

みずほ情報総研レポート

vol.18
2019

CONTENTS

社会動向レポート

- ◆「人生百年時代」を検証する
- ◆行政への浸透に向けたEBPMの課題とその一方策
～EBPMを契機とした行政・研究の連携を～
- ◆再生可能エネルギーの現状と将来(2019年版)
―出力抑制シミュレーションによる蓄電池併設の効果の分析―
- ◆業務部門の照明における温暖化対策の更なる推進に向けて
- ◆中長期的な気候変動対策における国際協力とコ・イノベーション
- ◆グリーンボンドとEUタクソノミー
―企業の移行と他者貢献の促進に向けて―
- ◆MaaSの現状と、わが国でMaaSを導入する上での重要な2つの視点
～地域ごとの“MaaS+”～

技術動向レポート

- ◆蓄電池技術はどこに向かうのか？
―一次世代・革新型蓄電池技術の現状と課題―
- ◆関連語辞書の自動生成技術の研究開発
―「寄り道検索」が導く新発想―

社会動向レポート

「人生百年時代」を検証する	2
社会政策コンサルティング部 主席コンサルタント 仁科 幸一	

行政への浸透に向けた EBPM の課題とその一方策	11
～EBPM を契機とした行政・研究の連携を～	
社会政策コンサルティング部 チーフコンサルタント 森安 亮介	

再生可能エネルギーの現状と将来(2019年版)	21
—出力抑制シミュレーションによる蓄電池併設の効果の分析—	
グローバルイノベーション&エネルギー部 チーフコンサルタント 蓮見 知弘	
コンサルタント 境澤 亮祐	
コンサルタント 古林 知哉	

業務部門の照明における温暖化対策の更なる推進に向けて.....	34
環境エネルギー第1部 チーフコンサルタント 佐野 翔一	
コンサルタント 横尾 祐輔	
次長 松井 重和	

中長期的な気候変動対策における国際協力とコ・イノベーション.....	45
環境エネルギー第1部 地球環境チーム コンサルタント 長島 圭吾	
グローバルイノベーション&エネルギー部 シニアコンサルタント 熊久保 和宏	

グリーンボンドと EU タクソノミー.....	52
—企業の移行と他者貢献の促進に向けて—	
環境エネルギー第2部 シニアコンサルタント 永井 祐介	

MaaS の現状と、わが国で MaaS を導入する上での重要な2つの視点	63
～地域ごとの“MaaS+”～	
経営・IT コンサルティング部 コンサルタント 西脇 雅裕	

技術動向レポート

蓄電池技術はどこに向かうのか?	72
—次世代・革新型蓄電池技術の現状と課題—	
サイエンスソリューション部 チーフコンサルタント 茂木 春樹	
グローバルイノベーション&エネルギー部 コンサルタント 佐藤 貴文	
環境エネルギー第1部 チーフコンサルタント 吉田 郁哉	

関連語辞書の自動生成技術の研究開発.....	93
—「寄り道検索」が導く新発想—	
情報通信研究部 チーフコンサルタント 山泉 貴之	

社会動向レポート

「人生百年時代」を検証する

社会政策コンサルティング部
主席コンサルタント 仁科 幸一

毎年厚生労働省から公表される平均寿命の伸びが、長寿化の進展を示す指標として注目される。平均寿命とは、新生児の平均余命のことで、全年齢層の状況を示す指標である。しかし、長寿化を「老後が長くなること」、ととらえた場合、その指標として必ずしも適当ではない。また、近年、「人生百年時代」ということばが使われるようになりつつあるが、本当に老後はそこまで長いものとなっているのか。

本稿では、「生命表」データの分析を通じて、「人生百年時代」のリアリティを検証する。

はじめに

最近、「人生百年時代」という言葉をしばしば耳にする。

国会図書館の雑誌記事検索によれば、「人生百(100)年」というタイトルの記事の初出は2004年⁽¹⁾。その後は年に数件程度であったが、2017年は34件、2018年は217件と飛躍的に増加している。これらのテーマは多岐に及ぶが、長寿化が進み100歳まで生きることを念頭に置いた人生設計の必要性を説くものと、長寿化を前提とした社会システムの再構築の必要性を説くものとに大別される。いずれにせよ、「人生百年時代」がキーワードとして定着しそうな兆しがみられるが、これを自分のこととして現実味をもって受けとめられないというのが筆者の実感だ。

本稿では、厚生労働省の「完全生命表⁽²⁾」をてがかりに、わが国の長寿化の推移と現状を概観する。今日、「人生百年時代」はどの程度のリアリティをもっているのだろうか。

1. 平均寿命は戦後急速にのびた

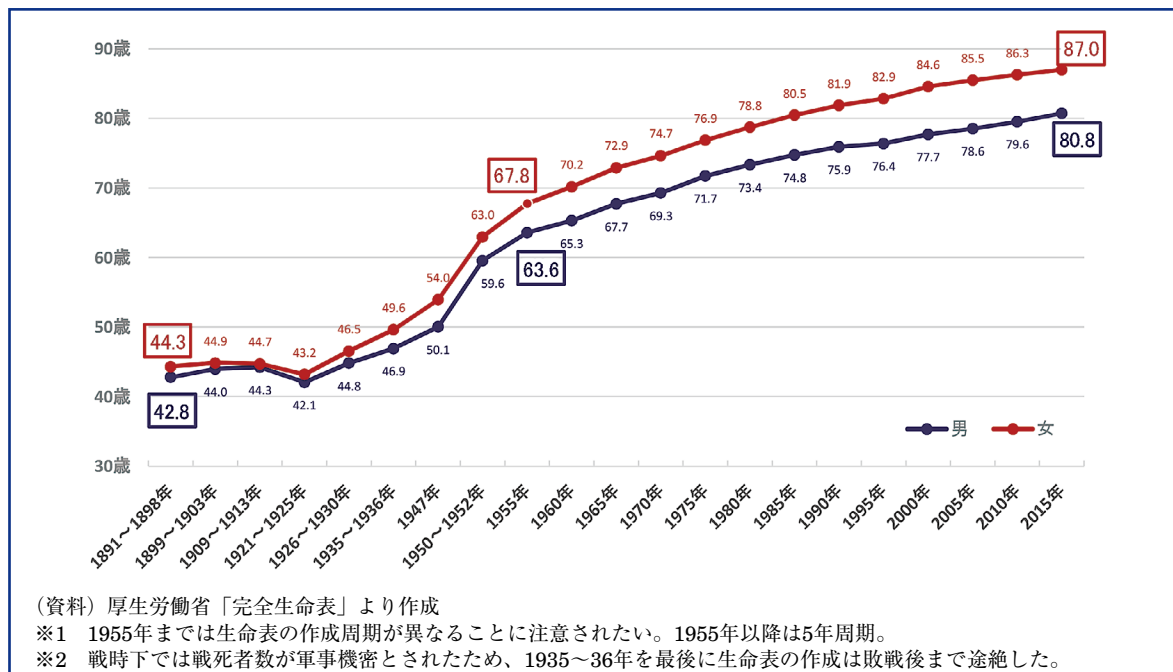
わが国の平均寿命がどのように推移してきたかを概観してみよう(図表1)。

日清戦争(1894～95年)の前後にあたる1891～98年の平均寿命は、男42.8歳、女44.3歳である。当時の就労人口のおよそ7割は農業に従事。1874年の「医制」⁽³⁾公布からおよそ20年と、近代医療制度の普及は限定的だった。こうしたことから、出生・死亡の動向は江戸時代末期とほぼ同水準であったと推察される。

そのおよそ60年後にあたる1955年の平均寿命は、男63.6歳、女67.8歳。敗戦から10年を経て経済・社会が落ち着きを取り戻し、後の高度経済成長の起点ともいえる時期である。国民の医療サービスのアクセシビリティを飛躍的に向上させた国民皆保険の確立はその6年後。当時の健康保険加入者は人口の7割程度にとどまっていた。

さらにその60年後にあたる2015年の平均寿命は、男80.8歳、女87.0歳。この間、全国民が公的医療保険に加入する国民皆保険が実現すると

図表1 わが国の平均寿命の推移



共に、医療施設も充実した。また、この間の診療技術の進歩は目覚ましいものがあった⁽⁴⁾。

この間のトレンドをみると、男女共に60年でおおよそ20年ずつ平均寿命が伸びたことになる。

だが、素朴な疑問も残る。平均寿命が40歳代前半であった明治期には、40歳を超えた者は人生の末期という意味での「老人」だったのだろうか。

2. 平均寿命とは何か

平均寿命とは亡くなった人の年齢の平均値というように受け止められがちだが、そうではない。世代によって出生人口が異なるため、死亡者の年齢の単純平均を求めると出生人口の多い世代の影響が大きくなってしまう。そこで、年齢(出生年)別に出生者10万人あたりの生存(死亡)者数、いうなれば「率」に換算する。

図表2は、2015年の男性の年齢別出生児10万人あたり生存者数を示している(図中の水色の線)。10万人の出生児は死亡によって徐々に減

少し、112歳に生存者数は1人になる。すなわち、男性の新生児が112歳に到達する確率は10万人に1人ということになる。

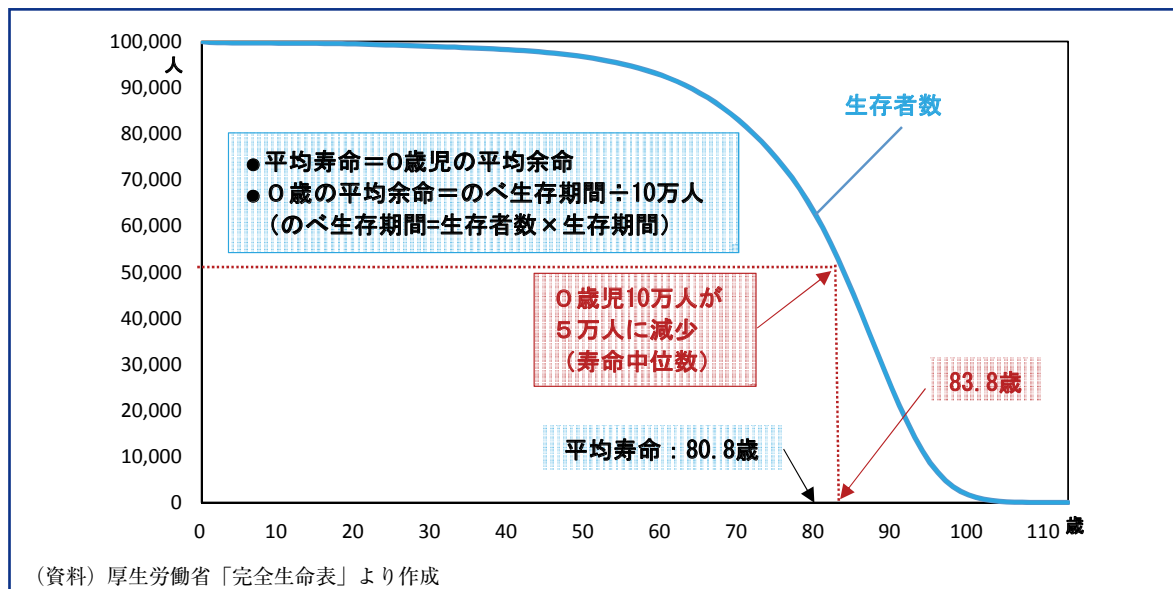
平均余命とは、特定の年齢を起点とした「のべ生存期間」(＝生存者数×生存期間)を求め、これを起点とする年齢の生存者数(0歳を起点とする場合は10万人)で割って求める指標、いうなれば生存期間の期待値である。0歳を起点とした平均余命を平均寿命とよんでいる。

平均寿命と似て非なる概念が、寿命中位数年齢である。これは、特定の年齢の生存者数が半分に減少する年齢をいう。例えば65歳の寿命中位数年齢というのは、65歳で開催した同窓会の参加者の半数が亡くなる年齢ということである。

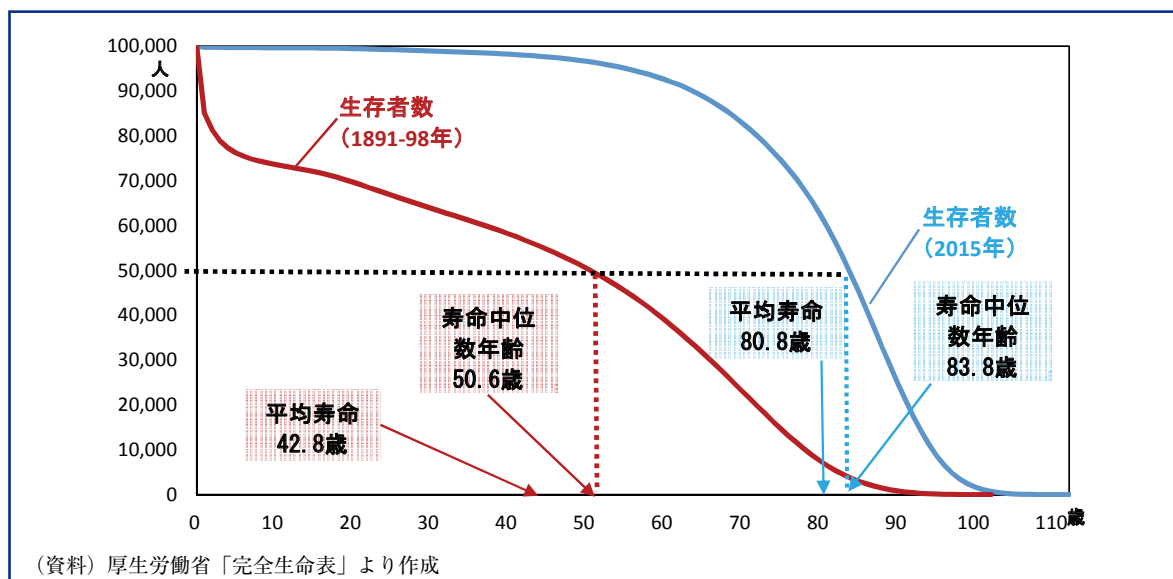
2015年の生命表によれば、10万人いた男の新生児が5万人まで減る年齢は83.8歳となる。もし年齢別死亡率(生存率)が将来も変わらないと仮定すれば、2015年の出生児の半数が83.8歳まで生存すると見込まれるということになる。

図表3は、2015年と1891～98年の男性の年齢

図表2 平均寿命と寿命中位数(2015年・男性)



図表3 平均寿命と寿命中位数年齢(男性・1891~98年と2015年の比較)



別生存者数、平均寿命、寿命中位数年齢を比較している。1891~98年の平均寿命は42.8歳(2015年は80.8歳)、寿命中位数年齢は50.6歳(2015年は83.8歳)であり、いずれも大きく伸びている。

注目していただきたいのが、1891~98年にあっては、若年層、特に乳幼児期の生存者数の

減少が現在と比較にならないほど大きいことである。2015年では10歳時点の生存者数は99,668人であるのに対して、1891~98年では73,655人と出生児の4分の3に満たない。男子の出生者の4分の1強が10歳を迎えることなく早世している。現代では、七五三は生活行事に過ぎないが、年少者の死亡率が高かった時代には、無事に3歳、

