴、そして政策動向を踏まえ、2050年に向けて展望します。

(1) エネルギーと経済成長の歴史

18世紀初頭にニューコメンにより鉱山の排水用に作られた蒸気機関は、1765年にワットが蒸気機関から復水器を独立させたことを始めとする多くの技術的改良の結果、能力が著しく増大し、エネルギー効率が大幅に改善され、革命的な動力源へと昇華し、産業革命に大きく寄与しました。これは英国に大量に存在した、比較的安価に採掘可能な石炭の後押しによるものです。また、同時に鉄製品の需要が格段に大きくなりました。それまでは木炭を利用して鉄を製造していましたが、石炭からコークスを作って鉄を生産するコークス製鉄法が生まれ、大量の鉄を生産できるようになり、産業革命を後押ししました。ここでも石炭は重要な役割を担いました。英国のスティーブンソンは、1814年には石炭輸送のための蒸気機関車を設計し、その後、実用化させました。米国では1807年、フルトンが蒸気船を実用化させました。これらを契機に鉄道や海運の交通網が発達していき、大量の物資や人員を短時間でさまざまな場所に輸送できるようになっていきました。

また、電磁気学も発展しました。電磁気学の基本法則と呼ばれているクーロンの法則が、クーロンによって発表されたのは1785年です。1827年にはオームがオームの法則を発表し、電気回路が進展することとなりました。1831年にはファラデーが電磁誘導の法則を発表しました。19世紀後半になると、エジソンは1870-80年頃に蓄音機や電話機、白熱電球、発電機などを次々と実用化させていきました。また、テスラは交流電動機などの電気機器を発明し、発電、送配電に大きな影響を与えることとなりました。

ペリーが浦賀に来航したのが1853年、明治元年は1868年です。ワットの蒸気機関から100年程度が過ぎた頃で、日本も産業革命の影響を急速に受けることとなりました。産業革命は急速な近代化、経済成長を多くの国でもたらすこととなりました。人もしくは馬などが主要な生産要素だった社会から、機械設備やエネルギーを主要な生産投入要素とする社会へと変わっていきました。それによって、新たな資本とエネルギーを作り出し、その循環を作り出すことで、加速的な経済発展が実現していきました。

化石エネルギー利用は農業分野にも劇的な変化をもたらし、1906年、ドイツのハーバーとボッシュは、化学肥料(窒素肥料)を生成するハーバー・ボッシュ法(空気中の窒素からアンモニアを合成)を開発しました。このプロセスでは大量のエネルギーが必要でした。そして、これによって農作物の収穫量は飛躍的に増加しました。人類の食料需給制約を大幅に緩和し、乳幼児死亡率の低下¹¹⁷、人口の増大につながり、経済成長を後押しすることとなりました。また産業革命によって、社会の形も大きく変化していきました。鉱工業に従事する労働者の数が大幅に増えたことで、都市に多くの労働者が集まるようになり、都市化も進展していきました¹¹⁸。

¹¹⁷ 無論、食料だけではなく、医療の発達も大きく貢献しました。

¹¹⁸ 農業の機械化、生産性の向上が、必要な農業従事者を低減させたことも重なって都市化は進展してきました。

1885年には、ダイムラーとベンツがそれぞれ内燃機関であるガソリンエンジンを取り付けた自動車を製作しました。同じ頃、石油開発技術も進展してきていたため、石炭利用の蒸気機関から、石油利用の内燃機関への大きな変化が起こり始めたのです。20世紀に入ると、世界は経済成長の原動力として、石油というエネルギーの争奪を行うことにもなってしまいました。

このような歴史でみられるように、産業革命以降の経済成長は、科学技術の発展によって、エネルギーとりわけ大量の化石エネルギーを効率良く安価に利用できるようになったことと密接な関係があります。そして、ある科学技術が、他の科学技術の革新を生み出しながら、「共進」して発達してきました。つまり、エネルギー効率を向上させ、安価にエネルギーを動力として利用することが可能になりました(ワットの蒸気機関など)。そして製造時に消費されるエネルギー量や直接的なエネルギー消費量も低減することで(コークス製鉄法など)、さまざまな製品やサービスが実現してきました(鉄道、船舶、自動車など)。またそれらを通して資本を蓄積し、それが生産能力を大きく拡大させてきました(鉄道、電力システムの発達など)。同時にエネルギー採掘技術の発展はエネルギー利用をさらに安価なものとし、経済の好循環を生み出してきた歴史がありました(石油開発技術など)。図 7-1-1 は世界経済における一人あたり GDP の推移[1][2][3]ですが、人類の歴史において、それが急速な増大を始めたのはまさに産業革命以降でした。経済の成長とともに、エネルギー消費量も急速に増大していきました(図 7-1-2)[4]。今もエネルギー消費量と経済成長の正の相関は基本的には続いており、特に、GDP と電力消費量との強い正の相関が見られています(図 7-1-3)[5]。

近年、OECD 諸国を中心に、国・地域によっては、エネルギー効率の改善などを理由に、エネルギー消費量や二酸化炭素(CO₂)排出量と経済成長のデカップリングの現象が見られます(例えば US EIA[6]など)。しかしながら、それは、OECD 諸国のエネルギー多消費産業が途上国に移転している影響が強く、一方で、OECD の消費構造は引き続き多消費になっており、結果、世界全体ではエネルギー消費量や CO₂ 排出量と経済成長の正の相関(カップリング)が継続しています。これは製品の消費地で排出計上を行う「消費ベース CO₂ 排出量」によって確認されています(OECD[7]、RITE[8]など)。よって、世界 CO₂ 排出量の増加も止まっていない[9]のが現状です。2050 年に向けて、少なくとも世界の電力消費量については、モビリティの電動化をはじめ脱炭素化に向けた電化、エネルギー転換も加わって、世界 GDP との正の相関は継続すると見るべきでしょう。つまり、後述の 7.2 節で記載のように、最終エネルギー消費において化石燃料から電力への転換、つまり電力化率の向上を進めながら、一次エネルギー消費総量は抑制して、低炭素排出そして脱炭素排出を実現していくことが大きな方向性と考えられます。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

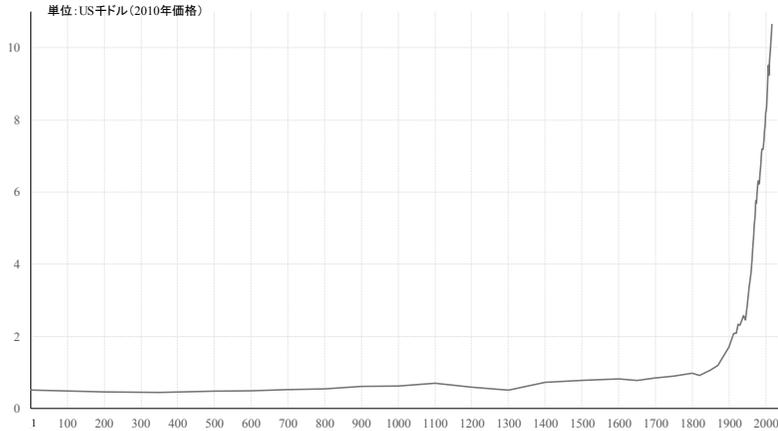


図 7-1-1 世界の一人あたり GDP の推移(紀元 1 年から 2017 年)
(文献[1][2][3]より慶応大野村浩二教授作成)

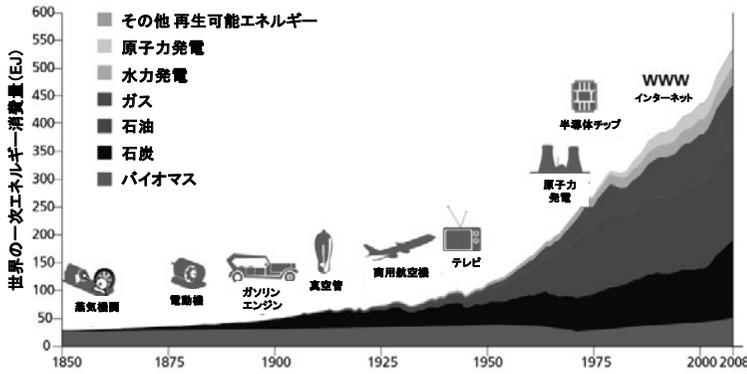


図 7-1-2 世界のエネルギー消費量の推移[4] (IIASA より転載許諾済み、reproduced with permission from the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA))

