

2.13 燃焼

（1）研究開発領域の定義

燃焼に関する科学、技術、研究開発を記述する。エンジン燃焼、ガスタービン燃焼、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼などを対象とする。エンジン燃焼に関しては低排出ガス化と高効率化の同時実現に向けて研究開発が進められている自動車エンジンにおける周辺機器開発や制御技術も含めた燃焼技術も含まれる。

（2）キーワード

エンジン、工業炉、熱効率、火災、着火・消炎、化学反応、NO_x、スス・PM（Particulate Matter）、バイオ燃料、水素、アンモニア、微粉炭、ゼロ CO₂

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

燃焼技術は、動力・発電・熱需要の大部分を賄っている。ベース電源のエネルギー供給源としての利用だけでなく、短時間に出力を要する機器として代表される自動車・船舶・航空機の動力による人・物の輸送やあらゆる工業製品の製造工程に使われており、経済活動に必要な不可欠な基盤技術である。一方で、燃焼機器は CO₂ の主な排出源であり、エネルギー機器としての高効率化¹⁾や CO₂ 排出量削減に向けた取り組みが喫緊の課題である。特に、自動車用パワーtrainは電動化の方向に大きく変化している一方、2040年でもエンジンが搭載された自動車は70%を越え、かつ自動車販売台数は増加すると予想されており、自動車のエネルギー消費量、CO₂ 排出量、排出ガスのさらなる大幅な低減のため、究極の熱効率の追求やクリーンな排出ガスの燃焼コンセプト開発が大きな方向である。また、燃焼は化学反応と熱流体が連成する極めて複雑なマルチスケール・マルチフィジックス現象であり、最も現象解明やモデル化が困難な領域のひとつとして考えられる。

[研究開発の動向]

COP21で採択された「パリ協定」に基づき、各国は温室効果ガス排出量の大幅な削減に向けて具体的な行動を求められている。燃焼由来の CO₂ は温室効果ガス排出量の大部分を占めるため、この削減が喫緊の課題である。このため、再生可能エネルギー由来の電気エネルギーの利用を想定した燃焼機器の電化が短期的には進められてきた。しかしながら、再生可能エネルギーの導入が進むにつれて、再生可能エネルギーは時間的・空間的な偏在性が高い、電気エネルギーは高密度・長期間貯蔵が困難、といった特徴が改めて認識され、単なる燃焼機器の電化推進では経済活動と整合させつつ2°C目標を達成することは困難との認識が浸透しつつある。すなわち、単なるエネルギー利用工程の電化でなく、燃焼機器の有する高い出力密度と負荷変動追従性を活用し、経済活動と整合させつつエネルギー製造・貯蔵・輸送・利用の全工程からの CO₂ 排出量削減を目指すことが求められている。

この観点において、燃焼領域の研究開発動向は大きく二つのトレンドがみられる。一つは、化石燃料を燃料とする燃焼機器のさらなる高効率化である。化石燃料はその製造・貯蔵・輸送における発熱量当たりの CO₂ 排出量は非常に小さいことから、燃焼利用時における熱効率向上が CO₂ 排出量削減に直結する。我が国の燃焼機器の熱効率は世界トップクラスにあり、最

新の自動車エンジンは熱効率 40% 超²⁾、天然ガス焼き 1500°Cコンバインドサイクルは熱効率 60% 超・出力 98 万 kW³⁾、空気吹き石炭ガス化炉 1200°C級コンバインドサイクル（IGCC、実証試験）は熱効率 40% 超・出力 25 万 kW³⁾ であり、効率と規模の両面でエネルギー利用を牽引している。また、石炭は他の燃料に比べて単位発熱量当たりの CO₂ 排出量が大きく、温暖化防止の観点に対するデメリットを持つが、賦存量が豊富かつ安価で比較的価格変動が少ないことから、特にアジア地域を中心に今後も需要は増加すると予想されている⁴⁾。SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾ では、アンモニアを燃料として直接利用する方法の一つとして、微粉炭燃焼ボイラへ導入し、微粉炭とアンモニアを混焼させる検討を行っており、760 kWth 石炭燃焼試験炉を用いた混焼試験、10 MWth 試験炉を用いた混焼試験に加え、発電用実機ボイラを用いた実証試験も実施されている。さらに、自動車エンジンの熱効率 50% を目標とした SIP「革新的燃焼技術」⁶⁾ や 1700°C級ガスタービンの研究開発⁵⁾ が進められている。「革新的燃焼技術」では、自動車用エンジンに対して産学官の連携を基盤に既存燃料に対する燃焼技術、制御技術の改善が進められており、燃料の希薄化や熱発生制御など、燃焼条件による熱効率の向上が図られている⁶⁾。エンジンの究極の熱効率として、乗用車用ガソリンエンジンとディーゼルエンジンでは最大正味熱効率 50% を、商用車用ディーゼルエンジンでは 55% が目標とされている。現在の熱効率達成レベルは、乗用車用ガソリンエンジンで 47.2%、乗用車用ディーゼルエンジンで 48.6% であるが⁷⁾、2018 年度中にそれぞれ 50% 必達を目指して研究開発が行われている。

昨今の乗用車用ガソリンエンジンでは、EGR を活用した過給直噴をベースに希薄燃焼方式（HCCI 含む）や高圧縮比化がトレンドとなっているが、⁸⁾ ノッキングや燃焼制御という大きな課題があり、それらの対策の研究開発が主流と言える。また、熱効率向上、排出ガス低減、ノック抑制の両立の観点からガソリン直噴の燃料噴射圧は、今後も高圧化していく方向である。

乗用車用ディーゼルエンジンでは、NO_x や機械損失の観点から低圧縮比（ $\epsilon = 14 \sim 16$ ）化の方向であったが、最近では前述の課題を解決しつつ熱効率向上を狙い少し高めな適度な圧縮比（ $\epsilon = 16 \sim 18$ ）で PCCI 燃焼コンセプトをベースに、排出ガス低減を維持しつつ燃焼時の冷却損失低減が研究開発のトレンドである。そのポイントは燃料噴射系であり、可変噴射率制御⁹⁾、近接多段噴射制御、燃料噴射圧の高圧化（200 → 300MPa）¹⁰⁾ の方向である。商用車用ディーゼルエンジンでは、乗用車に比べ常用エンジン回転数が低いこともあり、高めの圧縮比（ $\epsilon = 18 \sim 20$ ）の過給直噴をベースに、やはり燃焼時の冷却損失低減が研究開発のトレンド¹¹⁾ と言える。

排出ガス低減の追求に関しては、乗用車用ガソリンエンジンでは、冷間始動時の三元触媒の早期活性化が課題であり、冷間燃焼の安定化、遅角燃料噴射による膨張行程での燃焼利用、排気系に空気を噴射する三元触媒早期暖機、冷間始動時のみヒータで触媒を加熱する EHC¹²⁾ などが検討されている。また、主に欧州では、ガソリンスートをトラップし燃焼させる低圧損な GPF¹³⁾ の研究開発もトレンドである。乗用車ディーゼルエンジンの排気クリーン化では、エンジン 1 サイクル間に複数回（3 ～ 7 回）の燃料噴射を最適制御し、NO_x、スート、燃焼音、冷却損失を同時低減することはベース技術であり、後処理では、酸化触媒＋尿素水添加 SCR 触媒＋DPF の組合せが一般的である。

一方、欧米諸国においても同様に内燃機関の燃焼技術、計測技術、代替燃料の利用に対する研究開発やすすなどの環境負荷物質の排出低減を目指した研究開発、新燃焼法、新燃料を対象に研究の推進が求められており例えば¹⁴⁾、ドイツ圏の内燃機関研究コンソーシアム FVV¹⁵⁾ が

60年以上の歴史の中で、ゼロ CO₂ を目指してさらに将来の燃焼研究に力を注いでいる。また、熱効率向上に取り組んでいるものの日本のレベルを超えていないが、自動車の走りにつながるエンジンの動力性能向上にも力を入れている。そのため、エンジンは、過給直噴をベースとし、ダウンサイジングからライトサイジング（適正なトルク/出力）がトレンドとなっている。

二つ目のトレンドとして、代替燃料あるいはカーボンフリー燃料の燃焼利用が挙げられる。カーボンフリー燃料として、CCS（二酸化炭素回収貯留）により炭素成分を除去した燃料（天然ガスを原料に炭素成分を地下貯留した水素など）や再生可能エネルギー由来の燃料（バイオ燃料等）が挙げられる。水素供給が可能なパイプラインが整っており、広大な国土により豊富なバイオ資源が見込める海外において、それらの燃焼利用に関する研究開発が特に盛んである。燃焼機器は燃料の燃焼特性に厳密に整合させることで高効率化を実現しているため、同時に各種燃料の燃焼特性を調べる基礎研究も盛んである。我が国では、「水素専焼ガスタービン開発」プロジェクト¹⁶⁾や貯蔵性・輸送性に優れたアンモニアに着目した研究開発 SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾が進められ、世界に先駆けてアンモニア専焼によるガスタービンおよび工業炉の開発に成功した。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

- 超希薄燃焼技術：SIP「革新的燃焼技術」⁶⁾で進められている研究開発。通常は火炎が形成されないような超希薄条件（空気過剰率で2以上）における燃焼を実現することで、比熱比の向上と低温燃焼により、熱効率50%越えを目指している。超希薄条件における点火・火炎伝播・ノッキング等の素過程の解明およびモデル化による基礎研究と、エンジン試験における計測・実証による応用研究が進んでいる。
- 圧縮自着火（HCCI）燃焼：超希薄燃焼ガソリンエンジンとして公表されたマツダのSKYACTIV-Xは、火花点火時期で自着火制御するエンジンである¹⁷⁾。この燃焼コンセプトを実現するために量産新技術として、筒内圧センサーや80MPaの高圧ガソリン燃料噴射弁を採用している。全域でのHCCIは実現できていないが、量産レベルでの技術進展が大きい。他に、海外でもSpark assisted HCCIの報告がある。
- ノック抑制技術：0次元詳細自着火反応計算により、ガソリンエンジンのノック抑制の可能性が示唆されている。冷炎直前のパルス状の圧縮は、冷炎後のエンドガス中の体積変化率とH₂O₂を抑制し、着火遅れ時間を大きく遅延させることを明確にした¹⁸⁾。また、副室付点火プラグ（Pre-chamber Spark Plug）からの強力な火炎噴射によって高圧縮比の燃焼室全体の燃焼を速やかに終了させることでノック抑制を図る技術が開発されている。副室のみのPassive Typeと副室に燃料噴射弁を設けたActive Typeが研究され、高圧縮比化によりそれらプラグでの冷却損失を上回る大きな熱効率向上が得られる。2018年ルマン24で優勝したトヨタのエンジンにも採用されている¹⁹⁾。
- 自動車用e-fuel研究：欧州FVVの研究テーマとして実施されており²⁰⁾、再生可能エネルギー由来の電気を用いて、大気中や工場の排出ガスからCO₂を濃縮/分離し、逆水性シフト反応でCOに、水の電気分解によってH₂を生成して、両者からFT法で hidroカーボン燃料を合成する。これらの合成燃料を自動車用燃料として、WtWのCO₂をゼロにしようという狙いを持つ。また、Audiはe-fuel戦略を継続していて、ドイツのGlobal

Bioenergies と共同で初めて 60L の e-gasoline (C_8H_{18}) の生産に成功し、エンジンベンチで試験中である²¹⁾。

- アンモニア燃焼技術：アンモニアは再生可能エネルギーで製造可能で、エネルギーキャリアとして貯蔵性・輸送性に優れることから、島国である我が国の将来エネルギーとして重要である。アンモニアはその反応性の低さから燃焼利用は難しいと考えられていたが、アンモニア燃焼特性の解明と燃焼器開発により、SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾においてアンモニア専焼によるガスタービンおよび工業炉の開発に成功した。アンモニアが新たな燃焼用燃料と認知され、各国で多くのアンモニア燃焼研究が追従するきっかけとなっている。
- 微粉炭燃焼技術：前述の実証試験に加え、微粉炭燃焼の数値シミュレーションに関する技術開発が国内外で進められており、最近の新しい流れとしては、乱流の計算において高い計算精度と低い計算コストの両立を図るラージ・エディ・シミュレーション (LES) の微粉炭燃焼場への適用、詳細化学反応を低計算コストで実施できるフラームレットモデルを微粉炭燃焼に適用する試み²²⁻²⁴⁾、微粉炭燃焼数値シミュレーション用のすす生成モデル開発^{25,26)}がある。また、アンモニアと微粉炭の混焼メカニズムを解明する基礎的な研究^{27,28)}も実施されており、実用化に向けた今後の発展が期待される。これらの技術開発により、低品位炭やバイオマス燃料等を実機ボイラに導入した際の事前影響評価や、新しいボイラ・バーナの効率的な開発が可能となる。さらに、日本燃焼学会では産学連携プロジェクト「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と検証」により、微粉炭燃焼の数値シミュレーションの計算精度検証が実施され、参加企業に開発コードが提供されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