5歳、7歳を迎えることは切実に言祝ぐべきことだったのである。

前述のように、平均寿命は「のべ生存期間」を起点の人口(この場合は10万人)で割って求めるため、年少の死亡者が多いと平均余命(平均寿命)は低下する。寿命中位年齢も同様に、年少の死亡者の影響を受けて1891～98年では50.6歳にとどまっている。図表3に示されているように、男の平均寿命が42.8歳の1891～98年であっても、全ての者が50歳を迎えることなく亡くなるわけではない。

全ての世代にわたる保健福祉水準を総合的に示す指標として、0歳の平均余命である「平均寿命」が有効であることはいうまでもない。しかし、長寿化を「老後の期間が長くなること」ととらえた場合、若年期の死亡を控除した平均余命や年齢別生存率にも着目すべきなのである。

3. 長寿化はどこまで進んだのか

(1) 高齢者をどうとらえるか

① 高齢期の定義

長寿化を「老後の期間が長くなること」ととらえる場合、高齢期を何歳で区切るかということが重要な問題となる。

一般に高齢期とは65歳以降をさすが、この定義は「1965年に世界保健機関(WHO)が、65歳以上の人口が全人口の7%を超えると高齢化社会とする、という見解を発表したことが契機」であり、「医学・生物学的な根拠はなく、当時の欧米諸国の平均寿命が男性66歳前後、女性72歳前後であったことからそのまま使われるようになった」ものだ⁽⁵⁾。必ずしも合理的根拠があるというわけではない。しかし、医学・生物学的知見を基礎とするにせよ、社会的な地位や役割を基礎とするにせよ、長期にわたるデータが得にくく、また、妥当性の解釈余地が大きい。

こうしたことから、本稿では、高齢期の始期を65歳とし、一部、参考値として55歳と75歳を始期とするデータを示すこととする。ちなみに55歳とは1955年当時の厚生年金の支給開始年齢、75歳は後期高齢期の起点にあたる。

② どれくらいの人が高齢期に到達できたのか

図表4は0歳を起点とする年齢別生存率を示している。65歳に到達する者の率は、1891～98では男性31.5%、女性35.4%、1955年では男性61.8%、女性70.6%、2015年では男性88.8%、女性94.2%となっている。明治期は若年早世者が多いため、高齢期に到達すること自体が「狭

図表4 年齢別生存率

年齢	1891～1898年		1955年		2015年	
	男	女	男	女	男	女
0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
10	73.7%	75.5%	93.5%	94.3%	99.7%	99.7%
20	69.7%	71.1%	92.5%	93.5%	99.5%	99.6%
40	58.2%	57.8%	87.0%	89.0%	98.2%	99.0%
55	45.4%	46.9%	77.5%	81.7%	95.1%	97.2%
65	31.5%	35.4%	61.8%	70.6%	88.8%	94.2%
75	14.7%	18.9%	34.6%	47.6%	74.6%	87.7%

(資料) 厚生労働省「完全生命表」より作成

き門」であったのに対して、現代では9割前後の者が高齢期を迎えることができる。

(2) 高齢者の平均余命の変化

図表5は、55歳、65歳、75歳の平均余命のおよそ60年ごと（1891～98年、1955年、2015年）の変化を示している。

① 1891～98年

55歳に到達した者の平均余命は男性では15.7年（70.7歳）、女性では17.4年（72.4歳）。

65歳に到達した者の平均余命は男性で10.2年（75.2歳）、女性で11.4年（76.4歳）。

75歳まで到達した者は男性で6.2年（81.2歳）、女性で6.7年（81.7歳）となっている。

図表4で示したように、高齢期に到達できる者の割合は現代と比べて小さいが、高齢期を迎えることができた者については、男女ともに70歳を超えている。寿命は意外に長かったという

のが率直な感想である。当然、40歳を超えたら老人というわけではなかったと思われる。

② 1955年

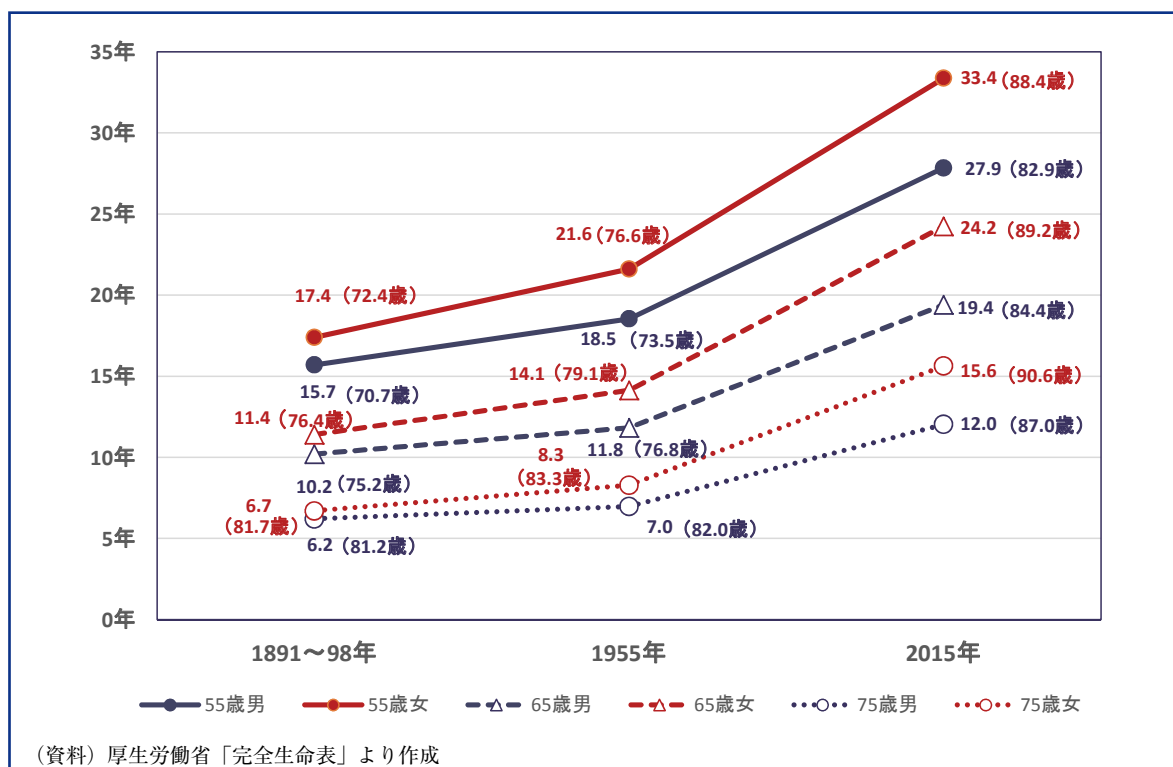
およそ60年間を経た1955年、55歳の平均余命は男性18.5年（73.5歳・2.8年の伸び）、女性21.6年（76.6歳・4.2年の伸び）に伸びている。65歳の平均余命は男性11.8年（76.8歳・1.6年の伸び）、女性14.1年（79.1歳・2.7年の伸び）となっている。75歳では男性7.0年（82.0歳・0.8年の伸び）女性8.3年（83.3歳・1.6年の伸び）となっている。

いずれの年齢の平均余命も伸びているが、図表1に示した平均寿命と比べると、その伸びは小さい。この間の平均寿命の伸びは、若年者（特に子ども）の死亡率の低下の影響が大きかったことがうかがえる。

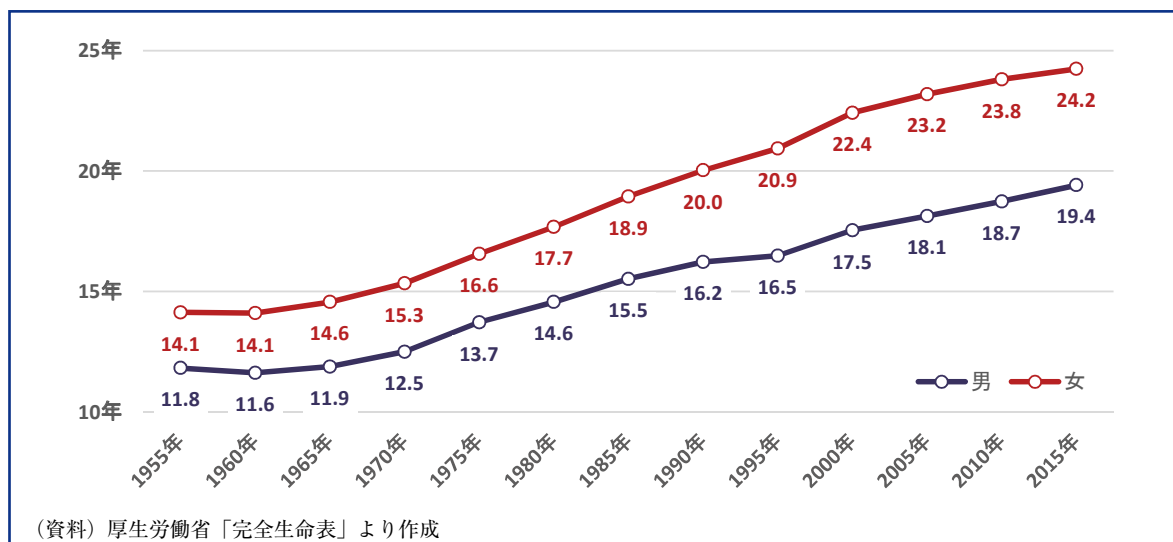
③ 2015年

1955年からの60年間に、65歳の平均余命は男19.4年（84.4歳・7.6年の伸び）、女性24.2年（89.2

図表5 高齢者の平均余命の変化



図表6 65歳平均余命の推移



歳・10.1年の伸び)、75歳では男12.0年(87.0歳・5.0年の伸び)女15.6年(90.6歳・7.3年の伸び)となっている。1891～98年から1955年の60年間と比べ伸びが大きい。特に75歳に到達した者は、男女いずれも「人生およそ90年」が現実のものとなっていることがわかる。

④ 1955年以降の65歳平均余命の推移

1955年から2015年までの65歳平均余命の推移(図表6)をみると、1960年以降、多少の波はあるが今日までほぼ一貫して伸びている。平均余命の変動に影響を与える要因⁽⁶⁾は多岐にわたるが、国民の医療サービスへのアクセシビリティを大きく改善した国民皆保険のスタートが1961年であることを勘案すれば、これが長寿化に一定の影響を与えたものと考えられる。

(3) 65歳の寿命中位数年齢(図表7)

65歳の人口が半減する年齢は、1891～98年は男性74.4歳、女性75.7歳となっている。60年後の1955年では、男性は76.2歳(1.9年の伸び)、女性は78.9歳(3.3年の伸び)である。さらに60年後の2015年では、男性85.2歳(9.0年の伸び)、女性は90.4歳(11.5年の伸び)である。

この指標からも、1955年以降の伸びが顕著であることがわかる。

(4) どれくらいの人々が100歳に到達できるのか

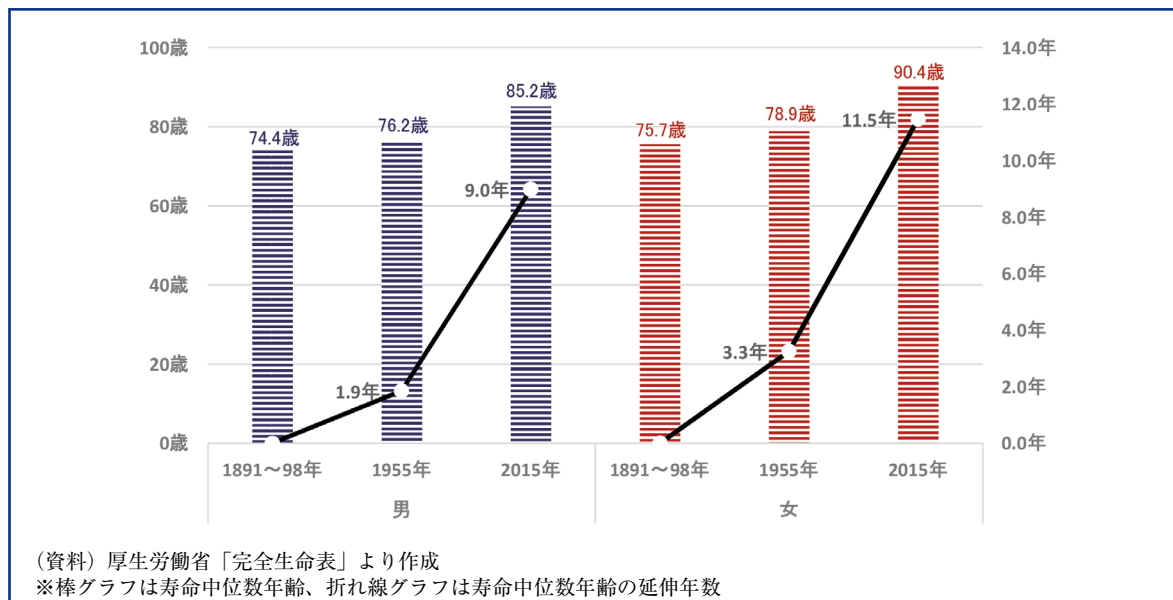
図表8に示す100歳の生存率(100歳に到達することができる者の割合)をみると、明治期も1955年も男女共に0に近い。一方、2015年では男性の1.6%、女性の6.7%が100歳に到達している。過去と比較すれば100歳に到達することのできる確率は飛躍的に高くなっている。しかし、男性の約63人に1人、女性の15人に1人という水準で「人生百年時代」と言い切るには躊躇が残る。

(5) わが国の長寿化は突出しているのか

G7参加国の65歳時点の平均余命を比較すると(図表9)、男性についてはカナダ、フランスがわが国よりわずかながら長く、女性についてはわが国が最も長くフランス、カナダがこれに続いている。男性では最も長いフランスと短いアメリカ・ドイツの差は1.9年、女性では最も長い日本と短いアメリカとの差は3.7年となっている。

