

2.9.2 持続可能な大気環境

(1) 研究開発領域の定義

人間の健康や生態系への影響など豊かな生活にかかわる大気環境の研究開発を扱う。人為活動に由来する産業や燃焼に加えて、自然由来も含めて大気汚染物質の観測技術、大気汚染物質の発生源や発生過程、輸送過程の解明に関する研究開発や、除去・浄化技術などを対象とする。

大気汚染物質は、NO_x、SO_x、CO、CH₄、光化学オキシダント、揮発性有機化合物（VOC）等を対象とする。微粒子状物質（PM_{2.5}）等に関して、広域の越境移動や、その観測ネットワーク、大気中の動態を含める。三元触媒等の除去・浄化技術、大気汚染物質の排出規制も扱う。モビリティに関して、都市集積度や人口動態の変化に伴う交通、物流の変化に対して持続可能な大気環境を保つための予測技術等も含める。

人間の健康や植物など生態系への悪影響と、気候への影響との両面の性質をもつ物質に関しては、本領域では健康影響・生態系影響物質としての側面を扱い、気候への影響の側面は「気候変動観測」「気候変動予測」領域で扱う。大気汚染物質の分析手法は「2.10.2 環境分析・化学物質リスク評価」領域で別途扱う。

(2) キーワード

大気汚染物質、カーボンニュートラル、ゼロエミッション、自動車、排出ガス、排気後処理技術、電動化、エアロゾル、光化学オキシダント、広域大気汚染、観測ネットワーク、発生源解析、大気化学プロセス、輸送過程、モデル解析、植物影響、大気汚染の疫学

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

我が国では、人の健康の保護及び生活環境の保全のうえで維持されることが望ましい大気環境基準¹⁾を制定している。大気環境基準では、二酸化硫黄（SO₂）、一酸化炭素（CO）、浮遊粒子状物質（SPM）、二酸化窒素（NO₂）、光化学オキシダント（O_x、対流圏オゾン）、微小粒子状物質（PM_{2.5}）や有害大気汚染物質等の値が設定されている。それらを維持するため、様々な大気汚染物質発生源に対する排出規制が施行されてきた。

我が国では都市における大気汚染の主要な発生源として、自動車排出ガスの規制が、1970年代から段階を追って強化されてきた²⁾。現在、これらの規制が功を奏し、都市の大気環境は著しく改善されたが、光化学オキシダントなど光化学反応の寄与が大きい物質では、課題が残されている^{3), 4)}。

近年、我が国や中国におけるPM_{2.5}濃度の低下⁵⁾が指摘されている。新型コロナウイルス感染症（COVID-19）拡大防止策により多くの地域でNO_xやPM_{2.5}の低下が見られた⁶⁾。特に中国での産業活動の減速による大気汚染物放出の低下⁷⁾は、大気環境の改善に明確につながったが、一時的となる可能性がある。産業活動がリバウンドし、大気環境の改善が継続されないシナリオも指摘されており、一層の環境対策が必要となる。

現在の自動車の排出ガス対策は、エンジンの改良、排気触媒や粒子除去フィルターなどの排気後処理技術、燃料の低硫黄化等、潤滑油等の改善により成立している。日米欧等の厳しい排出ガス規制に対応するためには、排気ガスの後処理が必須であり、当面、極めて重要な技術である。

2016年に2020年以降の温室効果ガス（GHGs）の削減等に関する国際枠組みであるパリ協定が発効し、2050年カーボンニュートラルを宣言する国が相次いだ。我が国の政府も2020年10月、2050年までにGHGs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として宣言した。カーボンニュートラルの達成には、GHGsの排出が多い化石燃料から脱却し、GHGsを排出しない再生可能エネルギー等への転換を進める必要がある。化石燃料は、GHGsに加えて大気汚染物質の主要排出源でもある。カーボンニュートラル化と大気汚染物質の排出削減の両面の効果が期待されている。このような課題に対応するには、大気汚染物

質の観測、発生源や大気中における発生過程の解明、ネットワークによる広域大気汚染の観測などの強化が必要となる。エアロゾルを含む大気汚染物質の人間の健康への影響は、喫緊に、より詳細な解明を進めて、その知見に基づいて我が国の環境基準の改定や対策などに結び付けていかなければならない。わが国の環境基準はWHOの基準⁸⁾と比較して緩い項目が多く、これらの扱いは今後の検討課題となる。CO₂の最も重要な吸収源である植物に対して大気汚染が与える影響を詳細に解明することも重要である。これからの大気環境問題を検討するためには、従来の視点よりも広く捉え、効果的な対策を講じていくことが必要である。

[研究開発の動向]

大気汚染の問題はいまだ重要な環境問題だが、昨今の異常気象の多発なども要因となって、国民の関心は気候変動に強くひきつけられている。これに加えてCOVID-19による産業活動の低迷などもあり、大気汚染が喫緊の環境問題として捉えにくくなっている。しかしながら、大気汚染物質の多くはSLCFs（短寿命気候変動因子）として地球温暖化に対しても少なからぬ役割を果たしていることは既に広く知られている。中でもエアロゾルはいまだに気候変動に与える影響の不確実性が高いとIPCC第6次評価報告書でも評価されている。PM_{2.5}として人間の健康に与える影響も、まだ十分には解明されていない。世界人口の99%はWHOのガイドラインを超える大気汚染レベルの地域に居住していると報告されている⁹⁾。

このような状況の改善には、(i) 詳細かつ正確な野外観測の実施とそのデータ解析、(ii) AIなども活用したモデルシミュレーションによる現状解析と未来予測、(iii) モデルに組み入れるためのより詳細な化学プロセスの解明、(iv) これまで解析されてこなかった新たな現象の発見とその解析、が求められる。

(i) については、地球規模・地域規模・国規模・ローカル規模の汚染にそれぞれ対応する形で様々な観測が行われ、既に一定の成果が出ている。近年では観測手法や観測プラットフォームのバリエーションも極めて豊富となり種々の要請に応えられるようになってきている。特に公定法として用いられている従来の測定機器に加えて廉価な簡易型の測定器の普及により、より密度の高い測定・観測が進められ始めている¹⁰⁾。

(ii) については、より精度の高いシミュレーションモデルの開発と利用、より信頼性の高いエミッション・インベントリの構築などに基づく計算機シミュレーションの進展が求められている。AIを利用した機械学習、深層学習の発展により、様々なデータに基づく新たな発見や、高精度の予測も進められるようになってきた。

(iii) については、大気中のエアロゾルの発生源に関して、大気中での化学反応による二次生成の解明が重要である。近年エアロゾル表面における不均一反応も含めた詳細な化学プロセス、反応機構の解明が進められている¹¹⁾。

(iv) については、我が国の大気環境で現在に至るまで大きな問題となっている、例えばNO_xやVOCなどの原因物質が減少しているにも関わらずオゾン濃度が低下しないことが我が国の大気環境における大きな問題となっている。原因解明に向けて、従来は解析対象となっていなかった事象の再吟味なども提唱されている。加えて、現在、海洋環境で大きな問題となっているマイクロプラスチックが大気環境においても問題となり得ることが認識されている¹²⁾。大気環境における実際のサイズは海洋のマイクロプラスチックに比べると非常に小さいが、新たな観測などに基づく情報が蓄積され始めている。

自動車の排出ガス対策技術の研究開発については、排出ガス規制に対応する形で開発が進められてきた(図表2.9.2-1)。ガソリン車の排出ガス対策は、主にエンジンの改良とエンジンから排出された大気汚染物質を触媒で浄化する排気後処理技術によって行われてきた。排気触媒の採用に当たっては、触媒の被毒を防ぐため、燃料の硫黄分の低減や潤滑油添加剤の改良等が行われてきている。コールドスタートエミッションの低減には、触媒をできるだけ低温から機能させることが必要であり、エンジンの改良に加えて、低温活性に優れた触媒などが開発された。

