

# 地域熱供給とスマートエネルギー

## District heating systems and smart energy

中田俊彦\*

### 1. はじめに

政府は、統合イノベーション戦略（内閣府、2019）にて「SDGs 達成のための科学技術イノベーション」を掲げて、「多様なエネルギー源の最適活用を可能にする世界最先端のエネルギーマネジメントシステムの実現」を唱っている。今世紀後半に脱炭素社会を実現する具体的な方策として、パリ協定「2℃目標」の達成、水素社会（経済産業省資源エネルギー庁）、地域循環共生圏（環境省）を提唱するものの、社会実装を進めるための方策とその効果は明確ではない。他の産業分野と異なって、エネルギーは公共の社会資本であり、産業革命以降続いた大量消費の時代から持続可能な社会への大きな転換（パラダイムシフト）のなかでその再定義が求められている。

従来のエネルギーシステムは、双方向のシステムよりはむしろ、化石資源や電気を需要家に供給するワンウェイのエネルギーフローに留まっていて、研究の主体は採掘、変換、輸送の各要素プロセスの損失を低減する技術開発であった。しかし、このアプローチでは、プロセス毎の効率を向上させても、バイオマスや再生可能エネルギーのような基本特性の異なる資源に適用するには限界があり、実際に最近の再生可能エネルギー導入に伴って生じている新たな問題は、従来のエネルギーフローや既設エネルギーインフラに再エネを吸収させるインターフェイスから生じている。つまり、優れたイノベーションやエネルギー変換技術が生まれても、それが既設の社会システムに受け入れられない限り実装されない、というロックイン状況が生まれている。また、今後、地域のエネルギーシステム設計の担い手となる地方自治体、あるいは地域での新たなエネルギーシステムの構築に参加する民間事業者（以下、地方

自治体等）が経済合理的なエネルギーシステムを設計するために不可欠な基礎情報となる、エネルギー統計の市区町村地域版が存在しないという問題がある。

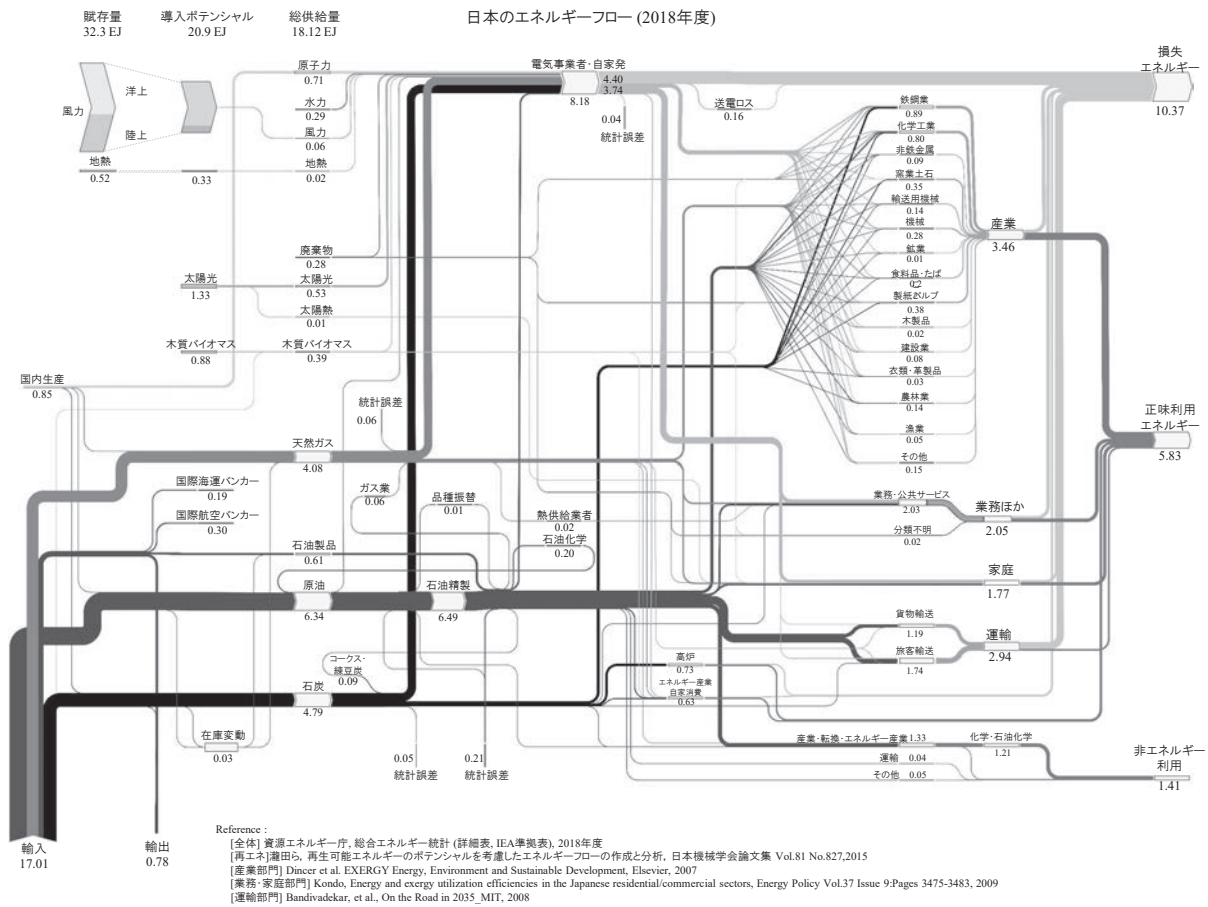
再生可能エネルギーは、地産地消を含む地域エネルギーシステムとの親和性が高く、従来型の大規模集約型のエネルギーシステムを補完し、災害時のエネルギー途脱を抑制するレジリエンス機能に優れた利点がある。地域熱供給システムは、この再生可能エネルギーを熱エネルギーとして利用可能な、古くて新しいエネルギーシステムである。