多少の差はあるが、長寿化は先進国に共通し

図表7 65歳の寿命中位数年齢の変化

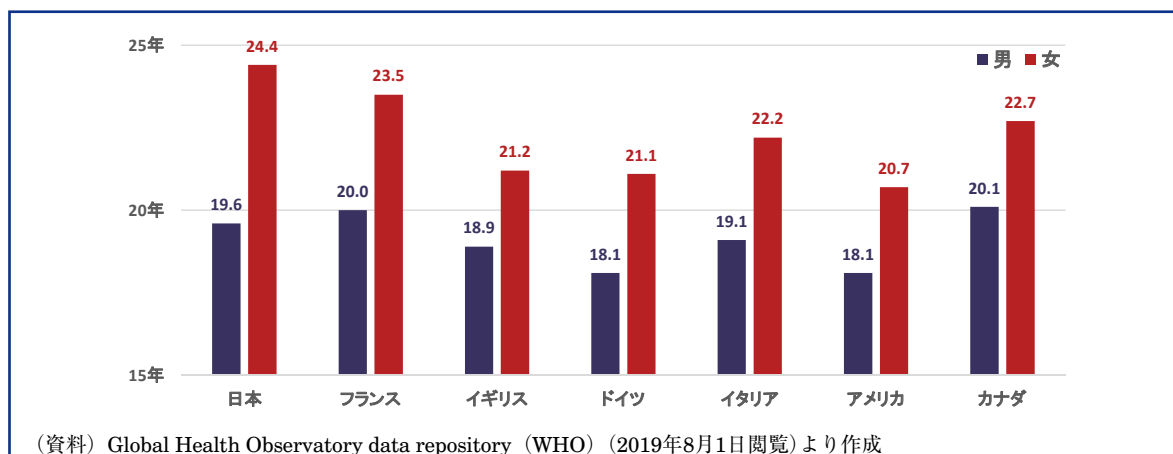


図表8 年齢別生存率

年齢	1891～1898年		1955年		2015年	
	男	女	男	女	男	女
0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
65	31.5%	35.4%	61.8%	70.6%	88.8%	94.2%
80	7.6%	10.6%	20.0%	31.9%	62.6%	80.9%
90	0.8%	1.4%	2.7%	6.2%	24.9%	49.1%
100	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.6%	6.7%

(資料) 厚生労働省「完全生命表」より作成

図表9 65歳時点の平均余命の国際比較(2016年)



てみられる現象であり、わが国はフランス、カナダ、イタリアとともに平均余命が長いグループにはあるが、特に突出した存在とはいえない。長寿化は先進国共通の現象なのである。

4.「人生百年時代」のリアリティ

(1)現状は「人生90年」

以上の検証を通じて、以下のことが明らかになった。

第1に、高齢期の延伸という意味での長寿化が進展したのは、1960年代以降のことであり、現在まではほぼ一貫して伸びている。

第2に、とはいえ実際に100歳まで到達できるのは、男性では2%に満たず、女性でも1割に満たない。90歳到達者であれば男性ではおよそ4分の1、女性ではおよそ半数ということを踏まえれば、「人生90年時代」は現実のものではあるが、「人生百年時代」というにはためらいが残る。

第3に、わが国が長寿国であることはいくまでもないが、決してわが国に特有の現象ではなく、先進国に共通してみられる現象である。長寿化の要因は医療のみならず、生活習慣、住宅環境、就労環境、都市環境など多岐にわたると考えられるが、わが国に特有な要因だけを取り出して称揚すること⁽⁷⁾には慎重であるべきだろう。

(2)長寿化は今後も進むのか

1960年代以降のわが国の長寿化傾向は今後どのように展開するのだろうか。筆者は、長寿化は今後も進展するとみている。

長寿化の要因は多岐にわたるが、生活習慣、就労環境、住宅環境、都市環境が、高齢者の余命を短くするほど大きく変動するとは考えにくい。一方、医療の技術進歩があらたな展開を見せており、その動向次第では、高齢者の積極的

治療の可能性が拡大するとみられる。

一般に加齢に伴って侵襲性(身体へのインパクト)が高い治療の適応が難しくなる⁽⁸⁾。今日、外科領域では、内視鏡手術、血管内治療、ロボット手術などの低侵襲性手術が適用範囲を拡大しつつある。また、バイオ医薬、遺伝子治療、再生医療などが実用化に向けて研究・開発にしのぎをけずっている。

もちろん、新型インフルエンザなどの新たな感染症の蔓延、耐性菌の発生など無視しがたいリスクも存在するが、医療技術の進歩が後期高齢者への積極治療の可能性を上げ、高齢者の平均余命を延伸していく可能性は小さくはない。それがいつ実現するかを具体的に特定することは筆者の手には余るが、「人生百年時代」が将来実現する可能性は低くはない。

こうした変化に対応した社会システムをどのように再構築すべきか、議論に費やす時間は意外に短いかもしれない。

注

- (1) 野口忠「巻頭言 人生100年時代の栄養学を目指して」FFI ジャーナル第209巻6号、広瀬信義「人生百年時代」商工ジャーナル30巻4号。
- (2) ある人口集団の死亡状況が今後変化しないと仮定したときに、各年齢の者が生存する確率や平均してあと何年生きられるかという期待値などを集計した統計。国勢調査をデータソースとして5年ごとに作成されるのが「完全生命表」、推計人口をデータソースとして作成されるのが「簡易生命表」。第1回生命表は1891～98年の人口をもとに作成され、1955年以降は国勢調査の実施に合わせて5年周期で完全生命表が公表されている。
- (3) 当時の大都市圏であった東京府・大阪府・京都府を対象として、文部省医務局が1874年に公布した、医師等の養成、医療制度、衛生行政に関する規定。わが国の近代医療制度の原点ともいべき法令である。
- (4) 細菌性感染症治療にめざましい効果のある抗生物質による投薬治療、画像診断機器(CT・コンピュータ断層撮影装置、MRI・核磁気共鳴画像診断装置、エコー・超音波検査装置)や内視鏡検査・治療装置などの開発と普及が例としてあげられる。

- (5) 「高齢者に関する定義検討ワーキンググループ報告書」(2017年・日本老年学会・日本老年医学会)
- (6) 医療の普及や技術進歩のほか、生活習慣(栄養・食習慣、喫煙、飲酒、睡眠、運動、ストレスなど)、就労環境(労働安全・衛生、労働時間、ストレス)、住宅環境(室温や衛生状況)、都市環境(上下水道、大気・水質汚染)の要因が考えられる。
- (7) その例として、日本的な食習慣がわが国の長寿の最大の要因とするような言説がある。すでにみたように、長寿化は先進国に共通してみられる現象であり、こういった言説にどの程度の科学的根拠があるのか、疑問なしとはしない。
- (8) 侵襲性の高い治療を強行すれば、治療自体は成功したが侵襲性によって患者が亡くなってしまうということになりかねない。医師は治療によって得られるメリットと侵襲性によるリスクを天秤にかけながら治療方法を判断している。

社会動向レポート

行政への浸透に向けた EBPM の課題とその一方策

～EBPM を契機とした行政・研究の連携を～

社会政策コンサルティング部
チーフコンサルタント 森安 亮介

政府の政策立案の在り方を変える取り組みとして、2018年頃から各省庁で対応が進められている EBPM（エビデンスに基づく政策立案）。本稿ではその概要や発展経緯を概観するとともに、推進上の3つの課題を整理している。その上で、とくに行政と研究の協業体制の在り方について、解決の方策を検討している。

1. はじめに

少子高齢化の進展に伴い、国家財政はますます厳しくなることが予想されている。限られた資源を有効に活用するためにも、わが国の政策は、課題をより適切に把握した上で立案し、より有効なものを選択する必要がある。そこで着目されているのが「エビデンスに基づく政策立案（Evidence Based Policy Making。以下 EBPM という）」である。後述するように、EBPM は因果関係を示す根拠や証拠に基づいた政策の立案を行うものである。わが国では2010年代半ばから導入が検討され、2018年頃からは各省庁で EBPM 推進の組織設立や、省庁内の試行的な運用が始まっている。また、EBPM で用いられる専門的な統計手法も複数の省庁やシンクタンク等によって整理されている。なお、こうした手法はベストセラーとなった『統計学が最強の武器である』や『学力の経済学』など一般書でも紹介されており、一般的な理解も広まりつつある。

しかし、統計手法が整理されたからと言って、即座に行政が EBPM を実践できるわけではない。準備段階から実装段階に移りつつある

EBPM が、行政の政策立案現場に浸透するためには何が必要だろうか。本稿では2017年度に実施した自主研究事業「わが国の教育行政に浸透する科学的根拠に基づく政策立案（Evidence-Based Policy Making）の在り方の検討～日本型 EBPM のメソッド開発に向けて～」で得た知見をもとにしながら EBPM 推進上の課題を整理する。本稿の構成は次の通りである。まず第2節で EBPM の概要と発展経緯を概観した上で、わが国の現状を確認する。続く第3節で EBPM 推進に向けた課題を整理する。第4節ではそうした課題を踏まえた解決の道筋を考察する。

2. EBPM とは

（1）EBPM の概要と発展経緯

OECD（2007）『Evidence in Education: Linking Research and Policy』では、EBPM を「複数ある政策オプションの中から意思決定し、選択する際に、最新最良のエビデンスを、良心的に、かつ明確に活用すること」と定義している。尚、ここでいうエビデンスとは、科学的な手法をもとに因果関係が明瞭に示されていることを指している。

エビデンスを生成するための科学的な手法論

図表1：エビデンスレベルの例

エビデンスレベル	概要
レベル1	関連する全てのランダム比較実験のシステマティック・レビューまたはメタ分析によるエビデンス
レベル2	適切に設定されたランダム化比較実験から得られたエビデンス
レベル3	ランダム化されていないが、適切に設定された比較実験(準実験研究)から得られたエビデンス
レベル4	適切に設定された症例対照研究やコホート研究によるエビデンス
レベル5	記述的研究や質的研究のシステマティック・レビューによるエビデンス
レベル6	単一の記述的研究や質的研究によるエビデンス
レベル7	権威者の意見や専門家委員会の報告書によるエビデンス

(資料) Melnyk, B. M, Fineout-Overholt, E. "Evidence-based practice in nursing and healthcare; A guide to best practice". Lippicott Williams & Wilkins, 2010, p.12をもとに筆者が整理

は、統計学の発達とともに1970年代頃から発展をとげ、現在では一定の基準も確立されている。例えばEBPMの発祥である医学や疫学領域では、そうした手法の信頼性の高さ(エビデンスレベル)がランク付けされており、よりエビデンスレベルの高い手法の活用が推奨されている。

こうした科学的な手法を、政策の領域にも導入する先鞭となったのが1990年代のイギリスである。財政逼迫や公的サービスの見直しが叫ばれる中、医療分野の「コクラン共同計画」(1993年)から波及し、社会政策分野全体の「キャンベル共同計画」に適用されたことがEBPMのはじまりとされている。その後、ブレア政権によってEBPMは強力に推進され、エビデンスの生成や活用を支援する第三者機関(What Works Centre)も設立されるなど、EBPM実行のための体制が整備された。こうした動きは2000年代以降、アメリカを始め欧米諸国にも伝播し、今や世界的な潮流となっている。例えば教育領域では、アメリカの「落ちこぼれゼロ(No child Left Behind)法」(2001年)成立によって、科学的根拠に基づくエビデンスを示さない限りは教育政策の予算要求ができなくなっている。加え

て、その推進サポート体制として進められたWhat Works Clearinghouse (WWC)プロジェクトによって既存の教育研究が系統的に整理されおり、「どのような教育方法が科学的に有効か」という知見が得られるようになっている。こうした英米の事例からは、EBPMを一つの契機として科学的知見が政策立案現場や教育現場に活かされる様子も伺える。

(2)わが国のEBPMの取り組みの経緯と現状

こうした動きも背景に、わが国でもEBPM推進に向けた準備が推し進められている。2016年6月閣議決定の「経済財政運営と改革の基本方針2016(骨太の方針)」では、文教・科学技術分野の基本方針に「エビデンスに基づくPDCAサイクルの徹底」がうたわれている。さらに、同年12月施行の「官民データ活用推進基本法」に基づく基本計画において、EBPM推進が明記された上で、各府省庁において一元的な統計等データの整備・管理を行うことが記されている。翌2017年5月の統計改革推進会議では、これまでの政策立案は「往々にしてエピソード・ベースでの政策立案が行われているとの指摘がされ

てきた」と言及した上で、EBPM 推進とその推進のための統計等データの構築を一体として進めていくことが明言されている。こうした流れを受け、「経済財政運営と改革の基本方針2017」や「世界最先端 IT 国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画」に EBPM 推進体制の構築が明記され、2018年からは各省庁の EBPM 推進統括官等の新設や、省庁内のデータ活用、データ利用促進、事業効果検証への試験的導入など各省庁による推進が始められている。

3. EBPM 推進の3つの課題

(1) EBPM の実践に必要なデータの整備

①データの整備

EBPM 推進に際し、こうしたデータ整備も進められる背景には、EBPM に必要なデータの特性も関係している。前述のように、EBPM で用いるエビデンスとは「科学的なエビデンス」のことを指し、例えば一時点で得られた参加者満足度のアンケート結果などはこれに該当しない。EBPM の取り組みに際し、内閣府は図表2のようなエビデンスレベルの目安を提示しており、より高いレベルのエビデンスの生成・活用が推奨されている。このうち上位レベルに位置づけられている分析手法は政策実施前後を捉えたデータがあってこそ実施できる手法である。政策の影響や効果を検証するためには、例えば同

じ個人や企業の政策実施前後を比較して検証することが必要なためである。

同じ個人や企業など、同一サンプルを追跡的に捉えたデータはパネルデータと呼ばれ、人文社会領域においてはアメリカで1960年代から、ヨーロッパでも1980年代頃から整備されてきた。これに対し日本では1990年～2000年代に入ってから一部大学で着手され、近年になって各省庁の研究機関でデータの構築や分析事例が出始めている状況にある⁽¹⁾。

もちろんわが国には各省庁に公的統計データ、各種調査データ、行政記録など豊富で精緻なデータ・記録が存在する。しかし、これらは必ずしも政策効果の検証や研究を目的に収集されたものではないことからパネルデータ化されているわけではない。こうしたデータ・記録を追跡的なパネルデータの形にするためには、膨大なデータの再統合はもちろん、領域によっては統計法をはじめとした法制度の変更・検討や、調査目的の整理をはじめとした関係各所の諸調整なども必要となる⁽²⁾。こうした対応は、簡単に解決できる問題ではないものの、EBPM 推進の土台づくりに欠かせない重要なテーマとなっている。

②平等性や倫理面にも配慮したデータの創出

また、EBPM で求められるデータの整備は、予算や人員さえ揃えば実現できるというもので

図表2：エビデンスの質のレベルに係る目安

レベル	分析手法
レベル1	ランダム化比較実験
レベル2a	差の差分析、傾向スコアマッチング、操作変数法等
レベル2b	重回帰分析、コホート分析
レベル3	比較検証、記述的な研究調査
レベル4	専門家等の意見の参照

(資料) 内閣府「平成30年度内閣府本府 EBPM 取組方針」(2018)

はない。平等性や倫理的側面などの観点からデータ構築が困難な課題も存在する。とくに顕著な例が前掲の図表2で示したエビデンスレベル最上位に位置づけられているランダム化比較実験である。この手法については前述の『統計学は最強の学問である』『学力の経済学』などでも分かりやすく紹介されているため、なじみのある読者も多いかもしれないが、以下簡単に説明した上で、その課題について述べたい。