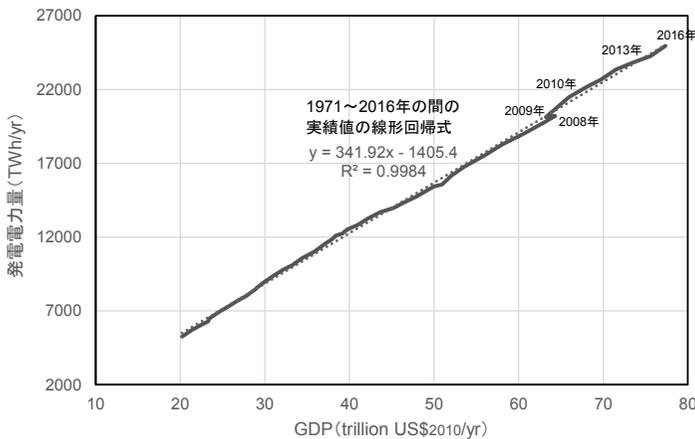


図 7-1-3 世界の GDP と発電電力量との関係(1971~2016 年)[5]

(2) エネルギーと気候変動問題

産業革命以降の長期にわたる成長の過程において、経済成長に伴って様々なリスクを低減してきた一方で、様々な環境問題も生じてきました。今、化石燃料の大量消費などに伴って、CO₂をはじめとする温室効果ガスの排出による温暖化問題が大きな問題として立ちふさがってきています(7-2 節参照)。

気候変動の影響は、時間スケールが長く、そのため、世代間の負担の衡平性の問題も生じます。また、全球的に影響が及びますが、影響度合いは地域によって差異が生じます。例えば、アフリカや小島嶼国など、元々、人間にとって生活が厳しい国々の環境がより厳しくなる可能性があります。そして、影響が及ぶ分野が広範です。一方で、気候変動緩和(排出削減)の面においては、経済活動の基盤として化石エネルギーに依存した構造となっているため、エネルギーを利用すれば必然的に CO₂ が排出されるので、大幅な削減は容易ではありません。まず、先述のように、安価なエネルギーを利便性高く利用できるようになったことで、様々なリスクから人類は開放されてきたことを踏まえる必要があります。その上で、気候変動影響被害によって新たに大きなリスクに晒される可能性が見えてきた訳です。温暖化対応のために、エネルギー利用に高い費用が必要となったり、エネルギー利用の制限をすることとなれば、過去、経済成長を伴って、食料アクセス、高い乳幼児死亡率など、人類が直面していたリスクを、大きく低減することに成功してきたリスク低減傾向を停滞させるか、もしくは再び上昇させてしまうことにもなりかねません。リスクとリスクのトレードオフ(相反)に留意した対応が必要です。

国際的な気候変動対応を振り返ると、1992 年に国際連合気候変動枠組条約(UNFCCC)が締結され、1997 年の第3回締約国会議(COP3)において京都議定書が採択されて、温室効果ガスの排出削減の具体的な取り組みに向けて世界が協力する枠組みができました。京都議定書は 2005 年に発効しましたが、京都議定書は先進国にのみ排出削減を義務づける枠組みであり、2000 年に入ってから、途上国の急速な排出量の上昇が起こる中で、世界の温室効果ガス(GHG)排出量の増加はむしろ加速しました[9]。そこで、すべての国が排出削減に取り組む枠組みとして、2015 年の COP21 においてパリ協定[10]が合意され、2016 年 11 月に発効しました。パリ協定では、長期気温上昇抑制目標として「世界的な平均気温上昇を産業革命前に比べて2°Cより十分低く保つとともに、1.5°Cに抑える努力を追求する」と定め、そのため、「長期目標を達成するよう、世界の温室効果ガスの排出量が最大に達する時期をできる限り早くするものとし、その後、迅速な削減に取り組み、今世紀後半には、温室効果ガスについて人為的起源排出と吸収源による除去量との間の均衡を達成する」と、今世紀後半に温室効果ガス排出量の正味ゼロの達成をめざすことも定めています。こうした長期目標の達成に向けて、各国は、5 年ごとに国別目標(NDCs: Nationally Determined Contributions)を策定し、提出することが義務づけられています。新たな目標は、現行の目標から削減努力を積み増すものであり、その国のできる限りの削減努力を示すものであることが要請されています。パリ協定は、この 5 年ごとの目標提出のプロセスを通じて、長期目標の実現に向けて世界の削減水準を引き上げていくことを企図しています。

COP21 の招請を受け、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、1.5°C特別報告書(SR15)[11]を作成し、2018 年 9 月に公表しました。そこでは、1.5°C上昇に抑えるには、2050 年頃に世界の CO₂ 排出量を正味でほぼゼロにする必要性が指摘されました。また、IPCC 第5次評価報告書(AR5)の評価[12]では、CO₂ の累積排出量と気温上昇の間には線形に近い関係が見られること

が示されています。すなわち、気温を安定化させようとするれば、気温上昇の水準によらず、その時点では世界の正味 CO₂ 排出量をほぼゼロにする必要があるとされています。

気温上昇に伴ってこれからさらに大きくなると予測される気候変動の影響とリスクへの懸念を背景にしながら、SR15 に示された知見も受けて、世界では、2050 年までに CO₂/GHG 排出量を実質ゼロにする脱炭素化を目指す動きが加速しています。COP25 議長国であるチリが立ち上げた 2050 年までに CO₂ 排出量の正味ゼロをめざす Climate Ambition Alliance (気候野心同盟) には、2019 年 12 月の時点で、世界の CO₂ 排出量の約 13% に相当する 72 カ国と EU に加えて、米国カリフォルニア州など 14 の地域、東京都、長野県、横浜市、京都市などを含め 400 をこえる自治体、786 の企業、年金基金など、400 兆円超の資産を有する 27 の金融機関・機関投資家も参加しています。

日本政府は、2018 年 7 月に第 5 次エネルギー基本計画[13]を閣議決定しましたが、そこでは、2050 年に向けて、野心的な目標 (80%削減、そしてさらには脱炭素化を目指す)を示した上で、多くの不確実性に対応して、「複線シナリオ」で対応していくとしました。そして、G20 大阪サミット前の 2019 年 6 月には「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定しました[14]。そこでは、「最終到達地点として『脱炭素社会』を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す」とした上で、非連続なイノベーション等を推進し、環境と経済の好循環を実現するとしています。

SR15 などの知見が示すように、脱炭素社会の実現には、エネルギー、建築物、交通を含むインフラ、産業などにおいて急速で広範囲なかつてない規模の変革・移行が必要であり、あらゆる部門での排出削減、広範な削減策の導入、そのための相当な投資の増大が必要です。

また、第 5 次エネルギー基本計画に沿って、エネルギー安全保障・安定供給、経済性、環境性および安全性 (3E+S)、SDGs 達成を目指す方針が示されました。気候変動対策は、喫緊の課題ですが、気候変動対応を持続可能なものとするためには、3E+S や SDGs の同時達成が不可欠であり、「複線シナリオ」でリスクを管理しながら、脱炭素社会を実現するエネルギーシステムの構築を目指す必要があります。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

(3) 地球温暖化、気候変動、気象災害

我が国も貢献している世界気象機関(WMO)の現場観測ネットワークによれば、全球平均した地表付近の大気中のCO₂濃度は2018年時点で約408ppmであり、産業革命以前(1750年)の水準より47%も増加し、依然増加中です(図7.4c)[15]。CO₂は水蒸気とともに代表的な温室効果気体として知られており、太陽放射で暖められた地表面から射出される赤外放射を効率よく吸収し、宇宙空間に向けてのみならず、下向きにも赤外線を射出して地表を暖めます。この温室効果がなければ、現在約15°Cある全球平均の地表気温は理論上約33°Cも低下するとされています。つまり、今日の豊かな社会生活の基盤となる森林などの自然環境や農業・林業・水産業などは温室効果に支えられているのです。しかし、産業革命以降、人類は石油・石炭など化石燃料を大量に消費してCO₂を排出する一方、その吸収源である森林を伐採してきた結果、CO₂濃度が増加しています。その増加は1950年代以降特に際立っており、その主因が化石燃料の燃焼によるCO₂排出の急激な増大であることは、観測される炭素同位体C13比の減少により裏付けられています(図7-1-4a、b)。さらに、CO₂に次いで重要な温室効果気体であるメタン(CH₄)濃度も2018年には1.87ppmと過去最高値を更新し、産業革命以前の水準の約2.6倍にも達しました[15]。こうして温室効果が強化され、その指標である放射強制力は1990年以降43%も増加しており[15]、地球温暖化問題が現在深刻化しています。