### 2. 日本のエネルギーフロー

今後の持続可能なエネルギーシステムを考える上では、日本のエネルギー利用の現状を把握するため、エネルギーフローの全体を俯瞰することが重要である。

はじめに日本のエネルギーフロー図（図1）を供給側から見る。OECD（経済協力開発機構）の国際エネルギー機関（International Energy Agency）の統計データによると、2018年の一年間に日本で供給されたエネルギー量（一次エネルギー供給量、TPES）は18 EJ（エクサジュール：10の18乗、低位発熱量ベース）である。需要部門別に見ると、産業部門に3.46 EJ、業務部門に2.05 EJ、家庭部門に1.77 EJ、運輸部門に2.94 EJのエネルギーが供給されて、これらの合計である最終エネルギー消費量は10.2 EJである。しかし、各需要部門で有効に利用されたのは5.83 EJのみで、実に一次エネルギー供給量全体の57%にあたる10.4 EJが熱として廃棄された。全需要家の年間エネルギー支払総額は約40兆円なので、その57%に相当する23兆円が煙とと

\* 東北大学大学院工学研究科 教授



Jul. 27, 2020 Y.Kusumoto@Nakata Lab

図1 日本のエネルギーフロー (2018年度)



図2 日本のガスインフラの現状

もに去ったことになる。廃棄エネルギーが多いおもな要因は、発電効率の低さと、自動車の燃費の低さにある。

次に2018年の日本のエネルギー消費量を利用形態（キャリア）別に見ていくと、熱が電力と並んで最も多く、全体の36%を占めて、輸送用燃料が28%と続いている。

これらのデータから、日本はエネルギーを熱として利用することが多いにもかかわらず、いっぽうで発電と運輸のためにその熱を大量に廃棄している現状が浮き彫りになる。

過去に遡ると、日本の一次エネルギー供給量（TPES）は、過去最大であった21.95 EJ（エグザジュール、10の18乗）（2004年）から17.87 EJ（2018年）まで、18%減少し、この傾向がさらに続いている。このうち発電電力量は、過去最大の4.22 EJ（2010年）から3.69 EJ（2018年）まで12%減少した。今後、電気自動車が運輸部門（旅客）に普及すれば、その燃料を代替する電力量は電力需要量全体の約11%に達すると見込まれる。これは、過去10年間の電力需要の減少分と同量なので、供給電力量の総量不足を懸念する必要はない。大事なのは、電力量 kWh よりむしろ、充電需要を賄うための時間と空間の調整力価値  $\Delta$ kWh と容量価値 kW、電力品質のグリーン化である。