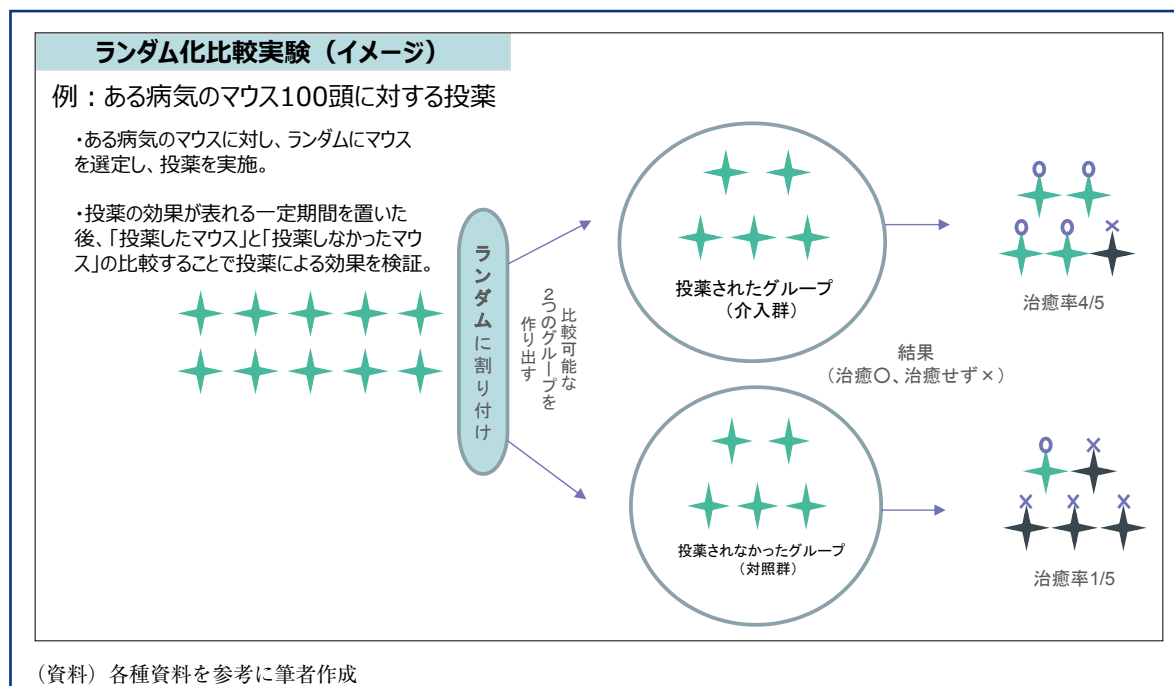
ランダム化比較実験とは、施策を実施した層(Treatment group：介入群)のみならず、比較可能な実施していない層(Control group：対照群)を準備し、両者を前後比較することで施策効果を検証する手法である。ある病気のマウス100匹を用いた治療薬の治験を例に説明したい。もしマウス100匹すべてに投薬し、一定期間後80匹が完治していたとしても、果たしてその治癒が治療薬によるものなのかよく分からない。投薬以外の何か別の要因によって完治したのかも

しれないし、何もせずとも治癒していたのかもしれない。そこで、100匹のマウスからランダムに選定し2つのグループを作る。1つのグループには投薬を行い、残りのグループには何も行わない。外的条件を同一にした上で一定期間、経過を見て両グループの治癒率の差が統計的に有意かどうかをはかる手法がランダム化比較実験である。

さて、こうしたマウス治験の例では、①マウスの個体差がない、②ランダムに割りつけることが容易、③外的環境のコントロールが可能(実験室内等)という条件が成立しているからこそ検証が可能であった。しかし例えば人間を対象とした教育効果ではそうはいかない。外的環境のコントロールという技術的側面もさることながら、生徒ごとに異なる教育を行うという平等性の観点やランダムに割りつけることへの倫理的な観点などが課題となるためである。

欧米では50年以上も前からこうした実験が数

図表3：ランダム化比較実験のイメージ



多く行われている。有名な例が1960年代にアメリカで行われたペリー幼稚園プロジェクトである。これは就学前教育の効果測定を目的に行われた社会実験であった。貧困街の児童123人を対象に、くじ引きで選んだ58人には富裕層の通うペリー幼稚園の質の高い就学前教育を2年間実施した(介入群)。選ばれなかった残りの65人は何もしない層(対照群)として振り分けられた。その後追跡的に両グループの教育効果を検証した結果、子どもたちのIQは一時的には高まるものの、その効果は8歳には消失することが明らかになった。

この研究はその後40年以上追跡した結果、非認知能力の発見にもつながったエポックメイキングな研究として経済学では世界中で知られている⁽³⁾。しかし、貧困街の児童への教育をくじ引きで選ぶ行為が果たして現代のわが国の社会通念上認められ得るか、疑問である。さらに、こうした検証によって明らかになる定量的な検証結果が、その学校や教員、生徒、地域に果たして受け入れられるかという課題もある。とくにこの課題を難しくさせるのが教育の「効果」の認識が多様なことである。治療薬の治験の例

であれば、病気の治癒や寿命延命など衆目の一致する「効果」が一定は存在する。しかし教育においては効果の定義は多様である。テストの点数の上昇なのか、人間力のような要素の向上なのか、それとも習慣化なのか…など例を挙げればきりが無い。「効果」の定義に多様な解釈があり、かつ、各学校によって教育方針も異なる中で、特定の定量的な側面を「効果」として検証する以上、学校現場に受け入れられるためには相当なコミュニケーションが必要になる。実際、後述する当社自主研究事業のヒアリングでは、ある学校の副校長から「検証結果が担当教員の評価に直結するような面があると、学校をマネジメントする立場としては、実証実験の受け入れは難しい」という声もあった。こうした問題は、関係者への事前説明や各現場との丁寧なコミュニケーションによって一定程度解消するかもしれないが、そのコミュニケーションを行う主体は誰がどのように行うのかといった点も大きな論点である。

(2) 行政への組み込み

データ整備に加えて対応が必要なのが、行政

図表4：自主研究事業の実施概要

事業名	「わが国の教育行政に浸透する科学的根拠に基づく政策立案(Evidence-Based Policy Making)の在り方の検討 ～日本型 EBPM のメソッド開発に向けて～」
実施時期	2017年7月～2018年3月
実施事項	【ヒアリング】 ・学識者 / 中央官庁の政策立案担当者 / 地方自治体の政策立案担当者 / 学校教員10名以上に対するヒアリング
	【意見交換・ワークショップ】 ・研究者・行政担当者・学校教員の三者が一同に集まるワークショップを開催。そのコンテンツの1つとして、EBPM やランダム化比較実験等を紹介した ⁽⁴⁾ 。
	【検討会】 ・EBPM がビルトインできる政策立案プロセスの在り方について

(資料) 各種資料を参考に筆者作成

の政策立案プロセスの中にいかにEBPMを組み込むかという点である。EBPMをうまく政策立案プロセスにフィットさせるための課題を検討するために、当社では2017年度に教育領域を対象としたヒアリング・検討会等の自主研究事業を実施した(図表4)。

結果、次に示す3つの課題が明らかになった。

①統計人材の育成および統計人材が活躍できる組織の整備

まず第1の課題は統計人材の育成や統計人材が活躍できる組織の整備である。EBPMを実践するためには、統計学や計量経済学などに代表される計量的手法の専門技能を会得する必要がある。例えば、イギリス政府では政策分析を担当する専門職が多数存在し、修士号や博士号を有する人材が政府エコノミストとして政策分析や評価を担っているという。わが国においても育成体系を確立し、統計に関する知識向上を求める声もある。しかし、こうした専門性は一朝一夕に獲得できるものではなく、ただでさえ多忙をきわめる行政職員が通常業務の傍ら専門性を会得することには限界があろう。他方、専門人材の登用(中途採用や任期付き常勤職の登用)も案としては考えられるが、現実的な運用を考えると、引く手あまたな専門人材をいかに獲得し定着させるか。専門人材を惹きつけるような処遇や就業環境、キャリアパス等を整備する必要がある。こうした人材の育成や登用を中長期的な課題と位置づけ、人事制度を含めた人材マネジメントの在り方の検討と実行をすること(人材開発・組織開発)がEBPM推進のために重要なテーマである⁽⁵⁾。

②行政プロセスに即した方法論の整備

前述の通り、EBPMで用いる統計分析の各種専門手法については、多くの書物やレポートで

整理されている。しかし、いざ行政職員が政策を立案する過程において「どの場面で」「どの手法を」「どのように」用いれば良いか?を示す方法論の提示は十分ではない。政策立案プロセスを起点とし、いかにEBPM的な要素を盛り込むかという視点にたったマニュアルやヒント集などの提示(メソッド開発)が必要であろう。例えばモデル事業を実施する際には、その対照群をセットする発想があるだけでも事後的な政策評価の質が高まる。また、政策課題の解決に向けた既存の先行研究・先行事例サーチだけでも、政策オプションの複数案の検討・比較に通じる。このように、仮にデータがなくてもEBPMのエッセンスを少しでも行政プロセスに取り込んでいくことがEBPM実装の第一歩になるのではないだろうか。

③コスト・ベネフィットに配慮したサポート体制の整備

EBPMの実践には、例えばデータ整備や指標の生成、対照群のセットなど、時間的・金銭的成本が追加的に発生する。コストが増えるにも関わらず、それに見合うベネフィットが存在しなければ積極的な活用は見込めない。EBPM推進の担当組織にとってはEBPM浸透が目的の一つかもしれないが、各原課の政策担当者にとってはEBPMは良い政策を立案するための手段でしかない。こうした点を踏まえて、例えば過去事例の検証を通し、EBPM導入の職員にとってのメリットが見える化するとともに、追加的なコストを抑制するような仕組み作りが必要であろう。また、仮にEBPM導入により政策の効果が高まったとしても、そのための社会的コストが高ければ持続性は見込めない⁽⁶⁾。EBPMがフィットする政策領域とそうでない領域の見極めも含め、導入に係るコスト・ベネフィットを鑑みた設計と運用が求められる。

(3)行政と研究機関の協業

課題の3点目は行政と研究のパートナーシップである。EBPM 実践のための全ての対応を行政だけが担うことは非効率的であり非現実的でもある。例えば政策評価や政策的問題の発見など、エビデンスを「つくる」過程においては、専門性を有する研究機関の対応が効果的であろう。また、研究機関との適切な連携は、前項で示した行政への組み込みに関する諸課題の解消も期待される。

たしかに現状でも行政と研究機関の協業は多数みられる。しかし、EBPM で求められる協業は、政策の設計段階から研究者も入り込み(例えば前述した対照群の準備や、効果の定義に関する設定など)リサーチデザインの観点で連携することが望ましい。その上で、政策実行後の政策評価等をフラットに検証し、課題や改善ポイントを整理することが求められる。こうした連携には、研究者側にとっては多くの時間的なコミットを必要とする上、論文などの研究成果にはつながらない可能性もある。他方、行政側からみると、学術的検証に一定の時間を要することから、行政のタイムスパンにはそぐわない可能性もある。行政、研究機関双方にとって、異なる時間軸やインセンティブをどのように結び付けられるか。両者の理想的な協業体制を見出すことが大切であろう。そのための方策の一方策については次節で詳述したい。

4. EBPM 推進に向けた一方策：研究知見を行政に活かせる協業体制の構築を

以上、本稿では EBPM におけるわが国の取組みを概観するとともに推進に係る3つの課題—(1)データの整備、(2)行政への組み込み、(3)行政・研究機関の協業—を確認した。このうち(1)(2)については既に各省庁で検討や着手がなされている。例えば厚生労働省では「厚生労働省統計改革ビジョン 2019」(2019年8月公表)

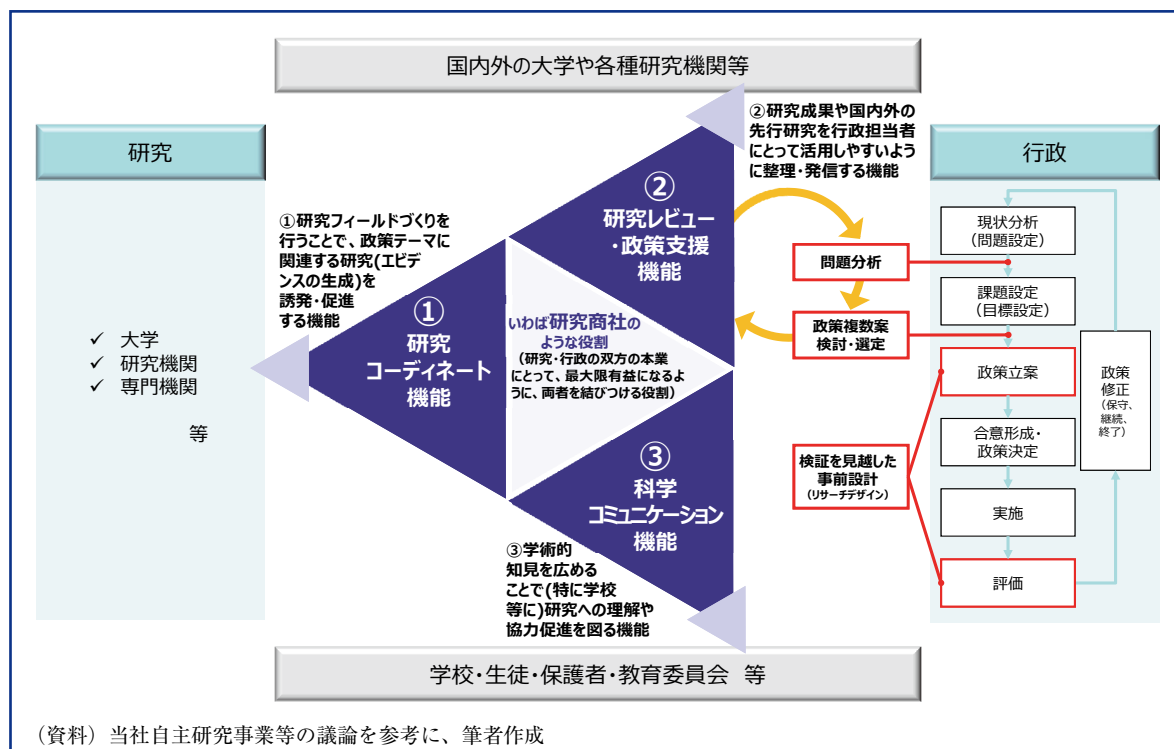
に EBPM 実践を通じた統計の利活用やデータ管理等が明記されており、実行に移される段階にある。また、人材の育成・登用についても EBPM 推進委員会「EBPM を推進するための人材の確保・育成等に関する方針」(2018年)で方針が提示され、各省庁で検討が進められている。これらは統計改革であり、行政プロセス改革であり、そして組織人事改革とも直結するテーマでもある。そのため一朝一夕で解決されるものではなく、長い道のりを着実に推進していくものである。

こうした状況を鑑み、本節では、残る(3)行政・研究機関の協業に焦点を当て、その実行に必要な機能について考察する。先述のように研究サイドと行政サイドは時間軸もインセンティブも異なっている。そのため、両者が win-win な関係になるために、各々の本業にとっても有益になるような仕組み作りが求められる。両者がうまく結びつく中間機能として、筆者は次の3つの社会的機能の拡充が必要だと考える。