図表 2.9.2-1 日米欧三極における自動車排出ガス規制開発の流れ

時期	国・地域	出来事
1940年代	米国	カリフォルニア州で炭化水素（HC）とNO ₂ から生成された光化学オキシダントによるスモッグ発生
1962年	米国	カリフォルニア州がHC抑制のためクランクケース・エミッション規制を制定
1963年	米国	大気浄化法が制定
1965年	米国	カリフォルニア州がエンジンからの排出ガスを対象にした規制を導入
1966年	日本	ガソリン車のCO濃度規制
1968年	日本	大気汚染防止法の公布
1968年	米国	全米で排出ガス規制が開始
1970年	米国	マスキー法成立。大気汚染対策としての自動車排出ガス規制を段階的に強化
1970年	欧州	排出ガス規制が制定。
1970年	日本	東京新宿区での4エチル鉛含有ガソリンによる鉛中毒事件、東京杉並区の高校での光化学スモッグ等が原因と疑われた大気汚染問題が発生
1973年	日本	昭和48年排出ガス規制でガソリン車のHCとNO _x が追加
1974年	日本	昭和49年排出ガス規制以降、ディーゼル車の排出ガス規制が段階的に強化
1975年～	日本	昭和50年、53年規制でマスキー法水準に引き上げ。対策として、点火時期遅延や排出ガス再循環、副燃焼室を採用した燃焼改善等でNO _x を低減、COとHCを酸化触媒で浄化する技術が採用。電子式燃料噴射制御装置や酸素センサーの実用化により、CO、HC、NO _x を同時に浄化する三元触媒システムが開発され、一部の車両で採用された。
1990年代	欧州	大気汚染の深刻化により、段階的に規制が強化（米国並みの規制に強化）
1994年～	日本	短期規制（1994年）でディーゼル車のPMの排出重量規制を導入。その後、段階的に強化。試験モードを定常運転から過渡試験に変更。新短期規制（2003～2004年）以降、ディーゼル車にも様々な排気後処理装置が採用。
2000年～	日本	平成12年、17年規制でガソリン車コールドスタート時のエミッション低減に重点を置いた規制が導入、強化
2009年	日本	筒内直接噴射ガソリンエンジンは燃費性能に優れるが粒子排出があるため、吸蔵型窒素酸化物還元触媒を装着した希薄燃焼方式の直接噴射式エンジン自動車を対象に、粒子に対する排出規制が導入
2020年	日本	理論空燃比で燃焼する方式の直接噴射式エンジンを有する自動車を含む全ての直噴車で粒子に対する排出規制を導入

欧州では、排出重量の規制（PM規制）に加えて、排出個数の規制（PN規制）が導入されることになり、ガソリン車を対象にした粒子捕集フィルター（GPF）が必要とされている。我が国においても、新型車ではガソリン車が2024年10月1日から、ディーゼル車が2023年10月1日から、粒子数の排出規制（PN規制）を開始することが決定した。継続生産車はその2年後に適用となる。

ディーゼル車は、ガソリン車と比べて、その燃焼形態の相違からCOとHCの排出が少ないことに加えて、排出ガス中に多量の酸素を含むことから、三元触媒の適用が難しい。そのため長期規制（1996～1997年）までの対応車までは排気後処理技術を使用せず、主にエンジンの燃焼改良や排出ガス再循環などで対応されてきた。しかし、都市部の大気環境に対するディーゼル排出ガスの寄与が社会問題化したことをうけ、新短期規制（2003～2004年）以降は厳しい排出規制が導入され、ディーゼル車においても酸化触媒（DOC）、ディーゼル粒子捕集フィルター（DPF）、選択式還元触媒（SCR）などの排気後処理装置が採用された。

DPFは、耐久性等の問題から実用化は困難と言われていた時期もあったが、DPF自体の改良に加えて、エンジンやその制御技術の改良等で実用化された。最近では、DPFとSCR触媒などのNOx触媒を組み合わせたシステムが主流となっている。このような排気後処理技術の採用により、ディーゼル車からの大気汚染物質は著しく低減されてきた。排気後処理装置の導入に際し、触媒の被毒や劣化を防止するため、燃料中の硫黄分の低減や潤滑油の添加剤の開発も進められ、ディーゼル車の排出ガス低減に大きな役割を果たしている¹³⁾。

このように、自動車排出ガスの削減対策は、エンジンや排気後処理装置の改良、燃料・潤滑油の改良等により行われてきたが、2016年にパリ協定が発効して以降、GHGsの削減対策に対する要求が高まり、化石燃料からGHGsを排出しない再生可能エネルギーへの転換が進められることになった。化石燃料から再生可能エネルギーへの転換は、大気汚染物質の排出削減に著しい効果が期待されるため、大気汚染対策としてもその効果が期待されている。自動車の分野に限れば、欧州や中国では地球温暖化と大気汚染対策の両立を目指して、パワートレイン電動化などのゼロエミッション車の導入が急速に進められており、化石燃料を用いる内燃機関の販売や登録を禁止する動きも活発化している。エネルギー源の変化は、自動車そのものだけでなく、他の産業や社会全体に大きな影響を及ぼすため、不透明な部分が多々存在する。現在は、このようなエネルギーや社会の変化を踏まえながら、これからの大気環境を維持していくための対策を検討する時期に差し掛かっていると考えられている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

① 世界保健機関 (WHO) 大気環境に関する新しいガイドライン⁸⁾ を公表

WHOは、2021年9月に大気環境に関する新しいガイドライン (図表2.9.2-2) を公表した。このガイドラインでは、各大気汚染物質 (PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂、SO₂、CO) に係るAQG levelを示している。AQG levelはガイドライン勧告 (recommendation) の一種で、各国政府が環境基準等へ採用する際に、それぞれ地域状況を考慮して検討する必要があるとしている。我が国の環境基準と比べてかなり厳しい値だが、今後の大気環境のために考慮すべき事項である。

図表 2.9.2-2 WHOの大気環境に関する新しいガイドライン

Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
PM _{2.5} , µg/m ³	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour ^a	75	50	37.5	25	15
PM ₁₀ , µg/m ³	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour ^a	150	100	75	50	45
O ₃ , µg/m ³	Peak season ^b	100	70	-	-	60
	8-hour ^a	160	120	-	-	100
NO ₂ , µg/m ³	Annual	40	30	20	-	10
	24-hour ^a	120	50	-	-	25
SO ₂ , µg/m ³	24-hour ^a	125	50	-	-	40
CO, mg/m ³	24-hour ^a	7	-	-	-	4

^a 99th percentile (i.e. 3-4 exceedance days per year).

^b Average of daily maximum 8-hour mean O₃ concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O₃ concentration.

② 高所での都市大気、自由対流圏内の大気汚染観測

人間の健康影響の観点から、これまで大気汚染は都市域の地上付近を中心に観測されてきた。しかし、大気中における汚染物質の移動や化学反応を考える上では地上付近にとどまらず都市上空の大気環境も観測する必要がある。長距離越境大気汚染を考える上ではさらに上空の自由対流圏内の大気環境を観測する必要がある。このような観点から我が国でいえば東京スカイツリー¹⁴⁾や富士山頂¹⁵⁾における大気観測は、今後より詳細な大気環境の把握を図る上で重要である。

③ ドローンや小型簡易型センサーを用いた密度の高い大気汚染観測

これまで主に健康影響の観点から、地上の定点で、検定を受けた測定機器類で大気汚染の観測が行われてきた。しかし、短時間、広領域（衛星観測や航空機観測などがカバーする領域よりは狭い）、高空間分解能などの重要性が認識され、ドローンを用いた3次元的観測¹⁶⁾や、一定の信頼性が確保できる小型簡易型センサー¹⁰⁾を多地点で用いた高密度の観測が進められている。環境基準の制定やこれに基づく環境の保全・改良には公定法を用いた正確な測定が欠かせないが、地域の環境やその変化を迅速・機動的に把握していくために今後さらに重要性が増していくと考えられる。

④ COVID-19による大気環境の変化

2020年初頭から始まったCOVID-19は社会生活のみならず、環境科学にも大きな影響を与えた。特に大気環境の分野では、経済活動の停滞などの影響が現れ、特定の国にとどまらず、地域規模・地球規模の環境にも影響を与えた¹⁷⁾。特に中国では2022年12月まで継続したゼロコロナ政策の厳格な措置と運用がSO₂やNO_xなどの大気汚染物質の放出を低下させた。その影響は国内にとどまらず、周辺諸国にも現れている¹⁸⁾。脱炭素社会を目指した産業活動の変革がもたらす影響とも相まって、COVID-19による経済活動の激変がもたらす大気環境の変化を注視していく必要がある。