これらエネルギー需給に伴うエネルギー損失を大幅に低減し、災害時のエネルギー自給機能を併せ持つ自律分散型の地域エネルギーシステムが期待されている。情報通信技術（ICT）を活用する地域エネルギー事業であるスマートシティ構想が躓いているのは、地域社会の特徴を客観的に分析することなしに、全国ブランドの導入を御旗に挙げているからであろう。1,745の市町村毎に、地域の歴史、気候、風土、くらしがある。そこに鉄鋼、化学、窯業土石、紙・パルプなどの素材系製造業が立地していれば、産業部門のエネルギー消費量は、家庭・業務・運輸部門を併せても一桁大きいのがふつうである。

### 3. 国内のエネルギー供給インフラの偏在

こうした状況は、日本ではエネルギー供給インフラの整備が電力を中心に進んできたことが影響していると考えられる。戦後、日本では大規模な火力発電が全国に建設され、発電した電気を供給するための送電線の整備も進んだ。一方、もっとも必要とする熱を作り出すのに使われるガスのインフラ整備は十分に進んでこなかった（図2）。

ガスのパイプラインの整備は全国の主要都市部のみに留まり、都市ガスが利用できるエリアは市街地とその周辺に限定されている。都市間のパイプライン等も整備が進んでいないため、地方で都市ガスを供給する企業はローリー車などを使って原料を調達している。輸送コストがかかるので家庭用小売単価は高くなる。例えば宮城県気仙沼市の単価は東京の1.9倍である。

都市ガスのパイプラインが行き届いていない地域では、暖房・給湯用のエネルギーとして、都市ガスよりも単価が高いLPガスが使われている。現在、日本の一般世帯の約45%にあたる約2,410万世帯がLPガスを利用しているが、地域別に見ると近畿が23%、関東が38%、東北・四国が72%で、大都市圏から離れるほどLPガスの割合が高くなっている。東日本大震災の被災三県の割合は宮城県56%、福島県76%、岩手県80%といずれもLPガスの割合が高い。

現在、電力市場の全面自由化を契機に、以前にも増して電力への関心が高まっている。しかし、発電のために大量の熱を廃棄している現状、また、熱供給に関するインフラ整備が不十分な地域で単価の高いエネルギーを利用している現状などをふまえると、今後は電力を中心とした大規模集約型のエネルギー供給システムから、熱エネルギーを有効に活用する地域分散型へとシフトさせていくことが重要なのは明らかだろう。

### 4. 欧州の先進モデル

欧州では暖房や給湯などに使う温水や水蒸気などの熱エネルギーを効率的に供給するための熱導管ネットワークの整備が進んでいる。この地域熱供給の歴史は古く、1875年にドイツで始まり、1896年には熱電併給方式の地域暖房システムを使った市庁舎への熱と電気の供給が始まった。米国でも、1876年にニューヨーク州ロックポートでの実証を経て1882年に大規模な商用化が始まり全国に拡大した。

同時期に、米国トーマス・エジソンによる電球の発明（1879）を契機にして電力エネルギーの導入も進み、1888年（明治21）には、仙台市三居沢にて宮城紡績（株）が小水力発電によってアーク灯を点灯し、これが日本の最初の商用水力発電となった。

日本で地域熱供給システムが初めて導入されたのは、千里中央（1970）、札幌市（1971）と欧米の1世紀後である。

特に熱インフラの整備が進んでいるのが北欧や中

欧の寒冷地域である。暖房度日の区分で色づけして（図 3a）、地域熱供給システムを実装する都市を赤丸で示した（図 3b）。同地域では給湯や暖房などのエネルギー供給機能は重要な社会資本の一つと考えられ、公的な整備が進められている。街中には水蒸気や温水を供給するネットワーク設備が整備され、近年は温水等を作り出す使うボイラーの燃料に、ゴミや廃材、泥炭など多様な燃料を混ぜ合わせる取り組みも行われている。

発電時に出る排熱の有効活用も行われている。たとえば、デンマークの首都コペンハーゲンでは、火力発電所の多くが熱電併給（CHP, Combined Heat and Power）機能を併設し、発電時に出る排熱を使って温水を作り、熱導管を通して供給している。この CHP では、電力と熱の二種のエネルギー市場を監視して、エネルギー価格の変動や需要量の変動に応じて発電量や供給熱量を変えて、需要家の利便性と事業者利益の最大化を同時に実現するといった高度なシステムも登場している。