<日本>

- SIP 革新的燃焼技術⁶⁾：5年計画でガソリン/ディーゼルエンジン共に最大正味熱効率 50%を達成すべく、前例にない強い産学官連携で推進されている。並行して連携している産の自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE)²⁹⁾の各社でもそれらの研究成果を研究開発に取り込んでいる。
- SURIAWASE2.0³⁰⁾：経済産業省に設置された「自動車産業におけるモデル利用のあり方に関する研究会」において、自動車業界全体でパワートレインを中心に協調できるすりあわせ開発や実機を用いないバーチャルシミュレーション開発 (MBD) を高度化する狙いであり、日本の OEM と部品メーカー 10 社が参画し、今後は産学官連携をさらに強化して車両運動性能モデルに拡大していく方向を模索している。
- 内燃機関産学官連携コンソーシアム³¹⁾：SIP 革新的燃焼技術の出口戦略として持続可能な内燃機関の研究体制を産業総合研究所の中に設置し、産の連合体である AICE と学の連合体で構成される。現在、機動的な体制を構築中である。
- SIP「エネルギーキャリア」⁵⁾：水素エネルギー利用社会を見据えたプロジェクトである。アンモニア直接燃焼グループと水素利用グループでは、燃焼技術を基盤とした研究開発が進められている。
- 日本燃焼学会産学連携プロジェクト「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と検証」³²⁾：企業間の非競争領域において精度検証・動作保証がなされた、

高いカスタマイズ性を有する燃焼解析のための基盤的コードの開発を目的とし、13企業、1財団法人、9大学が参加した。企業からの開発資金により大学がコード開発を行い、精度を検証した上で学会を通じて企業に完成したコードが提供された。

<米国>

- **Co-Optima³³⁾**：2030年までに自動車による石油の消費量を30%削減することを目標に、アメリカの国立研究所9カ所が中心となって進めている。新エンジンとバイオ由来新燃料の両方の開発を進めていることが特徴である。我が国のSIP「革新的燃焼技術」では既存燃料を対象に研究開発を進めていることから、新燃料の研究開発に関する動向は特に注意が必要である。
- **Five Super Truck II projects³⁴⁾**：エネルギー省（DOE）主導で、トラックの車両走行燃費を2009年のトップランナーに対し100%以上向上させ、最大正味熱効率も55%を狙うというものである。予算は年間800万ドル以上で、2016～2017年の5プロジェクトトータル予算は、4000万ドルと言われている。

<EU>

- **Horizon 2020**：EU最大規模の研究開発予算を持ち、省エネに関するテーマの中に、運輸（飛行機、自動車、船舶）のエンジン燃焼に関連する小テーマがある。多くのテーマにおいて研究者ネットワークを支援する形をとっており、研究者間の交流が進んでいる。SIP「革新的燃焼技術」を参考にしたとみられるプロジェクト（EAGLE³⁵⁾が進んでおり、追い上げが顕著である。
- **FVV³⁶⁾**：FVVは、ドイツを主体とする歴史ある自動車用内燃機関の研究団体であり、日本のAICEの手本となった。会員数は、自動車メーカー、技術コンサルタント会社、部品メーカー等200社を越え、今なおアクティブかつ先んじて内燃機関関連の多くのプロジェクトを起動/完了し、それら多くの成果を会員各社が製品開発に生かしている。日系企業もトヨタ、ホンダ、日産、いすゞが会員となっている。

<中国>

- **中国製造³⁷⁾**：中国が世界の製造強国のトップになるろうという33年間の超巨大国家プロジェクトであり、3ステップで構成されている。重要な10大産業が挙げられていてそれぞれ高い目標を設置している。その一つに「省エネルギー・新エネルギー自動車」産業があり、EV化を中心に電動化+内燃機関でエネルギー消費量と排出ガス低減に取り組んでいる。
- **National Key Research and Development Plan of China（中国）**：生態系の復元と保護を旗印に掲げた2016年7月から2020年12月までの中国政府による研究開発計画で、このプロジェクトから燃焼関連の研究にも潤沢な資金が提供されている。

(5) 科学技術的課題

- **燃焼ダイナミクスの解明とモデル化**：燃焼条件がより燃料希薄、高圧となることによって生じる不安定現象であるノッキングや燃焼振動は実質的に燃焼機器の熱効率向上や運転範囲を律速するため、その発生メカニズムを解明し、予測・回避する必要がある。しかしながら、こうした非常燃焼挙動は熱流体・化学反応・圧力波など、複数の現象が連成する極めて複雑な現象であるため、詳細な現象解明とモデル化には先進計測・数値計算技術の適用が必要不可欠である。高いエネルギー密度と負荷変動追従性を有する燃焼機器の特

徴を生かすために、今後は定常運転を想定した定常境界条件における非定常燃焼挙動から、非定常運転を想定した非定常境界条件における非定常燃焼挙動へと、研究対象の条件がさらに複雑化すると考えられる。さらに、すす生成モデル、微粒化モデルなどを組み込んだ数値解析やプラズマ支援点火 (Nano second Repetitively Pulsed Discharge; NRPD, Laser Ignition, Dielectric Barrier Discharge; DBD) などの新点火手法の構築およびそのモデル化が求められている。

- 燃料多様化と詳細化学反応機構の構築：アンモニアをはじめ、従来は燃料として考えられてこなかった化学物質が燃料として考えられるようになってきている。燃焼器の設計開発には燃料種の多様化 (バイオ液体燃料, 低品質燃料を含む) に伴う基礎燃焼特性 (燃焼速度, 着火遅れ, 燃焼排出物生成特性) の把握が重要であるだけでなく、燃焼反応を正確に予測可能な詳細化学反応機構の構築が必要不可欠である。特に、新燃料は既存の反応機構構築や燃焼特性計測の基盤となる前提 (グループ則、薄い火炎帯等) が成立しないことがあるため、新たな学術基盤構築が求められる。
- 数値解析の計算負荷削減：数百化学種・数千素反応からなる詳細反応機構を現実的な計算リソースで計算ができるように、妥当な計算精度を実現する簡略化反応機構の構築、反応性流体に特化した時空間の乱流フィルタリング、燃焼ダイナミクスの簡易モデル構築等に関する研究が必要である。具体例としては、SIP 革新的燃焼技術で構築された3Dエンジン燃焼モデル HINOCA は精度向上や異なる燃焼コンセプトへの対応も可能にし、広く自動車産業界で活用できるMBD ツールを目指している。究極的には、デジタルツインやモデルベース燃焼制御を視野に入れ、リアルタイム～数秒程度の計算時間を目指した超コンパクトモデル・計算法の開発が必要である。また、各主モデルを、前述の新燃料に対応させていく必要もある。
- 固体燃料粒子反応数値シミュレーション技術開発：前述のように、微粉炭燃焼を対象として比較的 low コストで詳細化学反応機構を取り扱うことが可能なフレームレットモデルの開発が行われているが、肝心の微粉炭粒子から放出される揮発分の詳細化学反応機構は未だ開発されておらず、揮発分の成分として低級な炭化水素成分を仮定し、その化学反応機構を代用しているに過ぎない。したがって、今後、揮発分の化学反応機構構築に資する実験データ取得が必要となる。
- エンジン燃焼技術の進化：今後のガソリンエンジン燃焼において、熱効率を向上するためにはノッキング現象の化学的かつ物理的完全解明と、その抑制や制御技術の構築が必須であり、このノックフリー燃焼コンセプトが産学連携の1つの大きなテーマである。また、圧縮自着火燃焼では、その制御技術が大きな課題で、化学反応、温度や EGR 分布などの広範囲の制御技術がカギとなる。また、市販化踏まえた新燃料探索も重要である。さらに、ディーゼルエンジン燃焼において、さまざまな噴霧燃焼条件でのスート生成機構の明確化と、超低 NO_x との両立が出来るスートの大幅な低減技術の構築が重要であり、このスートフリー (EGR レス) 燃焼が1つの大きなテーマと考えられる。また、EGR 系や燃焼室のデポジットも永年の課題であり、完全に解決できていない。
- AI 技術を活用した燃焼現象の予測・制御：21世紀初頭頃から、燃焼現象の予測・制御における人工知能の活用に関する研究が報告されるようになった³⁸⁾。一般的なニューラルネットワーク (NN) を用いて、燃焼振動などの燃焼状態の予測制御、微粉炭バーナへの

スラグ付着検知、バイオマスボイラーの出力予測、ディーゼルエンジンのシリンダ内圧力に基づく有害物質の排気量予測等の研究が実施されてきた。近年では、畳み込みニューラルネットワーク（CNN: Convolutional Neural Network）手法を燃焼状態の予測に適用する例が見受けられ、火炎の画像データを基にしたスワール燃焼器における燃焼振動の発生の検知や火炎画像による炉内の燃焼状態の予測などが報告されている。未だ基礎研究が主体ではあるものの、燃焼制御分野において、AIがこれまでの手法の代替となる有用な手法となる可能性を秘めている。

(6) その他の課題

地下資源がなく再生可能エネルギーも少ない日本の唯一の資源は、科学技術力に裏打ちされた産業競争力とその人材である。人材育成の観点では、現状の任期付教員制度は研究期間と研究の公表までの時間が短く短期的な視点での研究に注力する傾向となる課題点がある。また、研究に特化した研究員の雇用機会を設ける必要がある。

燃焼は、社会エネルギーシステムの重要な研究領域の1つであるので、持続的な産学官連携が望まれる。

(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	◎	→	●研究の質は世界トップレベルにあるが、研究者の層が薄い。近年、燃焼を主題とした大型研究（SIP）が措置されたため、継続的な措置により、産産学連携の一体化、研究者の層の厚みが形成されることが期待される。また、学界・産業界の融合の動きとして、京都大学・北海道大学・九州大学を主体としたCAEコンソーシアム ³⁹⁾ も注目すべき内容である。
	応用研究・開発	○	→	●現在は、実用燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベルにあり、日本の省エネ技術をけん引しているが、主な欧米のプロジェクトの様に産学共同で取り組む実証研究段階への大型プロジェクトが少ない。経済産業省+AICEや内閣府SIPプロジェクトにおいて、基礎研究の成果を実際のエンジンに応用した研究を産、学、研究機関で展開できている。また、2019年度からAICEの第2フェーズの5ヶ年計画がスタートするので、産学連携の強化が期待される。
米国	基礎研究	◎	→	●応用機器を見据えた基盤技術としての燃焼研究を行う研究機関が複数存在し、研究の質と研究者の層の厚さは依然としてトップレベルにある。大統領選挙に伴うエネルギー政策の大幅変更により、分野によっては予算獲得が難しくなっているものの、アメリカ国立科学財団（National Science Foundation, NSF ⁴⁰⁾ ）などの予算による研究やDoE等の潤沢な予算のもと、エンジン燃焼に関しても国立研究所、有力大学で基礎研究が積極的に実施されている。ECN（Engine Combustion Network）等の基礎研究に関わっている人材の豊富さと交流の多さ、および各国立研究所の所有するスーパーコンピュータや高エネルギーX線解析などが積極的に活用できる環境にある。

米国	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 実用燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベルにあり、世界的な販売力・展開力も高い。具体的な目標物（自動車、航空機）に対する政府機関（DOEなど）と財団（NSFなど）、企業からの支援を基盤とした研究が進められている。例えば、DOE 主導の SuperTruck II において、自動車用エンジンとしては非常にチャレンジングな BTE:55% のシナリオ検証が主要テーマである。また、SwRI (Southwest Research Institute) のコンソーシアムとして、ガソリン正味熱効率 45% を目指した HEDGE-IV (2017 ~ 2020)⁴¹⁾ や、ディーゼルの賞味熱効率 55% を目指した CHEDE-VII (2015 ~ 2019)⁴²⁾ が、世界中のメンバーを巻き込んで実用研究が実施されている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 国によって、燃焼研究への予算措置がされにくい、国家予算規模が小さい、などの事情があるが、EU が措置する Horizon 2020 により、多国間の研究者ネットワークが形成されており、研究の質も高いレベルにある。大学や研究機関が中心となって、エンジン燃焼に関わる様々な基礎現象解明のためのコンソーシアムが組織され、政府や企業を含め継続的に研究を行っている。石炭火力の新設は大幅に抑制されているものの、微粉炭燃焼関係の基礎研究は継続されている。 ● (英国) 再生可能エネルギー由来の燃料利用に研究開発予算が大きく偏り始めており、研究者の層の厚さに減少傾向がみられる。Cambridge 大学による噴霧燃焼研究や中国の大学と共同で、微粉炭燃焼研究が実施されている。 ● (ドイツ) 大学や研究機関が中心となって、エンジン燃焼に関わる様々な基礎現象解明のためのコンソーシアムが組織され、政府や企業を含め継続的に研究を行っている。また、DFG (ドイツ学術振興会) による基礎研究支援があり、バイオマス燃料の製造から実用まで行う The cluster of excellence という大規模なプロジェクトが実施されているほか、微粉炭燃焼の分野では数値解析用フレームレットモデル開発などが進行中である。DLR や大学による噴霧燃焼に関する基礎研究も実施されている。 ● (フランス) Paris Saclay, Centrale Suplec (EM2C)⁴⁴⁾ から、燃料噴霧の蒸発・燃焼に対する基礎研究が発表されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● フォルクスワーゲンの排ガス不正問題を契機として、自動車の電動化に関する研究開発が顕著に進んでいるが、ドイツ FVV をはじめとした技術協同組合を通じて、産学連携による燃焼の共同研究は依然として活発である。欧州委員会が取り纏める FP7 や Horizon2020 といった短期集中型+テーマを絞り込んだ産学プロジェクトが常に多数並行して進み、活発な活動がされている。 ● (英国) シーメンスとカーディフ大学の共同研究が中心となり、アンモニア燃焼に関する顕著な追い上げがみられる。 ● (ドイツ) FVV による内燃機関研究コンソーシアムが莫大な予算で継続されていて、60 年以上の歴史を重ねている。参加団体は、ドイツ圏を中心に自動車関連企業 200 社以上と有力大学が一体となった研究を実施している。基本的に 2/3 が公的資金で 1/3 を参画企業が支援する研究体制である。昨今、電動化が叫ばれているが、内燃機関搭載車は存続し続けるので、エンジン燃焼研究への予算投入は今後も継続していくと思われるが、ゼロ CO₂ (e-fuel)、低排出ガス (Regulation)、Controls、Sensors の研究テーマが中心になっていく模様⁴³⁾ である。また、DLR などの研究機関が液体燃焼に対する基礎研究から応用研究までを牽引している。 ● (フランス) IFPen, ONERA などの研究機関が液体燃焼に対する基礎研究から応用研究 (IFPen: 往復式内燃機関), (ONERA: 宇宙機) までを牽引している。
中国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 燃焼への大型予算が措置されており、燃焼を主題とした State Key Laboratory 認定が複数ある。欧米から帰国した研究者が顕著な業績を出しており、全体をけん引している。National Science Foundation of China などからの予算を元に、特に国家重点大学と認定されたトップレベルの大学 (清華大学⁴⁶⁾) などで研究員の数が増加し、研究レベルが向上している。また、上海交通大学などの大学からも液体燃料の微粒化、噴霧燃焼関係の研究発表がなされている。国際的な共同研究の動きも大きく、液滴燃焼や代替燃料の燃焼研究も行われている。微粉炭燃焼の分野では、潤沢な研究資金を背景に、世界の論文発表件数の半分以上を中国からの発表が占めている。