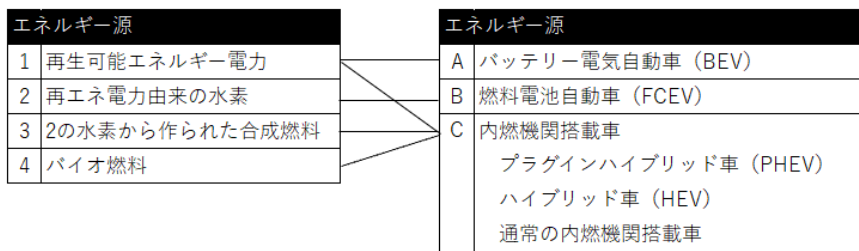
⑤ 自動車の変化

自動車業界は100年に一度の変革期にあると言われ、それを代表するものとして「CASE」と呼ばれる用語を目にする機会が増えている。CASEは、Connected（繋がる車）、Autonomous（自動運転）、Shared（シェアリング、共有）、Electric（パワートレインの電動化）の頭文字をとった用語で、今後の自動車の姿を示すキーワードとなっている。このような分野の研究や製品開発のためには、これまでの自動車産業にはない新しい分野の研究開発、人材、研究設備への多額の投資が必要とされる。一方、このような背景を考慮すると、排出ガス対策を含む内燃機関の技術は高度に成熟したレベルにあるため、今後、研究開発への投資は削減される可能性が高い。さらに、自動車の使い方や効率的な輸送などが実現される可能性もあり、大気環境の改善策としても注意を払う必要があると考えられている。

⑥ 2050年カーボンニュートラルに向けての自動車用パワートレインの動向

パリ協定が発効してから、2050年カーボンニュートラルを宣言する国が相次ぎ、我が国政府も2020年10月、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。

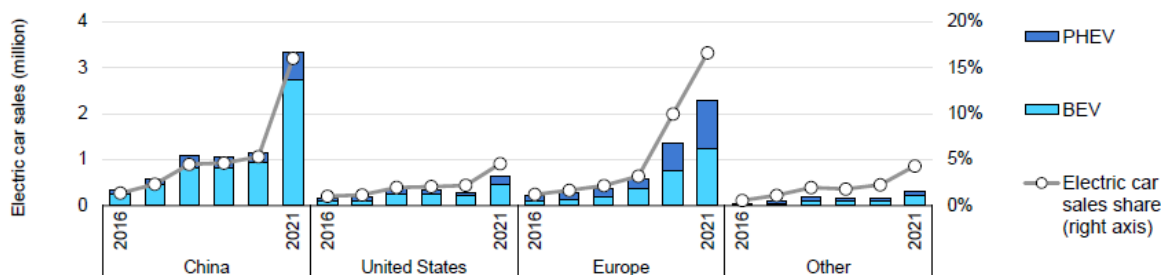
このような背景のもと、自動車用パワートレインのカーボンニュートラル化に向けて、様々な研究開発が行われ、様々な方法が提案されている。図表 2.9.2-3 にエネルギー源と自動車技術の代表的な組み合わせを示す。



図表 2.9.2-3 エネルギー源と自動車技術の組み合わせ

太陽光や風力発電等からの電力と BEV (図表 2.9.2-3 中の 1 と A) の組み合わせが最も代表的なものである。それ以外にも、カーボンフリーな電力から生成した水素と FCEV (図中の 2 と B) の組み合わせ、カーボンフリー水素から作られた合成燃料やバイオ燃料と内燃機関 (図中の 3 か 4 と C) の組み合わせもカーボンニュートラル化に貢献する。このようにエネルギー源と自動車技術の組み合わせは複数存在するが、エネルギーの利用効率で比較すると BEV が最も効率が高く、再生可能エネルギーによる電力を用いて生成した水素や合成燃料を用いた内燃機関自動車の効率は BEV に比べて大きく低下する。

図表 2.9.2-4 に最近の BEV、PHEV の販売台数とシェアの推移を示す。中国、欧州で販売が急増している。このような電気自動車販売の急増には、補助金等の政策の影響が大きいことが指摘されているが、エネルギーの利用効率が高いことも一因と考えられている。欧米では、今後の BEV の増加に向けて、需給が逼迫すると予想される蓄電池工場の建設が計画されている。



図表 2.9.2-4 電気自動車の販売台数とシェアの推移¹⁹⁾

©IEA

重量貨物車等の大型車の電動化も取り組まれているが、大容量の電池の搭載や充電時間等の問題がある。FCEV や水素エンジン等も検討されており、その方向性は現時点では不透明である。仮に、蓄電池の資源の制約などからカーボンフリーな燃料を用いた内燃機関搭載車が広範囲に使用されるような状況になれば、従来の内燃機関自動車と同様に排出ガスの後処理装置が引き続き必要となり、重要な技術になる点には留意が必要である。

⑦ 内燃機関搭載車両の販売禁止の動き

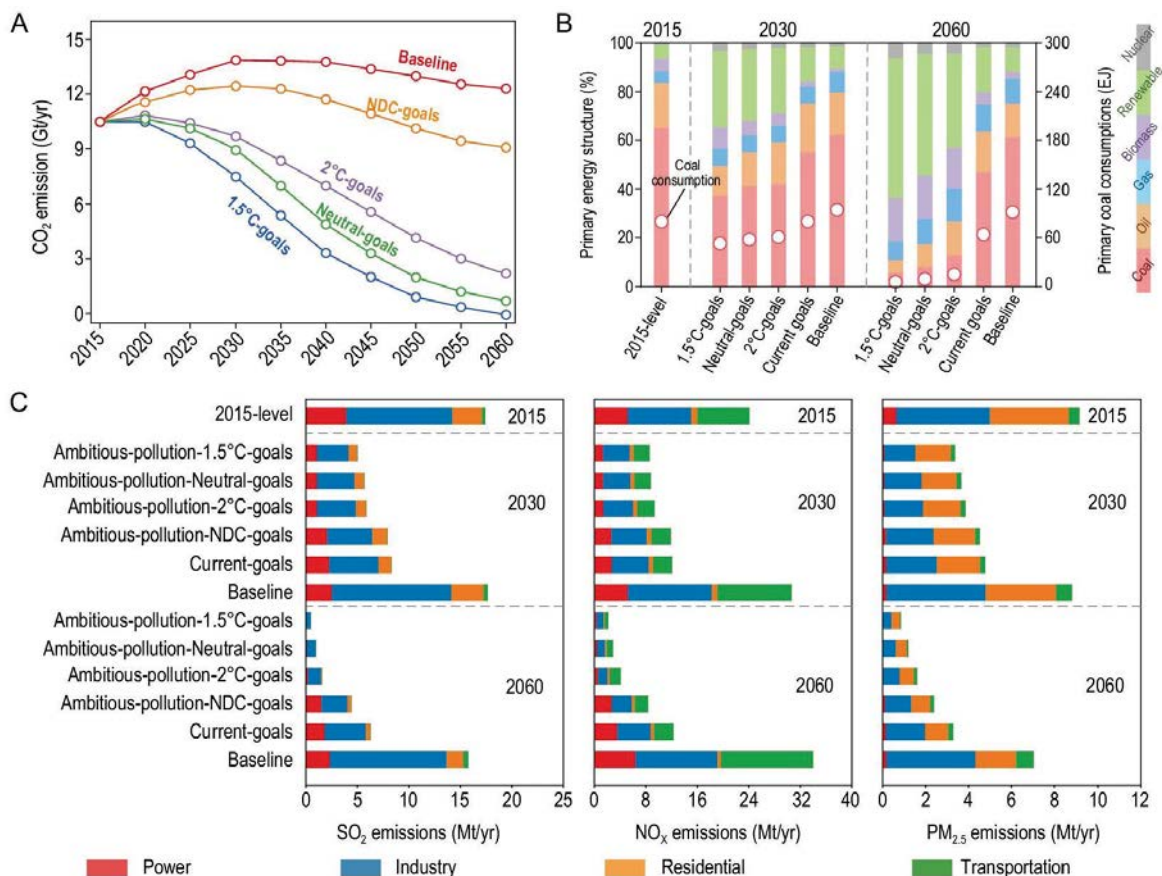
欧州を中心に、2050年カーボンニュートラルを目指して、2025年から2040年にかけて内燃機関を搭載する自動車の販売や登録を禁止する動きが活発化している。2021年に英国グラスゴーで開催された国連気候変動枠組み条約第26回締約国会議 (COP26) では、販売される全ての新車を、主要市場で2035年までに、世界全体では2040年までにゼロエミッション車とすることを目指す共同声明が発表された²⁰⁾。この共同声明には、英国やスウェーデン、カナダ、チリ、オランダなど28カ国とMercedes-Benz Group