対応して、全球平均の地表気温も顕著な上昇傾向を示しています。例えば、2015年までの10年平均値は19世紀後半の平均値よりも0.87°Cほど高くなっています(図7-1-5)[11]。我が国の貢献も重要なIPCC第5次評価報告書[12]では、全球平均の気温上昇量がCO₂の累積排出量に概ね比例することが示されたのに加え、多数の全球数値気候モデルによる検証から、過去50年間に観測された温暖化は温室効果の人為的強化がなければほぼ説明できないことが高い確度で示されています。こうして、人為起源の温暖化が10年当たり約0.2°C(0.1~0.3°C)もの気温上昇を近年もたらしていると評価されています(図7-1-5)[11]。ただし、最先端の全球数値気候モデルであっても、地球の気候システムを構成する複雑な過程の全てを正確に表現するのは困難です。中でも、自然起源・人為起源のエアロゾル(大気中の微粒子)のはたらきは複雑で、ほとんどの種類のエアロゾルによる太陽放射の散乱を通じた冷却効果や黒色炭素による太陽放射吸収といった直接効果に加え、雲核としてもはたらくエアロゾルからの雲の太陽放射反射率への影響や、雲の寿命に及ぼす影響、さらには雪氷面に付着した黒色炭素による反射率低下などの複数の間接的な影響を考慮する必要があり、数値気候モデルによる近現代の気候状態の再現や将来予測に不確実性をもたらす主因の1つとなっています。観測研究などにに基づき、数値気候モデル内のエアロゾルや雲などに関わる過程の改善が急務となっています。

温室効果気体の人為的な排出増加への応答としての気温上昇は、気候システム内のさまざまな過程の変化を通じて現れているもので、その中には進行中の温暖化をさらに増幅するフィードバック過程が含まれています。例えば、気温上昇に伴う飽和水蒸気圧の増大を反映して、温室効果気体である水蒸気の量も増加傾向にあります[12]。フィードバックが特に顕著なのが北極域で、近年は全球平均気温に比べて2倍以上の速さで急激に気温上昇が進み、1990年までの30年の平均値に比べ約3°Cもの温暖化が観測されています[13]。これを反映して西部シベリア沖のバレンツ・カラ海やオホーツク海などで海水被覆面積が今世紀に入って顕著な減少傾向を示しており、北極域全体の海水面積はここ40年で約40%も減少しました[17][18]。こうして、北極海が暖候期に以

前より太陽放射の吸収量の増えた北極海では海水温も上がり、その熱が秋から冬に大気へと放出されて、水蒸気の増加とともに気温上昇を加速させるようはたらいっています。また、温暖化に伴う積雪域や積雪期間の長期的な減少傾向も、太陽光の反射を減じて温暖化の加速に寄与しています。そして、もしこのまま温暖化が続けば、北極域の永久凍土の融解に伴い、凍土中のメタンが大気中に放出され、温室効果を一層強化させる恐れがあります。

一方、これまでの温室効果の強化によって海洋表層に蓄えられる熱量も着実に増加し、それが海水の膨張を引き起こしています。2015年までの約100年間に観測された全球平均の海面水位の持続的上昇は約16cmにも及び[19]、その大部分は海水膨張によるものと評価されています。また、既に進行中の大陸氷河の融解に加え、北極域の急激な温暖化に伴ってグリーンランド氷床の融解も海面水位上昇に寄与しつつあり、将来の温暖化の進行によって南極氷床の融解がさらに進めば海面水位上昇が一層加速される恐れがあります。一方、大気中に放出されたCO₂の主要な吸収源でもある海洋は、その酸性化も懸念されています。産業革命以降、全球平均した表面付近の海水pH値は0.1程度低下しており、今後さらなる低下が予測されています[12]。酸性化が進行すると海水によるCO₂の吸収能力が低下し、それが大気中のCO₂濃度を増やす方向にはたらくことが懸念されています。また、海洋の酸性化は水温上昇と相まって、サンゴの白化に加え、動植物プランクトンや貝類・甲殻類などの海洋生態系に広く影響を与える懸念も指摘されています[19]。

IPCC第5次評価報告書[12]によれば、今後の温暖化の進行に伴い、世界各地で異常高温の頻度が増加する一方、異常低温の頻度は低下する傾向が予測されています。また、温暖化に伴う水蒸気量の増加や地表面からの蒸発の増大は、大気中の水蒸気輸送を変化させて、乾燥地域の乾燥化を助長する可能性がある一方、現在でも降水の多い地域や高緯度域の降水量を増加させると予測されています。特に、中緯度陸域や湿潤な熱帯域のほとんどの地域では極端な降水の強度の増大やその頻度の増加が見込まれています。一方、アフリカなどの乾燥地域では、干ばつの増加と砂漠化の拡大により食糧生産と地域の人々の生命が危機に晒されることが危惧されています[20]。なお、熱波や寒波、暴風、豪雨・豪雪や干ばつなどの異常気象は、我が国を含む中高緯度域では、上空の偏西風ジェット気流の蛇行などの自然変動によって、温暖化が顕在化する以前から起きていました。また、熱帯・中緯度域では、以前から台風など熱帯低気圧が暖候期に豪雨や暴風をもたらし、エルニーニョなど熱帯域の自然気候変動が熱波や多雨・干ばつをもたらしています。こうした自然変動に温暖化シグナルが重畳することで、過去に例を見ないような異常高温や豪雨などが既に起きつつあるのです。例えば、ここ40年間で日本域の夏季地表気温は1°C近くも上昇しており[21]、この温暖化の寄与がなければ2018年夏の東日本・西日本の記録的猛暑はほぼ起こり得なかったことが全球大気モデル実験から確認されています[22]。また、過去100年余り日本近海は全海洋平均の約2倍ものペースで温暖化しており[23]、気温上昇とも相まって、日本上空の夏季の水蒸気量もここ40年で約10%増加し[24]、それに伴い豪雨強度も増大傾向にあります[25]。実際、2018年7月上旬の「西日本豪雨」の雨量も7%ほど増加させたことも確認されています[24][26]。さらに、温暖化の進行とともに、所謂「スーパー台風」の個数は将来増えるとの予測もあります[12]。こうした強い台風が日本に接近すると、高い水温によってその勢力が衰え難く、海水位上昇とも相まって、沿岸域が甚大な浸水被害に見舞われる恐れがあります。

実際、ここ30年で気象関連自然災害の経済損失額が継続して増えていることにも留意が必要です。我が国では2018年の西日本豪雨と台風21号で約230億米ドル[27]、2019年の台風15

号・19号では約250億米ドルもの経済損失が生じたと推計されています[28]。世界的にみても、2017年までの20年間の自然災害に直接的に起因する世界の経済損失額約2.9兆米ドルのうち、実に77%が気候変動によるものと推定されています[29]。今後の温暖化の進行は、世界的な異常気象の頻発やそれに伴う自然災害の甚大化のみならず、水の確保や食糧問題の深刻化など、人間社会に広範な影響を及ぼすことが懸念されます。因みに、地球の長い歴史の中で今日よりも温暖な時期があったことは事実ですが、気温上昇は地質学的な長い時間をかけて極めて緩やかに起きました。現在の人為起源の温暖化は100年といった遥かに短い時間スケールで起きており、この急激な変化に生態系や人類社会が対応できない危険性が高まっているのです。現在のまま温室効果気体の排出が続き温暖化が進行すれば、産業革命後の全球平均の地表気温の上昇は、早ければ2030年頃には、遅くとも2050年頃までには1.5°Cに達し、地球気候に深刻な影響がもたらされるとされています[11]。これを防ぐには2050年頃までにCO₂排出量を正味でゼロにまで抑制するなどの大胆な社会の変革が必要とされています。それでも、海洋に蓄えられた熱エネルギーによって暫く温暖化が続くため、効果的な温暖化緩和策とともに適切な適応策の準備も不可欠となっています。我が国でも1998年に制定された「地球温暖化対策推進法」の下で温室効果気体の排出削減に向けた取組みがなされてきましたが、2018年には「気候変動適応法」の制定とともに「気候変動適応計画」も閣議決定されました。そこでは、将来予測も含め、気候変動やその影響に関する科学的知見を充実させ、温暖化適応に関するあらゆる施策にそれを活用してすることが謳われています。我が国における具体的な適応策は、洪水危機管理や降雪減少を見据えた治水対策などの治水対策、土砂災害・熱中症予防や熱帯・亜熱帯域特有の感染症への備え、海洋・陸域を含めた生態系の保全や農作物の高温障害・病害虫対策など社会の広範に関わり、かつ各地域の特性への配慮が欠かせません。よって、効果的な適応策の策定・実施のためには、理工系、生命科学系、人文・社会科学系の学問分野を跨ぎ、かつ市民や社会全体を巻き込んでの産学官連携を推進する必要があります。これこそまさに「フューチャー・アース」の目指すところで、国際的な協働や社会・市民との対話も欠かせません。そして、気候・環境学者には、温暖化の進行や地球環境の最新状況を把握するとともに、より精度の高い気候の将来予測や異常気象の予報の実現に向けた取組みを一層推進することが求められているのです。

(中村 尚 東京大学先端科学技術研究センター副所長・教授)