中国	応用研究・開発	○	↗	● 実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であるが、研究開発は旺盛に進められている。日米欧の自動車メーカーとの合弁会社から技術移転がなされはじめており、研究レベルは確実に向上している。中国製造 2025 (2016～2049) ⁴⁷⁾ において重要な 10 大産業が挙げられ、それぞれ高い目標を設置している。その一つに「省エネルギー・新エネルギー自動車」産業があり、EV化を中心に電動化+内燃機関でエネルギー消費量と排出ガス低減に取り組んでいる。超臨界のボイラ等も自国メーカーで建設できるようになっており、発展が著しい。
韓国	基礎研究	△	→	● 研究の質は高いレベルにあるが、燃焼コミュニティの規模が小さいため、特定分野 (例えば化学反応) では顕著な成果が見られず、全体としてもアジアの中では中国ほどの発表数は認められない。自動車産業では、Korea auto-oil プログラムが FY2017 まで実施予定で着実に進んでいるが、エンジン燃焼に関する基礎研究の新規の国家プロジェクトはないようである。微粉炭燃焼研究は引き続き活発に行われている。
	応用研究・開発	△	→	● 実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であり、特筆すべき大型プロジェクトもない。液体燃料を取り扱う実用燃焼器に対する研究も、ここ数年大きな変化はない。自動車産業については、環境府を中心に実用化事業 (製作車、レロフィット、計測技術) が進行中 ⁴⁷⁾ である。事業期間は phase I が 2011.5 - 2016.4, Phase II が 2016.5-2021.4 で、毎年 100 億ウォン/年の予算である。ディーゼルエンジンの開発は全体的に遅れている。

(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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価。

◎: 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」……近年 (ここ 1～2 年) の傾向として、研究開発水準がどう変化しているかの評価。

↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) U.S. Energy Information Administration (EIA), “International Energy Outlook 2017.”
- 2) 自動車技術会『自動車技術』71 巻 8 号 (2017)
- 3) 正田淳一郎「発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望」『日本機械学会誌』119 巻 1173 号:434-437. (2016)
- 4) 日本エネルギー経済研究所「IEEJ アウトルック 2018 -2050 年に向けた展望と課題 -」(2017 年 10 月) .
- 5) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「エネルギーキャリア」, <http://www.jst.go.jp/sip/k04.html> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 6) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「革新的燃焼技術」, <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 7) 杉山雅則「第 4 回 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 1 期記者勉強会」 (2018 年 5 月 14 日) <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sippress.html> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .

- 8) 古野志健男「自動車用内燃機関は消えていくのか? - SIP 革新燃焼からの提案と方向性 -」
『JSME 関西支部 第 93 期定時総会・講演会講演論文集』No.184-1: 107-111, 2018
- 9) 相澤哲哉 他「逆デルタ噴射ディーゼル噴霧火炎の紫外自発光・紫外吸収・輝炎 3 種同時
高速度撮影」『自動車技術会 2018 年春季大会 講演予稿集』No.61-18: 1, 2018
- 10) F. Steinparzer, *et al.*, "The New 3- and 4-Cylinder Diesel Engines from the BMW
Group - NEXT Generation Modular," 26th Aachen colloquium, 111-130, 2017
- 11) 渡辺裕樹 他「ディーゼルエンジンの筒内火炎挙動解析に基づく熱発生率制御と排気特性
の改善」『自動車技術会論文集』48 巻 2 号: 233-239, 2017
- 12) R. Bruck *et al.*, "Innovative Catalyst Substrate Components for Future Passenger Car
Diesel Aftertreatment," 26th Aachen colloquium, 1075-1096, 2017
- 13) G. Rosel *et al.*, "System Approach for a Vehicle with Gasoline Direct Injection and
Particulate Filter for RDE," 39th International Vienna Motor Symposium, 2018
- 14) Lyle M. Pickett and Scott A. Skeen, "Spray Combustion Cross-Cut Engine Research,"
FY 2018 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 19 June 2018,
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/06/f52/acs005_Pickett_2018_o.pdf (2019
年 2 月 27 日アクセス) .
- 15) 草鹿仁「ドイツ FVV にみる産学官連携」『ENGINE REVIEW』Vol.4, No.2 (2014).
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「水素専焼タービンの先導的研究開発に着手」,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100596.html (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 17) マツダ「SKYACTIVE TECHNOLOGY」,
<http://www.mazda.com/ja/innovation/technology/skyactiv/> (2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 18) 三好明「低温酸化反応の怪」『第 55 回燃焼シンポジウム講演論文集』, 428-429, 2017
- 19) 清水直茂「トヨタ・ホンダも照準、超希薄燃焼の有力技術プレチャンバー: 欧州エンジニ
アリング大手 IAV が“激安”技術を提案」『日経 xTECH』,
<https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00001/00671/>(2019 年 2 月 27 日アクセス) .
- 20) FVV, *Renewables in Transport 2050*, 65, 2016
- 21) Audi Japan Press Center, 「アウディ、e-fuel テクノロジーでさらなる進化: 新しい合成
燃料 "e-benzin" (e-gasoline) のテストを実施中」,
<https://www.audi-press.jp/press-releases/2018/b7rqm000000lqor.html> (2019 年 2 月
27 日アクセス) .
- 22) Junya Watanabe *et al.*, "Large-eddy Simulation of Pulverized Coal Combustion Using
Flamelet Model," *Proceedings of the Combustion Institute* 36, no. 2: 2155-2163, 2017
- 23) Xu Wen *et al.*, "LES of Pulverized Coal Combustion with a Multi-regime Flamelet
Model," *Fuel* 188: 661-671, 2017
- 24) M. Rieth *et al.*, "Flamelet LES Modeling of Coal Combustion with Detailed
Devolatilization by Directly Coupled CPD," *Proceedings of the Combustion Institute* 36, no.
2: 2181-2189, 2017
- 25) H. Takahashi *et al.*, "Prediction of Soot Formation Characteristics in a Pulverized-coal
Combustion Field by Large Eddy Simulations with the TDP Model," *Proceedings of the
Combustion Institute* 37, no. 3: 2883-891, 2019

- 26) Kailong Xu *et al.*, "Predictions of Soot Formation and Its Effect on the Flame Temperature of a Pulverized Coal-air Turbulent Jet," *Fuel* 194: 297-305, 2017
- 27) 大阪大学「世界初！アンモニアと混焼する微粉炭の詳細燃焼挙動を明らかに ～再生可能エネルギーの利用拡大につながる新たな知見～」,
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20161031/index.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 28) 科学技術振興機構 さきがけ,
<https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112064/15655993.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 29) 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）,
<http://www.aice.or.jp/index.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 30) 経済産業省,
<http://www.meti.go.jp/press/2018/04/20180404003/20180404003.html>（2019年2月27日アクセス）.
- 31) 産業総合研究所「内燃機関産学官連携コンソーシアム」,
<https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/ICEC/>（2019年2月27日アクセス）.
- 32) 日本燃焼学会燃焼解析プラットフォーム研究開発プロジェクトチーム「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と検証：進捗報告（第1報）」,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcombsj/59/187/59_61/_article/-char/ja/（2019年2月27日アクセス）.
- 33) U.S. DOE, "Co-Optimization of Fuels & Engines,"
<https://www.energy.gov/eere/bioenergy/co-optimization-fuels-engines>（2019年2月27日アクセス）.
- 34) U.S. DOE, "PACCAR Joins Energy Department SuperTruck II Initiative,"
<https://www.energy.gov/eere/articles/paccar-joins-energy-department-supertruck-ii-initiative>（2019年2月27日アクセス）.
- 35) European Commission (EC), "EAGLE,"
<https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/green-vehicles/eagle>（2019年2月27日アクセス）.
- 36) FVV, <https://www.fvv-net.de/en/>（2019年2月27日アクセス）.
- 37) みずほ総合研究所「2025年の製造強国入りを目指す中国の製造業振興策」『みずほレポート2016年6月27日』,
<https://www.mizuho-ri.co.jp/publication/research/pdf/report/report16-0627.pdf>（2019年2月27日アクセス）.
- 38) Soteris A Kalogirou, "Artificial Intelligence for the Modeling and Control of Combustion Processes: A Review," *Progress in Energy and Combustion Science* 29, no. 6:515-66, 2003
- 39) 理化学研究所「燃焼システム用次世代 CAE コンソーシアムを設立 -産官学連携で次世代の燃焼システムものづくりのフレームワーク構築-」,
http://www.riken.jp/pr/topics/2018/20180521_1/（2019年2月27日アクセス）.
- 40) National Science Foundation (NSF), "CBET proposal submission information,"

- https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=245721&org=CBET (2019年2月27日アクセス) .
- 41) Convergent Science,
<https://convergecf.com/press/join-hedge-iv-consortium> (2019年2月27日アクセス) .
- 42) Southwest Research Institute (SwRI),
<https://www.swri.org/consortia/clean-high-efficiency-diesel-engine-vii-chede-vii> (2019年2月27日アクセス) .
- 43) FVV,
<http://www.fvv-net.de/en/fvv4/mission-and-vision/index.html> (2018年10月27日アクセス) .
- 44) Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, “Macroscopic Molecular Energy and Combustion Laboratory (EM2C) CNRS UPR 288,”
<http://www.centralesupelec.fr/en/macroscopic-molecular-energy-and-combustion-laboratory-em2c-cnrs-upr-288> (2019年2月27日アクセス) .
- 45) King Abdular University of Science and Technology (KAUST), Clean Combustion Research Center,
<https://ccrc.kaust.edu.sa/Pages/Home.aspx> (2019年2月27日アクセス) .
- 46) 清華大学, “Center of Combustion Energy,”
https://www.tsinghua.edu.cn/publish/teen/8273/2013/20130417103356200585813/20130417103356200585813_.html (2019年2月27日アクセス) .
- 47) Center for Environmentally Friendly Vehicle (CEFV),
https://www.cefv.re.kr/index.php/?mid=sub02_01_01 (2019年2月27日アクセス) .

2.14 トライボロジー

(1) 研究開発領域の定義

トライボロジーは相対運動をしながら互いに影響を及ぼしあう2つの表面に起こるすべての現象を対象とする科学技術で、潤滑、摩擦、摩耗などを取り扱う分野である。ここでは、省エネルギー的観点から摩擦メカニズム、接触表面状態、潤滑剤の影響などの基礎的トライボロジー研究や、環境エネルギー機器・輸送機器分野への応用・実用化を見据えた研究開発の動向を対象とする。

(2) キーワード

摩擦、摩耗、焼付き、表面損傷、境界潤滑、流体潤滑、添加剤、潤滑油、ナノ計測、コーティング技術

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

トライボロジーはギリシャ語の $\tau\rho\iota\beta\omicron\sigma$ (tribos: 摩擦する) を基にした造語である。摩擦低減技術はあらゆる産業分野、生活環境における効率的エネルギー活用に不可欠であり、低炭素社会実現の観点からも極めて重要な技術である。トライボロジーの用語は、1966年に英国の H. P. Jost による「Lubrication (Tribology) - A Report on the Present Position and Industry's Needs」で初めて使用され、その中で、潤滑改善による経済効果が英国においては年間5億ポンド(当時)に相当するというトライボロジーの大きな社会・経済的意義が報告されている。その後、同様な推算が各国でなされており、我が国でもトライボロジーの経済効果として、1994年には13.5兆円が見込まれ¹⁾、最近の推算例でも2002年度で8.6兆円、対GDP比1.7%という結果が出されている²⁾。

2015年12月のCOP21パリ協定の合意を受け、世界各国で更なるCO₂削減努力が必要であるが、今後世界的に増加が見込まれる自動車分野におけるエネルギーの効率的利用も非常に重要となる。現在の自動車は燃料の約1/3はエンジンや変速等、タイヤなどにおける摩擦損失によって浪費されており、最新のトライボロジー技術を適用することで5～10年の短期レンジで18%、15～25年の長期レンジでは61%もの削減が可能という報告がある³⁾。これらを世界全体でのCO₂排出量として換算すれば、それぞれ2億9000万トンと9億6000万トンの削減に上り、我が国の年間CO₂総排出量に匹敵する。このようにトライボロジーは、既存技術の改良や改善だけを見ても波及効果と即効性の高い工学技術であり、地球環境問題解決への貢献も多大と期待される。一方で、摩擦は固体表面・潤滑油など多くの要素が界面において複雑に絡む動的特性のために、その理解は十分には進んでおらず、従来の開発は主に経験的な蓄積に基づくものである。このため、現在の省エネルギーにおける摩擦低減技術の必要性ならびに課題の大きさからは、より合理的な設計論による開発の加速が重要となる。