AG、General Motors Company、Ford Motor Companyなどの自動車メーカー11社・団体などが署名している。

⑧ 地球温暖化対策が大気環境に及ぼす影響に関する研究

世界各国がカーボンニュートラルに向けて動き出しているが、化石燃料から再生可能エネルギー等への変化が大気環境に及ぼす影響についても研究が行われている。最近では、地球温暖化対策の評価に使用されてきた統合評価モデルと大気環境の評価に用いられてきた化学輸送モデルとを組み合わせ、将来の地球温暖化対策に伴う大気環境の改善効果を予測する研究が行われるようになってきた。

特に、大気環境問題が深刻な中国では、地球温暖化と大気環境問題の同時解決を目指して、自動車の電動化を世界に先駆けて実施しており、カーボンニュートラルに向けた様々なシナリオと大気環境との関係について報告されている^{21), 22)}。図表2.9.2-5はその一例で、中国における様々なGHGs低減シナリオの下での大気汚染物質の排出量を推計したものである。出典元の論文によると、現行の中国での排出ガス規制は2030年以降、その効果は少なくなり、WHOの大気環境に関するガイドラインを達成するためには、同時に、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換等のGHGs低減対策を進める必要があると結論づけている。すなわち、地球温暖化対策を進めることによって、大気環境を大幅に改善できることが示されている。



図表2.9.2-5 中国における人為的なCO₂排出量とエネルギー、大気汚染物質の推移シナリオ²¹⁾

©Oxford University Press

(A) 2015年から2060年までのCO₂排出量推移シナリオ、(B) 2015年、2030年、2060年の一次エネルギー構造(左Y軸)および石炭消費量のシナリオ(○印、右Y軸)、(C) 複数のGHGs削減シナリオにおける2015年、2030年、2060年の排出源別の大気汚染物質排出量(SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}) Current-goalsの2030年と2060年を比較すると微減にとどまることが読み取れる。

⑨ 機械学習を用いたより高密度の大気汚染予測

観測とモデルシミュレーションは環境解析に不可欠な両輪といえる。現状を把握し、将来を予測するには両者が必要であることは論をまたない。地球規模、地域規模の環境解析、将来予測には大規模なシミュレーションモデルが大きな役割を果たしてきた。今後、環境観測から高頻度、高密度のデータが得られるようになると、コンピューターがそれらのデータから継続的に学習するとともにデータに基づいて予測を行える機械学習、さらには深層学習のようなコンピューターによる処理が極めて有効となる²³⁾。しかし、現在の大気環境のデータは都市域に偏在しており、森林衰退に対する大気汚染の影響の解析には十分ではない。高精度の衛星観測や高空間分解能の地上データが蓄積されていけば、このような機械学習による特定地域の環境解析に力を発揮していくと期待されている。

⑩ シードエアロゾル存在下での大気化学反応機構の研究

大気中でエアロゾルを生成するような化学反応の研究はすでに長年の蓄積がある。しかし従来は主に気相の化学反応の観点からの研究が主であり、生成するエアロゾルの実時間で追跡や、エアロゾル存在下における反応の解析などは困難を伴うものであった。しかし近年では生成するエアロゾルを実時間で測定したり、事前にエアロゾルを系内にシードした上で反応を行わせたりするような実験方法が開発されてきており、そのような実大気条件に近い条件下での化学反応の解析が進められている²⁴⁾。大気中で生成する二次生成エアロゾルはPM_{2.5}の主要成分でもあり、その化学組成の把握や生成プロセスの解明は極めて重要な知見となる。

⑪ 森林生態系のCO₂吸収源としての役割を阻害する対流圏オゾンの影響

我が国においては大気汚染物質の環境基準はほぼ100%達成されているが、唯一、光化学オキシダント(対流圏オゾン)はその達成率がほぼ0%である。オゾンは世界的に見ても森林生態系への大きな脅威となっている²⁵⁾。オゾンの暴露は樹木のCO₂吸収量を低下させ、長期的には生態系の炭素循環に大きな影響を与えると考えられている。森林は重要なCO₂吸収源であり、カーボンニュートラルを達成するためには森林伐採のみならずオゾンなどによる森林衰退の防止もまた重要な環境保全ターゲットである。

⑫ 東アジア地域の広領域における大気汚染物質の分布の把握

大気汚染物質の環境影響は国レベルにとどまらず、広く地域レベル・大陸レベルの環境問題であることはすでに周知の事実となっている。欧州や北米に比較すると、アジア特に東アジア地域は熱帯から温帯にかけて広く森林が分布し、重要なCO₂吸収源になっている一方、発展途上国が多く存在し、十分な環境保全策がとられていないケースも多く、未だに多くの問題を抱えている。この地域の大気環境について、従来、酸性雨に焦点を当てたモニタリングネットワークである東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)の活動が行われてきた²⁶⁾。最近、森林やこの地域に属する都市域などに対する大気汚染物質の影響の重要性に鑑み、EANETのスコープが拡大されて主な大気汚染物質も主要なターゲットとされることになった。先行する欧米に追いつき、まだスコープには含まれていないものの、SLCFsの観測・規制など、大気汚染と温暖化・気候変動の両者に共便益を与える取り組みが今後求められると考えられる。

⑬ 船舶、航空機の規制動向

国際的な船舶の大気汚染物質やGHGsの排出削減に向けた規制は国際海事機関(IMO)の海洋環境保護委員会で議論されている。国際貨物の増大等により、船舶のCO₂排出量も増大している。2008年と2018年を比較すると40%の増加となっている。2021年6月の会合では、日本主導で、世界の大型外航船への新たなCO₂排出規制「既存船燃費規制(EEXI)・燃費実績(CII)格付け制度」が採択された。従来は新造船のみが対象だったが、当該規制は既存船に対しても適用される。欧州や日本の新規船舶では

LNG（液化天然ガス）大型貨物船が就航し、メタノール、LPG、水素等の新燃料の研究開発も行われている。国際海事機関が監督するマルポール条約では、2020年1月に全ての海洋でSOx排出規制を3.5%から0.5%に引き下げる改正も行われ、既存船舶へもSOxスクラバー搭載等の対策が必須となっている。

航空機については国際民間航空機関（ICAO）で大気汚染物質の規制が制定されている。航空機のCO₂排出について、2020年以降総排出量を増加させないグローバル目標を設定している。新型機材や運航方式に加えて、持続可能航空燃料（SAF: Sustainable Aviation Fuel）の導入を促進しており、各国も注力している。とくに欧米諸国の動きが早く、ノルウェー、フランスではSAF混合義務が既に法制化した。

⑭ 二輪車や特殊自動車の規制動向

日本自動車工業会が集計している統計²⁷⁾によれば、2021年3月における我が国での二輪車保有台数は約1千万台である。二輪車の世界の保有台数は、正確性の高い統計が揃っていないが、少なくとも3億台は超えている。四輪車について我が国での保有台数は約8千万台、世界の保有台数は約15億台である。四輪車と比べ台数や総走行距離が少ないとはいえ、日本国内でも二輪車は無視できない移動発生源である。我が国で二輪車の排出ガス規制が導入されたのは1998年からと、1952年から導入の歴史がある騒音規制と比べて最近だった。しかし、図表2.9.2-1で述べた四輪車の排出ガス基準強化の歴史を急速に追いかけ、近年は欧州との国際基準調和に向けて厳格化してきている²⁸⁾。我が国の二輪車では2006年以降の規制を満たすため、四輪車で開発されていた三元触媒等の技術が適用されてきている。二輪車は中国や台湾、インド、東南アジアなどでの主要交通手段である。特に大気汚染対策を強化している中国や台湾での電動二輪車の普及も話題を呼んでいる。台湾は人口約2,400万人に対して二輪車約1,400万台も普及しており、大気汚染の3割がバイクを含む移動発生源と推定されている。台湾政府が2017年に打ち出した「大気汚染防止行動計画」では2035年までに新車販売する二輪車を電動化する目標を掲げ、補助金政策や低価格モデル車の販売などにより年8万台前後が販売されている。ベンチャー企業のGogoro社がバッテリー交換ステーションビジネスを展開するなど動向が注目されている。