【参考文献】

- [1] Maddison, Anhus (2007) *Contours of the World Economy, 1-2030 AD: Essays in Macro-Economic History*, Oxford University Press.
- [2] De Long, J. Bradford (1998) “Estimates of World GDP, One Million B.C. - Present,” Department of Economics, U.C. Berkeley.
- [3] World Bank, National accounts data.
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD> (最終閲覧日 2019年4月30日)

- [4] GEA, 2012: Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press. <https://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/Home-GEA.en.html> (最終閲覧日 2020 年 7 月 22 日)
- [5] IEA, 2018: World Energy Balances より作成
- [6] US EIA, 2017: Link between growth in economic activity and electricity use is changing around the world. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33812#>
- [7] OECD, 2019: Carbon dioxide emissions embodied in international trade. <https://www.oecd.org/sti/ind/carbondioxideemissionsembodiedininternationaltrade.htm>
- [8] RITE, 2018:「経済と CO2 排出量のデカップリングに 関する分析:消費ベース CO2 排出量の推計」http://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Analysis_Consumption-Based-CO2.pdf
- [9] Global Carbon Project, 2018: Global Carbon Budget 2018. https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2018/GCP_CarbonBudget_2018.pdf
- [10] UNFCCC, Paris Agreement http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- [11] IPCC, 2018: Global Warming of 1.5° C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- [12] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- [13] 日本政府, 2018: 「第 5 次エネルギー基本計画」 https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf
- [14] 日本政府, 2019: 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf>
- [15] WMO, 2019: WMO Greenhouse Gas Bulletin No.15 (2019 年 11 月 25 日刊行, 気象庁訳 http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/info/wdcgg/GHG_Bulletin-15_j.pdf より入手可能)
- [16] 深澤理郎ほか, 2019:「これからの北極」北極域研究推進プロジェクト事務局, 58pp. (<https://www.arcs-pro.jp/about/pamphlet/booklet201903b.pdf> より入手可能; 2020 年 3 月 26 日確認)
- [17] AMAP, 2017: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 269 pp.
- [18] 気象庁, 2019: (2019 年 7 月 1 日発表; 2020 年 3 月 26 日確認) http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/series_okhotsk/series_okhotsk.html
- [19] IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner et al., Eds.], 35pp.

- (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/03_SROCC_SPM_FINAL.pdf より入手可能; 2020年3月26日確認)
- [20] IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, et al. Eds.], 41pp. (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Edited-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf より入手可能; 2020年3月26日確認)
- [21] Shimpo, A., et al. 2019: Primary factors behind the heavy rain event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan, SOLA, 15A, 13–18.
- [22] Imada, Y., et al. 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. SOLA, 15A, 8–12.
- [23] Wu, L., et al., 2012: Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. Nature Clim. Change, 2, 161–166.
- [24] Takemura, K., et al., 2019: Extreme moisture flux convergence over western Japan during the heavy rain event of July 2018. SOLA, 15A, 49–54.
- [25] Fujibe et al., 2015: Relationship between interannual variations of extreme hourly precipitation and air/ sea-surface temperature in Japan. SOLA, 11, 5–9.
- [26] Kawase, H. et al., 2020: The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. Bull. Amer. Meteor. Soc., 101, Special Supplement: “Explaining Extreme Events in 2018 from a Climate Perspective”, S109–S113.
- [27] AON, 2019: Weather, Climate & Catastrophe Insight, 2018 Annual Report, 86pp. (<https://www.aon.com/unitedkingdom/insights/Weather-Climate-Catastrophe-Insight-2018-Report.jsp> より入手可能; 2020年3月26日確認)
- [28] AON, 2020: Weather, Climate & Catastrophe Insight, 2019 Annual Report, 81pp. (<https://www.aon.com/unitedkingdom/insights/Weather-Climate-Catastrophe-Insight-2019-Report.jsp> より入手可能; 2020年3月26日確認)
- [29] Wallemacq, P., et al., 2018: Economic Losses, Poverty and Disasters 1998–2017, United Nations Office for Disaster Risk Reduction and Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 31pp.

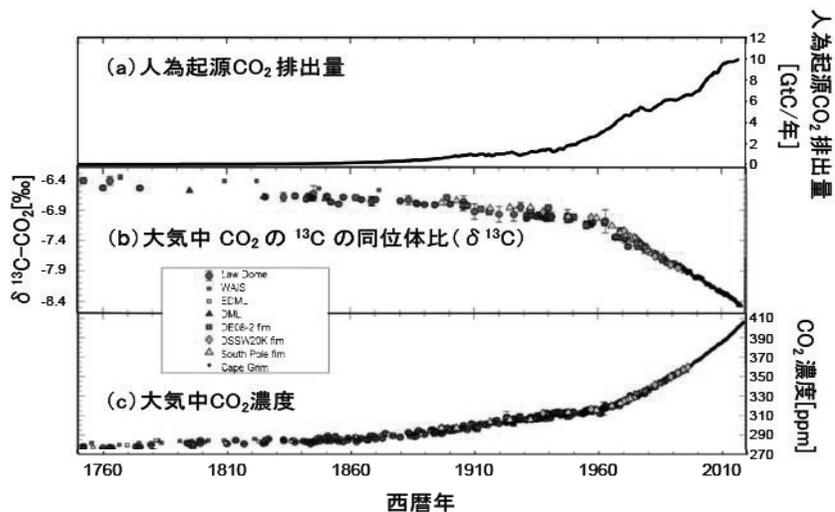


図 7-1-4 (a) 1760 年以降の CO₂ 排出量, (b) 氷床コア内の気泡及びケープグリム(オーストラリア)で採取された空気における C13 同位体比, (c) 大気中の CO₂ 濃度 (ppm) の 1750 年以降の時系列 [13]。C13 同位体比の減少は化石燃料の燃焼を反映したものである。

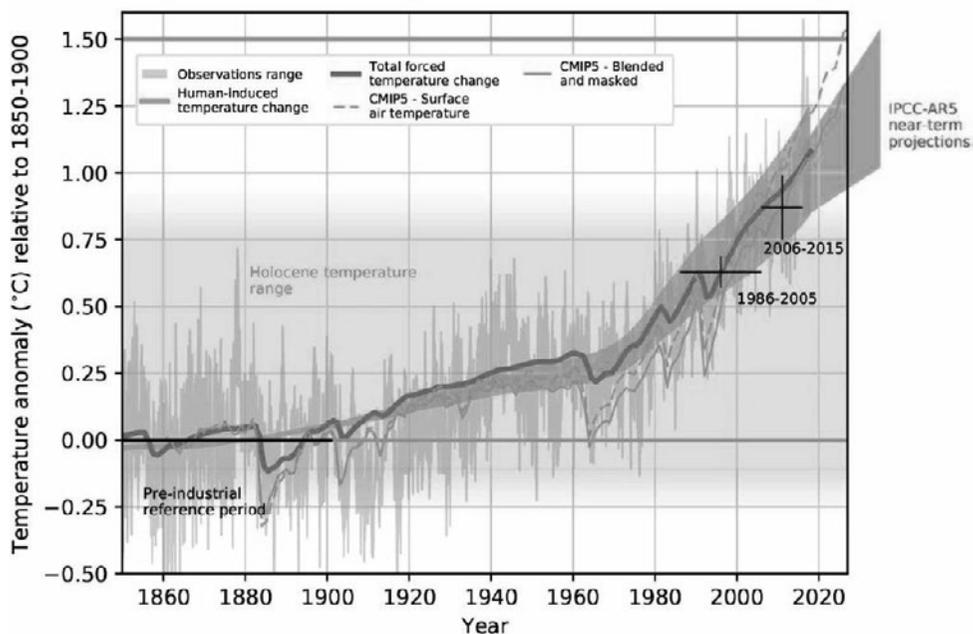


図 7-1-5 観測された全球平均地表気温の 1850 年以降の時系列 (激しく変動する細い線)。1850~1900 年平均からの月平均偏差 (°C) で示され, 変動幅は 4 つのデータセット間のばらつきを示す。人為起源の温暖化による気温上昇の推定値は時間とともに広がる帯で示され, 橙色線はそれに自然変動からの寄与を加えたもの。その少し下の実線は CMIP5 数値気候モデルによる平均的な再現値で, 過去の観測点の推移を反映させてサンプリングし直した再現値を破線で示す。[9] による (IPCC より転載許可済み)。

7-2 エネルギー・環境分野の科学・技術

(1) エネルギー・環境分野の技術オプション

気候変動対応としては、対策費用と、副次的な便益(大気汚染防止・低減の便益など)も含め、対応によって得られる便益の費用便益的な対策を志向することが重要ですが、様々でかつ大きな不確実性が存在しているため、総合的にリスク管理することが重要です。主たる対策は、気候変動緩和(排出削減)ですが、気候変動緩和策のみならず、気候変動適応策、気候工学的手法といったオプションを検討の俎上に載せておく必要があると考えられます(図 7-2-1 は気候変動対応の構造)。気候変動緩和には、エネルギー生産性の向上(省エネルギー)、エネルギーの低炭素化・脱炭素化(CO₂ 原単位の改善)に加え、社会構造・ライフスタイルの変化といった対応があり、すべての対応を検討し、費用対効果を見極めて実施していくことが必要です。