[研究開発の動向]

摩擦・潤滑の利用や研究の基礎は、産業革命前後(1750年から1900年頃)の研究に負うところが多く、流体潤滑理論の構築、ストライベック曲線の提案、境界潤滑の用語の導入など、現在も使われている概念や理論体系、経験式が提案されている⁴⁾。さらに20世紀の半ばには微

視的に摩擦現象を理解しようとする試みが見られるようになり、当時提唱された真実接触の概念に基づく摩擦の凝着理論が英国ケンブリッジ大学のパウデンとテーバーによって確立され⁵⁾、その後、同じく英国で1966年に誕生した”トライボロジー”に引き継がれる形で、現代的な摩擦や潤滑に関する研究と、その応用開発につながったという系譜にある。

トライボロジーの先端研究は、米ソ冷戦時代の宇宙開発競争にしのぎを削るNASA（米国航空宇宙局）を中心とした米国に舞台を移し、さらにモータリゼーションの到来を背景として自動車関連のトライボロジーを軸に、ドイツ、フランス、日本などへと発展の場を広げていった。一方、磁気記録装置の性能向上が急務となったIT分野では、ハードディスク装置の開発に最先端のトライボロジー技術が次々と導入されることになった。米国IBMなどを先導役とした技術開発競争の最中、微細加工技術の進歩と相まって、“マイクロトライボロジー”が新たなテーマとして取り上げられるようになった。これは今日、高度な表面分析技術と計算科学を融合した“ナノトライボロジー”へと発展し、最先端研究の一翼を担っている。医療分野では、英国リーズ大学を中心とするグループが、トライボロジーの視点から人工関節の開発に精力的に取り組む、性能の向上に大きく寄与するとともに、“バイオトライボロジー”という医工連携の新しい領域を開拓した。ほかにも、こうした動向と切り離すことのできない弾性流体潤滑（EHL）理論の進展、各種機械要素や潤滑剤、新規コーティング材料などの発明や開発と普及を通じ、トライボロジーはそれぞれの時代の産業技術の隆盛と深く関わりながら発展してきた。

以上のような変遷を踏まえ、2000年以降2010年代半ばまでのトライボロジー領域における研究開発の動向については、ナノテクノロジーに代表される表面・界面の観察評価法の進歩、DLC（ダイヤモンドライクカーボン）膜とエステル系添加剤との組み合わせによる低摩擦現象発現、樹脂複合材料の適用による発電タービン用すべり軸受の耐摩耗性向上と摩擦損失低減の実現、最小油量で潤滑するMQL（minimal quantity lubrication）といった省資源・低排出技術の開発などを引き合いにして、「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野（2017年）」の「3.29 トライボロジー」に詳述されている⁶⁾。

こうした動向に加え、当該分野の主要な動きとして、日本トライボロジー学会の「トライボロジー・ロードマップ研究会」および「オープンイノベーションを目指した技術動向調査研究会」の活動がある。前者の研究会では、2012-2013年度の活動期間に、その成果としてトライボロジー技術俯瞰図を提示する⁷⁾とともに、当該技術俯瞰図においてまだ空白のマトリックスの技術・研究課題を埋め、それらの課題を分類整理し、分類された課題ごとに10年後の予測を行い、順次20年、50年へと可能な範囲で拡大していくことによってロードマップを作製できるようにまとめた報告書を公開している⁸⁾。この報告書では、システム・コンポーネント側からの要求に対するトップダウンからのロードマップを、自動車の省エネルギー・環境対応、鉄道、航空用エンジン、発電用ガスタービン、医療機器、宇宙機器を例にして紹介している。一方、ボトムアップからのロードマップも、転がり軸受・すべり軸受・シールのトライボロジー技術各論、材料・表面処理、潤滑剤、シミュレーション技術・摩擦摩耗試験法・加速試験法・プローブ顕微鏡による分析技術といった解析ツールなどを例にして紹介している⁹⁾。これに対して後者の研究会では、2015-2017年度の活動期間に、その成果として、初年度には「継続的な技術動向調査とロードマップへの反映」を含む4つの取り組みの必要性を中間報告し¹⁰⁾、最終的に「社会的要請とトライボロジー技術の関係」について報告書にまとめる方針である¹¹⁾。

さらに、自動車の省資源・省エネルギーに対するトライボロジー技術の貢献は、現在も研究

のターゲットとしては主流であり¹²⁾、SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) の「革新的燃焼技術 (日の丸内燃機関が地球を救う計画)」(研究期間:2014 ~ 2018 年度)においても、乗用車用内燃機関の最大熱効率を 50%に向上することを目的に、「機械摩擦損失の低減の研究」の中で以下のテーマが取り上げられている¹³⁾。

- ・低摩擦損失と耐焼き付き性及びオイル消費の低減を両立する自動車用エンジンの提案と実証 (東京都市大学)
- ・潤滑油添加剤と表面改質とのマッチングに基づく相乗効果による摩擦低減メカニズムの解明 (東京工業大学)
- ・境界・混合潤滑領域における耐荷重性能の改善 (名城大学)
- ・カーボン系硬質膜の超低摩擦及び耐焼付き性向上の指針の提案と実証 (名古屋大学)
- ・潤滑解析モデルの高度化と解析ソルバーの開発 (東海大学)
- ・境界摩擦領域での摩擦係数低減を目指すナノ計測 (東北大学)
- ・境界摩擦領域での摩擦係数低減を目指す分子動力学を用いた摩擦予測 (東北大学)
- ・表面テクスチャを基軸としたなじみ制御による低摩擦・耐焼き付きナノ界面形成技術の開発 (東北大学)
- ・自動車用内燃機関摺動面潤滑モデルの確立および新しい潤滑面設計支援解析法への展開 (九州大学)
- ・エンジン内ピストン摺動部の低摩擦・耐焼き付き及びなじみ促進を発現する初期三次元テクスチャ形状の提案と実証 (福井大学)
- ・低摩擦エンジン油をめざした添加剤技術の最適化 (香川大学)
- ・摩耗・焼付きリスクの低減 トライボシミュレータの開発 (東北大学)
- ・ポリマーモノリス材料を用いた潤滑システムの開発 (京都大学)

トライボロジーに関わる国際的な動向に目を向けると、2010 年代半ばまでの流れについては、「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野 (2017 年)」の「3.29 トライボロジー」において、第 4 回世界トライボロジー会議 (WTC IV、2009 年京都)における“Green Tribology”の提唱、2010 ~ 2015 年に総額 59 百万ユーロが投入されたトライボロジーも基幹テーマに含むオーストリアの COMET (Competence Centers for Excellent Technologies) プロジェクト、2008 年からの 5 年間に総計 9.7 百万ポンドの研究資金を集めた英国ササンプトン大学の nCATS (national Centre for Advanced Tribology at Southampton) 設立、米国 DOE (The U.S. Department of Energy) による次世代先進自動車開発への 175 百万ドルの投入 (うち 4.7 百万ドルが潤滑油関連プロジェクトへ配分) などが詳述されている⁶⁾。

そうした中、トライボロジーにおける最近の国際的な動きとしては、中国の台頭がある。同国では、清華大学と蘭州化学物理研究所がトライボロジー分野での国家重点実験室に指定され、研究資源の重点配分のもと活発な研究活動を展開しており、それが奏効した形で中国の台頭を象徴した催しが第 6 回世界トライボロジー会議 (2017 年 9 月 17-22 日、北京) である。世界トライボロジー会議 (World Tribology Congress) は、国際トライボロジー評議会 (International Tribology Council) が統轄し、開催国持ち回りで 4 年ごとに開かれるトライボロジー分野の一大イベントであり、第 1 回が 1997 年にロンドンで開催され、日本も 2009 年に京都で第 4 回を主催した。2017 年北京の第 6 回会議は、8 件の基調講演に加え、オーラルおよびポスターでのプレゼンテーションを合わせると 1000 件以上の発表を集め、過去最大級の規模で開催さ

れた。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■ 材料に関する新たな技術動向

- ・高分子ブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料ならびに生体内潤滑モデルとして世界的に学を中心として研究されている。しかし、高負荷など厳しい摺動条件では摩耗してしまい、1MPa程度の穏やかな条件のみで使用できるものと考えられていた。京都大学の辻井敬亘教授は濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功している。膨潤溶媒も水からイオン液体や潤滑油に変更した材料が作成できるようになっており、実用用途に可能性のある日本独自の展開である。また京セラは東京大学の石原一彦教授の研究成果を元に、人工股関節のポリエチレン臼蓋カップ表面に高分子ブラシコーティングを施し、体内でのポリエチレン摩耗を大幅に抑制する技術を実用化し、「アクアラ」の商品名で臨床適用が開始されている。
- ・無機コーティングに関しては、DLCは既に新しい潤滑材料として、車にも実装され始めている。無機酸化物コーティングは、酸素存在下でも安定であるという特徴があるが研究例は僅少であった。物質材料機構の土佐らは、特定の条件で調製したZnOの摩擦係数が半減することを見出しており、注目されている。
- ・低摩擦化添加剤として、吸着部位ならびに潤滑部位を有する高分子が東北大学栗原らにより設計されている。
- ・ゲルの機械における潤滑材料としての応用も始まっている。

■ 研究手法に関する新たな技術動向

- ・ナノテクノロジーの発展により開発・普及している様々な表面評価法（XPS、EDX、FTIR-ATRなど）のトライボロジー研究への適用
- ・共振ずり測定など表面力装置を利用したずり測定による潤滑油評価と低粘度化への対応
- ・機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明による低摩擦の合理的設計の研究推進
- ・基材（機械部品の材料）と潤滑油の組み合わせによる低摩擦化技術の開発

■ 摺動面アーキテクチャの概念とその具体的研究動向

- ・固体接触や潤滑油との反応により表面状態が常に変化していくことを前提に、システムの一部として摺動表面の構造や組成などを設計する概念として、摺動面アーキテクチャが重要である。そのため、マルチスケール・テクスチャリングの考え方として、表面の構造及び組成の空間分布をナノ・マイクロからマクロレベルまでの連続したスケールで俯瞰・理解した上で、階層的な役割の振付が必要になる
- ・表面損傷の進行や摩擦環境の変化に能動的に対応する自己適応（self-adaptive）する機能表面の創製として、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚などの模倣（バイオミメティックス）、また加工技術として新しい付加加工技術として注目されている3次元積層造形技術（通称3Dプリンタ）の応用などに関する研究が出てきている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■ 国内プロジェクト

- 1) SIP「革新的燃焼技術」（平成 26～30 年度）
 - ・損失低減チーム：排気エネルギーの有効利用と機械摩擦損失の低減に関する研究開発
- 2) 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）¹⁴⁾における研究開発プロジェクト
 - ・エネルギー消費量削減や CO₂ 排出量削減等が社会的に求められる状況の中で、自動車用エンジンの高効率化、低排ガス化の課題を共同で解決することを目的とした研究開発プロジェクト
- 3) 機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明（あるいは基礎研究の技術課題の適用）による低摩擦の合理的設計の研究推進を行うプロジェクト
 - ・MEXT、光・量子融合連携研究開発プログラム、「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」（平成 25 年度～29 年度）
- 4) 厚膜濃厚ブラシの実用化
 - ・JST、ACCEL 事業「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」（平成 27～31 年度）
- 5) 自動車用動力伝達技術研究組合（TRAMI）¹⁵⁾
 - ・自動車の CO₂ 排出抑制や価値の多様化に向けて、動力伝達技術の産学連携の基礎研究による学のサイエンス進展・産学人材育成を通して、日本の産業力の底上げと持続的な科学技術の発展に貢献することを目的に発足（平成 30 年度より）

■ 国外プロジェクト

- 1) COST MP1303：“Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction”
 - ・2013 年より開始されたトライボロジーに関する欧州共同研究の活動（2017 年の終了予定）
 - （COST: European Cooperation in the field of Science and Technical research）
- 2) 「ハノーバー宣言」（2017 年 3 月に日本とドイツとの間で採択）にもとづく国際共同研究の動き
 - ・当該宣言の対象として自動車エンジンの基礎研究の内容が含まれていることに基づき、それを後押しする形で、AICE と学とが連合した研究組織を公募で 2019 年度から立ち上げた。これを母体にドイツの内燃機関研究に関する産学官コンソーシアム（FVV）と国際共同研究を開始する予定であり、エンジントライボロジーもこの研究の枠組みの中で今後推進する方向である。

■ 注目すべき国外主要拠点

- 1) ミュンヘン工科大学機械要素研究所（ドイツ）¹⁶⁾
 - ・「歯車研究センター」とも呼ばれ、歯車と伝動要素の疲労寿命、効率、振動特性の信頼性の高い測定方法とツールの開発などの研究活動が、公的研究資金または産業界提供資金によって、業界と密接に協力して実施されている。
- 2) トライボロジーセンター（オーストリア）¹⁷⁾
 - ・本センターは、トライボロジーにおける新しい学際的かつ総合的な知識の創出のために設

立されたプロジェクト拠点である。スマート材料、表面およびコーティング、潤滑剤および潤滑システム、高分解能摩耗測定システム、摩擦および摩耗プロセスのシミュレーションおよびモデリングなどのトライボロジーの革新的な分野における研究が実施されている。2010年4月以降、プロジェクト Xtribology が、多くの企業や科学的パートナーの協力のもと、30以上の個別研究プロジェクトの形で10年間にわたって運用されている。Xtribologyの予算の約半分は、オーストリアの研究推進機関（オーストリア交通、技術革新省）と Niederösterreich、Wien、Vorarlberg の州から拠出されている。