我が国では2006年以降、特殊自動車（産業機械、建設機械、農業機械）の排出ガスは特定特殊自動車排出ガス規制法（通称：オフロード法）で規定されている²⁹⁾。同法では公道を走行する自動車、原動機付自転車をオンロード車と呼ぶのに対して、公道を走行しない特殊自動車をオフロード車と呼んでいる。図表2.9.2-1で述べたように一般自動車の排出ガス規制が進み、特殊自動車起因の大気汚染物質の比率が無視できなくなってきたことを受けて、段階的に排出ガス規制を強化している。技術的にはオンロードのディーゼル車の排出ガス浄化技術で述べたDPFや排出ガス再循環等に対応されてきている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

• 経済産業省他「グリーンイノベーション基金」(期間：10年間、予算規模：総額2兆円)

経済産業省は、2050年カーボンニュートラル目標に向けて、令和2年度第3次補正予算において2兆円の「グリーンイノベーション基金」をNEDOに創設した。この基金では、研究開発・実証から社会実装までを見据え、官民で野心的かつ具体的な目標を共有し、重点14分野を対象に企業等の取り組みに対して10年間の継続的な支援を行うとしている。

自動車の環境問題に関わる分野では、「次世代蓄電池・次世代モータの開発プロジェクト」(予算総額1510億円)、「スマートモビリティ社会の構築プロジェクト」(予算総額1130億円)、「CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクト」(予算総額1145億円)などが実施される見込みである。

「CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクト」では、ENEOS株式会社がCO₂からの合成反応を用いた高効率な液体燃料製造技術の開発を、自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）が乗用車および重量車の合成燃料利用効率の向上とその背反事象の改善に関する技術開発を担当して、自動車用燃料としての技術

開発を行うことになっている。合成燃料は、コストと供給量が問題視されているため、乗用車については、HEV用ガソリンエンジンの熱効率向上技術、車両走行時の平均熱効率向上技術、車両効率向上技術、革新的排気後処理技術等を開発するとしている。また、大型商用車に対しては、最高熱効率55%超、Tank-to-WheelでのCO₂排出量を4分の1以上削減するための要素技術として、大型商用車用ディーゼルエンジンの熱効率向上技術、車両走行時の平均熱効率向上技術、車両効率向上技術、革新的排気後処理技術を開発するとしている。

• 経済産業省「自動車産業「ミカタプロジェクト」

経済産業省は、自動車の電動化にともなって需要の減少が見込まれるエンジンやトランスミッション等の自動車部品メーカーについて、電動車部品の製造に挑戦するといった「攻めの業態転換・事業再構築」について、窓口相談や研修・セミナー、専門家派遣等を通じて支援する事業を開始した。補助金を通じて事業転換に必要な設備投資や研究開発、人材育成等の支援も行うとしている。こうした取り組みを通じて電動化の動きは国内でも静かに進行して行くと思われる。

• ERCA「短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究」(2021～2025、500百万円)

排出源および大気中の時空間分布が偏在している SLCFs の地域ごと及び組成ごとの気候変動および環境影響を定量的に評価し、同時に影響緩和へ向けた排出量削減シナリオを策定するための研究を推進する。気候変動評価に加え、環境影響評価では、気候モデルによるシミュレーション結果を境界条件として、SLCFs の排出量増減に伴う地域ごとの健康影響・農作物影響・洪水渇水影響について、各種影響評価モデルを用いた評価を行う。

• ERCA「大気粒子中化学成分が小児のアレルギー及び生活習慣病の発症に及ぼす影響の解明」(2019～2021、99百万円)

兵庫県尼崎市の「子どもの検討環境に関する全国調査（エコチル調査）」参加者（約4,900人）のうち、小学2年生時に実施する学童期検査を受診する子どもを対象に、小児期の喘息等のアレルギー疾患の発症及び生活習慣病のリスク要因である高血糖や脂質異常等について、バイオマーカーを用いて客観的に評価したプロジェクト。胎児期及び乳幼児期の大気汚染物質及びその化学成分への曝露の影響を疫学的に解明した。

• ERCA「オゾン生成機構の再評価と地域特性に基づくオキシダント制御に向けた科学的基礎の提案」(2021～2023、108百万円)

スモッグチャンバーや水素酸化物（HOx）反応性計測といった先端技術を駆使し化学反応メカニズムの検証を行い、レジーム判定を含めた実大気計測を通してモデル精度の向上を図り、地域の特性に則した有効な光化学オキシダントの制御戦略の科学的な基礎の提案を目的としている。

• ERCA「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」(2021～2023、108百万円)

大気中のマイクロプラスチックの分析法を確立し、国内外における大気圏内の動態を観測およびモデルの両面から解明し、発生源の推定を行う。健康影響の観点から呼吸器系における炎症惹起作用や気管支喘息に対する影響を評価する。

• 大型車用水素エンジンの開発

2022年7月、いすゞ自動車株式会社、株式会社デンソー、トヨタ自動車株式会社、日野自動車株式会社、Commercial Japan Partnership Technologies 株式会社の5社は、カーボンニュートラルの実現に向けた

選択肢の一つとして、さらなる内燃機関の活用を目指し、大型商用車向け水素エンジンの企画・基礎研究を開始したと発表した。トヨタは、乗用車用の水素エンジンの開発も行っており、日本や欧州の自動車レースに参戦している。

水素エンジンは、再エネ由来の水素を使用すればCO₂を排出しないが、空気との燃焼では大気汚染物質の一つである窒素酸化物を排出する。SCR触媒等の排気後処理装置が必要になると考えられる。

■国外

・米国エネルギー省 (DOE) SuperTruck 3プロジェクト³⁰⁾(期間：5年間、予算規模：1億2700万ドル)

米国DOEのエネルギー効率・再生可能エネルギー局は、2009年に大型トラックの貨物輸送効率を50%向上させることを目的としSuperTruckイニシアチブを立ち上げた。その結果、トラクタートレーラーの燃費を12、13 mpgまで向上させることに成功した。このプロジェクトで開発された技術は、現在では市販のトラックにも応用されている。後継プロジェクトであるSuperTruck 2では、18輪トラックの燃費を2倍にすることを目標とし、Cummins Inc.の研究チームが廃熱回収システムを装備したエンジンで正味熱効率55%を達成したことを発表している。現在進行中のSuperTruck 3は、これまでのエンジン車とは異なり、大型車や中型車の電動化に焦点を当て、高い輸送効率とゼロエミッションを達成するため、電動トラックと貨物システムのコンセプトを開拓するための研究に資金を提供している。このプロジェクトには、米国のPaccar, Inc.、General Motors Company、Daimler Trucks North America LLC、Ford Motor Company、Volvo Group North America LLCの5社が参加している。

・米国DOE 電気自動車、バッテリー等への研究支援³¹⁾

DOEは2021年6月、傘下の国立研究所における電気自動車、バッテリー、コネクテッド・ビークルのプロジェクトおよび電気自動車のイノベーションを支援するDOEの新しいパートナーシップに対して、今後5年間で2億ドルの資金提供を行うことを発表した。

・EU Towards zero emission road transport (2Zero)³²⁾

Towards zero emission road transport (2Zero) は、Horizon Europeプログラムの資金提供を受けた、欧州全域での道路交通をゼロエミッションへ速やかに移行することを目的とした共同プログラムのパートナーシップで、2021年6月23日に正式に発足した。

2Zeroパートナーシップでは、BEVとFCEVなどを統合したシステムの実装を検討している模様。既存のEUにおける技術プラットフォーム (ERTRAC、EPoSS、ETIP-SNET、ALICE、Batteries Europe) の支援を受けて新しい自動車技術の研究を続け、その範囲をゼロエミッション車のエコシステムへの統合にまで広げ、EUの競争力と技術的リーダーシップの強化に貢献するとしている。

(5) 科学技術的課題

① 低下しない光化学オキシダント濃度

国内の大気環境問題においては、様々な発生源対策によって一次大気汚染物質たるNO_xやVOC (揮発性有機化合物) は着実に大気中の濃度が低下してきており、環境基準も設置されている測定局のほぼすべてで達成されている。これに対して光化学オキシダント (オゾン) の濃度は横ばいか微増の状況が続いており、その生成源であるNO_xおよびVOCの低減の効果が見られていないのは依然大きな問題である。オゾンは二次汚染物質であるため、その生成に至る大気中での化学反応について、さらなる検討が必要である。