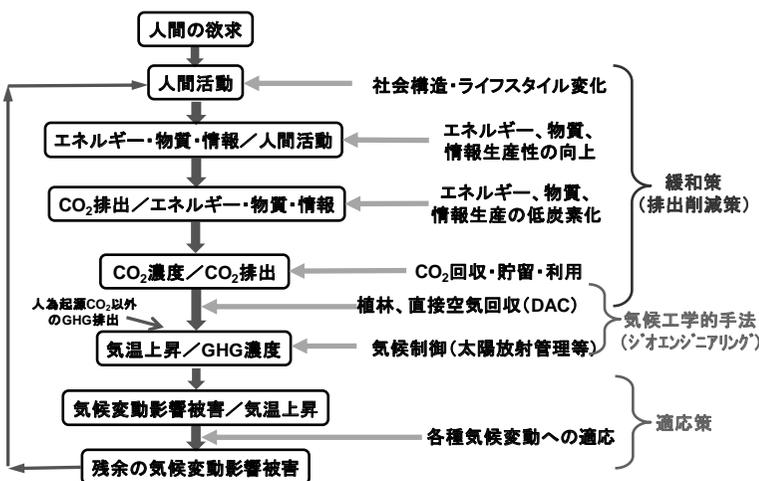


図 7-2-1 気候変動対策の基本構造(出典:文献[1]に加筆)

エネルギー効率改善など、今ある費用対効果の高い対策を普及、加速しつつ、脱炭素社会を実現するエネルギーシステムの構築を目指す必要があります。2050年、今世紀後半の脱炭素社会の実現を見越すと、破壊的イノベーション¹¹⁹を含む、エネルギー・温暖化対策技術関連の様々なイノベーションが不可欠です。

例えば、IPCC 第3作業部会の第5次評価報告書(AR5)[2]も、IPCCの1.5°C特別報告書(SR15)[3]でも、2°Cや1.5°C、正味ゼロ排出を達成するには、技術の漸進的な進展を想定し、さらに世界のCO₂限界削減費用が均等化し費用最小となる状況を想定したとしても相当大きな削減費用が必要と報告しています。例えばSR15では、2050年に2°C目標のうち排出高位の場合でも45~1050 US\$/tCO₂(中央値130 US\$/tCO₂程度)、1.5°C未満では245~14300 US\$/tCO₂(同2800 US\$/tCO₂程度)としています。排出削減費用が高いということは、その目標を達成しようとするれば、同じエネルギーを使うのに、より大きな費用が必要ということであり、その分、社会保障など他の対応

¹¹⁹ 「破壊的イノベーション」とは、市場における既存のルールを根本的に覆し、そこにまったく新しい価値を創出するイノベーションのことであり、「持続的イノベーション」と対比される。

にお金を費やすことができなくなるということになります。また、産業においては、同じ製品を作るために、より大きな費用が必要となり、気候変動対応の国際協調ができなければ、安価な製品が選択されやすくなり、気候変動対策をとった企業は国際的な競争に負けてしまうということにもなりかねません。CO₂ 排出に伴う気候変動影響は、世界のどこで排出しても基本的に効果は同じであるため、このように産業のリーケージが起これば、気候変動対策の効果はなくなってしまいます。このような難しい地球環境問題特有の課題を踏まえると、国家間の明示的もしくは暗示的炭素価格の国際協調が重要です。ただ、強力な国際協調実現のハードルが高い国際情勢を鑑み、そして、IPCC等で示されているような 2°Cや 1.5°Cシナリオで示されているような極めて高い削減費用の下では、そこで示されているようなシナリオが現実世界で機能する可能性は高くないと考えられます。

イノベーションによって気候変動対策のコストを下げることは、気候変動対策が SDGs の達成などの他の政策とのシナジーを生むためにも重要です。日本政府の「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」[4]では、国によるコスト等の明確な目標、官民のリソースの最大限投入、投資額を含めた長期にわたるコミット、国内外における技術シーズの発掘や創出、ニーズに基づく課題設定、革新的なテーマに失敗を恐れず挑戦することへの柔軟な制度による支援、ビジネスにつなげる支援の強化、各事業を一体として推進・フォローアップする体制整備等を含み、技術が実際に事業化し、世界の排出削減に貢献できるようにするとしています。候補となる技術分野として、次世代太陽光発電、次世代地熱発電、革新的原子力(核融合を含む)、次世代蓄電池、水素モビリティの電動化・水素化、CO₂ニュートラル燃料、革新的製造プロセス、省エネ、VPP (Virtual Power Plant) 等のエネルギーマネジメント、CCUS (CO₂ Capture, Utilization, and Storage) 等を挙げており、これら技術は重要な役割を果たす可能性があると考えられます。

しかしながら、これらの現在想像可能な範囲の技術だけで十分かは明確ではないと言った方が良いでしょう。実効性のある気候変動対策のためには、非連続なイノベーションも不可欠であり、それには現在ほとんど想像できていないような技術も必要かもしれません。そして、その実現のためには、幅広い基礎的研究、技術の充実も欠かせないと考えられます。日本学術会議による「第6期科学技術基本計画に向けての提言」[5]においても、長期的視野から腰を据えて基礎研究に取り組む環境が急速に失われ、学術の裾野を形成する研究者の活動が弱体化していることに懸念を示し、このような状況では、気候変動問題への対処を含む SDGs や Society 5.0 等に示されるような世界及び日本の諸課題の解決への期待に応えることは難しいとしています。そして、予測困難な変化に迅速かつ適切に対応するためには、幅広い分野における多様な学術研究、とりわけ短期的視野にとらわれない基礎研究の分厚い蓄積と、それを可能にする継続的な投資の努力が不可欠であるとしています。気候変動対策技術は応用技術の側面が強いと考えがちですが、2°Cや 1.5°C目標、そして脱炭素化の実現は、現状技術の延長線での進展だけでは難しく、基礎的研究も含め幅広いイノベーションが必須です。また、技術だけではなく、ビジネスモデルや社会プラットフォームなどの革新も重要です。

非連続的なイノベーションを誘発するために政府の支援が必要ですが、予算は限られており、費用対効果の検証を的確に進めながら支援しなければなりません。リスクマネジメントの視点からも、複数の技術を追求してリスクヘッジすることは必要ですが、費用対効果を適宜検証しながら、無駄な支出を抑制していくことが、より良いイノベーションを生み出すために重要です。効率化を図りな

がら、一方で、気候変動対策の視点からも、短期的には評価が難しい基礎的な研究にも研究資金の厚みを増すべきと考えられます。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

【参考文献】

- [1] 山地憲治, 2006:「エネルギー・環境・経済システム論」、岩波書店
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- [3] IPCC, 2018: Global Warming of 1.5° C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- [4] 日本政府, 2019: 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf> (最終閲覧日 2020年3月28日)
- [5] 日本学術会議, 2019: 「提言 第6期科学技術基本計画に向けての提言」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t283-1.pdf> (最終閲覧日 2020年3月28日)

(2) 脱炭素化に向けたエネルギーシステムとその実現に至るリスクマネジメント

脱炭素化においては、最終エネルギーは、原則として、使用時に CO₂ を排出しない電気か水素とする必要があります。ただし、一部、バイオエネルギーおよび太陽熱等の直接熱利用、また、CO₂ フリー水素と回収 CO₂ によって合成(メタネーション)したメタンでの利用などは可能です。IPCC 報告書等でも示されているように、大きな排出削減を目指すほど、電力化率の向上が求められます。そして、脱炭素化を実現するには、電気と水素製造においても、脱炭素化(再生可能エネルギー、原子力、CCS)が必要です。なお、産業用高温熱など完全な脱炭素化は現実的ではないので、正味ゼロ排出においても、必要最小限の排出は許容し、植林、バイオエネルギーCCS(BECCS)、DACs(直接大気回収・貯留)等の負の排出技術(NETs)活用はあり得るし、対策オプションとして費用対効果やその他の視点から検討していくことが必要です。

なお、脱炭素化の実現を目指すべきですが、その実現は現状では費用が高いため、脱炭素化に至る過程では、低炭素化を進めながら、イノベーションを加速していくべきでしょう。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