3) サウサンプトン大国立先端トライボロジーセンター（英国）¹⁸⁾

・本センターは、世界中のトップ研究グループや産業界との戦略的研究パートナーシップのもと、将来の輸送およびエネルギー効率の良い機械、排出ガスおよび低保守性の再生可能エネルギーシステム制御、およびバイオテクノロジー等への展開を狙い、摩擦プロセスのセンサーや新規プローブの開発、さらに、再生可能エネルギーシステムのトライボロジー、汚れ、腐食のトライボロジーなどの実験研究、シミュレーション研究等を実施している。

4) エコール・セントラル・ド・リオンのトライボロジーラボラトリー（フランス）¹⁹⁾

・フランス国立科学研究センターの関連研究ユニットになる表面技術研究所（1992年設立）が母体。研究分野は、表面とトライボロジーの物理化学をベースに、固体と振動力学の新しいトピックスも統合し、産学連携で基礎研究と応用研究がバランスよく実施されている。近年、土木工学と構造物のダイナミクス、回転機械、振動音場の研究が強化されている。

5) 清華大学トライボロジー重点ラボ（中国）²⁰⁾

・本ラボは、百人規模で1988年11月に設立。トライボロジーとマイクロ/ナノ製造の理論と応用に関する基礎研究分野が重点推進され、摩擦、摩耗、潤滑、シーリング、表面と界面、インテリジェント機械、バイオメカニクス、マイクロ/ナノフォトニックデバイスなどもカバーする。全国主要プロジェクト、中国のハイテック研究開発プログラム、National Natural Science Foundation of China の主要および主要研究プログラム、創造的研究プログラム、国際協力プロジェクト、および企業からの委託プログラムなどが含まれる。

(5) 科学技術的課題

トライボロジー研究にとっては、摩擦・摩耗・潤滑の基礎メカニズムを理解することが、まず重要な課題である。しかし、トライボロジー現象は、真実接触部と言われる固体間に挟まれた $1 \mu\text{m}^3$ 未満の空間領域において、長くても 1ms 程度の短時間に起こる現象（温度・圧力変化、表面原子・分子構造変化、化学反応など）を捉えることが必要とされる。計測・分析技術として、極めて高度なその場観察技術（in-situ）が要求される。現在、様々な表面分析技術が開発されているが、未だに十分な時間分解能や感度を有し摩擦界面のその場観察に決定的な有用性をもたらす技術は、開発されていない。この分析・観察技術を確立することが、マルチスケール・マルチフィジクスによるトライボロジー分野シミュレーションモデル構築に役立ち、計算機シミュレーションによる数値解析技術の妥当性検証等に重要となる。

また、実用面として自動車用エンジンでは低摩擦化に向けて油の低粘度化が進む一方で、荷重や速度の条件がそれぞれ異なるエンジン要素部品を同じエンジン油で潤滑させるため、効果的な添加剤設計技術が重要となっている。また、熱効率（燃費）向上のための小型化（ダウンサイジング）・高過給化によるプレイグニッション、デポジット、燃料のシリンダ内直噴化に

よる潤滑油の燃料による希釈などが、異常燃焼と摩擦摩耗増加を引き起こす等の新たな技術課題がある。

さらに、無潤滑環境で摩擦係数が 0.01 以下となる「超潤滑」技術の開発が進んでいるが、現状では限定された材料組合せ（硬質薄膜である DLC や CNx（Carbon Nitride）の使用、相手面に触媒作用のある ZrO₂ などの利用）や環境（水素やエチレンなどのガス雰囲気や窒素ガス吹付け環境など）にて発現するレベルである。また、初期なじみにより低摩擦が実現するが、その条件は実験室的に確認されている段階であり、一般化されていない。

潤滑油添加剤による低摩擦化に関しては、MoDTC を始めとする摩擦調整剤の研究により低摩擦化が進んできているが、上述の「超潤滑」技術が無潤滑条件を前提に評価されているため、両者のシナジー効果が期待されるような研究にはなっていない。実用的な機器では、潤滑油が多く使用されており、潤滑油添加剤の有効性は高いと考えられるが、DLC 等の表面処理との組合せに関しては研究開発を継続している段階であり、「超潤滑」との組合せとなるとさらに進んだ研究が必要と考える。

中長期的に考えると、環境負荷などの観点から潤滑油の使用量を減少させる必要があると考えるが、「超潤滑」を用いて低摩擦を実現した場合に問題になるのは、摩耗寿命の評価法である。潤滑油は摩擦低減と合わせてしゅう動面を分離して摩耗を低減する役割も持つが、潤滑油の使用量を減らすと摩耗の発生が避けられなくなる。「超潤滑」の多くは硬質薄膜を用いる手法であるが、実験室的に摩耗が少ないことは確認されているものの、実験室での検証が困難な長期間（年単位～10年単位）での運転が要求される機器での摩耗評価・予測技術が確立されないと広く適用することが難しくなる。摩擦メカニズムの観点から、硬質薄膜の摩耗評価技術、摩耗低減技術、「超潤滑」の安定発現技術などが今後取り組む課題であると考えられる。

(6) その他の課題

トライボロジーが扱う対象は、原子・分子レベルでの摩擦現象から、ハードディスクのスライダヘッド、自動車の駆動部品やタイヤ、発電タービンの軸受、電気接点、人工関節、地震予知や人工衛星など、多岐にわたっている。そのため、トライボロジーが関連する学問は機械工学を本拠としながらも、物理学や化学などの基礎分野から、材料、電気、土木・建築、航空・宇宙などの工学分野、計測や分析等に関する分野、エネルギー・環境や防災に係わる応用領域、さらにはナノテクノロジー、バイオテクノロジーといった新融合領域に至るまで、非常に幅広い範囲に跨がっている。このように分野融合の科学・技術の典型であるトライボロジーであるが、世界的には大規模なトライボロジー研究拠点が各国に存在する。一方で、日本のトライボロジー研究は大学の研究室単位で実施されている場合がほとんどであり、基礎と技術課題の融合研究を推進するのに十分な体制にはない。先進的なトライボロジー研究を推進するには、多岐にわたる領域分野の研究者による異分野融合的な取り組みが必須であり、そのような取り組みが可能になるような体制の構築が求められる。

個人会員の約 2/3 が企業の所属という日本トライボロジー学会の会員構成を見ても明らかのように、トライボロジーと産業界のつながりはきわめて緊密であり、国際競争力を高めるといふ観点からも、大学や公的研究機関の研究者と民間技術者との協働による研究開発力の強化が期待される。「超潤滑」のような革新的技術の製品適用のためには、大学等で継続的に実施される基礎研究に加えて、産学共同での実用化研究が不可欠であるが、実用成果に至るまでに時

間を要する場合が多い。このため、産学連携の進展には、アカデミアにおける研究者に対する研究論文数以外の評価軸への配慮がさらに重要になると考える。

また、トライボロジー分野のような産業界においても地味な分野の研究領域については、当該分野における成果の社会的認知向上などにより、若い研究者を惹きつけなければ、世界をリードできる総合力を有する優秀な研究者が育たず、新技術を担う人材が枯渇するリスクも考えられる。現実にトライボロジー分野の研究室は、主要国立大学において減少する傾向にあり、「トライボロジー」を講義科目として開設していない理工系大学が少なからずある。高信頼性・高効率な機械を実現するための新技術開発に対する研究リソースが減少し、産業界への優秀な人材の輩出も困難になってくるおそれがある。

「超潤滑」等を含むユニークな技術の実用のためには、製造技術との連携は欠かせない。現状、自動車産業などの量産品事業では硬質薄膜を始めとする低摩擦化表面処理技術の製品適用が進んでいる。これは、小規模かつ大量の部品生産の量産効果が高いため、硬質薄膜の施工メーカーや部品への施工を実施する機械要素メーカー自身が、経済合理性に基づいた生産設備への開発を含む投資が可能であることが大きいことによる。一方、大型のインフラに関わる機械産業では単独では経済合理性が成立せず、その結果、研究成果そのものにポテンシャルがあっても実用化に結びつかない場合がある。優れた技術の産業界全体への普及による産業の競争力強化のためには、これを後押しするための製造技術開発に関する支援が行われることが求められる。

(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"> ●基礎分野の研究者の参画により、摩擦・潤滑研究の新しい展開が出ている。特に、物理、化学、材料、計測の研究者の融合研究への参画が進んでいる。（東北大学「トライボロジー融合研究拠点プロジェクト」、東京理科大学「トライボロジーセンター」等） ●トライボロジーにおける低摩擦の発現現象や焼付き及びなじみのメカニズム、カーボン系炭素膜等多くの基盤技術が大学をはじめとする研究機関で推進されている。（JST ACCEL（イノベーション創出向け研究加速プログラム）など） ●一方、高温個体潤滑剤研究などは衰退してきている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●近年の自動車の燃費向上の大きな部分が、低摩擦化技術の向上によっている。過去20年間で15%²¹⁾と燃費向上が実現している。 ●各機械要素技術（部品）の低摩擦・耐久性技術は現状でも世界トップクラスである。これらが変わらず高品質の機械システムを支えている。SIPにおける乗用車エンジンでのトライボロジー研究の推進等。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●基礎と応用研究の循環がスムーズである。バンチャーから生み出された摩擦試験機が世界標準機になっている（現在は Bruker が販売）。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●基礎と応用研究の循環がスムーズである。例えば、ハードディスクの潤滑研究をナノテクノロジーから推進した IBM の研究者が教科書²²⁾を執筆するなど、先端研究の導入へのハードルが低い。

欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 欧州全体としては、本文中にも記載したとおり数か所の拠点があり、近隣の複数国持ち回りによる国際会議やシンポジウムの開催や共同しての若手育成などを連携して進めている。産業界との連携も強い。 ● 国際会議や国際誌の発表が活発で、COSTプロジェクトなどがある。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 官民共同でイノベーション推進する傾向が近年活発になっている。政府の Innovative UK による資金助成のほか、トライボロジー分野では IMechE や IOM3 などが協力して UK Tribology という組織を立ち上げ、国内のトライボロジー拠点を連携して経済・産業界への貢献を指向している。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 上記 EU の一員として、基礎研究に先導的な役割を果たしているが、トレンドとしては高止まりの感が強い。
	応用研究・開発	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 産学の連携が強い。添加剤におけるエボニックなど世界的な企業が研究をリードしている。 ● 機械システム及びその課題を明確化した産学官の連携体制。エンジン設計に有用な解析モデルでは世界有数の企業 (FEV、AVL、RICARDO 等) があり、世界の自動車企業のエンジン開発のサポートを行っている。
欧州	応用研究・開発	◎	→	<p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 産学連携が活発に行われており、官からファンディングを受けるなどして研究開発がされている。例えばボーイング社とシェフィールド大学が設立した Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) は世界各国から民間企業が参画して航空関連技術開発を進めており、トライボロジー関連では難削材加工などが日本企業も参画して行われている。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 産学連携がもともと高いレベルで行われており、トライボロジー関連では自動車の内燃機関系に関わる共同研究プラットフォームとして FVV (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.) が発足し、ドイツ国内に研究拠点を有する自動車メーカーと部品メーカー、大学等が参画している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 摩擦研究拠点が、清華大学 (北京) の他、蘭州にある (State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, the Chinese Academy of Science (1987年創設)。百人規模の研究者 (80名以上・ポストドク以上) を擁する大規模な組織。欧米で教育あるいは研究経験を積んだ中堅研究者がリーダーとして研究を率いている。研究テーマも現代的であり、まだ追随型の傾向はあるものの、応用研究への展開をにらみ、精力的に基礎研究を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はないが、基礎研究の状況から今後の応用研究レベルの向上が考えられる。
韓国	基礎研究	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 他国との比較でトライボロジー分野での特筆すべき基礎研究はない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はない。

(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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：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」……近年 (ここ1~2年) の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 潤滑油協会「潤滑管理効率化促進調査報告書」(1995).
- 2) 化学技術戦略推進機構「ST / GSC 技術開発プログラム構想—ST 戦略の具体化に向けて」(2005).
- 3) Kenneth Holmberg, Peter Andersson and Ali Erdemir, "Global Energy Consumption Due to Friction in Passenger Cars," *Tribology International* 47: 221-234, 2012.
- 4) Bo N. J. Persson, "Sliding Friction," *NanoScience and Technology*, 2000.
- 5) F. P. Bowden and D. Tabor, "The friction and Lubrication of Solids," Oxford University Press, (first published in 1950, reprinted with additional material in 1954), paperback edition, 1986.
- 6) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野 (2017年)」:502-511, 2017.
- 7) 日本トライボロジー学会「トライボロジー技術俯瞰図」(2015),
<https://www.tribology.jp/unit/s-101/fso4p100000005rj-att/ob515g0000000034.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 8) 日本トライボロジー学会「トライボロジーロードマップ研究会 報告書」(2015).
<https://www.tribology.jp/unit/s-101/fso4p100000005rj-att/jr41mf00000000e0.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 9) 中原綱光, 安藤泰久「トライボロジーロードマップの目的と報告書の概要」『トライボロジスト』61巻1号(2016): 9-15.
- 10) 日本トライボロジー学会「2015年度(第60期)研究会報告」『トライボロジスト』61巻6号(2016): 401.
- 11) 日本トライボロジー学会「2017年度(第62期)研究会報告」『トライボロジスト』63巻6号(2018): 434.
- 12) 日本トライボロジー学会「創立60周年記念 自動車の省資源・省エネルギー」特集『トライボロジスト』61巻2号(2016): 64-115.
- 13) 科学技術振興機構 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「革新的燃焼技術, 損失低減チーム」, https://www.jst.go.jp/sip/k01_team4.html (2019年2月1日アクセス) .
- 14) 自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE) ,
<http://www.aice.or.jp/index.html> (2019年2月1日アクセス) .
- 15) 「トヨタ・日産など11社、「自動車用動力伝達技術研究組合」を設立」『日本経済新聞』速報, プレスリリース, 2018年5月15日,
https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP479753_V10C18A5000000/ (2019年2月1日アクセス) .
- 16) ミュンヘン工科大学, Institute of machine elements FZG,
<https://www.fzg.mw.tum.de/en/home/> (2019年2月1日アクセス) .
- 17) Austrian Excellence Center for Tribology,
<https://www.ac2t.at/en/ac2t/> (2019年2月1日アクセス) .
- 18) サウサンプトン大学, National Centre for Advanced Tribology at Southampton,
https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/groups/ncats.page#group_

- overview（2019年2月1日アクセス）。
- 19) エコール・セントラル・ド・リオン,
<http://ltds.ec-lyon.fr/spip/spip.php?rubrique1>（2019年2月1日アクセス）。
 - 20) 清華大学, State Key Laboratory of tribology,
http://www.tsinghua.edu.cn/publish/dpien/7819/2012/20120903141457094331781/20120903141457094331781_.html（2019年2月1日アクセス）。
 - 21) 鈴木厚「自動車の省資源・省エネルギー予測」『トライボロジスト』61巻2号(2016): 109-115.
 - 22) C. Mathew Mate, "Tribology on the Small Scale," 2007.