② 地球温暖化関連大気汚染物質が人間の健康や農作物などに与える影響とその対策

地球温暖化が人間の健康や農畜産物に与える影響はこれまでに多くの研究がすでに進められてきている。

温暖化への対策としては緩和策（CO₂などのGHGsの削減）と適応策の二つが車の両輪のように重要であると指摘されてきた。その両者を並行して進めて、お互いの効果を相乗的に高めることが必要であることは概念的には理解されているが、しっかりとした裏付けとなる情報は不十分である。特にSLCFsは温暖化・冷却化だけでなく、大気汚染物質として様々な環境影響を与える物質でもあるため、都市域に限らない実態の解明や削減方式に関する研究を継続して深めていく必要がある。

③ カーボンニュートラル化が大気環境に及ぼす影響についての評価

地球温暖化対策として、世界の主要国が2050年カーボンニュートラルを目指すことを宣言し、自動車の電動化等、化石燃料と内燃機関自動車からの脱却が進行している。大気環境改善策としても極めて有効なGHGs削減対策もあり、大気汚染物質の排出量を既存の排出ガス規制では達成できない水準まで低減可能との研究も存在する。一方、カーボンニュートラルに向けた自動車技術やエネルギー源の選択は、複数の削減シナリオが存在することに加えて、多くの不確実な部分が存在する。海外では、地球温暖化対策等の評価に用いられている統合評価モデルと連携して推計した大気汚染物質の排出量を化学輸送モデルに入力し、GHGs削減シナリオごとに大気環境の将来予測を行う研究が行われている。このような研究の推進により、これからの大気環境に対する課題を把握し、大気環境改善のために必要な研究課題を検討していくことが求められている。

④ 既存車（内燃機関自動車）の排出ガス低減技術開発について

度重なる排出ガス規制の強化により、内燃機関搭載車の排出ガス浄化技術は、高度な水準に達していると考えられる。しかしながら、最近、国内の大型車メーカーによる排出ガス長距離耐久試験に係る不正が明らかになった。このような不正が行われてはならないことは言うまでもないが、背景のひとつとして、高い耐久性が要求される重量貨物車等の排気後処理技術において、長期間にわたる信頼性の確保等がまだ技術的な課題として残されていたことがあらためて示されたともいえる。さらに、粒子状物質の排出個数規制（PN規制）やReal Driving Emission（RDE）規制の導入など新しい規制や試験法への適用などにおいても、技術的な課題が存在する。

⑤ エアロゾル化学成分の健康影響

PM_{2.5}などエアロゾルの健康影響については多くの研究が進められてきた。さらに一步踏み込んで、エアロゾルに含まれる化学成分の何が人間の健康に大きな影響を及ぼすのかについての検討はまだ十分ではない。エアロゾル捕集法の開発が進み、細胞レベルでの暴露実験も進んできているため、今後さらなる成果が得られるものと期待される。疫学的な研究に基づく化学成分の健康影響研究も視野に入ってきている。

⑥ 有機エアロゾルの生成機構の解明

有機炭素（OC）は大気中のエアロゾルの主要成分の一つであるが、それを構成するのは多種多様な有機化合物であり、大気中における生成反応のプロセスは十分には解明されていない。シミュレーションモデルによる大気環境の解析には二次汚染物質の生成機構は一義的に重要ではあるが、その多様性のためすべてを網羅することは現実的に不可能である。主要な化学反応（オゾン反応やOHラジカルの反応）について代表的な人為起源および自然起源の有機化合物の大気中における反応プロセスを明らかにすることは依然として重要なターゲットである。

⑦ タイヤ粉塵起因マイクロプラスチックの環境動態、環境運命

海洋マイクロプラスチックの関心に伴い、大気環境中マイクロプラスチックも関心が高まった。自動車走行に伴う粉塵巻き上げ、タイヤ切削などが大気環境中で浮遊するサイズは非常に小さく、大きなものは車

道から下水道や雨水排水管に流れることが既知だが、これまでの研究蓄積の共有や詳細化が期待される。

⑧ 低温域での排ガス浄化性能やシステム全体最適化

内燃機関は一定の比率で残るとみられることを踏まえると、低温域での触媒の排ガス浄化性能の向上は引き続き課題である。開発視点では、内燃機関と浄化触媒とを一体のシステムととらえ、全ての使用過程での環境性能の向上が求められる。

⑨ 自動車排ガス触媒への機能付与や貴金属削減・代替技術

今後の自動車は各国での補助金、税制誘導政策などにより、普及シナリオには大きなばらつきがあるが、おおむね長期にはBEVなどの普及は進む一方、短中期にはHEVなど内燃機関搭載の低CO₂車も重要な位置を占めるとみられる。BEVについては大量のリチウムイオン電池搭載によるLi等の資源不足、価格高騰への対策技術、一定走行距離を達成しなければ製造時CO₂排出が既存車を上回る指摘などの課題がある。内燃機関搭載車については自動車三元触媒に用いられるRh、Pdなど貴金属、レアメタルの資源不足、価格高騰などの実現性シナリオ研究、そのリスクに応じた代替技術や削減技術を可能とする研究課題がある。

⑩ 高い時間・空間分解能を持つ大気環境観測

エアロゾルの観測は公定法としては24時間捕集後の分析によって行われている。様々な高時間分解能の測定機器が公定法と等価性があるものとして認められているが、それぞれに一長一短は存在する。一方、公定法は環境基準の策定やその維持につながるため厳密な管理が必要とされ、多くの機器を広く配置するには困難が伴い、空間分解能の高い測定を行うには向いていない。詳細な時間変化や不均一な空間分布を把握するためには短時間に比較的高精度で広域を測定するための手法が必要となる。

(6) その他の課題

① 広範囲な分野の研究者の研究協力体制の構築

石油を燃料とする内燃機関を動力源とする現在の自動車が誕生してから130年以上たつ。その歴史の中で、絶え間ない改良が加えられてきた。大気汚染物質の削減対策に限定しても約50年の歴史がある。必要な要素技術は高度になり、深い専門知識を集約した形で成立している。自動車の排出ガス削減技術に限定すれば、現在の自動車の清浄な排気は、燃料、内燃機関、排気後処理装置の改善で主に成り立っている。一方、2050年カーボンニュートラルに向けて、これまでの社会や産業の基礎であったエネルギー源の大幅な転換が求められており、社会や産業が大きく変わる転換期にあると思われる。CASEに代表される今後の自動車についても、エネルギーの転換に加えて、情報通信技術や人工知能など、これまで関連の少なかった分野との融合が要求されている。このような時期には、広範な技術分野を俯瞰的に眺め、今後、重要になる研究分野を見極め、各分野における深い専門知識を統合した研究開発体制の構築が必要と考えられる。さらに、広範囲にわたる分野の研究を取りまとめられる人材の育成も必要と思われる。

② 途上国における都市の大気環境問題

排出規制が厳しい日米欧の主要国の都市部では大気環境が改善傾向だが、世界の大多数の都市における大気環境は、極めて厳しい状況にある。その原因の多くが、自動車や発電所、工場、事業所等における燃料の燃焼に起因している。自動車排出ガスの低減を進めるためには、排気後処理の付いた車両への代替が効果的であるが、燃料の低硫黄化が達成されておらず、低排出ガスの車両が導入できない状況にある。途上国では、経済的事情から、新型車への代替が進まず、古い車両が長期間にわたり使用されることも一因である。使用過程車に対する排出ガス対策は、触媒やDPFなどの後付が効果的だが、一般的な排気後処理装置は、低硫黄燃料を前提に開発されているため、都市の大気汚染が深刻な途上国には、適用が困