(3) 再生可能エネルギーへの期待と課題

脱炭素化を目指す上で、再生可能エネルギー(再エネ)の果たす役割は大変大きいと言えます。国内外で再エネ、特に風力発電と太陽光発電のコスト低減が急激に進んできています。世界平均値で見ると、陸上風力発電のLCOE(均等化発電原価)は、2010年の0.085 US\$/kWhから2018年には0.056 US\$/kWhへと35%低下しました。要因としては、技術開発により高効率かつ大型の風車が可能になったことで、利用率及び1基あたりの発電電力量が増加したこと、ウィンドファームが大規模化して建設コストの効率化が図られたこと、などが挙げられます。例えば、太陽光発電については、大規模設備のLCOEの世界平均値が2010年0.37 US\$/kWhから2018年の9年間で0.09 US\$/kWhへと77%低下しました。要因として、普及拡大による大量生産がもたらすコストの低下、入札による価格競争の影響などが挙げられます。しかしコスト低下には国によって差が見られます。太陽光発電の設置費用は世界平均で2010年の4,621 US\$/Wから2018年には1,210 US\$/Wへと74%、前年比で13%低下していますが、日本では2018年の太陽光発電の設置費用は、2010年と比べて74%低下したものの、世界最高レベルの2,101 US\$/Wで、他国と比べると高く、直近のコスト低下は前年比3%に留まります[1]。日本政府も、2025年に稼働する事業用太陽光の発電コストを7円/kWhに、2030年に稼働する陸上風力、着床式洋上風力の発電コストを8~9円/kWhにすることを目指して取り組みを加速化しています。再生可能エネルギーのコスト低減はさらに一定程度は進展すると見られ、世界においても、日本においても、今後一層、再生可能エネルギーの重要性は増していくでしょう。ただし、再生可能エネルギーの導入拡大にあたっては、環境調和、環境保全に配慮することが必要です。太陽光発電の大規模開発に伴う自然や生態系の破壊、風力発電開発に伴うバードストライクや低周波音の問題、景観への懸念、バイオマス発電における輸入パーム油の持続可能性の懸念などが指摘されています。再生可能エネルギーといっても、特定の再生可能エネルギー資源に偏り過ぎることによる悪影響へも留意を行って、広範な再生可能エネルギー資源を活用しながら拡大を図ることが重要です。

また、太陽光や風力発電のような変動性再生可能エネルギー(VRE)導入が進むにつれ、柔軟性が鍵となります。調整力の確保に加えて系統制約の克服が大きな課題となってきています。小規模で分散しているというVREの特徴に加えて、地域的なVRE導入の進捗が電力需要および系統の規模と一致しておらず、一部の電力系統では系統制約が顕在化しているためです。電源コストに加えて電力ネットワークに伴うコストを含めた再エネ電源主力化に伴うトータルコストの削減に向けて、気象予測を利用した発電量・需要量予測の精緻化、電力系統の広域運用や揚水発電の活用など既存のリソースを最大限活用し、また需要側資源の活用など更なるイノベーションが必要です。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

【参考文献】

- [1] IRENA, 2019: Renewable Power Generation Costs in 2018,
<https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018/>(最終閲覧日 2020年3月28日)

(4) 持続的なエネルギーインフラの構築・維持に関する政策

日本においては、送配電設備の老朽化が今後進み、更新が必要な設備が増大してくるに加え、今後、日本では人口低下に伴い、地方の過疎化が進展すると見られます。それに応じて、過疎地域における送配電設備の維持、投資回収が難しくなり、その負担が大きくなっていく可能性があります。過疎地域における電力、石油、ガス等のエネルギーインフラの維持費用が増大する可能性があり、持続可能なエネルギーインフラを今後どのように維持していくべきかは喫緊の検討課題です。情報技術によって、再生可能エネルギーなど分散したエネルギー供給技術や需要サイドの技術を連結し、効率的にエネルギーを使用する新たなエネルギーシステムを支えるインフラのあり方を検討することもまた課題です。過疎地域の中でも、独立したスマートグリッドを構築する方が経済的かつ強靱なエネルギーインフラとなる可能性もあり、技術の進展に応じて様々な可能性を探ることが重要です。一方、途上国ではエネルギーアクセス(現在のクリーンエネルギー利用)の課題が残っている国々が存在しています。日本は、スマートグリッドのような技術の国際展開等を通じて、SDGsの視点から国際貢献を行っていくことも重要です。

エネルギーインフラは、基本的に資本費が高いことが一般的です。電力自由化の下では、無駄の削減といった効率化を促しますが、短期の効率性が追求された結果、初期設備費が小さく、短期的に投資回収が可能な投資に向かいやすい傾向があります。つまり、長期的な視点での必要な投資が過小化する危険性があります。また、再生可能エネルギー拡大のためにも、電力ネットワークへの投資が必要ですが、これも電力自由化の下では大規模な投資が難しい状況にあり、送配電事業者に投資のインセンティブを与える制度の再構築を行うことが、2050年に向けた持続可能なエネルギーインフラ構築のために必要です。さらには、昨今、気候変動影響に起因すると見られるような自然災害が増加してきています。そのためのレジリエンス強化も必要となってきており、これらを統合的に検討し、持続可能なエネルギーインフラを構築していく必要があります。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

7-3 社会の変容によるエネルギー需要と環境対応

エネルギー供給技術については、従来は規模の経済を働かして費用を低減し、安価なエネルギー供給を実現してきました。しかし、大規模なエネルギー供給技術は、一般的に寿命が長く、技術進展のサイクルが緩やかです。それに対して、エネルギー需要サイドに近い技術は、規模が小さく、寿命も短く技術進展が速い傾向があります。ただ、従来は情報不足や個別状況への細かな対応などの「隠れたコスト」が普及障壁になってきました。しかし、情報技術によってその「隠れたコスト」を低廉な費用で除去できる可能性がでてきています。また、情報技術によって、分散したエネルギー供給技術や需要サイドの技術を連携することが可能になっていることも、この技術動向を後押ししつつあります。大規模なエネルギー供給技術は引き続き重要な役目を果たすと見られますが、分散型エネルギー供給技術の役割の増大は強まっていくでしょう。

エネルギーは、そのものを消費することが目的ではなく、最終目的である製品やサービスに伴って付随的に利用されるものです。一方、エネルギーは、特に最終利用に近いところで本当に必要な製品、サービスの提供を大きく超えて消費されています。それは、エネルギーを削減すると相対的に大きな機会費用が必要だったりしているためです。例えば、こまめに照明を消すことに機会費用が生じるためだったりします。また、自家用車のように稼働率が低いものが保有されているのは、使いたいときに、タクシーがすぐに利用できなかつたり、レンタカーを借りに行かなければならない機会費用が生じるなど、「隠れた費用」が存在しており、それを避けるために車を保有する傾向が強いのが現状です。

デジタル化技術の進展によって、社会厚生を減じることなく、シェアリングエコノミー¹²⁰やサーキュラーエコノミー¹²¹といった社会変容を促し、その結果、エネルギー需要における高効率化を実現し、低エネルギー需要社会を実現していくことが重要です。これは、経済自律的に、もしくは低費用でエネルギー消費を大きく減らす可能性を有しており、また、モノの稼働率を増すことで、モノの量を減らし、資源利用を減じる可能性を有しています。そのため、気候変動対策のみならず、多くのSDGsの達成にも寄与する可能性を有しています。

例えば、運輸部門については、自動運転、カーシェア・ライドシェアリング、EVの組み合わせによって、乗用車部門からのGHG排出を大幅に減らすことができる可能性が生まれてきています。大幅な排出削減が可能になるのは、自動運転、カーシェア・ライドシェア、低炭素の電源を前提とした電化の3つの技術の相乗効果に依ります。これらをつなぐ、コネクティングが加わり、CASE (Connected, Autonomous, Sharing/Service, Electric)がキーワードになってきているところです。そして、これまでの乗用車を保有することから、Mobility as a Service (MaaS)へと、新しいビジネスモデルが生まれつつあります。自家用車の稼働率は通常低く5%前後です。CASEによって、利便性を大きく損なうことなく、効率よく、低廉にサービスが提供できるかもしれません。

このように、大きなエネルギー消費の削減、CO₂排出削減が期待されるのは、IoT等のデジタル技術などの進展が、特定部門のエネルギー消費の低減をもたらすだけでなく、部門横断的に他部

¹²⁰ 物・サービス・場所などを、多くの人と共有・交換して利用する社会的な仕組み。情報技術の進展とその活用によって、従来、容易ではなかった共有・交換が比較的容易に実現できるようになりつつある。

¹²¹ 製品を資源から生産し、使用後に廃棄して終了する直線を描くのではなく、製品のまま、あるいは修理して他人が再び利用する、廃棄物を部品や資源に分解して再び製品にするというように円形状に回していく経済のしくみ。情報タグ管理など、情報技術の進展によって、従来、容易ではなかった、製品の循環が可能な領域が広がりがつつある。