導入量を国別でみると（図 4）、ロシア、中国、米国は別格にして、日本の実績はアイスランド、オランダ、スイスよりも少ない。しかも、冷熱供給量が温熱供給量よりも大きい。これは、国内の地域熱供給は、おもに業務用オフィスビルの空調機器を集約した事例が主体で、結果として冷房需要が大きいからである。海外では、地域熱供給システムの 60%以上が家庭部門向けを対象にしているが、日本は 98%が業務部門向けである（図 5a）。熱源構成を見ると、海外では火力発電の排熱（Excess heat）、太陽熱、バイオガス、地熱などの再生可能エネルギー（Renewable heat）への依存度が高いが、日本は 80%を化石燃料に依存している（図 5b）。

ドイツでは、廃棄物由来のバイオガスをガスのパイプラインへの混入も試行されているほか、パワートゥーガス（P2G）という取り組みも始まった。風

力や太陽光などで作った電気を水素に変え、さらにそれを二酸化炭素と反応させてメタンに変換し、既設のガスパイプラインに混入するのである。

### 5. 地域熱供給システムの変革

海外では地域熱供給のバージョンアップが進んでいる。従来は高温の蒸気や温水を鋼管のパイプラインで供給していたが、給湯や暖房にはそれほど高温である必要がないことから、60℃～70℃程度の温水を送るようにし、複合樹脂材の高い断熱性能とあわせて総合エネルギー効率を高める工夫なども始まっている。

当初の高温蒸気を熱キャリアとする第 1 世代地域熱供給システム（1GDH, First Generation District Heating System）から、中温度の温水を利用する第 4 世代（4GDH）、低温水を供給して需要家が電気温水器やヒートポンプで昇温する第 5 世代（5GDH）と、変化や進化は甚だしい。

以上のように熱のエネルギーインフラは、機能をバージョンアップできることも大きな強みになる。こうしたバージョンアップを通し、エネルギーシステムが地域社会に及ぼす産業創出の効果も大きい。また、日本の各地域にこうしたエネルギーシステム

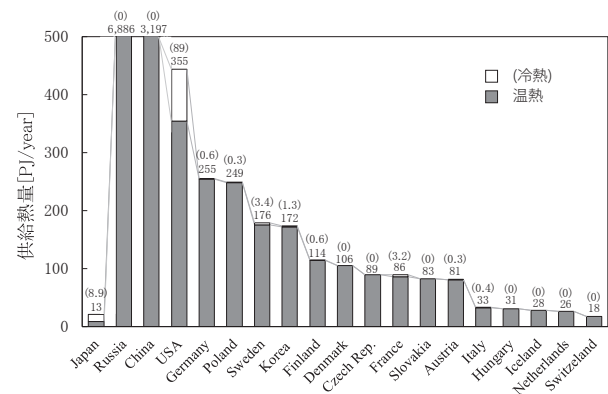


図 4 地域熱供給システムの国別導入状況

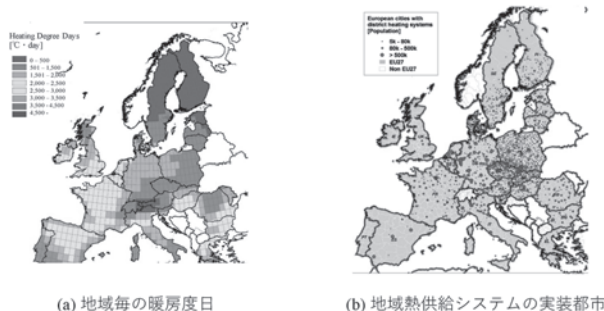


図 3 欧州の (a) 暖房度日と (b) 地域熱供給システムの実装都市

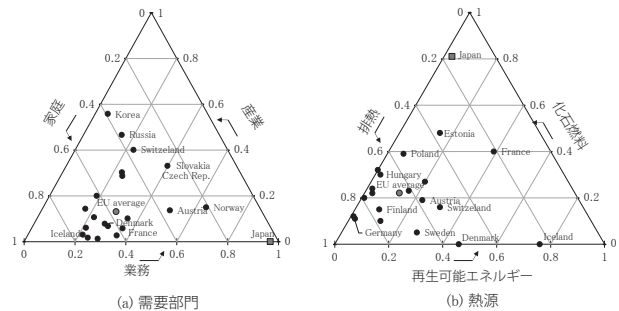


図 5 地域熱供給システム, (a) 需要部門別 (b) 熱源別のシェア比較

が出現すれば、従来の大規模集中型のエネルギー供給インフラの中では末端の毛細血管に過ぎなかった脆弱な地域社会に、自律機能が付加され、レジリエンス機能が備わることにもなるだろう。