難な状況にある。エネルギーの転換など、GHGsの削減を優先的に進めることが大気環境の改善に寄与する可能性もある。

③ 若手研究者の育成の支援不足

理工系における若手研究者の不足は指摘されるようになってから久しいが、大気化学、大気環境科学分野においても例外ではない。科学研究費補助金やその他の競争的研究資金においてはいずれも若手研究者に対する支給の充実を試みているが、若手研究者の育成はまだ十分ではない。例えば諸外国に見られるような、博士課程学生に給与を与えるような支援制度の充実が望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●内燃機関の効率向上、排出ガス浄化に関する研究は、自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）やゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム等で、産学連携する形で研究が進められている³³⁾。 ●電動化によるゼロエミッション車にとって必須な蓄電池の研究はグリーンイノベーション基金等により実施されている。わが国からのリチウムイオン電池の特許出願数は、他の国に比べて多い³⁴⁾。 ●光化学オキシダントについて、ほぼ唯一環境基準を達成できていない汚染質として、動向や原因、対策について種々検討が進められているが、十分な結論は得られていない。 ●長距離越境大気汚染がCOVID-19による影響を受けて低下し、国内的にはPM_{2.5}の環境基準がほぼ100%達成されるようになってきて、単なる重量濃度のみではなく、化学成分とそれによる健康影響に注目した研究が進められている。 ●二次有機粒子は大気中のPM_{2.5}に占める割合も大きい、その生成プロセスは不明な点が多く残されている。各国で生成機構、生成プロセスの解明について精力的な研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●排気後処理装置の改良などの研究は、継続して実施されている ●ハイブリッド車等を含めた内燃機関搭載車の販売では、我が国自動車メーカーは依然として主要なポジションを維持しており、技術力が評価されているものと考えられる。しかしながら、ゼロエミッション車の主流と考えられているBEV車の開発では、欧米や中国、韓国等の後塵を拝しており、世界市場でのシェアも小さい。 ●現行の光化学オキシダントの指標が必ずしも現状を正確に表していないともいわれ、いくつかの新たな指標が提案されている。 ●日本の主導で始められたEANET(アジア酸性雨モニタリングネットワーク)により、酸性雨にとどまらず東アジア全体に向けたPMの観測網による活動が開始されようとしている。 ●大気中の二次有機粒子の反応機構の解明は直接的な技術開発等には結びつきにくい。シミュレーションモデルへの組み込みは行われている。
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●国立研究機関等での自動車関連研究は、これまでの内燃機関の燃費性能向上等からカーボンニュートラルを見据えた車両の電動化にシフトしている^{30), 31)}。 ●欧米では従来より、オゾンの二つの前駆体であるNOxとVOCの削減が進められてきたが、オゾン生成反応の不均一性のため、これらの削減がオゾン低下につながるか、逆になるかは条件によって異なる。 ●米国のPM_{2.5}関連環境基準は段階的に強化されており、WHOの推奨値に最も近いレベルに到達している。今後さらなる規制の強化に向けた取り組みがなされており、そのための様々な研究が進められている。 ●二次有機粒子は大気中のPM_{2.5}に占める割合も大きい、その生成プロセスは不明な点が多く残されている。各国で生成機構、生成プロセスの解明について精力的な研究が進められている。

	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●米国自動車技術会 (SAE) では、継続して内燃機関車の排気浄化に関する研究発表が行われているが、報告数は減少している。 ●Tesla社に代表されるように、米国ではBEV社の専業メーカーが存在し、乗用車から大型車まで開発が行われ、乗用車は、世界市場で大きなシェアを獲得している³⁵⁾。さらに、既存のGM社やFord社も電動化に向かって開発を進めており、COP26におけるゼロエミッション車に関する共同宣言に署名している²⁰⁾。 ●光化学オキシダントについて、上記のような状況に対応してNOxとVOCの濃度領域に依存したオゾン生成レジームの検討は現在も進められている。 ●国内のPM_{2.5}はEPAなども不断に把握に努めており、健康影響に対する市民の意識の高まりもあって、研究開発に対する意識は高い。 ●大気中の二次有機粒子の反応機構の解明は直接的な技術開発等には結びつきにくい。シミュレーションモデルへの組み込みは行われている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●欧州の研究・イノベーション助成プログラムのもと、交通部門についての研究が行われているが、多くは、気候変動対策としてゼロエミッションを目指したものである。前述した2Zeroパートナーシップでは、大型車のバッテリー電気自動車 (BEV) と燃料電池電気自動車 (FCEV) を研究対象としている³²⁾。 ●各国別個の対応というよりは欧米で協力した対応が目立つ。米国と同様従来より、オゾンの二つの前駆体であるNOxとVOCの削減が進められてきたが、オゾン生成反応の不均一性のため、これらの削減がオゾン低下につながるか、逆になるかは条件によって異なる。 ●PMの健康影響は欧州全体に関わる問題である。市民の関心も高い。 ●二次有機粒子は大気中のPM_{2.5}に占める割合も大きい。その生成プロセスは不明な点が数多く残されている。各国で生成機構、生成プロセスの解明について精力的な研究が進められている。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●内燃機関の共同研究組織として設立されたFVVは、最近では、持続可能な社会を実現するための研究を行う組織に生まれ変わっている。自動車のパワートレインについては、以下のようなゼロエミッションの可能性のある複数の組み合わせを検討している。 <p>Battery electric powertrain, Fuel cell (hydrogen), Combustion engine (hydrogen), Combustion engine (DME), Combustion engine (methane), Combustion engine (Fischer-Tropsch fuel), Combustion engine (methanol)。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●欧州の自動車メーカーの多くは、カーボンニュートラルに向けて、電気自動車への転換を鮮明に打ち出しており、多くの車種 (BEV, PHEV) が市場に投入されている³⁵⁾。これまでに市販された車両は、乗用車が主であるが、ダイムラーやボルボなどの大型車メーカーも商用のバッテリー電気自動車を開発している^{36), 37)}。中国と同様、車両の電動化の先陣を切っている。 ●電気自動車でも最も重要となる蓄電池は中国や韓国の製品に依存していたが、輸送コストや安定供給を目的に、欧州各地に巨大な電池工場が新設されている。 ●光化学オキシダントについて、NOxとVOCの濃度領域に依存したオゾン生成レジームの検討が進められている。 ●PMについて、森林などの生態系への影響も応手全体の問題として捉えられている。様々なモニタリングがEMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) を中心に進められている。 ●大気中の二次有機粒子の反応機構の解明は直接的な技術開発等には結びつきにくい。シミュレーションモデルへの組み込みは行われている。

中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●内燃機関の研究も実施されているが、他の主要国に比べ研究水準は低いと考えられる。一方、車両の電動化に必須なバッテリーの多くを中国の企業が提供しており、研究においても世界の先端にあると考えられる³⁸⁾。 ●対流圏オゾンは中国でも重要な大気汚染問題として最近注目されており、日本と同様前駆物質の濃度は低下しているのにオゾンの濃度が下がらないことが問題となっている。 ●東アジア地域のコホート調査が進められており、PMの長期暴露の健康影響などの研究が進められている。 ●二次有機粒子は大気中のPM_{2.5}に占める割合も大きいですが、その生成プロセスは不明な点が多く残されている。各国で生成機構、生成プロセスの解明について精力的な研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●中国では、大気環境改善とGHGs削減の両立を目指して、国を挙げて自動車の電動化が進められており、多くの電動車両メーカーが存在する³⁵⁾。一部のメーカーは、欧州等でも高い評価を得ており、技術の向上は目覚ましい。 ●中国は、世界における自動車用リチウムイオンバッテリーの70%を生産しており、生産技術では世界のリーダー的立場にある³⁸⁾。 ●光化学オキシダントについて、多くの研究が開始されている。 ●PMの健康影響は最大の関心事でもあり、他の先進各国に比較して高めの環境基準の達成も現状では難しいため、多くの研究開発が試みられている。 ●シミュレーションモデルへの組み込みによる大気中の有機エアロゾルの生成プロセスの解明に取り組んでいる。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●内燃機関の排気浄化等に関する基礎研究分野では、目立った研究は少ない。しかしながら、韓国も中国に次ぐ、自動車用リチウムイオンバッテリーの生産国であり、生産等に関する技術レベルは高いと推察される³⁸⁾。 ●対流圏オゾンの不均一生成は韓国でも問題となっている。 ●中国などとも共同で東アジア地域のコホート調査が進められており、PMの長期暴露の健康影響などの研究が進められている。 ●二次有機粒子は大気中のPM_{2.5}に占める割合も大きいですが、その生成プロセスは不明な点が多く残されている。各国で生成機構、生成プロセスの解明について精力的な研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●韓国車は、我が国ではあまり見かけないが、その品質の高さから世界市場では確固たる地位を築いている。 ●電動化の分野でも、高品質のバッテリー電気自動車を開発、欧州市場等に投入し、高い評価を得ている³⁵⁾。 ●光化学オキシダントについて、衛星や地上観測などを組み合わせて地域ごとの環境対策に結びつけようとしている。 ●韓国においてもPMの化学成分の健康影響は重要な関心事であり、研究開発が進められている。 ●シミュレーションモデルへの組み込みによる大気中の有機エアロゾルの生成プロセスの解明に取り組んでいる