門にも波及し、社会の大きな変化、社会イノベーションを実現する可能性があるためです。現在の社会では、モノは本当に必要なサービスを提供するために必要な以上に製造され、またエネルギーサービスも必要以上に供給されています。最終的なサービス提供に近いところで、エネルギーは有効に利用されず、無駄に消費されています。IoT等の進展とその活用は、企業は製品を売るだけでなくサービスを売ることが出来るようになることで、ライフサイクルベースで見たエネルギー・資源効率の向上に寄与できる機会が生まれつつあり、2050年に向けて大きな進展が期待できます。

また、気候変動影響被害への懸念の高まりは、欧州を中心に一部においてCO₂削減を目的に航空機移動を避ける「フライトシェイム」など、モビリティ選択に影響を与えつつあります。さらに、欧州のみならず、日本においても自動車免許証の取得率は低下してきており、カーシェア・ライドシェアリングを後押しする可能性があります。それと革新的な技術変化が結び付いて、大きく社会変化を引き起こす可能性があります。シェアリングエコノミーやサーキュラーエコノミーの誘発を様々な方面で支援していくことが重要と考えられます。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

7-4 エネルギー・環境教育

近代社会におけるエネルギーが果たしている大きな役割を認識し、そして、将来にわたってのより良いエネルギー需給と地球温暖化問題へのより良い対応の重要性を認識することは重要です。またエネルギーや気候変動対応の意思決定は専門家のみで行えるものでもなく、行うべきものでもないことを踏まえれば、多くの人々がエネルギーをより良く理解することが重要と考えられます。エネルギーは、システムとしての理解が重要であり、また自然科学、工学、経済学、政治学、法学、社会学、哲学など、学問領域を超えた総合的な理解が求められます。さらに、地球温暖化問題のようなエネルギーと表裏一体で生じている環境問題を理解する際にも、エネルギーを含めた総合的な理解が重要と言えます。ここで、総合的な理解には、多くの知識をベースにした上で、全体構造と因果関係を包括的、論理的に捉える能力が求められます。ところが、現在の教育体系ではこれに対応できるような体制ができていません。

例えば、藤本の調査によると[1]、日本では、日本を科学技術先進国と感じ、資源・エネルギー問題や環境問題等の課題が、科学技術の発展により解決されると期待されています。しかし、科学技術の発達が IT 犯罪や地球温暖化などの地球環境問題に影響を与えると不安視もしています。これに対して、そのような問題や懸念を解決していく次世代の子どもたちの学びについては、理科や数学の授業が科学的センスを育てるのに役立っていると思っている被験者は 43%程度と高くありません。エネルギーや科学技術を学校教育の中で学ぶ場面が、理科を中心に、社会、技術・家庭といった教科に点在しているためと考えられます。当然のことながら日本の学校教育では、子どもの発達段階と、各教科の教育観を踏まえて作られた学習指導要領とそれをベースにした教科書を用いて授業が行われており、エネルギー教育や科学技術教育の教育体系で編成がなされていません。一方で、学校は、地域性等を踏まえて独自の教育課程を編成することが求められており、ここにカリキュラムマネジメントを通じてエネルギー教育や科学技術教育の学びを入れ込む余地があると考えられます。ところが、この学びの場を作る管理職、教員、家庭、地域といったステークホルダーが、エネルギーや科学技術の必要性は知っていても、その教育的な価値に気づいていないことが多い状況です。

また、環境教育においてもその統合的な推進が重要であり、人材育成・人材配置の強化や情報基盤の整備、カリキュラム開発や教科教育の点検などが必要です。また、環境教育が 21 世紀の人材育成に寄与するものであるという、共通理解を深めていく必要があります[2]。環境教育は人間の「生きる」という営みを育むものと考えられますが、自らの「生きる力」を「生き抜く力」「生き残る力」に鍛え上げるだけでなく、「ともに生きる力」を、「ともに生き抜く力」、「ともに生き残る力」へと展開することが期待されます。つまり、ローカルとグローバルをつなぐ環境教育の実現が求められています[2]。

エネルギー・環境問題は、公共政策、そして将来世代にも及ぶ社会のあり方に関わる事柄です。一方で、例えば、原子力安全問題をはじめ、将来のエネルギー選択、地球温暖化対策など、社会的に見解が一致しないエネルギー問題には普遍的な唯一の解がないことが多くあります。そのため、さまざまなステークホルダーや市民参加による世論形成が欠かせません。自然科学の法則や歴史的な事実のように客観的で正確な知識を習得した上で、それだけでは答えが出せない問題があることを理解できる体験が大切です。それは、2050 年に向けた社会において、エネルギー・環境問題を超えて、今以上に社会の問題解決能力の醸成のために重要となると考えられます。例えば、情

報が氾濫する現代社会における教育の意味を考える必要があります。インターネットを通して検索すれば、エネルギー・環境問題を考える上で必要なほぼ全ての情報が得られますが、その中には誤った情報も含まれています。よって、正しい知識の習得というエネルギー・環境教育の目的を実現するには、知識そのものの教育よりも、情報を理解できる能力や玉石混交の情報から正しいものを選ぶ能力の育成の方がより重要性が高いと言えます。もちろん、情報の理解や選択のためには、エネルギー・環境に関する基本的事項は教育しておく必要があります[3]。また、科学技術を人間が統御していくための倫理的基盤は何かについての討議が深められる必要もあります。そして、科学者自身が社会リテラシーを深めていくという自覚をもち、そのような機会を増していくべきでしょう。

総合的なエネルギー・環境教育は、現状の教育システムでは十分ではなく、リスクを総合的により良く認識できる能力を育成し、情報リテラシーを高める教育システムの構築を志向することが求められます。

(鈴置 保雄 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授)

(山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)副理事長)

(秋元 圭吾 公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループリーダー・主席研究員)

(疇地 宏 大阪大学レーザー科学研究所・特任教授)

【参考文献】

- [1] 藤本登, 2019: 「エネルギー・科学技術教育の現状」、学術の動向、24 巻 2 号、
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/24/2/24_2_74/_pdf/-char/ja(最終閲覧日 2020 年 3 月 28 日)
- [2] 関礼子, 2016: 「環境教育の統合的推進に向けて」、学術の動向、21 巻 7 号、
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/21/7/21_7_8/_pdf/-char/ja(最終閲覧日 2020 年 3 月 28 日)
- [3] 山地憲治, 2019: 「エネルギー教育の課題と展望」、学術の動向、24 巻 2 号、
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/24/2/24_2_93/_pdf/-char/ja(最終閲覧日 2020 年 3 月 28 日)

7-5 水資源の確保

(1) 水資源の偏在と需給バランスの危機

約 14 億 km³の水が地球表面の 70%を覆っています。その 97.5%が塩水で、淡水は 2.5%です。淡水の 70%が氷河・氷山として固定され、30%の大半が土中あるいは地下帯水層にあります。人間の利用可能な水は淡水の約 0.4%(地球上のすべての水の 0.01%)、そのうち約 10 万 km³が、持続的利用可能な状態、すなわち水資源です。(環境白書、平成 22 年、環境省)

水資源分布は自然条件に依存し、時間的空間的に偏在します。需要も人間の社会システムに依存して時間的空間的に偏在します。経済協力開発機構(OECD)の「OECD Environmental Outlook to 2050(2012)」[1]によると、2000年時点の世界の水需要は約 3,600km³であり、このうち灌漑用水が約 2/3を占めています。水需要は 2000年から 2050年の間に、主に製造業の工業用水(+400%)、発電(+140%)、生活用水(+30%)の増加により、全体で 55%の増加が見込まれています。2050年には、深刻な水不足に見舞われる河川流域の人口は、39 億人(世界人口の 40%以上)となる可能性もあると予想されています。(図 7-5-1)。

2017年、ユニセフ(国連児童基金)とWHO(世界保健機関)は水と衛生に関する新たな報告書[2]を発表しました。世界では、21 億人(世界人口の約 10人に3人)が安全な水を自宅で入手できず、45 億人(同 10人に6人)が安全に管理されたトイレを使うことができないことを、明らかにしました。安全に管理された水を使用できない 21 億人のうち、8 億 4,400 万人は基本的な飲み水さえ入手できません。このうち、2 億 6,300 万人は往復で 30 分を超える時間をかけて水を汲まなくてはならず、1 億 5,900 万人は、河川や湖などの地表水から汲んだ、未処理の水を飲んでいました。洪水や高波による被害も今後さらに増加すると予測され、感染症も水の汚染を通じて拡大することが多いのです。また、約 8 億人が食料不足にさらされていますが、食料の再生産を保証する農業用水が