2.15 エネルギーシステム評価

(1) 研究開発領域の定義

エネルギーシステム評価に関する科学、技術、研究開発を記述する。エネルギーシステム（社会における電気や石油など様々な形態のエネルギーの生産・配送・消費までの流れをシステムとして表したものを）を数理モデルとして計算プログラム化することにより、経済合理性や環境適合性なども考慮に入れたエネルギー技術選択や政策の有効性や妥当性の評価を目的とした研究開発領域が対象となる。

なお本領域では評価対象となるエネルギーシステムを空間スケールで分類しており、それぞれの評価の目的や課題が異なり、評価方法もこれに対応していることから、対象とするエネルギーシステム自体の主な動向、課題等についても記述する。

(2) キーワード

エネルギー変換・貯蔵・輸送技術、供給の変動性、地球温暖化問題、資源賦存量の不確実性、経済的不確実性、政治的リスク、社会的受容度、情報技術によるシステム管理

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

エネルギーシステム評価の重要性は、第一次石油危機後に注目された。第2次世界大戦後のモータリゼーションと電力消費の爆発的拡大の中で、石炭から石油にエネルギーの中心が移行したが、同時に石油依存型社会の脆弱性も明らかとなった。また1960年代は化石燃料消費に伴う環境汚染も大きな問題となった。このような資源の有限性の中で拡大する需要、環境性、経済性などの同時成立を求めエネルギーシステム評価研究が始まった。その後、石油代替エネルギー、地球温暖化問題、再生可能エネルギー開発など供給面の拡大、利用者間のエネルギー輸送、コジェネレーションやヒートポンプなど利用機器の性能向上と未利用エネルギー利用技術の再評価など需要側の技術進展によりシステム評価はさらに複雑化した。また、各国でエネルギー産業の規制改革が進み、ことに電力市場では電力（kWh）、さらに設備容量（kW）までが商品のように市場取引の対象とされ制度的にも複雑化している。

このようにエネルギーシステム評価は、単なる入力一次エネルギーに対する最終消費エネルギーの入出力変換効率だけでなく、経済性、環境負荷、さらに経済的な変動に対するリスクヘッジだけでなく、資源問題では政治的リスク、原子力では事故リスクという対象の広がり、地球環境問題では超長期的視点、地域エネルギーでは温度を考慮したエネルギーの質的側面、太陽光・風力発電では短周期的変動性など、単にエネルギーの量のみでは表せない諸問題が近年評価の鍵となっている。

[研究開発の動向]

エネルギーは産業と社会を支える基本的な要素である。しかし利便性に優れる天然ガスや石油は資源が有限かつ偏在しており供給のコストは短期的にも長期的にも変動が大きい。また大気汚染や地球環境問題を引き起こす。他方、太陽光のような無尽蔵と言って良い再生可能エネルギーはゼロコストで誰も恩恵を受けられるものの、一般に供給の密度が薄く、収集と変換にコストがかかり、また出力は気候や天候で変動する。原子力は原理的には安定した供給を

安価な燃料費で可能とするが、事故時の影響はきわめて大きい。このようにエネルギー源はいずれも得失がある。他方、2016年時点で一人当たり一次エネルギー消費はOECD地域と非OECD地域で4.20石油換算トンと1.34石油換算トン、アフリカでは0.663石油換算トンと格差が大きい。また、先進国であっても国内に「エネルギー貧困」と呼ばれる格差がある。

電力やガソリンなど生活の基盤となるエネルギー源では、どのような価格で消費者に提供されるかが社会の基本的な問題であるが、ここには技術的コストだけではなく環境負荷のための社会的コストが必要であり、さらに実際の市場価格は税制など制度に依存する。

このようにエネルギーシステムの評価は決して一元的になされるものではなく、多面的な視点が不可欠である。特に、システム評価は、時代に合わせ社会からの要請に応えるため新たな方法論が開発されるなど、システム評価が拡張されてきた経緯がある。

ここでは、エネルギーシステムを空間スケールで分類し、本領域の方向性を示す。

(3)-1 グローバルレベルのエネルギーシステム評価

長期・グローバルレベルのエネルギーシステムの近年の最大の課題は地球温暖化問題への対応である。1988年に政府間気候変動パネル（IPCC）が設立され、特にエネルギー利用の化石燃料起源の二酸化炭素排出が大きな要因とされて以来、エネルギー、経済、環境を共存させるための定量的評価研究が世界的になされた。1990年代は主にエネルギー需要を所与としエネルギー技術選択と経済の相互関係を分析するボトムアップ型モデルと、主にエネルギー価格と市場メカニズムに着目して経済活動の中でエネルギー種が選択されていくというトップダウンモデルがエネルギーシステム評価の基本的な方法であった。次第にこれらは大気汚染や水汚染などの環境影響評価、土地利用や食糧需給評価、簡易全球大気循環モデル、水資源評価など範囲を広げた総合的評価システム体系に拡張された。このように多分野の評価モデル群を整合的に相互リンクさせたシステムは統合評価モデル（IAM）と呼ばれ、2013年に発表されたIPCC第5次評価報告書WG3（IPCC-AR5-WG3）¹⁾には日・欧・米から30の統合評価モデルが参加するに至った。日本からは、最も広範囲かつ大規模なモデル評価を続けている国立環境研究所のAIM²⁾、詳細なエネルギー技術評価ボトムアップモデルを特に詳細化した地球環境産業技術研究機構のDNE-21³⁾、コンパクトにエネルギー、経済、環境影響、土地利用を統合化したエネルギー総合工学研究所のGRAPE⁴⁾や東京理科大学のMARIA⁵⁾が参加している。

他方、モデルは大規模・精緻化されたとはいえ長期的な地球環境問題の不確実性は自然科学的にも人為的影響にしてもあまりにも大きく、これらのモデルが導く結論は決して収束しておらず評価の幅はなお広い。例えば、先のIPCC第5次評価報告書WG3では¹⁾2100年時点での2°C安定化目標と対応する430-480ppm濃度制約に対するGDP低下率は、2%-15%（中位値5%）という広い幅を与えている。モデル間に共通する知見と差異を明らかにすることは研究の方向付けにも政策提言にも重要と考えられる。このような観点から数多くのモデル比較プロジェクト（Model Inter-Comparison : MIP）が進められてきた。IPCC-AR5-WG3には9のMIPが記されているほか、2017年時点でさらに4プロジェクトが進行している。

(3)-2 国レベルのエネルギーシステム評価

(3)-1で紹介したエネルギー経済モデルの方法論は、ボトムアップアプローチ、トップダウンアプローチともそのまま1国あるいは地域のエネルギー・経済・環境評価に適用できる。エ

エネルギー需給データが整備されていれば、国単位、地域単位のボトムアップアプローチの開発は比較的容易なため、世界各国での開発例は多い。この背景には、1980年に国際エネルギー機関（IEA）から発表された高い汎用性と柔軟性を持つメインフレーム計算機上で動作するMARKALモデル⁶⁾の存在が大きい。計算機環境の進歩により経済活動との統合化や不確実性評価など様々な拡張がされ、評価ツールとして普及した。

他方、経済政策評価においては、エネルギー政策と産業との相互影響、特に一次産業から二次産業、サービス業など産業部門間の影響の波及は産業連関表を用いて分析することができ、政策上重要な意味を持つ。トップダウンアプローチの中でも、産業連関表の概念を拡張した応用一般均衡モデル（CGE）は、このような多部門間の相互関連のもとで、価格と取引額の整合性を保ちつつ詳細な経済活動を導出することを可能とする⁷⁾。一般均衡分析は高度な専門的知識を要する経済学の一学問分野であるが、計算ソフトウェアの進展とデータの整備によりCGEモデル開発は容易になり、CGEは今や研究だけでなく実務の評価ツールとして世界各国で用いられている。

基本的な差として、前者は需要を外生的に与えるのに対し後者は価格メカニズムで変化すると想定されること、前者はエネルギー技術を明示的に扱うのに対し後者は「価格」の中に体化されているなどの方法論上の相違があるが、これらは絶対的なものではなく拡張例はある。

なお、CGEは基本的に静学モデルであり、経済のダイナミックな変化そのものを扱うものではない。そのため先のAIMでも逐次最適化によって産業部門間の相互作用を見つづ動的な技術導入シナリオを導くシステムを持つ。さらにマクロ経済モデルと組み合わせた大規模な経済評価システムが日本経済研究センター等で行われているが、エネルギーシステム評価からは外れるのでここでは省略する。

また、複数の国の間のエネルギーに関わる協力連携政策の評価にも関心が集まっている。連携には大別して、(a) OPECに始まり、環太平洋パートナーシップ協定（TPP）や二国間クレジット制度などの多岐に渡る複数国際間の社会・経済的な制度設計、(b) 国際間の長距離送電線やパイプラインなどの国際間のエネルギー輸送インフラ整備に関わるもの、などがある。対象国としては、EU、ASEAN、South Asian Association for Regional Cooperation（SAARC）、中東、東アジア、先進国と発展途上国の組合せ、などがその目的に応じて取り上げられる。モデル化の手法としては、上記の国を対象としたモデル化手法が利用されるが、近年話題となっているバイオマス、水素、電力等の国際間輸送のように、技術的な因子を無視できない国際連携も評価対象となる。

(3)-3 電源計画と電力システム評価

エネルギーシステム評価において電力需給システムはやや特徴的な性質を持つ。これは、①電力の貯蔵には制約が大きいこと（揚水発電は大規模であるが貯蔵効率が約7割と損失が大きい。蓄電池は応答は速いが、容量が小さく高コスト）、②送配電は交流でなされているので、需給バランスがとれ、周波数がどの段階でも正しく管理されていなければならない、③電力需要は、通常でも季節・日間で、さらにより短時間でも変化する、などの需給双方の特性のためである。このため、電源は需要に合わせた運転が必要だけでなく周波数や電圧管理のための設備と運用が必要となる。

需要変化が1時間程度で起こり、しかも事前にわかっているとすると設備は可変費が安い順

に運転を行い、全体では予測されるピーク需要に適正な予備力を加えた設備導入を行うのが合理的なことが自明である。ただし、太陽光発電（PV）や風力発電など変動電源が主力電源化する段階では、電力の需給構造が大きく変化し、従来のように夏季午後に最大需要が発生するとは限らず、年間を通じて供給信頼度を適切に把握する必要性が高まっている。需要家に電力を送るには、送電システムの容量制約を考慮することになる。このような「上流から下流へ」エネルギーが流れる単方向ネットワークフローの想定では、電源計画は先のボトムアップアプローチと基本的に同じようなモデルで評価可能である。しかし分散型電源が需要家側に導入され、送配電システム側に逆方向のフロー（逆潮流と呼ぶ）が発生すると話は単純ではなくなる。まず既存の設備はそのような逆潮流を想定していない。第2にネットワークが周波数成分とフィードバックループを持つ場合、停電が急激に広範囲に拡大するようなシステムの安定性の問題が発生する。電源システムのエネルギーシステム評価では、このようにマクロでのエネルギー需給バランスのシステム評価と、短期あるいは瞬時のシステム安定性の問題を同時に扱うことはタイムスケール上も空間のスケール上も極めて困難なため、両者は切り離して評価されてきた。

しかし、両者にまたがる問題も近年発生してきた。再生可能エネルギー、特に太陽光発電や風力発電の急速な拡大は世界的なトレンドである。日本においても2011年3月の東日本大震災以降、世界的な太陽電池パネルの価格低下とFeed in Tariff (FIT) の導入により急速に拡大した。ここで、太陽光発電も風力発電も天候により短時間で出力が変化してしまう（これらを変動性電源とも呼ぶ）。すると送電システムはまず周波数が低下してしまうので、瞬時に供給を適切に増やし補償する必要がある。もし発電設備がタービンなど回転機で構成されていると、わずかな変化なら自動的に吸収する特性があるが、ある程度以上大きな変化が要求される場合は設備による調整を必要とする。さらに変動電源は本質的に出力予測誤差があるため、従前以上の十分な予備力がなく対応しきれなくなると系統全体が不安定化することになる。