まず、「①研究コーディネート機能」である。時間軸の異なる両者の win-win な体制構築の鍵は、どうしても時間軸の長くなる研究を先行させることにあろう。そこで、データ整備や研究フィールドづくりを積極的に行い、政策テーマにも関連する諸研究の発展を促すことが第一歩になるのではないだろうか。例えば、学校現場でランダム化比較実験を行おうとしても、学校関係者や保護者、教育委員会等との密なコミュニケーションや膨大な諸調整が欠かせない。こうしたコミュニケーション・諸調整を第三者機関が担い、研究者は研究に集中できるような良質な研究フィールドを築くことが求められる。

しかし、そうした研究成果(すなわちエビデンス)が学術界のみに発信されているのは政策活用には至らない。そこで重要になるのが、「②研究レ

図表5：EBPM実装を促す3つの機能—教育領域を念頭に—



ビュー・政策支援機能」である。上述の研究成果や海外も含めた先行研究を、行政担当者のニーズに即して分かりやすく伝えることが、エビデンスの行政への取り込みを促すために有効な手段である。例えばイギリスの What Works Centre やアメリカの What Works Clearinghouse では研究知見が分かりやすく発信されており、研究と行政・教育現場をつなぐ役割を果たしている。こうした発信は行政担当者のエビデンス生成やエビデンス収集の負担を軽減することから、EBPM 推進を促すものとなろう。

そして、最後に必要なのが、そうした研究の有用性や必要性を広く発信し、研究への理解を広める「③科学コミュニケーション機能」である。例えば教育に関する研究知見は、本来的には教育の質向上にも役立つものであり、丁寧なコミュニケーションさえ行えば学校側にも有用である。研究成果の解釈や留意点、活用可能性

等について丁寧に説明するとともに、世に広く事例や意義を発信することが、共感者の拡大を通し、実証フィールドの提供可能性の拡大にもつながる。実際、筆者も政策研究大学院大学(GRIPS)で実施したセミナーで100名程度の教育関係者にランダム化比較実験等を紹介したところ、少なくとも5つの学校や自治体で「工夫次第によって自組織での実施が可能である」との意見が表明された⁽⁴⁾。このような事例を一つでも多く創出し、研究フィールドの輪を広めていくことが必要である。

こうした3つの機能はEBPMに先行する医療領域のEBM (Evidence Based Medicine)のエビデンスを「つくる」「つたえる」「つかう」の3つの段階にも即したものである⁽⁷⁾。即ち、まず①研究コーディネート機能を通してエビデンスを「つくる」支援を行う。次に②研究レビュー・政策支援機能によってエビデンスを「つたえる」

とともに、行政がエビデンス「つかう」ための支援を行う。そして、こうしたサイクルが自律的に展開される土台として③科学コミュニケーションによる支援を行う。このように、単に行政・研究の両者間の仲介ではなく、両者各々の本業にとって最大限有益になるように付加価値を高めながら介在する役割—研究知見に関する商社のような役割—が、上述の3つの機能を果たす上で重要だと考える。もちろんこうした役割は現在でも大学、各種研究機関、行政、NPO、シンクタンク等が担っているが、前述した機能の担い手として、今後一層の発展と貢献が必要となる。

5. 結びにかえて

以上、本稿ではEBPMやその取組みを概観するとともにEBPM推進の3つの課題を確認した。その上で、とくに行政と研究機関の協業に関する解決の一方策を検討した。歴史を紐解くと、EBPMのさきがけとなったイギリスも政府の旗振りだけでその実践に至ったわけではない。政府が取り組むはるか以前から、活発な研究コミュニティを中心に研究知見を実践に活かす文化があり、そうした土壌があったからこそ花開いた経緯がある。現在各省庁で検討や実行がされているEBPMを1つの契機として、むしろわが国の研究土壌にも目を向けて対応していくことが結果的にはEBPMの推進に結びつくのではないだろうか。

注

- (1) 例えば経産省の経済産業研究所(RIETI)では慶應義塾大学 山本勲教授をリーダーとしたチームで企業・従業員をマッチングしたパネルデータが構築されている。また文科省の科学技術・学術政策研究所(NISTEP)では、博士取得人材を追跡したパネルデータが構築されている。このデータの分析には筆者も参加しており、調査概要や結果については「博士人材追跡調査 第2次報告書」を参照頂きたい。

- (2) 研究で必要とされる統計・データの条件や、現状のわが国の政府統計に係る課題については川口(2019)に詳しい。
- (3) 14歳時点での基礎学力の達成度や高校卒業率に統計的に有意な差が生じ、40歳時点では月収、持ち家率、犯罪率等についても教育プログラムを受けた層の方が優れているとの検証結果が出ている。
- (4) ワークショップは2018年3月10日(土)に政策研究大学院大学で実施した。文部科学省職員や文部科学省所管の研究所の研究者、自治体職員、教育やEBPMを研究する学者、教育に関わる民間企業など計122名が参加した。
- (5) 社会科学の専門性を生かした政策形成の導入については内山(2015)に詳しい。イギリス政府における公務員制度や政官関係のあり方については内山・小林・田口・小池(2018)に詳しい。
- (6) EBPMの導入効果に対する議論も存在する。例えば関沢(2017)・関沢(2019)ではEBPMがモデルとしている医療のEBM(エビデンスに基づく医療)において、バイアスによって、本当に信頼できるエビデンスが得られなくなっているケースを紹介している。
- (7) EBMは「エビデンスに基づく医療」という考え方であり、1991年にゴードン・ガイアットによって“Evidence-based Medicine”と題する論文が発表され、1993年からアメリカ医師会雑誌にEBMのシリーズ論文が掲載されたことが契機だとされている。そうした動きの中、本稿p2でも紹介したコクラン共同計画がイギリスで実施された。なお、コクラン共同計画は、研究者などがエビデンスを「つくる」場と、それらを医者・薬剤師・行政官・患者などが「つかう」場の、両者の間に入って「つたえる」(多様なランダム化比較実験等の研究知見の中から、信頼に足る成果を吟味して、それらをまとめて必要な人に遅滞なく伝える)ことが大切だとして推進されたものでもある。こうした経緯やEBMとコクラン計画との関係等については正木・津谷(2006)や津谷(2011)に詳しい。

参考文献

1. 家子直幸・小林庸平・松岡夏子・西尾真治(2016)「エビデンスで変わる政策形成」三菱UFJリサーチ&コンサルティング政策研究レポート
2. EBPM推進委員会(2018)「EBPMを推進するための人材の確保・育成等に関する方針」(平成30年4月27日)
3. 内山融(2015)「政策立案力高めるには 経済分析の専門家採用を」日本経済新聞2015年5月29日付 経済教室
4. 内山融・小林庸平・田口壮輔・小池孝英(2018)「英国におけるエビデンスに基づく政策形成と日本への

- 示唆—エビデンスの「需要」と「供給」に着目した分析—」RIETI Policy Discussion Papers Series 18-P-018 2018年12月
5. 岩崎久美子(2017)「エビデンスに基づく教育 研究の政策活用を考える」情報管理 2017年4月
 6. 川口大司(2019)「日本の統計の質はどう評価できるのか？」経済セミナー2019年6・7月号 日本評論社
 7. 経済産業省 平成28年度政策評価調査事業(経済産業行政におけるエビデンスに基づく政策立案・評価に関する調査)報告書
 8. 関沢洋一(2017)「エビデンスに基づく医療(EBM)探訪 第5回『エビデンスに基づく医療がハイジャックされている?』」独立行政法人経済産業所
 9. 関沢洋一(2019)「EBPM がハイジャックされないために」独立行政法人経済産業所
 10. 津谷喜一郎(2011)「日本の EBM の動きからのレッスン—前者の轍を踏まないために—」国立教育政策研究所紀要 第140集45-54, 2011年3月
 11. 正木朋也・津谷喜一郎(2006)「エビデンスに基づく医療(EBM)の系譜と方向性:保健医療評価に果たすコクラン共同計画の役割と未来」日本評価研究/6巻1号
 12. 三浦聡(2017)「経産省における EBPM の取り組み」https://www.rieti.go.jp/jp/events/18121401/pdf/4-3_miura.pdf (2019年11月1日アクセス)
 13. 内閣府(2018)「内閣府本府 EBPM 取組方針」(平成30年4月)
 14. Melnyk, B. M (2010); Fineout-Overholt E “Evidence-based practice in nursing and healthcare; A guide to best practice.” Lippicott Williams & Wilkins, 2010, p.12
 15. OECD (2007) “Evidence in Education: Linking Research and Policy”

社会動向レポート

再生可能エネルギーの現状と将来(2019年版)

—出力抑制シミュレーションによる蓄電池併設の効果の分析—

グローバルイノベーション&エネルギー部
 コンサルタント コンサルタント チーフコンサルタント
 境澤 亮祐 古林 知哉 蓮見 知弘

2018年10月に九州本土にて、電力の安定供給のため、地域内の発電量が需要量を上回った場合に発電量を制限する再生可能エネルギーの出力抑制が実施された。この出力抑制は、太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入が急増したことにより生じたものであり、九州以外でもその蓋然性は高まっている。出力抑制の回避措置として、大型蓄電池が活用されている。本レポートでは、省エネ対策として推進している住宅用太陽光発電に蓄電池を併設した自家消費利用が、どの程度出力抑制の低減に寄与するかを定量的に分析した。

1. はじめに

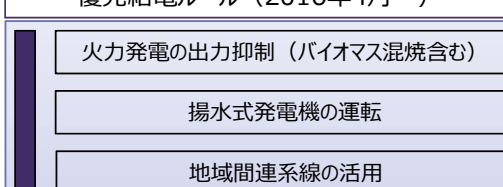
2012年の固定価格買取制度(以下「FIT 制度」という。)の開始によって再生可能エネルギーの導入は急速に進んだ。今後も太陽光発電や風力発電のような天候や日照等の自然条件によって発電量が変動する電源の導入が進む傾向にある。電力会社⁽¹⁾は、機器の動作不良や停電の誘発を防ぎ、電力を安定的に供給するため、常に電力の供給量と需要量を同量に保つ“同時同量の原則”を維持しなければならない。そのため、地域内の電力需要量と供給量を予測し、供給量が上回った場合は、出力を制限する要請を行っている。特に、FIT 制度により全国的に太陽光発電が急増し、発電量が日中に集中する状況となったため、再生可能エネルギーの発電量を抑制する状況となった。2018年10月には、離島を除いた国内で初めてとなる出力抑制が九州で実施され¹、その後、2018年度末までに26回行われた。太陽光発電の導入の急増は全国的なものであり、今後九州以外の地域でもその蓋然性が高まって

いる。

電力供給過剰時において、電力会社は図表1に示した優先給電ルールに則って供給量の調整を行っている。まず短時間での調整が可能な①バイオマス混焼を含む火力発電、②揚水式発電機や大型蓄電池の最大限の活用、③地域間連系線による他地域への融通を行う。それでも供給過剰が発生している場合は、④専焼バイオマス発電、⑤地域資源バイオマス発電、⑥太陽光発電・風力発電の順で実施する。原子力発電や水力発電・地熱発電は、数時間単位での調整が困難であるため抑制対象外となっている。

制度上出力抑制の頻度は、電源の種類と地域等によって異なり、抑制時間の上限を設定しない無制限抑制を前提とするものもある。その場合、再生可能エネルギー事業者にとってもファイナンスを組成する金融機関にとっても、事業性に直結するリスクの1つである。事業期間中の出力抑制の頻度を見極める必要がある。

本レポートでは、すでに導入されている大型蓄電池とは別に、国が省エネ対策として推進し、



優先給電ルール（2016年4月～）	
	火力発電の出力抑制（バイオマス混焼含む）
	揚水式発電機の運転
	地域間連系線の活用
	バイオマス発電出力抑制-1（専焼発電）
	バイオマス発電出力抑制-2（地域資源）
	太陽光・風力の出力抑制
	広域機関の指示（緊急時運用）
	原子力・揚水を除く水力・地熱の出力抑制

（資料）資源エネルギー庁資料よりみずほ情報総研作成

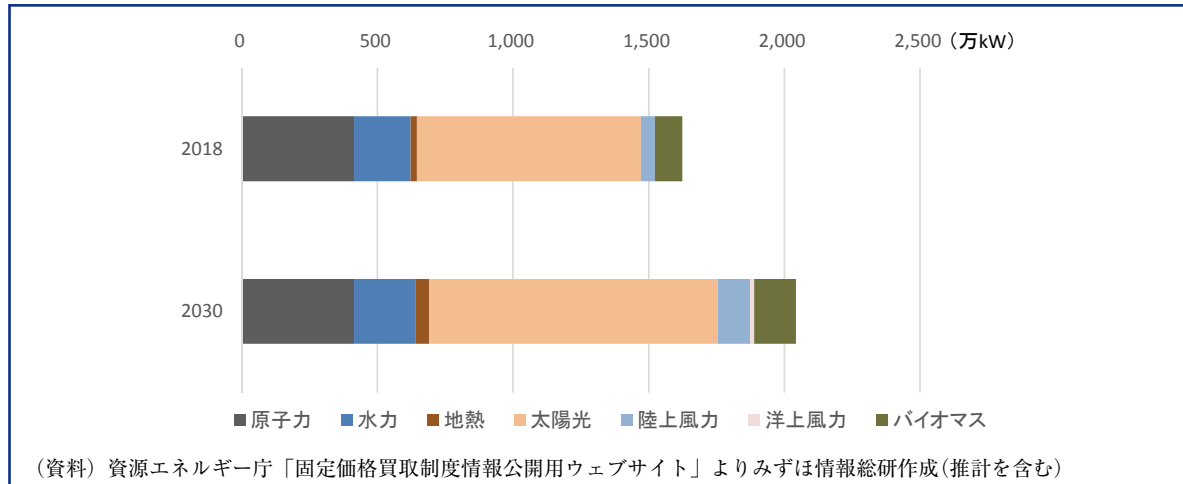
2. 出力抑制シミュレーションによる蓄電池併設の効果の分析

出力抑制の観点からみた自家消費モデルの普及は、太陽光発電設備の導入量が圧倒的に大きく、日中に電力の供給過剰が発生しやすい傾向

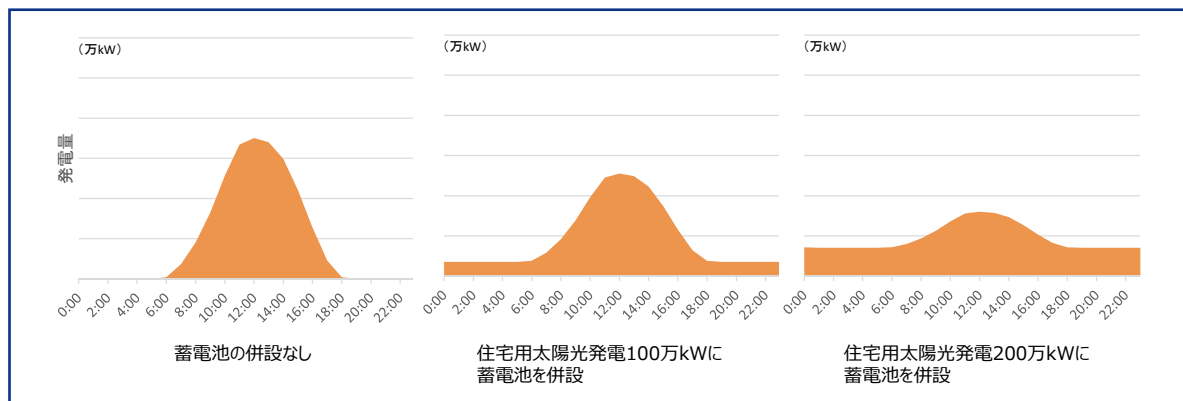
本レポートでは、出力抑制が実施された九州において、2030年の電源構成が2015年に国が掲げたエネルギーミックスを実現したという前提条件下で、住宅用太陽光発電等の普及に伴って蓄電池が住宅に併設された場合、出力抑制にどの程度影響を与えるか、当社の出力抑制シミュレーションモデル²を用いて分析した。