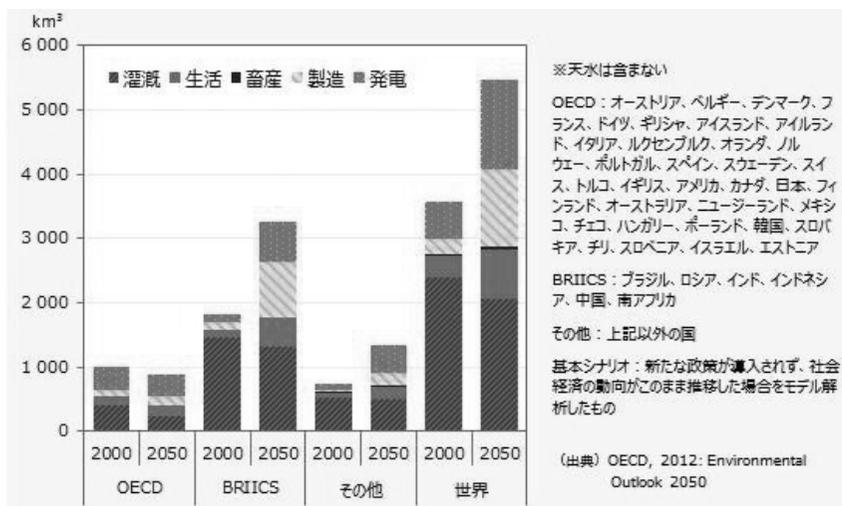


図 7-5-1 世界の地域別水需要予測基本シナリオ 2000-2050(国土交通省)

http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000021.html

不足しているために農耕を営めず、農業を支える地域コミュニティを維持できないことがその最大の要因です。特に、国際河川や湖沼の水管理問題が絡む時は、国際協調が必須の課題になります[3]。

(澁澤 栄 東京農工大学卓越リーダー養成機構特任教授)

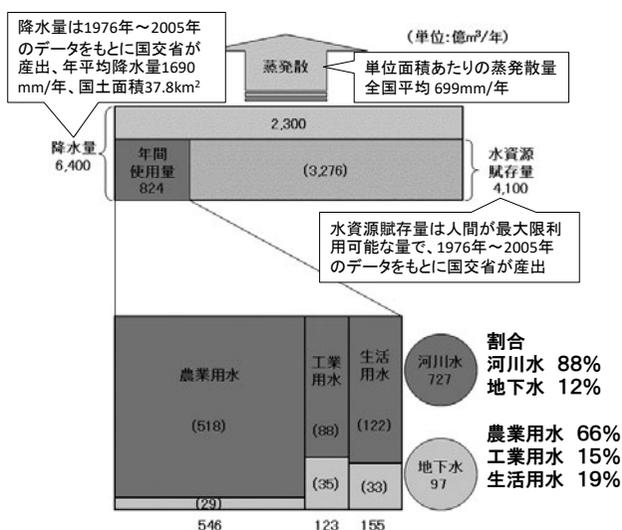
【参考文献】

- [1] OECD 「環境アウトルック 2050:行動を起こさないことの代償」、
<https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49884270.pdf>
- [2] ユニセフとWHO 共同監査報告書(2017)、<https://www.unicef.or.jp/news/2017/0146.html>

(2) 日本における水利用

日本の水資源は4千億 m³/年と見積もられ、その大半が河川水に依存し、また農業用水の需要が高い(図 7-5-2)。1人当たりの水資源量で見ると、世界平均9千m³/人・年に対して日本はおおよそ3千m³/人・年で世界 23 位に位置し、必ずしも水資源の豊かな国ではありません[4]。

日本においては、水の不足や汚染、治水についての国民的理解や対策が進展し、一時より問題が沈静化しているが、極端気象による渇水や集中豪雨・洪水の被害が頻繁に発生し都市域も含めた治水対策の強化が問題となっています。特に治水・用水施設の老朽化や地域社会の脆弱化は深刻な社会問題です。また、河川・湖沼・地下水の汚染や地下水汲み上げによる地盤沈下等の



日本の水資源国土交通省水管理・国土保全局水資源部2008年データより

図 7-5-2 日本における水資源の需給傾向

問題は依然として残っており、安全で良質の飲料水への欲求、都市の緑化等のための新たな用水の需要も高まっています[1]。

(澁澤 栄 東京農工大学卓越リーダー養成機構特任教授)

【参考文献】

- [1] JST 研究開発戦略センター、「地球規模の問題解決に向けたグローバル・イノベーション・エコシステムの構築—環境・エネルギー・食料・水問題—」(2007).

(3) 水資源利用の公平性

我が国では、水量偏在の是正のための技術と社会システム、水質の転換と処理のための技術と社会システム、治水技術と社会システムの包括的な取り組みが推進されており、SDGs 実現に向けた技術普及への貢献には高い期待があります。同時に、社会システムの変更を伴う対応には困難が伴います。例えば、食料の輸出入とともに移動するバーチャルウォーターの偏在は(図 7-5-3)、水資源の需給不均衡をさらに顕著にします。この是正の取り組みは、食料自給率の向上や水利用効率の向上および食生活や産業社会のあり方の変更を伴うものであり、食料の 60% (カロリーベース) 余りを輸入している日本にとっては特に重要な責任課題です。

バーチャルウォーターとは、食料を輸入している国(消費国)において、もしその輸入食料を生産するとしたら、どの程度の水が必要かを推定したものであり、ロンドン大学東洋アフリカ学科名誉教授のアンソニー・アラン氏がはじめて紹介した概念です。例えば、1kg のトウモロコシを生産するには、灌漑用水として 1,800 リットルの水が必要です。また、牛はこうした穀物を大量に消費しながら

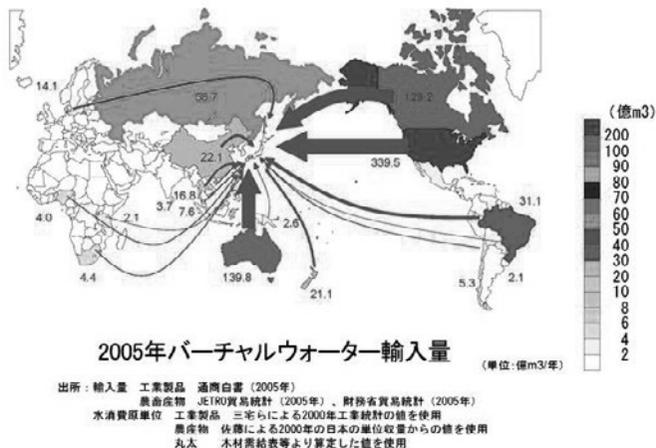


図 7-5-3 食料とともに移動するバーチャルウォーター
 国内年間水使用量と同程度の約 800 億 m³ がバーチャルウォーターとして日本に移動している。(環境省・NPO 日本水フォーラム)

育つため、牛肉 1kg を生産するには、その約 20,000 倍の水が必要です。つまり、日本は海外から食料を輸入することによって、その生産に必要な分だけ自国の水を使わないで済んでいるのです。言い換えれば、食料の輸入は、形を変えて水を輸入していることと考えることができます。

(澁澤 栄 東京農工大学卓越リーダー養成機構特任教授)

(4) 総合的・統合的な水資源管理をめざして

限られた水資源を有効に活用するため、地域の各国が協力したり、流域単位で調整したりする総合的・統合的な水管理が必要です。2002 年のヨハネスブルグ・サミットにおいて、「各国政府は、総合水資源管理(IWRM)計画を作成すること」が合意され、ユネスコを中心に「河川流域における総合水資源管理(IWRM)のためのガイドライン」がまとめられました。日本ではアジア水環境パートナーシップや日中水環境パートナーシップなどが進められており、国際規模での協力体制の推進が期待されます。

技術開発の面では、水の偏在を是正する技術、水質の転換・処理技術、自然水をコントロールする技術(治水)は日本が貢献すべき課題です[1]。例えば、JST CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」(2010-2016)では17の研究チームにより、革新的な水処理技術や水資源管理システムによって、水供給、排出、再利用、資源回収における、水の質と量の統合的な最適化を行い、エネルギー、コスト、環境負荷、健康・環境への安全性、地域社会の状況などの観点からもっとも合理的で持続可能な水資源の利用システムを提起する研究で、かつ、実社会への適用性を十分に配慮した研究を推進しました。

特に農業用水に対する考え方の転換は重要であり、(i) 多様でローカルな利水関係者間の流域ガバナンス(協働・協治)、(ii) 科学的知見に基づくグローバルで普遍的な問題解決、(iii) 良好な環境維持に貢献するための「環境流量(生態系などを維持するために供給されるべき水の流量)」や「小規模発電」に必要な水問題対応、の3類型にわたる包括的な課題解決が期待されます[2]。

(澁澤 栄 東京農工大学卓越リーダー養成機構特任教授)

【参考文献】

- [1] 国土交通省、「2019年度日本の水資源の現況について」(2019).
- [2] 日本学術会議 提言「変貌する農業と水問題 一水と共生する社会の再構築へ向けて一」、日本学術会議水問題分科会(2008).