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・蓄エネルギー技術 (環境・エネ分野 2.2.1)
- ・水素・アンモニア (環境・エネ分野 2.2.2)
- ・CO₂利用 (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・反応性熱流体 (環境・エネ分野 2.6.1)
- ・気候変動観測 (環境・エネ分野 2.7.1)
- ・気候変動予測 (環境・エネ分野 2.7.2)
- ・都市環境サステナビリティ (環境・エネ分野 2.8.3)
- ・環境分析・化学物質リスク評価 (環境・エネ分野 2.10.2)
- ・分離技術 (ナノテク・材料分野 2.1.2)

参考・引用文献

- 1) 環境省「大気汚染に関わる環境基準」<https://www.env.go.jp/kijun/taiki.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 2) 国土交通省「自動車の排出ガス規制 (新車)」https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000001.html, (2023年2月1日アクセス) .
- 3) 環境省「大気環境・自動車対策:大気汚染状況」<https://www.env.go.jp/air/osen/index.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 4) 環境省「令和2年度 大気汚染状況について」<https://www.env.go.jp/press/110805.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 5) Itsushi Uno, et al., “Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China,” *Scientific Reports* 10 (2020) : 6450., <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63592-6>.
- 6) Anton Beloconi, Nicole M. Probst-Hensch and Penelope Vounatsou, “Spatio-temporal modelling of changes in air pollution exposure associated to the COVID-19 lockdown measures across Europe,” *Science of The Total Environment* 787 (2021) : 147607., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147607>.
- 7) Xiaoyan Wang and Renhe Zhang, “How Did Air Pollution Change during the COVID-19 Outbreak in China?” *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, no. 10 (2020) : E1645-E1652., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0102.1>.
- 8) World Health Organization (WHO), “WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,” <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, (2023年2月1日アクセス) .
- 9) World Health Organization (WHO), “Ambient air pollution data,” <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/ambient-air-pollution>, (2023年2月1日アクセス) .
- 10) Teppei J. Yasunari, et al., “Developing an insulation box with automatic temperature control for PM_{2.5} measurements in cold regions,” *Journal of Environmental Management* 311 (2022) : 114784., <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114784>.
- 11) Phuc T. M. Ha, et al., “Effects of heterogeneous reactions on tropospheric chemistry: a global simulation with the chemistry-climate model CHASER V4.0,” *Geoscientific Model Development* 14, no. 6 (2021) : 3813-3841., <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3813-2021>.

- 12) Yulan Zhang, et al., “Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives,” *Earth-Science Reviews* 203 (2020): 103118., <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>.
- 13) 石油連盟「情報ライブラリー：Q&A：軽油の品質」 <https://www.paj.gr.jp/statis/faq/71>, (2023年2月1日アクセス) .
- 14) 三隅良平, 他「東京スカイツリーでのエアロゾル・雲研究」『エアロゾル研究』37 巻 2 号 (2022) : 96-103., <https://doi.org/10.11203/jar.37.96>.
- 15) 米持真一, 他「富士山頂における昼夜別に採取したPM_{2.5}中の無機元素成分と発生源解明」『分析化学』70 巻 6 号 (2021) : 363-371., <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.70.363>.
- 16) Vinit Lambey and A. D. Prasad, “A Review on Air Quality Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle,” *Water, Air, & Soil Pollution* 232 (2021) : 109., <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04973-5>.
- 17) Abdulmalik Altuwayjiri, et al., “The impact of stay-home policies during Coronavirus-19 pandemic on the chemical and toxicological characteristics of ambient PM_{2.5} in the metropolitan area of Milan, Italy,” *Science of The Total Environment* 758 (2021) : 143582., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143582>.
- 18) Tianhao Le, et al., “Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China,” *Science* 369, no. 6504 (2020) : 702-706., <https://doi.org/10.1126/science.abb7431>.
- 19) International Energy Agency (IEA), “Global EV Outlook 2022,” <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, (2023年2月1日アクセス) .
- 20) Department for Transport and Department for Business, Energy & Industrial Strategy, “Policy paper: COP26 declaration on accelerating the transition to 100% zero emission cars and vans,” GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/cop26-declaration-zero-emission-cars-and-vans/cop26-declaration-on-accelerating-the-transition-to-100-zero-emission-cars-and-vans>, (2023年2月1日アクセス) .
- 21) Jing Cheng, et al., “Pathways of China’s PM_{2.5} air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality,” *National Science Review* 8, no. 12 (2021) : nwab078., <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>.
- 22) Joana Monjardino, et al., “Carbon Neutrality Pathways Effects on Air Pollutant Emissions: The Portuguese Case,” *Atmosphere* 12, no. 3 (2021) : 324., <https://doi.org/10.3390/atmos12030324>.
- 23) Koushal Kumar and Bhagwati P. Pande, “Air pollution prediction with machine learning: a case study of Indian cities,” *International Journal of Environmental Science and Technology* (2022) : 1-16., <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04241-5>.
- 24) Satoshi Inomata, “New Particle Formation Promoted by OH Reactions during α -Pinene Ozonolysis,” *ACS Earth Space Chemistry* 5, no. 8 (2021) : 1929-1933., <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00142>.
- 25) Hanieh Eghdami, et al., “Influence of Ozone and Drought on Tree Growth under Field Conditions in a 22 Year Time Series,” *Forests* 13, no. 8 (2022) : 1215., <https://doi.org/10.3390/f13081215>.
- 26) Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET), “Fourth Periodic Report on the State of Acid Deposition in East Asia, Part III: Executive Summary,” https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2022/07/PR SAD4_PART3-Executive-Summary.pdf, (2023年2月1日アク

セス)。

- 27) 一般社団法人日本自動車工業会「統計・資料」<https://www.jama.or.jp/statistics/>, (2023年2月1日アクセス)。
- 28) 国土交通省「(参考) 新車排出ガス規制の経緯 (8)」<https://www.mlit.go.jp/common/001149724.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。
- 29) 環境省「特定特殊自動車排出ガス規制法」https://www.env.go.jp/air/car/tokutei_law.html, (2023年2月1日アクセス)。
- 30) Heavy Duty Trucking, “DOE Announces SuperTruck 3 Electric-Truck Projects,” <https://www.truckinginfo.com/10155233/doe-announces-supertruck-3-electric-truck-projects>, (2023年2月1日アクセス)。
- 31) Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “U.S. Department of Energy Announces New Vehicle Technologies Funding and Future Partnerships with Battery Industry,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-announces-new-vehicle-technologies-funding-and-future>, (2023年2月1日アクセス)。
- 32) Towards zero emission road transport (2Zero), “Who we are: 2Zero,” <https://www.2zeroemission.eu/who-we-are/2zero/>, (2023年2月1日アクセス)。
- 33) ゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム, <https://zemconso.jp/>, (2023年2月1日アクセス)。
- 34) International Energy Agency (IEA), “Innovation in batteries and electricity storage: A global analysis based on patent data, September 2020,” https://iea.blob.core.windows.net/assets/77b25f20-397e-4c2f-8538-741734f6c5c3/battery_study_en.pdf, (2023年2月1日アクセス)。
- 35) EV-volumes.com, <https://www.ev-volumes.com/>, (2023年2月1日アクセス)。
- 36) Daimler Truck AG, “IAA Transportation 2022: Daimler Truck unveils battery-electric eActros LongHaul truck and expands e-mobility portfolio,” <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/en/instance/ko.xhtml?oid=52032525&ls=L2VuL2luc3RhbmNlL2tvLnhodG1sP29pZD00ODM2MjU4>, (2023年2月1日アクセス)。
- 37) Volvo Trucks, “Electric trucks,” <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/alternative-fuels/electric-trucks.html>, (2023年2月1日アクセス)。
- 38) International Energy Agency (IEA), “Global Supply Chains of EV Batteries,” <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e-867e751c8dda/GlobalSupplyChainsOfEVBatteries.pdf>, (2023年2月1日アクセス)。