原子力発電と再生可能エネルギーの導入量は、国の定めたエネルギーミックスを達成することを前提に推計した。図表2は、原子力発電と再生可能エネルギーの導入量の2018年度の実績と2030年の見通しを示したものである。原子力発電は、現在稼働している玄海原子力発電所3、4号機、川内原子力発電所の1、2号機が引き続き

図表2 九州における2018年及び2030年の原子力発電と再生可能エネルギーの導入量



図表3 蓄電池併設時における自家消費型太陽光発電の発電量のイメージ



稼働していると、原子力の発電所の新設はないとした。太陽光発電、風力発電についても、エネルギーミックスの水準を達成することを前提に導入実績や発電計画等の情報をもとに推計した。

本レポートにおいて注目する蓄電池は、住宅用太陽光発電に併設することが一般的である。住宅用太陽光発電の導入量は、すでに2030年目標に到達している(参考図表9参照)ものの、省エネ対策としてのZEH(Zero Emission House)の導入目標を踏まえると、今後も一定の新築住宅には太陽光発電が導入されるものと考えられる。そこで、政府が掲げているZEHの見通しとして、環境省の地球温暖化対策計画や内閣府

の未来投資戦略2018を参考に設定した。

(2)蓄電池の併設に伴う自家消費モデルの考え方

本レポートでは、蓄電池が併設されている太陽光発電の導入量を①併設なし(蓄電池の影響を考慮しない)、②100万kW(現在の住宅用太陽光発電の約6割相当)、③200万kW、の3つのシナリオを設定し、太陽光発電の出力抑制の影響を分析した。蓄電池の導入によって平準化される住宅用太陽光発電の発電量を図表3に示す。蓄電池を併設する住宅用太陽光発電の割合が増え、日中の発電量ピークが蓄電によって減少する代わりに、夜間で蓄えた電力が利用されるため、太陽光の出力パターンを図表3のよう

に考えることができる。

(3)前提条件のまとめ

本レポートで実施した計算条件を整理したものを図表4に示す。出力抑制に大きな影響を及ぼす地域間連系線の容量は、経済産業省の審議会である系統ワーキンググループ(第18回)において九州電力が設定した容量の50%(67.5万kW)を活用可能とした³。なお、図表4の計算条件は、同ワーキンググループにおいて九州電力が設定した条件とは異なることに留意されたい。

2.2 シミュレーション結果

太陽光発電の出力抑制の頻度に関するルールは、国が定めており、地域と契約時期によって、年間の上限は①最大30日間まで(30日ルール)、②最大720時間まで(720時間ルール)、③無制限(指定ルール)の3つの区分で、事業者ごとに設定されている。また、出力抑制の時間が上限値に到達するまでは、事業者間の公平性の観点から、抑制時間が均等になるように、電力会社が

調整している。しかしながら、上限時間を越えると、③の無制限ルールだけが出力抑制の対象となる仕組みになっている。2019年3月時点の九州電力管内で、新たに太陽光発電事業を新たに行う際は、③の無制限の抑制(指定ルール)が適用される。本シミュレーションでは、出力抑制が生じる指標として出力抑制率を「本来発電することが見込まれた電力量に対し、出力抑制によって発電することができなかった電力量の割合」と定義し、以後、この指標を使って3つのシナリオの分析を行うこととする。

2030年における指定ルールの太陽光発電の出力抑制率の結果を図表5に示す。この図表のとおり、①併設なしのシナリオでは、年間の出力制御率は21.7%であり、年間で21.7%の発電機会損失が発生することを意味する。次に、蓄電池を併設した場合の年間の出力制御率は、②100万kWシナリオでは17.8%、③200万kWシナリオでは13.9%となり、蓄電池の併設によって出力抑制率が4~8%低減することを示した。

指定ルールが適用されている太陽光発電事業

図表4 計算条件のまとめ(2030年度の九州地域)

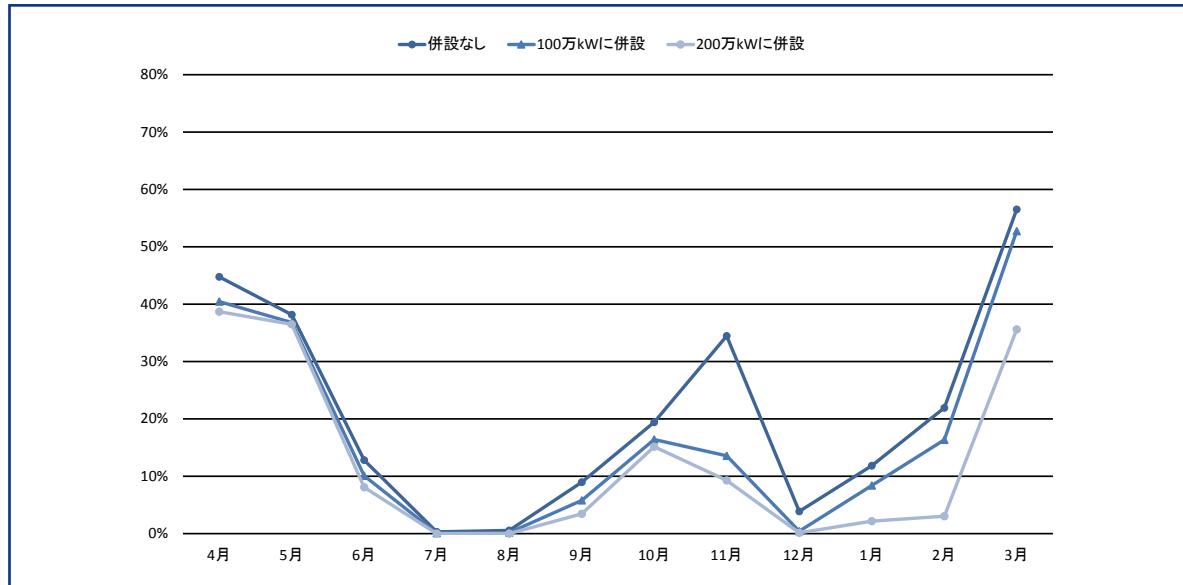
項 目	設定値
電力需要	2017年度実績を使用
再生可能エネルギー導入量	各電源が2030年エネルギーミックスに掲げた導入量を達成
原子力発電の導入量	現在稼働中の4基(玄海3、4号機、川内3、4号機)が稼働
設備利用率	系統ワーキンググループ(第18回)の値を採用
地域間連系線	系統ワーキンググループ(第18回)の中位ケース67.5万kWを採用
蓄電池が併設している太陽光発電の容量	①併設なし、②100万kW、③200万kWの3つのシナリオ

図表5 3つのシナリオにおける年間の出力抑制率

	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
蓄電池を併設した住宅用太陽光発電の容量	併設なし	100万kW	200万kW
指定ルール太陽光年間出力抑制率(年間)	21.7%	17.8%	13.9%

※出力抑制率=出力抑制によって発電することができなかった電力量/本来発電することができた電力量

図表6 太陽光発電の出力抑制率の比較(月別：指定ルール)



者の出力抑制率を各月で表示したものを図表6に示す。全てのケースにおいて、3月から5月の春季、10月と11月の秋季にかけて出力抑制率が大きくなっている。これは夏季や冬季にくらべて冷暖房需要が小さく、電力の供給過剰が発生しやすくなるためである。次に、各ケースの出力抑制率を比較すると、蓄電池の利用による出力抑制率の低減効果が月ごとに異なっていることがわかる。例えば、シナリオ1とシナリオ3を比較すると、5月の出力抑制率の差は2%程度であるが、11月や2月、3月については20%ほどの低減効果が見られる。一方で、11月は、シナリオ1とシナリオ2の間で出力抑制率の乖離が大きくなっている。これは、10月までは、出力抑制の年間上限値である30日または720時間に到達しておらず、すべての事業者が平等に抑制されていたが、11月中に年間の抑制時間が上限に到達したため、指定ルールが適用された事業者の負担が大きくなったことが原因である。

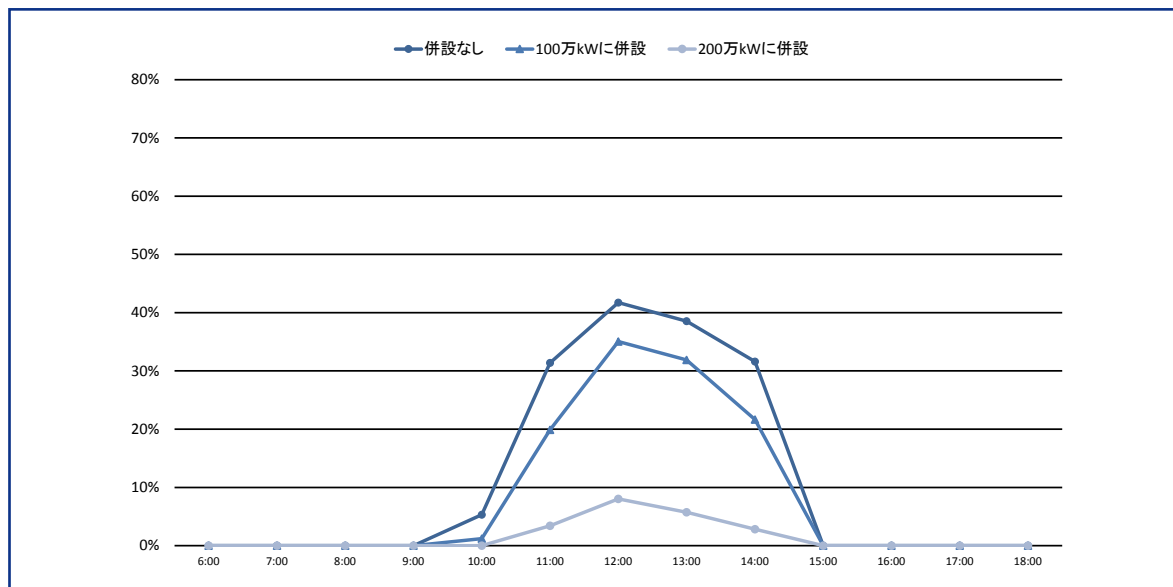
その他、5月と2月で蓄電池効果に差が見られることについては、電力の供給過剰の絶対量が影響している。2月は、シナリオ3の200万kW

の併設では、蓄電池を運用することで電力の供給過剰を回避できたが、5月においては回避できないほどの供給過剰が発生していることを意味している(図表7、8を参照)。

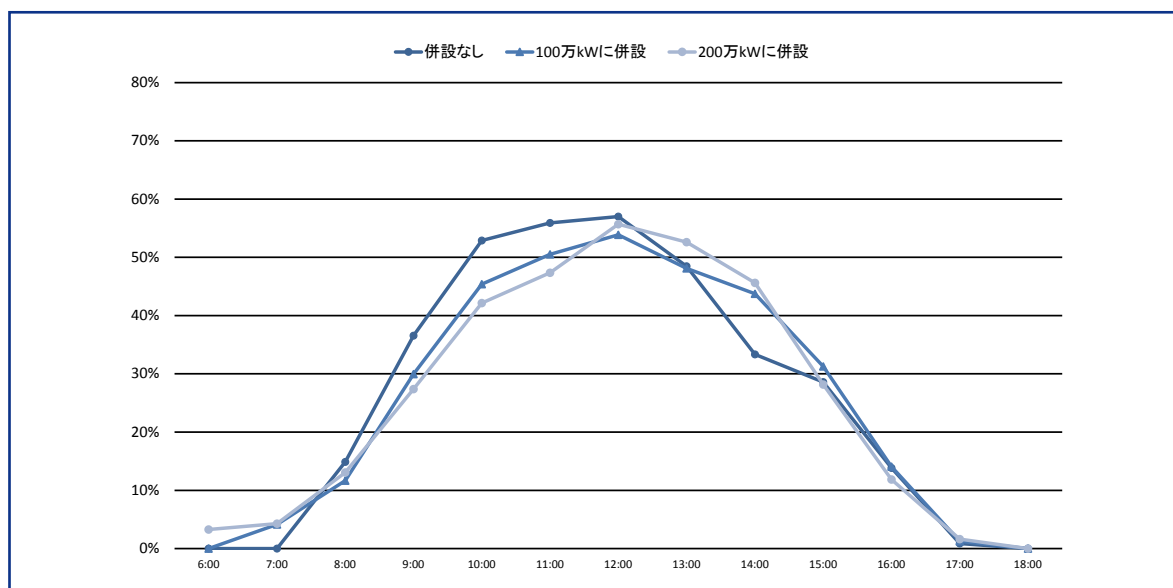
3. おわりに

本レポートでは、国が省エネ対策として推進している自家消費を目的とした蓄電池の導入が太陽光発電の出力抑制率に与える影響を分析した。その結果、住宅用太陽光発電に蓄電池を併設することは、電気料金の負担軽減だけでなく、太陽光発電事業者に課せられる年間の出力抑制率が4~8%程度低下し、再生可能エネルギーの利用可能量が向上することが明らかになった。一方で、電力の供給過剰量が大きい月では蓄電池に加えて何らかの対策が必要であることが示唆された。蓄電池は、日中の余剰電力を夜間に利用することができるので出力抑制率の低減に効果的だが、200万kW程度の蓄電池の導入では、電力の供給量と需要量のギャップが大きい5月における出力抑制率には波及しなかった。改善策としては、数日単位ではなく、季節をまた

図表7 1時間ごとの太陽光発電の出力抑制率の比較(2月平均：指定ルール)



図表8 1時間ごとの太陽光発電の出力抑制率の比較(5月平均：指定ルール)



ぐような時間スケールでの蓄電や PtG (Power to Gas) に代表される新たな電力利用方法の検討、電力需要家のデマンドレスポンスを追加的な取り入れが期待される。

また、本レポートでは九州電力管内での電力供給量と需要量のバランスに関する出力抑制の評価を実施したが、さらに再生可能エネルギーの導入が進むと、同じ電力管内でも場所によっ

て、送電線や変電設備の空き容量が異なることから、電力需要地や発電所の位置情報まで考慮した精緻な分析が求められる。今後、発電事業者は、設備導入地域近隣の送電容量を意識した発電見通しを計画的に検討することや、地域近隣での電力消費を想定し送電を最小限にする再生可能エネルギーの地産地消モデルの構築が必要となるだろう。