そこで、電源計画モデルもエネルギー量の需給バランスと総コスト最小化だけでなく視点を導入する必要性が生じた。まず地域の細分化と時間的な解像度の詳細化により変動性電源出力と需要の変動を明示的に扱う拡張がなされた。これにより太陽光発電の導入拡大に対する最適な蓄電設備の導入量を合わせ評価できる。この代表的なモデルが藤井らによる研究⁸⁾であり、1年の時間解像度は10分、地理的解像度は全国352地点、基幹送電線441本を扱う線形計画モデルで、規模は約2億の制約条件式と約1.5億の変数から構成される。やや簡易化された方法として、変動性電源の容量に対するタービン発電機の容量を一定値以上にする制約を加える方法がある。

これに対し、もともと中小規模の電気事業者が多い米国や国際的な送電ネットワークを持つヨーロッパでは、余剰電力の相互融通のために市場メカニズムを利用した管理システムを構築してきた。この中には、電力供給者から積極的に価格情報を消費者に流すことで需要をある程度調整しようとする需要側管理（DSM）と呼ばれる考え方が存在する。これは電力市場の形態を「需要に応じた生産」から「需要と供給のオークション」取引に変えるものである。消費者も自ら直接、あるいは家庭エネルギー管理システム（HEMS）や建物エネルギー管理システム（BEMS）によりある程度自動的に需要を調整する（Demand Response: DR）。ある程度以上需要が超過して価格が上昇すれば、予備電源の保有者もそこで市場に参加して供給を開始するかもしれない。この結果電力量の直物・先物取引だけでなく、予備的設備の保有も取引の対象となる容量市場など金融市場の方法が取り入れられてきた。この場合のエネルギーシステ

ム評価は、上記のいずれとも異なる接近法が必要となり、物理的なエネルギーシステム評価の枠を超えたオプションやボラティリティなど金融・証券市場の方法の適用と評価例が数多くみられるようになってきている。日本では小売り電力自由化は導入されても発送電分離と市場制度が欧米に比べると遅れているため、実証研究よりも数理モデル研究が先行しているが、今後の電力市場の方向性から見て、日本でも考慮すべき課題である。

変動電源の連系量増加によって、周波数制御や需給バランス調整のための調整力必要量が増え、従来電源以外の調整資源（蓄電池やDRなど）が必要となる可能性がある。再エネ電源大量連系下での需給バランス維持のために、需要側資源を経済的に活用できないか、検討する研究が始まっている⁹⁾。今後、変動電源の出力予測の分布を考慮し、需要家が保有する分散型エネルギー資源を系統と統合して、経済的に再生可能エネルギー電力を主要な供給力として使っていくための計画手法、運用制御手法の開発が必要になる。

(3)-4 地域エネルギーシステム

分散電源の拡大とエネルギー利用機器の拡大は、ミクロな地域レベルで見るとさらに異なる様相と課題をもたらしている。分散電源の拡大とエネルギー利用機器の拡大は、ミクロな地域レベルで見るとさらに異なる様相と課題をもたらしている。国全体の一次エネルギー消費削減や温室効果ガス削減が目的となる国レベルおよび電力システムの低環境負荷・低コスト・需給安定が目的となる電力システムレベルと、省エネルギーと建物に統合された再生可能エネルギー・分散型エネルギーシステムの導入によるネット・ゼロ・エネルギー化が目的となる建物レベルの間であって、地域レベルのエネルギーシステムの目的は従来明確では無かったが、近年 Smart Community、Smart City、Community Energy Management (CEM) 等の概念が出現し、また自治体が主導する低炭素まちづくりというニーズもあって、地域エネルギーシステムとの概念とその研究開発に対するニーズは近年高まっていると言える¹⁰⁾。通常、地域エネルギーシステムで取り扱われるのは、太陽エネルギー・地熱・小規模水力・バイオマスなど地域の再生可能エネルギー資源の供給、都市廃熱の活用、都市規模の熱併給発電、それらを含めて最終エネルギーを熱の形で建物に供給する地域熱供給システム（ヨーロッパや中国など寒冷地では地域暖房、日本など温暖地では地域冷暖房、シンガポール等では地域冷房も見られる）、分散型発電を含み広域の電力システムからの供給を含めて電力需給の最適化を図る地域の電力マネジメントシステム、都市ガス・石油類・近年では水素システム等を含む燃料供給システムと、建物（電気自動車への供給を含む）その他の部門の最終エネルギー消費を都市レベルにアグリゲートした都市の最終エネルギー需要である。

空間スケールがミクロになるにつれ、エネルギーシステムも個別の機器特性や需給パターンが詳細化され、さらに省エネルギーのオプションも具体的になる。例えば、農村部ではバイオマスの供給ポテンシャルが供給の時期と量、さらに質を合わせて検討されねばならない。畜産や農業廃棄物の利用システムも同様で、収集から変換まで具体的な調査と評価を必要とする。

都市部では産業排熱の利用だけでなく、ヒートポンプ技術の向上により河川熱や地中熱、さらに地下鉄排熱のような未利用熱源利用の可能性も視野に入る。省エネルギーオプションもゼロエネルギービル (ZEB) やゼロエネルギーハウス (ZEH) が提案するようなダブルスキン、LED タスクアンビエント、ライトシェルフなどの省エネルギー建築技術などの効果も検討課題となる。

廃棄物利用では、バイオマスだけでなく回収廃プラスチック再利用も重要課題であるが、ここでは燃焼によるエネルギー利用だけでなく、原料としてのマテリアルリサイクル、そのほかの化学的変換プロセスによるケミカルリサイクル、埋め立てなどエネルギー以外の処理方法の相互比較が資源、経済性、エネルギー効率、環境負荷、最終処分量など複数の視点から検討されねばならない。したがって、エネルギーシステムモデルも、単なるエネルギー変換だけでなく、マテリアルバランスやプロセスの温度、場合によっては圧力など化学工学的な評価を必要とするなど、熱利用でも特に熱輸送が含まれると温度や圧力など熱力学的側面が必要となる。このため、古くから評価はしばしばエネルギーだけでなくエクセルギーやエンタルピーからなされる。このように、ここでも単一の基準では不十分なものとなる。

地域エネルギーシステムでは、ヒートポンプや発電機などエネルギー機器の導入台数も数台単位となるため機器の運転特性も考慮されねばならない。例えば、大型エンジンを小出力で運転すると効率は大きく低下し、ある程度以下では停止してしまう。一般に、エネルギー機器は部分負荷状態では定格運転時の効率を発揮できないことが多く、地域エネルギーシステムではこの影響が大きくなる。しかしこのような特性はしばしば非線形かつ不連続関数となるため、数理モデル上は急激に定式化・求解とも困難さが増す。

このように地域レベルのエネルギーシステム評価は、基本的にボトムアップモデルをベースとして建築学、都市工学、化学工学、農学、機械工学、電気工学をはじめとする幅広い分野が担ってきた。特に、地理情報システム（GIS）の普及により、詳細な地理データが利用できるようになったことから日本でも東京、大阪、名古屋など大都市を対象とした詳細な分析が可能となった。反面、エネルギー利用状況の詳細なデータは、企業や個人の情報保護の観点から未公開なことが多く、システム評価のボトルネックとなっている。

次世代のエネルギーシステム要素技術として特に注目されるのが電気自動車（EV）と電力系統との連携（V2G）である。(3)-3で述べたよう太陽電池の変動性の吸収には蓄電池が有効であるが、もし駐車中の電気自動車の蓄電池を利用できれば追加的な費用は大幅に削減できることが期待できる。ただし充電と走行の時間配分に注意しなければならない。これを考慮するには、特定地域の大量の自動車の詳細な走行データとその分析が必要となる。情報技術の発展により、このようなビッグデータの収集と活用は現実のものとなりつつあるが、まだエネルギーシステム評価としては限定的である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

ここでは各レベルにおけるエネルギーシステム評価を実施する際に対象となるエネルギーシステム自体の注目動向を中心に述べる。

(4)-1 グローバルレベルエネルギーシステム評価

グローバルレベルのエネルギーシステムは、近年になっていくつもの大きなインパクトがあった。まず2010年付近からの米国のシェールオイル・シェールガスの急速な開発の進展、次いで太陽電池パネル価格の急速な低下、そして2016年パリ合意は世界のエネルギーシステムに大きな影響を与えている。

温暖化対策として近年注目される技術に、ジオエンジニアリング¹¹⁾がある。これには、大

気中への二酸化炭素排出を0に近づけるだけでなく吸収により「負の排出」を実現しようとするものと、より直接的に太陽放射への介入を通じて大気温度そのものを制御しようとするものがある。前者は、さらにバイオマス燃焼と排気ガス中の炭素回収隔離を組み合わせたもので BECCS と称されるシステムと、さらに直接大気から二酸化炭素を回収し貯留する Direct Air Capture (DAC) 技術などが提案されている。いずれも、二酸化炭素の分離、圧縮、地下あるいは深海への圧入貯留などの要素技術は確立したものであり、現時点でのコスト、エネルギー消費などは推計値の報告例は多い。ことに BECCS は (3)-1 で述べた地球温暖化対策のモデル比較では、2100年2℃目標達成のためには不可欠あるいは極めて高い優先度の技術となっている。

後者の直接的温度制御として、成層圏に硫酸などエアロゾルを散布し、直接地表へ到達する太陽光エネルギーを制御しようとする技術がある (Solar Radiation Mngement : SRM) コスト試算がいくつか報告されているが、問題点はコストよりもむしろ結果の不確実性と社会的受容性にみられている。

近年のゼロエミッション低炭素エネルギーシステムの要請に応えるには、重量車、航空機、船舶、素材産業でのゼロエミッション化が課題である¹²⁾。

(4)-2 国レベルのエネルギーシステム評価

国レベルのエネルギーシステムは社会経済の動向と政策により大きく変化する。近年では、まず、化石燃料から再生可能エネルギーへのシフトを念頭に置いた際の二次エネルギー（エネルギーキャリア）の将来に関する議論が活発である¹³⁾。現状では天然ガス・バイオガスに加えて、再生可能エネルギー電力と水素がその代表格であるが、その国内・国際間輸送がエネルギー変換技術はエネルギー貯蔵技術や二酸化炭素分離貯留技術（CCS）と組み合わせさせて多様なシステムが設計、評価されている。また、エネルギーと経済の相互関係における新たな要因として、情報技術の進展が大きく影響し始めている。ICT技術の進展に伴って、スマートグリッド、スマートエネルギー、スマートタウンなど、「スマート」と付く様々なシステムを近年目にする機会が増えた。これらは必ずしも明確に定義された工学用語ではないが、太陽電池やコジェネレーションなど分散エネルギー機器を持つ需要家と大規模事業者だけでなく中小規模の発電事業者、あるいは電気自動車との接続までを含むさまざまな供給者を情報技術で連携し、最も効率的な需給を実現しようとするものである。情報技術とAIの発展は、ネットワークの運営管理だけでなく料金の瞬時的な変化の反映や詳細な課金システムも可能とした。例えば、EVやPHVなど電気自動車の充電を他人の建物で行っても、常に課金が「家の所有者」でなく「自動車の使用者」になされるなら建物の電源コンセントの開放の可能性は広がる。このような広範囲の連携は、東日本大震災後に問題となった災害時の対策にも寄与するであろう。

「スマート」に関しては近年特に注目が集まり、情報技術の寄与の可能性は様々な論じられており期待も大きいですが、システム全体としての定量的評価はまだはっきりしない。需要家の行動が不明なことと、EVがまだエネルギーシステムと連携するに至っていないことが大きい。これらは今後の研究課題となっている。

(4)-3 電源計画システム評価

原子力発電所の拡大が望めない一方、二酸化炭素排出削減は進めねばならないため、太陽光、

風力など変動性電源の拡大は今や不可避と考えられる。そのため、需給のエネルギーバランスだけでなく系統の安定化の課題は急速に上昇している。対応策として、技術面と制度面からの展開がある。

技術面では、蓄電システムの開発がある。蓄電池も、容量一体積比（重量比）の改良を目指す大容量化—ただし寿命は5000回の充放電サイクルを基準とする蓄電池—と短周期的な充放電サイクルに強い蓄電池、さらには瞬時的応答に強いキャパシタや超電導装置など電池以外のシステムの寄与も次第に増加する。これらの進展により、エネルギーシステム上の制約は大きく緩和する。

近年では、特にリチウムイオン電池のコスト低減は著しいが、電力を制御するための半導体機器はなお安価とは言えず、次世代電源システムシステムの評価への影響は大きい。

制度面では、前述の新たな電力市場の創出、需要側管理などが小売り自由化に次ぐ送発電分離とともに現れるが、これによる経済効果、環境面への寄与などは、不確実性の高さからまだシステム評価に至っていない。

近年のトピックとして、変動性電源の急激な増加に対して、送電容量の不足から接続を拒否する電気事業者が現れたことがある。送電系統はピーク需要と事故に備えた容量が必要であり、このため設備利用率が制約される。この点は世界共通である。ただし例えば欧州では日本ほど台風や地震の災害リスクが大きいことや国際的な送電網の存在から迂回路が多くなる。日本は地域ごとの送電系統の独立性の高さからボトルネックが生じやすい現状がある。欧州では、送電空き容量の利用を高めるため「コネクト&マネージ」という言わば接続の公開市場制度が導入されている。日本政府も「日本版コネクト&マネージ」の導入を進めようとしているが、セキュリティと信頼性が確保される中でどのような効果が期待されるのかはまだ不明である¹⁴⁾。