こうした熱を有効利用するエネルギーシステムなどで構成される全体システムこそ、今後、日本がめざすべき持続可能なエネルギーシステムである。

日本の多くの事例がいまだに第1世代から3世代地域熱供給に留まっていて、内外の変化を直視しない現状を鑑みると、遅れている原因の分析こそが、キャッチアップする原点になる。

1. 熱供給事業法（1972）と熱供給事業法施行規則（1972）によれば、熱供給事業の定義としてボイラー等加熱能力を21 GJ/h以上と定めている。これは熱出力75,600 kWhに相当するので、山形県最上町や岩手県紫波町で始まったコミュニティ単位の中規模の家庭向け地域熱供給システムは、日本では対象に含まれておらず、実態が正確に把握できていない。
2. 総合エネルギー統計における熱のデータは、上記の熱供給事業法による認定事業に基づいて集計しているため、データ捕捉が一部に留まる。さらに、火力発電所の排熱、ゴミ焼却場の排熱など、欧州で主流の排熱としての熱エネルギーの存在を無視している。
3. 全国に1745ある地方公共団体には、エネルギー統計が存在しない。エネルギーの生産、流通、消費に係る信頼性のあるデータがないし、公式統計があっても、その信頼性と精度は低い。都道府県別エネルギー消費統計の精度も低い。
4. 地方公共団体の多くは、エネルギー関連政策に関する優先順位が低いために、専門職員はおろか、問題意識と能力のある担当者も少ない。経済産業省では、自治体に対する意識啓発から取り組んでいる状況だが、まだまだ理解度は低い。
5. 熱エネルギーのシステム利用の高等教育が欠けている。教科書に記載もなく、自力で英文の資料読解や、海外フィールド調査で見聞を得るのが唯一の学びである。

東日本大震災後、全国でスマートシティやスマートコミュニティの構築に向けたさまざまなプロジェクトが進んでいる。なかには太陽光発電設備を設置し、発電した電力を地元の公共施設等で消費するといった取り組みもある。しかし、熱の供給インフラが従来そのままでは、地域のエネルギー需給の実

態を見ない設備投資といわざるを得ない。

他にも課題がある。現状の総合エネルギー統計では、家庭や業務等で自家消費する太陽光発電量は、補足できていない。だから、日本の太陽光発電量は過小に評価している。木質バイオマスになると、統計ではさらに厄介である。大量に海外から調達しているEFB、PKS等の燃料区分自体が存在しないのだ。そもそも総合エネルギー統計は、貿易統計（一般統計、財務省）に根ざしているため、化石燃料の種別毎の輸入データは精度が高いが、バイオマスを含む再生可能エネルギーには手薄である。

## 6. 地域エネルギーシステムのデザイン

地域熱供給システムは、単に排熱利用に留まらず、エネルギーシステムの複層化を意味する。再生可能エネルギーの間欠性電源の受け皿として、水素に加えて熱が加われば、自然界の変動成分を調整して需要家が活用できる。脱炭素社会デザインに向けた持続可能なエネルギーシステムのデザインにて、重要な役割を担うのである。

地域のエネルギーシステムの最適化を達成するためには、まず地域エネルギー需給の実態を把握することが重要となる。日本列島は南北に長い。地域ごとに使用できる燃料も、需要パターンも、再エネ資源もまったく異なる。それを把握するために、エネルギー消費量の地域空間分布と時間変動データ取得し、電力、熱、輸送用燃料などのキャリアごとのレイヤー構造のデータベースを作成するのである。

海外では、21世紀初頭から、持続可能な社会システム構築のために、国単位から地域単位の分析と、それに必要なデータベース整備へと軸が移行し、データ分析の空間解像度が飛躍的に向上している。たとえば、米国オバマ政権下の復興・再投資法（2009）では、エネルギーのインフラ整備、高効率化と再生可能エネルギー導入が計画的に進められた。その後、米国エネルギー省では、各州のエネルギー需給統計データベースの整備とあわせて、化石燃料と再エネの賦存量分布、エネルギーインフラ配置等の全国版の電子地図情報（U.S. Energy Mapping System）が公開されている。近年では、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）が主導して、再生可能エネルギーのデータセット、電子地図、モデル、分析ツールなど研究者の支援環境を整備するとともに、これらの研究成果を活用した社会実装の利便性も高めている。