〈参考〉FIT 制度における再生可能エネルギーの導入と国民負担の状況(2018年12月時点)

FIT 制度以降再生可能エネルギー電源の認定量、導入量および買取価格、国民負担について、2018年12月までの推移および2030年度の累積の導入量見通しを整理した。各図において認定量・導入量を棒グラフ、買取価格を折れ線グラフで表記している。なお、いずれの電源も特に断りが無ければ、認定量、導入量は、FIT 制度開始後の新規認定分のみを対象とし、FIT 開始前の移行認定分は含んでいない。また、買取価格は10kW 未満の太陽光発電が税込み表示であり、それ以外は税抜き表示となる。

(1)太陽光発電

FIT 制度開始により、最も認定・導入が進んだ再生可能エネルギーである太陽光発電について、主として住宅向けの発電容量10kW 未満と、ビルの屋上設置やメガソーラー向けの10kW 以上の2つの区分で整理した。

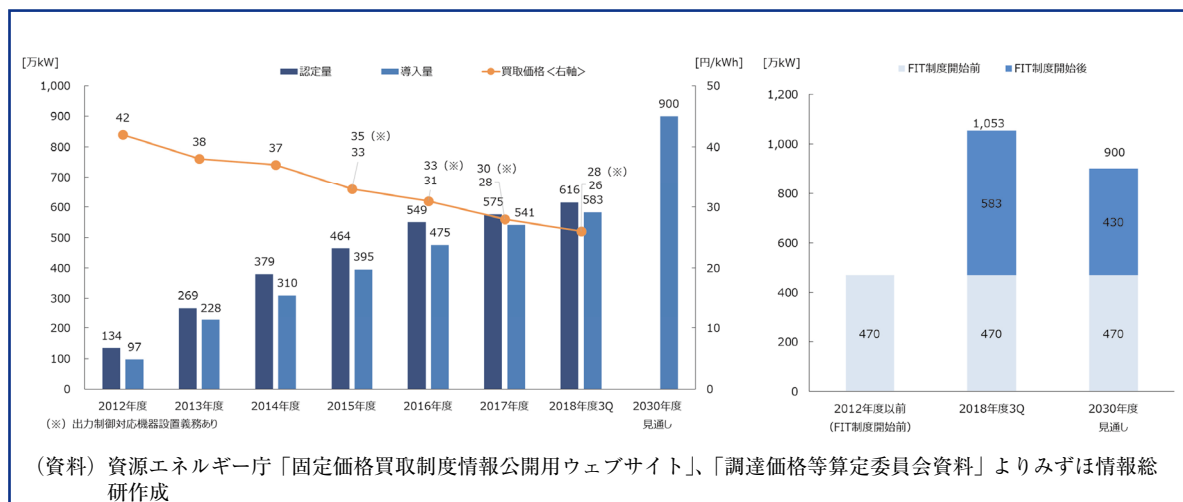
はじめに、10kW 未満の太陽光発電の認定量・導入量・買取価格の推移を図表9に示す。FIT 制度開始から2016年度までは、毎年100万 kW 程

度のペースで認定され、その後鈍化し、2018年12月時点では616万 kW が認定されている。一方、導入量は、認定量の約8割に相当する80万 kW/年程度の水準であったが、2017年度より事業認定の取得から1年以内に運転を開始しない場合、買取の権利を失う「失効」とする制度変更が行われたため、2017年度は、認定量97%とこれまでもの中で最も高水準で導入された。2018年12月時点における、FIT 制度開始以前を含む累積導入量は1,053万 kW となり、すでに2030年度見通しである900万 kW を早々に超過している状況である。

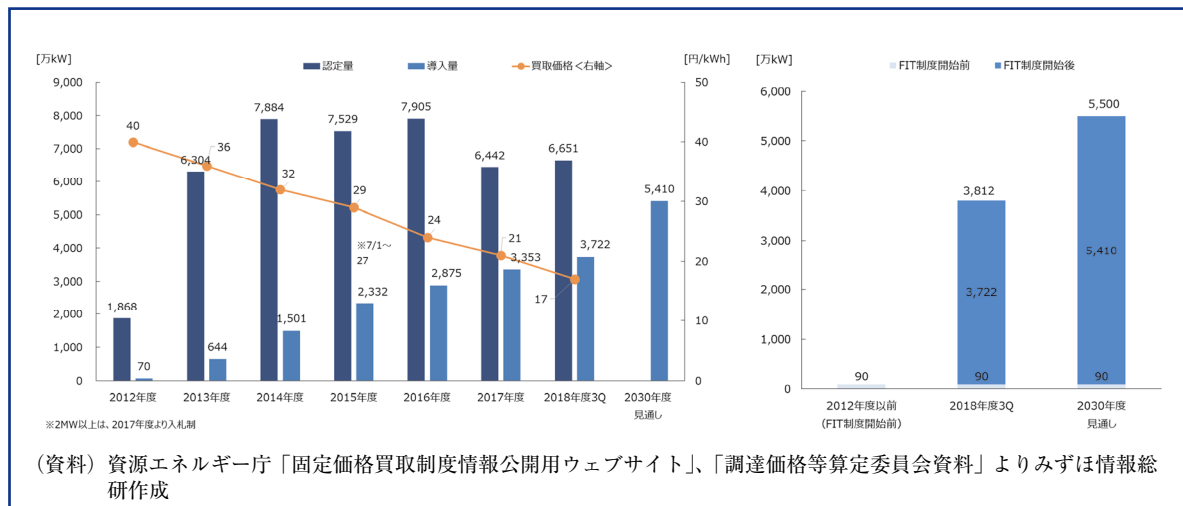
買取価格については、FIT 制度開始時点では42円/kWh であったが、太陽光パネルを中心に市場拡大に伴うコスト低減が進んだこともあり、2018年度には26円/kWh、出力抑制対応の場合は28円/kWh まで低下している。

2019年には、2009年に開始した余剰価格買取制度から移行された設備が10年間の買取期間を終えて、FIT 制度から卒業することになっている。

図表9 10kW 未満の太陽光発電の認定量・導入量・買取価格の推移
(左：FIT 制度下における認定量・導入量と買取価格、右：累積導入量と見通し)



図表10 10kW以上の太陽光発電の認定量・導入量・買取価格の推移
(左：FIT制度下における認定量・導入量と買取価格、右：累積導入量と見通し)



次に、10kW以上の太陽光発電の認定量・導入量・買取価格の推移を図表10に示す。事業参入の容易さに加え、40円/kWhの買取価格の高さの後押しもあり、認定量は2012年度の1,868万kWから急増し、2016年度にピークとなる7,905万kWに達した。その後、FIT制度の改正で電力会社との接続契約のない案件が失効したため、2018年12月末時点では6,651万kWに落ち着いている。一方、導入量は2015年度までは年間で約700万kW程度の水準であったが、2016年度以降は、系統工事の遅れ等もあり、年間約500万kWとやや鈍化した。2018年12月末におけるFIT制度開始以前を含む累積導入量は3,722万kWとなり、2030年度見通しの5,500万kWの約7割に達した。2017年度以降は、事業認定取得から3年以内に運転開始をしない場合は20年の買取期間が短くなるという制度改正から、2020年度までに導入が加速すると予想される。さらに、2018年12月には、2012年度から2015年度までに認定された運転開始期限が設定されていない未稼働案件の早期稼働を促すため、2019年3月までに電力会社に対する系統連系工事申込を行っていない案件については、「調達価

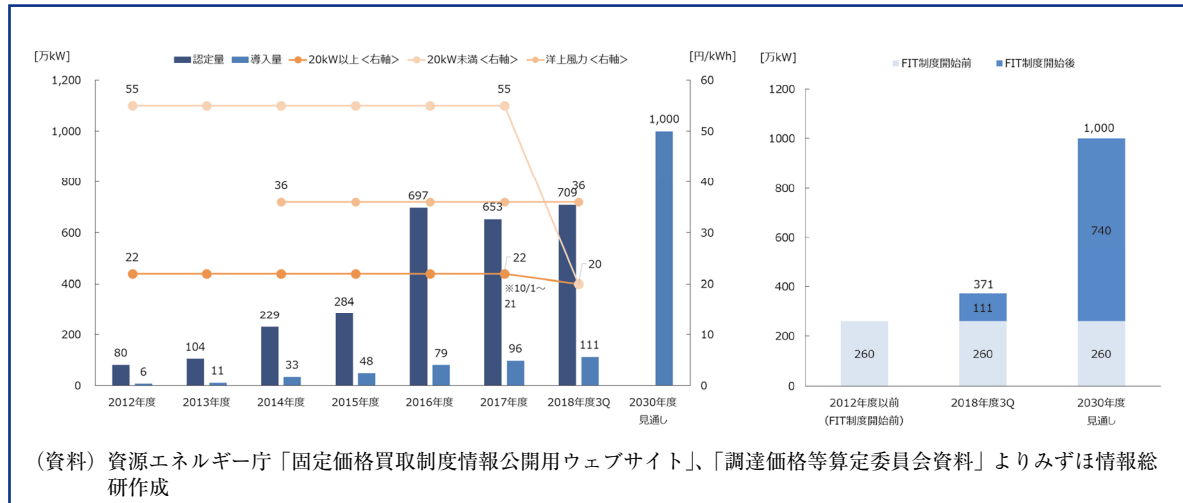
格を見直すこと」、「1年以内に運転開始ができない場合は買取期間を短くすること」が示された⁴。また、2018年12月21日には、運用の詳細についても示されたところである⁵。

買取価格は、FIT制度開始時点では40円/kWhであったが、10kW未満の太陽光発電と同様のコスト低減に加えて、安価な海外メーカーの導入が進んだことや、海外メーカーとの競争力強化の観点もあり、2018年度には17円/kWhにまで減じられた。2MW以上のメガソーラーは、2017年度からあらかじめ決められた募集枠に到達するまで、低価格で事業を行うことが可能な事業者から順に権利を獲得する入札制度が導入された。なお、2019年度においては、入札制度の対象も500kW以上となる見込みであり、入札対象外の10kW以上の買取価格は2018年度の17円/kWhから▲18%の14円/kWhまで減じられる。

(2)風力発電

風力発電の認定量・導入量・買取価格の推移を図表11に示す。風力発電についての2018年度時点のFIT制度における買取区分は、陸上風力が新設とリプレースで2区分、洋上風力が着床

図表11 風力発電の認定量・導入量・買取価格の推移
(左：FIT 制度下における認定量・導入量と買取価格、右：累積導入量と見通し)



式と浮体式で2区分の合計4区分になっているが、認定量や導入量は、これらを区別することなく整理した。

風力発電の認定量は、FIT 制度開始から発電容量が年間50万 kW のペースで増加し2015年度末では284万 kW にとどまっていたが、環境影響評価の手続きが進んだことも影響し、2016年度の1年間で約400万 kW 急増、その後は、相応の失効もあったことで、2018年12月時点では709万 kW に落ち着いている。一方、導入量は、年間約10万 kW の水準で増加し、2018年12月末時点の FIT 制度開始以前も含めた累積導入量は371万 kW となり、これは2030年度見通しである1,000万 kW の約37%の水準である。

買取価格は、20kW 未満の場合、制度開始から2017年度までは55円 /kWh と高水準であったが、その高い買取価格と、規模の性質上、国民全体が受益を得るような電源ではないこと等もあり、2018年度から20kW 以上の買取価格に一本化された。20kW 以上については、制度開始から2017年9月末までは22円 /kWh としていたが、海外と比べて発電コストが高く、国際競争力強化の観点から2017年10月から21円 /kWh、

2018年度は20円 /kWh と減じられた。また、洋上風力については、2014年に民間でも事業計画が立ち上がりつつあることを背景に、買取価格が36円 /kWh と設定され、2018年度まで変更はない。

今後は、着床式の洋上風力発電が北海道や東北地域といった風況のよいエリアを中心に導入が期待される。政府としても、その動きを加速化させるため、一般海域における洋上風力発電のルール作りを始めている。2018年の臨時国会において、海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律が可決され、2019年度の施行に向けて、促進区域の指定基準や指定手続等の運用の検討が進められている。この一般海域の海域利用ルール整備により、今後多くの洋上風力発電が導入されることが期待される。海域利用ルールの適用される案件は競争による価格低減を見込み、入札制で買取価格が決定されるとともに、海域利用ルール適用外の案件についても、大量導入によるコスト低減が見込まれることから2020年度以降の買取価格は2019年度に決定することとなっている。

(3)地熱発電

地熱発電の認定量・導入量・買取価格の推移を図表12に示す。地熱発電についての2018年度時点のFIT制度における買取区分は、新設の場合、発電規模別に15,000kW未満、15,000kW以上の2区分がある。これに加えリプレース枠として全設備更新型と地下設備流用型の2区分に対しそれぞれが前述の規模区分があるため、新設と合わせ合計6区分が設定されている。ここでは、認定量や導入量は、これらを区別することなく整理した。

認定量は、FIT制度開始から、大型の開発が1件のみで、ほとんどが数千kW級の中規模発電と、数百kW級の小規模発電が主流である。そのため、認定量は制度開始から2018年12月末までで8.4万kWにとどまっている。同様に、導入量は同2.3万kWにとどまっており、FIT制度開始以前を含む累積導入量52.3万kWは、2030年度見通しである140～155万kWの4割弱の水準という状況にある。このような中、2018年度には松尾八幡平(7,499kW)が、2019年度には山葵沢(42,000kW)が運転を開始した。

買取価格は、新設を対象とする2つの区分に

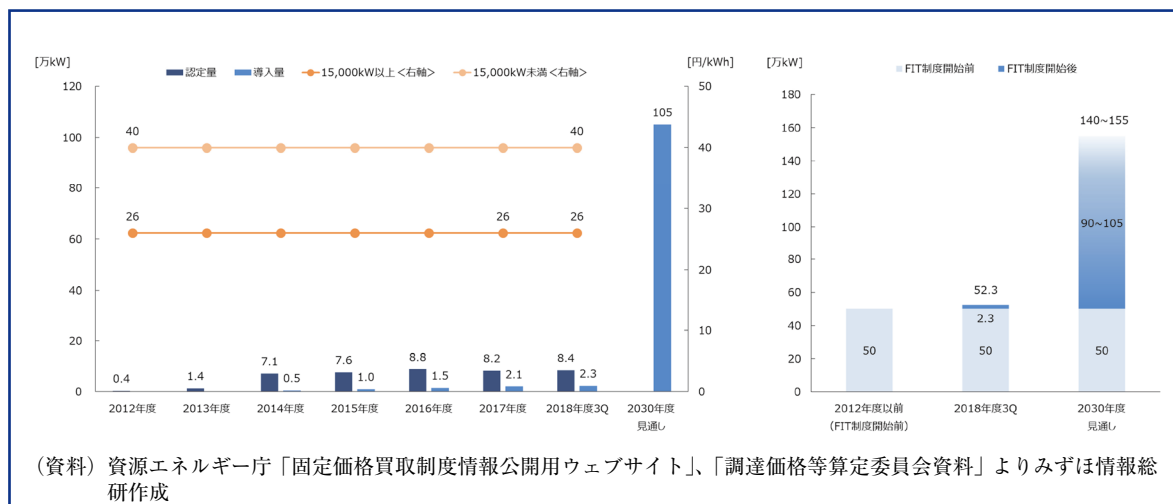
においてFIT制度開始から2018年9月までの間、15,000kW未満が40円/kWh、15,000kW以上が26円/kWhで変更されていない。その結果として、買取価格が原因で大規模な開発が停滞しているのではないかと意見もあり、実態の把握が求められている。