(4)-4 地域レベルのエネルギーシステム評価

太陽電池、風力発電、バイオマス等再生可能エネルギーなどは地域に分散して導入され、必ずしも送電の基幹系統の上流に接続されるとは限られない。中小規模では下流の66kV系統や末端の6.6kVの配電網に接続されることも多いことから、エネルギーも「地産地消」をめざす流れが生まれている。この場合、LNG火力など大規模電源よりもkWhあたりでの発電費用は上昇するものの、ある程度地域内で需給が閉じていれば雇用の確保につながり人口の減少に対策になりうる点に期待がされている。地場産業の育成を含む地方の活性化の一環として期待がされているが、補助金依存にならないような施策がなければ事業としては持続可能とはならない点に注意が必要である。

従来、都市レベルでのエネルギー供給システム評価では熱供給を中心に議論がおこなわれてきた。しかし、都市廃熱を主体とするヨーロッパ等での地域暖房システムに対し、日本に多く見られるように一般ビルの空調熱源システムを拡大した形の地域冷暖房システムでは建物側のセントラル空調システムの減少、パッケージエアコンシステムの高効率化と普及という状況下でその普及にブレーキがかかり、また、地域暖房システムに対しても高断熱型のゼロエネルギー建築の普及に伴う地域の熱需要密度の低下により熱供給システムの優位性の低下が懸念されている。それにかわって、電力需給を主体としたスマートコミュニティシステム、再生可能エネルギーの変動を吸収するために製造された水素エネルギーシステムなどが注目されるよう

になっている。

近年、自治体レベルの温暖化対策評価などを目的とした、都市最終エネルギー需要のシミュレーション技術開発が世界的な潮流となっている¹⁵⁾。元来建築のエネルギーシミュレーション技術を扱っていた IBPSA (International Building Performance Simulation Association) が 2 年に 1 度開催する Building Simulation 国際会議においても、2017 年にアメリカで開催された会議では、8 セッションのうち 1 つを都市モデルを扱うセッションが独占するなど、この分野に対する期待は高い。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

エネルギー、環境技術関連のプロジェクトは国内外に数多いが、エネルギーシステム評価におけるプロジェクトは限られる。グローバルレベルにおいては、(3)-1 で述べたモデル比較プロジェクトが進展中であり、12 モデルが集まった ADVANCE (2013-2017)、バイオマス起源の無機炭素と有機炭素排出に着目する EMF-30/33 (2013-2016)、16 プロジェクトからなる MILES (2015-2016)、CD-LINKS (2015-2019) などがあり、いくつかは活動を継続している。

国内においては、エネルギーシステム評価そのものを対象とするプロジェクトは、国立環境研究所の AIM と地球環境産業技術研究機構の ALPS- III が注目される。なお、AIM は世界だけでなく元来アジア地域を対象とする経済-環境評価プロジェクトであったことから世界各国との研究ネットワークを構築し、中国やインドネシアでは自国の評価モデルを開発している点を補足する。さらに、各種のモデルの取り組みを含めて、モデルを相互比較しようとするプロジェクトも始まっている。

ヨーロッパでは、ロシアや中東、北アフリカとのエネルギー相互依存ネットワークが古くから構築されており、天然ガスパイプライン、石油パイプライン、国際送電網が広範囲に各国を接続している。同時に、国際河川管理や環境管理の体制も長い歴史を持つことから、地球温暖化問題だけでなくエネルギー安全保障の視点、さらに再生可能エネルギー利活用についても欧州委員会としての政策を打ち出している。

アジア、オセアニア地域におけるエネルギー・環境問題を対象とした社会・経済的、インフラ的側面での協力も、今後重要性を高めていくと考えられる。

地域エネルギーシステムに関しては、日本の次世代エネルギー・社会システム実証事業 (2010-2015) において、横浜、豊田、京阪奈、北九州の 4 都市でスマートコミュニティの実証事業が実施されたほか、ヨーロッパでは EU による CONCERTO (2005-2010)、Smart cities and communities があり、前者は省エネルギー都市のパイロットプロジェクト、後者は都市におけるエネルギー・運輸・ICT などの分野融合によるイノベーション創出を目指している。

(5) 科学技術的課題

● エネルギーシステム評価における技術的課題としては、以下のものが挙げられる。

- ① 検証作業 (複数のモデルを利用したレビューなど)、
- ② 数値計算モデル上の技術課題 (非線形効果の導入、混合整数解の解法、モデルの定式化、求解の困難化など)、
- ③ エネルギー量だけではない多面的視点からの評価方法 (政治的リスク、事故リスク、不確

実性、エネルギーの質的側面、PVなどの短期周期変動性、地域におけるマテリアルバランスなど）、

④電力の市場取引化による数理モデル評価（および実証試験）などが挙げられる。

また、グローバルレベルから地域レベルを通じて、いくつかの新しい動向に対して、その影響が予測できない、あるいはデータがほとんどないことがエネルギーシステム評価を行う上で大きな課題となっている。それらを以下に列挙する。

● 需要サイドの問題

エネルギー供給技術については多くの開発課題と進展があるが、エネルギー需要に関しては基盤となるデータ、方法とも限られている。例えば、マクロレベルでの電力消費は与えられても、時刻別・世帯別・地域別のような細分化されたデータはわかっていない。ことに、天候に対して冷房など用途別需要がどのように変化するかはシステム評価上重要な課題であるが、データは限られている。ヒートポンプ技術の向上により河川熱や地下熱など未利用エネルギー源が実用性を有する段階となったが、これらは広域に存在するものではなく局所性が高いので、需要の詳細なデータとのマッチングが不可欠である。

輸送需要に関しても同様であり、時刻別・目的別需要などは個別調査によっている。日本においては、少子高齢化が予想されているが、これによりエネルギー消費がどちらに動くのかわからないシナリオに依存している段階である。世界的に見ても、例えば地域内交通の分析に必須のOD需要データは、国際輸送には存在しない。

さらに、今後の温暖化対策のキーテクノロジーの一つであるバイオマスエネルギーの潜在性評価にはエネルギーと食料需要の競合が懸念されるが、特に途上国地域の食料需要の将来の推移はよくわかっていない。

● 情報化の影響

先の詳細な需要データの必要性とも関係するが、情報技術の進展により個別の活動状況の収集は可能となっており、効率的なエネルギー利用が期待されている。近年注目されるシェアエコノミーにはこの情報技術インフラが不可欠であるが、この進展がどこまでエネルギーシステムに変革を起こすのかは現在、議論が緒についたばかりである。

● スマートネットワークの可能性

需要側管理を含めた新しいエネルギー需給ネットワークシステムへの期待は特に都市部や近郊都市で大きい。前述のようにEV／PHVのエネルギーネットワークへの参加はきわめて大きなインパクトを持ち、ことに自動運転が導入されれば需給構造とも大きな影響を受けると予想される。しかしそれがどのような形で、どのレベルのものなのかは現時点ではシナリオとしての議論にとどまっている。カーシェアリングは効率的な自動車利用をもたらすであろうが、同時に新たな需要を生むというリバウンド効果が予想されるため、全体的な影響については社会実験と実証モデルの開発が必要である。

● 地産地消型エネルギーシステムの可能性

地方の創生の観点からの再生可能エネルギーの拡大と「地産地消」の方向性は、低炭素社会の在り方の一つとしてしばしば語られる。その場合、ある程度地域内で需給が閉じていれば雇用の確保につながり人口の減少に対策になりうる点、地場産業の育成を含む地方の活性化の一環として期待がされる一方、補助金依存にならないような施策がなければ事業としては持続可

能とはならない点に注意が必要であり大きな課題となっている。

(6) その他の課題

エネルギーシステム評価において、需要データやエネルギー利用状況の詳細データなどが必要となるが、それらは情報保護法との兼ね合いがあること、またそのデータが共有化されていないことが課題となる。また地域エネルギーのデータについては個々に調査しているものの統合化されていない課題となっている。

さらにこの研究領域はきわめて分野横断的であるだけでなく、地域の在り方と国際的な温暖化対策、ミクロレベルのエネルギー需要と国際エネルギーネットワークなど空間スケールの横断性、また地球温暖化と短期的な変動電源の関係性など時間スケールの温暖性など幅の広い視点が不可欠である。さらに制度の社会的需要なリスクの認知など、人文・社会科学的知見の必要性や情報技術の進展の影響などの分野横断性は特に必要である。しかしながら、このような分野横断的なシステム研究は一例えはかつての科研費の重点領域のようなテーマは現状では取り上げられず、全学術分野を結集した取り組みが不可欠であるにもかかわらず、横断的視点の必要な若手人材の確保が困難となっている点が課題である。

(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	○	↗	●エネルギーシステム評価は通常の技術開発とはやや性格が異なるが基礎研究に相当するのが現状調査、データ収集であるとするなら、大都市を中心に様々な調査がなされている。
	応用研究・開発	○	→	●地球温暖化統合評価モデル開発は、NIESのAIM、RITEのALPS-III、エネルギー総合工学研究所のGRAPEなどが継続して情報発信している。ただし、新規の参入がやや少ない点が懸念事項である。
米国	基礎研究	△	→	●温暖化研究は政治的影響を受けたが、大学の研究所、EPAなど政府機関の活動は継続しているように思われる。ただしエネルギーシステムの研究は維持されている。電源系統とEVの連携評価、EV自動運転化の社会実験など興味深いテーマも見られる。
	応用研究・開発	△	→	●温暖化研究は政治的影響を受けたが、大学の研究所、EPAなど政府機関の活動は継続しているように思われる。電力市場などの展開においては活動が継続している。
欧州	基礎研究	○	→	●輸送部門における内燃機関車からの離脱とEVの推進など、やや方向性にぶれが生じている印象があるが、カーシェアリングなど情報技術との連携は進められているので全体としては横ばいと思われる。 ●（ドイツ）PIK（ポツダム気候変動研究研究所）は温暖化対策を念頭に置いた研究を続けている。
	応用研究・開発	○	→	●欧州では歴史的に国境を越えたインフラの連携がなされている。特に電源系統では、再生可能エネルギーの導入と国境・事業者をまたぐ系統運用や新たな市場の誕生とともに、新しい管理・運用形態、リスクへの対応などの実証研究が進んでいる。 ●（英国）グリーンディールなど温暖化対応の低炭素エネルギー利用の社会的制度の導入などにもとない、独自性のある研究報告がある。ただし、これらは国情の違いによるところが大きく、直ちに研究の開発状況の高低を意味するとは言えない。 ●（ドイツ）再生可能エネルギーの大幅拡大によるシステム運用研究は継続している。 ●国際応用システム解析研究所（IIASA：オーストリア）は世界のエネルギーシステムと気候変動対策、環境影響評価の研究の中核的機関の一つであり、中長期的視点から技術イノベーションをはじめ注目のべき活動を継続している。

中国	基礎研究	○	↗	●学術誌への投稿論文は相変わらず多く、大学を中心に様々なエネルギーシステムの調査が報告されている。
	応用研究・開発	○	↗	●輸送部門では情報技術の進展を具体的に応用するとともに環境問題へも言及がある。ただ、大都市と地方では研究に濃淡がある印象がある。
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発	○	↗	●以前はエネルギーシステム評価研究はさほど盛んではなく研究論文も限られていたが、この10年間に国際学会での発表や論文数も増加している。

(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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) IPCC-AR5-WG3, IPCC Fifth Assessment Report, WG-3 Full report, Figure 6.21, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf (2019年2月27日アクセス) .
- 2) S. Fujimori, T. Masui and Y. Matsuoka, "AIM/CGE [basic] manual" Discussion paper series No.2012-01, Center for Social and Environmental Systems Research, NIES, 2012.
- 3) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) , <https://www.rite.or.jp/system/research/new-earth/dne21-model-outline/> (2019年2月27日アクセス) .
- 4) A. Kurosawa, "Multigas Mitigation: An Economic Analysis Using GRAPE Model," The Energy Journal 27, Special Issue: Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy , 275-288, 2006
- 5) Shunsuke Mori,, Keisuke Miyaji and Kazuhisa Kamegai, "CCS, Nuclear Power and Biomass An Assessment of Option Triangle under Global Warming Mitigation Policy by an Integrated Assessment Model MARIA-23," Energy Procedia 37: 7474-7483 ,2013
- 6) International Energy Agency, "A Group Strategy for Energy Research, Development and Demonstration," (Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1980).
- 7) 川崎研一『応用一般均衡モデルの基礎と応用』（日本評論社, 1999).
- 8) 杉山達彦, 小宮山涼一, 藤井康正「全国の電力基幹系統を考慮した最適電源構成モデルの開発と太陽光・風力発電大量導入に関する分析」『電気学会論文誌 B』136 巻 12 号 (2016).
- 9) 高橋雅仁「再生可能エネルギー電源出力の不確実性を考慮した柔軟性資源計画モデルに関

- する研究」『電気学会電力技術研究会資料』PE-17: 109-112, 2017
- 10) Takaaki Furubayashi and Toshihiko Nakata, "Cost and CO2 Reduction of Biomass Co-firing Using Waste Wood Biomass in Tohoku Region, Japan," *Journal of Cleaner Production* 174: 1044-1053, 2018
 - 11) 杉山昌弘「技術で地球は変えられるか? -気候工学 (ジオエンジニアリング) -」『計測と制御』56 (2017).
 - 12) Steven J. Davis et al., "Net-zero Emissions Energy Systems," *Science* 360, no. 6396: 2018
 - 13) 新エネルギー・産業技術総合開発機構『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』1版 (総合エネルギー出版社 エネルギーフォーラム, 2010).
 - 14) 資源エネルギー庁「系統制約の緩和に向けた対応」,
http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/002_02_00.pdf
(2019年2月27日アクセス) .
 - 15) Christoph F. Reinhart and Carlos Cerezo Davila, "Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field," *Building and Environment* 97: 196-202, 2016