欧州では、EUの国際プロジェクトRE-

INVESTMENT (2017) によるエネルギーインフラのバージョンアップと再投資計画, THERMOS (2020) による地域熱供給の設計支援ツール開発等がプロジェクトとして進行中である。それらの研究成果として、エネルギーデータ分析やシステム設計など、数理モデルとフィールドデータを重ね合わせたデザイン手法が生み出されて、欧州各都市の再開発計画の立案に反映されている。

地理情報システム (GIS) を利用したこのデータベースは「熱需要マップ」または「エネルギー需要マップ」と呼び、1990年代から欧米では先行して整備が進んでいる。客観的データに基づいてエネルギーインフラを地域内に最適配置する投資をサポートする優れたものである (図6)。欧州では、こうしたマップを利用し、地域の需要に見合うエネルギーシステムを、それぞれの地域の担い出がデザインして実現している。日本はこれまで、そうした地域の需要実態に合ったエネルギーシステムに対する認識が希薄だった。大都市圏での資本投資を先進事例として、その経験を地方部に波及させるという水平展開モデルは通用しない。

欧州でのエネルギーインフラを組み込んだ街づくりと、その運用実態を深く学ぶことが重要だ。また、エネルギーシステムを俯瞰しデザインできるシステムエンジニアの育成が重要となるだろう。気候変動に始まる持続可能性への追求を国際社会の新たな普遍性とすれば、日本社会が輸入油漬けシーチキンとして、特異性溢れる国に留まってはならない。地域社会が乗り越えるべきハードルは高いが、道のりは

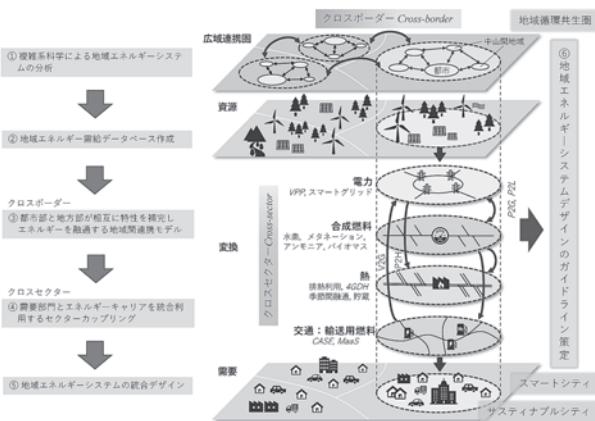


図6 地域熱供給システムを実装する社会デザイン

明瞭である。

### 著者紹介



【名 前】中田俊彦 (なかたとしひこ)

【生年月日】1960年10月12日(満59歳)

【現 職】東北大学 大学院工学研究科 教授

### 【略 歴】

- 1983年 東北大学 工学部 機械工学科 卒業
- 1985年 同大学院 修士課程 修了
- 1985年 財団法人電力中央研究所 勤務 (92年に同主査研究員)
- 1993年 東北大学 博士 (工学)  
東北大学工学部 助教授
- 1995年 東北大学大学院工学研究科 助教授  
この間, 1997-1998年に米国ローレンス・リバモア国立研究所にフルブライト研究員として留学。
- 2002年 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻 助教授
- 2006年 現 職

【専門分野】エネルギーシステムの統合デザインと分析, エネルギー経済工学

【委員等】政府復興推進委員会委員, 仙台市環境監査委員会委員長, 福島県環境創造センター部門長, 福島市環境審議会委員長, みちのく環境管理規格代表, 宮古市スマートコミュニティ推進協議会会長等。

【主な表彰】電力中央研究所所長表彰 (1991年), 日本燃焼学会技術賞 (1993年), 米国機械学会論文賞 (2000年), 日本エネルギー学会論文賞 (2005年, 2017年) ほか。

【主な著作等】岐路に立つ震災復興 [東大出版会 (2016)] (共著)。

エネルギーの貯蔵・輸送. [(株) エヌ・ティー・エス, (2008)] (共著)。

電気事業の構造改革. [技術経済研究所, (2002年)] (翻訳)。

リスク解析学入門-環境・健康・技術問題におけるリスク評価と実践. [シュプリンガーフェアラーク東京, (2001年)] (翻訳)。

不確実性と人類の未来-リスクに挑む新サービス経済. [日科技連, (2000年)] (共著) ほか。