大規模な地熱発電は、洋上風力発電と同様に地元関係者との合意形成に加え、開発にあたっては資源リスクが存在するため、一般的に計画から運転開始まで長い時間を要する電源である。そのため、現在は環境影響評価の対象にならない7,500kW未満の案件の開発や、既存の温泉井を使って発電する小規模な発電が主流になっている。今後の一層の導入に向けては、大規模な開発の支援だけでなく、現在開発が進んでいる案件の加速化、新規開発地点の発掘のためのヒートホール調査や空中物理探査の充実が求められている。また、2050年を見据えた新しい技術開発の検討も進められている。

(4)中小水力発電

中小水力発電の認定量・導入量・買取価格の推移を図表13に示す。中小水力発電についての

図表12 地熱発電認定量・導入量・買取価格の推移
(左：FIT制度下における認定量・導入量と買取価格、右：累積導入量と見通し)



2018年度時点の FIT 制度における買取区分は、規模別である200kW未満、200kW以上1,000kW未満、1,000kW以上5,000kW未満、5,000kW以上30,000kW未満の4区分に対し、新設および既設導水路活用型2区分があるため、合計8つの買取区分が設定されている。ここでは、認定量や導入量は、これらを区別することなく整理した。

認定量は、FIT 制度開始から2016年度末までは、年間で約20万 kW のペースで増加したものの、その後は伸びが鈍化し、2018年12月末まで120万 kW となっている。これに対して導入量は、2018年12月末時点で35万 kW、FIT 制度開始以前を含む累積導入量は、994万 kW であり、2030年度見通し1,090～1,161万 kW に対し約9割の水準である。

買取価格は、3つの区分において設定されており、FIT 制度開始から2018年度まで、200kW未満が34円/kWh、200kW以上1,000kW未満が29円/kWhと変更されていない。しかしながら、1,000kW以上30,000kW未満については、2016年度までは24円/kWh だったが、2017年度より細分化され、1,000kW以上5,000kW未満が27

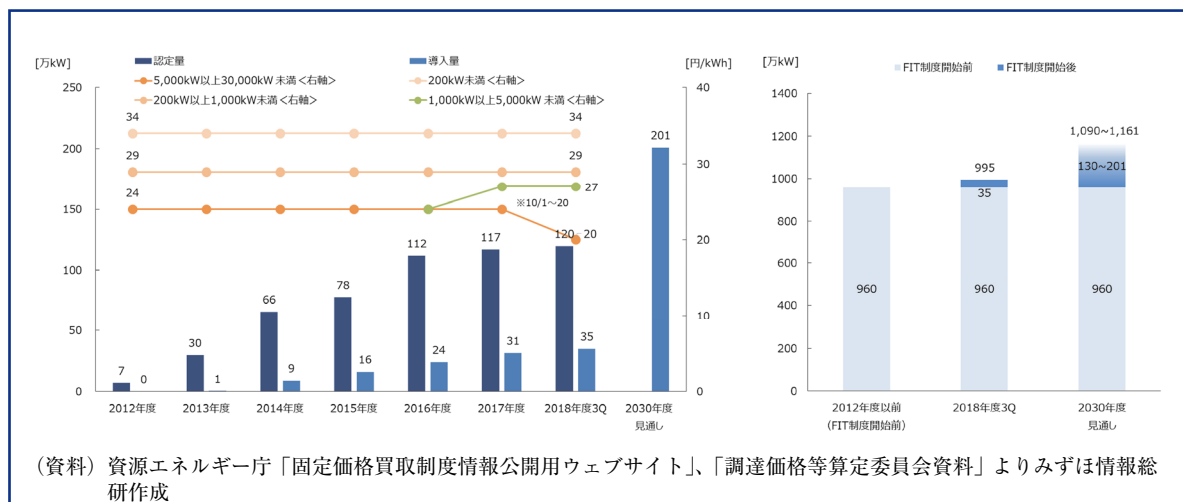
円/kWh、5,000kW以上30,000kW未満が20円/kWhと変更になった。

2030年度見通しは、一般水力を含めた水力発電全体としてのものであり、中小水力発電のみで達成率を試算すると、約15～26%の水準にとどまっている。一方、すでに大規模な一般水力の開発が進められてきたことから、中小水力発電の開発案件は限定的となっている。こうした状況から新設よりもリプレース時の増強が期待されるが、認定量が急速に増えることは考えにくく、現在認定を受けている案件の確実な導入が求められる。

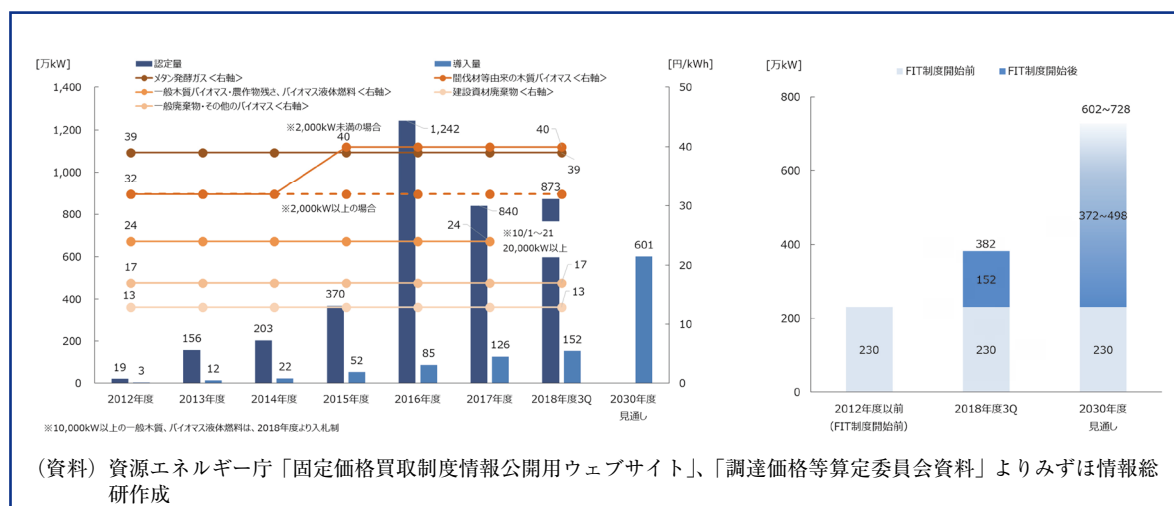
(5) バイオマス発電

バイオマス発電の認定量・導入量・買取価格の推移を図表14に示す。バイオマス発電についての2018年度時点の買取区分は、メタン発酵ガス、間伐材等由来の木質バイオマス、一般木質バイオマス・農作物残さ、バイオマス液体燃料、建築資材廃棄物、一般廃棄物その他のバイオマスといった6つの燃料種に加え、そのうちの2種はさらに発電規模が2つに区分されていることから、合計8区分が設定されている。ここでは、

図表13 中小水力発電の認定量・導入量・買取価格の推移
(左：FIT 制度下における認定量・導入量と買取価格、右：累積導入量と見通し)



図表14 バイオマス発電の認定量・導入量・買取価格の推移
(左：FIT 制度下における認定量・導入量と買取価格、右：累積導入量と見通し)



認定量や導入量は、これらを区別することなく整理した。

認定量は、FIT 制度開始から年間で約90万 kW のペースで増加、2015年度末には370万 kW に達したが、2017年度に一般木質バイオマス・農作物残さの買取価格が下がることを受けて、前年度の2016年度に駆け込みで認定を取得する事業者が殺到し、1,242万 kW まで増加した。その後、制度改正より、電力会社との系統接続の承諾が期限内に得られなかった案件が失効になったことにより、2018年12月末時点では873万 kW に落ち着いている。一方、導入量は、年間約20万 kW のペースで増加、2018年12月末では FIT 制度開始以前を含めた累積導入量は382万 kW であり、2030年度見通し602～728万 kW の約5～6割の水準である。

買取価格は、燃料種によって価格の見直し等の方向性が異なっている。一般木質バイオマス・農作物残さは、買取区分の細分化と買取価格の低減が図られ、10,000kW 以上の一般木質バイオマス・農作物残さやバイオマス液体燃料は、2018年度より入札制に移行した。それ以外の燃料種は、間伐材等由来の木質バイオマスの買取

区分の新設以外は、変更がない。

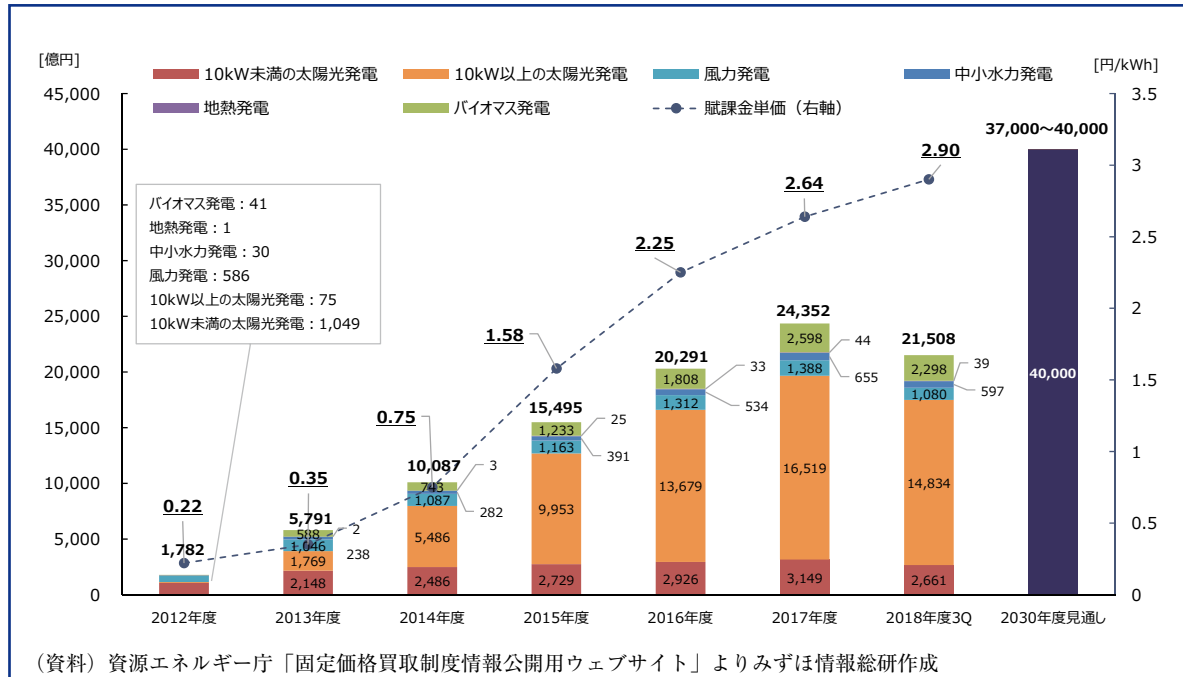
バイオマス発電においても、未稼働の太陽光発電の案件と同様に、国民負担の抑制に向けた対応として、バイオマス比率の変更にあたって制約を設けることになった⁶。具体的には、石炭等の混焼の場合は、バイオマス比率を増やす場合、または40%以上減らす場合は、バイオマス全体の買取価格の変更を行うこと、バイオマス専焼においても、買取区分ごとのバイオマス比率を20%以上増加させる場合は、増加した燃料に対し最新の買取価格を設定することとなった。

(6) 国民負担

FIT 制度下での再生可能エネルギーの買取総額と再生可能エネルギー発電促進賦課金(以下、「賦課金」という)単価の推移を図表15に示す。

再生可能エネルギーの買取総額は FIT 制度が開始された2012年度では1,782億円であったが、その後は、主として太陽光発電の導入量の増加に伴い2016年度には2兆円を超え、2018年度では12月末のペースで年度末まで推移した場合、3兆円を超える可能性があり、2030年時点の想定である3.7～4兆円へは、あと数年で到達する

図表15 FIT 制度下における再生可能エネルギーの買取金額と賦課金単価の推移



可能性が高い。また、賦課金単価においては、2012年度は0.22円/kWhであったが、その後急激に伸び2016年度で2円/kWhを超えた。その後、ややペースが鈍化した。2018年度は2.90円/kWh、2019年度は2.95円/kWhとなった。このように、再生可能エネルギーを導入することで電気料金が上がり、需要家である企業の国際競争力が失われる懸念から、省エネ対策等の取組を継続している企業に対しては、賦課金を減免する制度が設けられている。

注

- (1) 正確には「一般送配電事業者」であるが、本レポートでは一般になじみがあり、かつこれまで一般的に使われてきた「電力会社」と表記する。

参考文献

- 九州電力 再生可能エネルギー出力制御見直し
http://www.kyuden.co.jp/power_usages/pc.html
- みずほ情報総研 再生可能エネルギーの出力抑制の評価サービス
<https://www.mizuho-ir.co.jp/solution/improvement/>

- http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/018.html
- 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ(第18回)
<http://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181205004/20181205004.html>
- 資源エネルギー庁 FIT制度における太陽光発電の未稼働案件への新たな対応を決定しました
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/announce/20181221_mikado.pdf
- 資源エネルギー庁 事業用太陽光発電の未稼働案件への新たな対応に係る詳細運用等について(お知らせ)
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/announce/20181221.pdf
- 資源エネルギー庁 「既認定案件による国民負担抑制に向けた対応(バイオマス比率の変更への対応)」
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/announce/20181221.pdf

社会動向レポート

業務部門の照明における温暖化対策の更なる推進に向けて

環境エネルギー第1部

チーフコンサルタント 佐野 翔一 コンサルタント 横尾 祐輔 次長 松井 重和

オフィス、宿泊施設などが該当する「業務その他部門(以下、業務部門とする)」の地球温暖化対策は着実に進行しているものの、「地球温暖化対策計画」に掲げられた目標の達成、長期的な温室効果ガスの大幅削減のためには、更なる対策の進展が必要である。本稿では、業務部門においてエネルギーを大量に消費する機器や設備の一つである照明を、白熱灯や蛍光灯などの従来型の照明から LED 等の高効率な照明に置き換えていく対策について、さらなる対策の余地とそのために必要な施策を考察した。

なお、本レポートは弊社が環境省より受託した「平成30年度民生部門における低炭素化対策・施策検討委託業務」(以下、委託調査とする)において調査・検討した内容を、再整理したものである⁽¹⁾。

1. はじめに

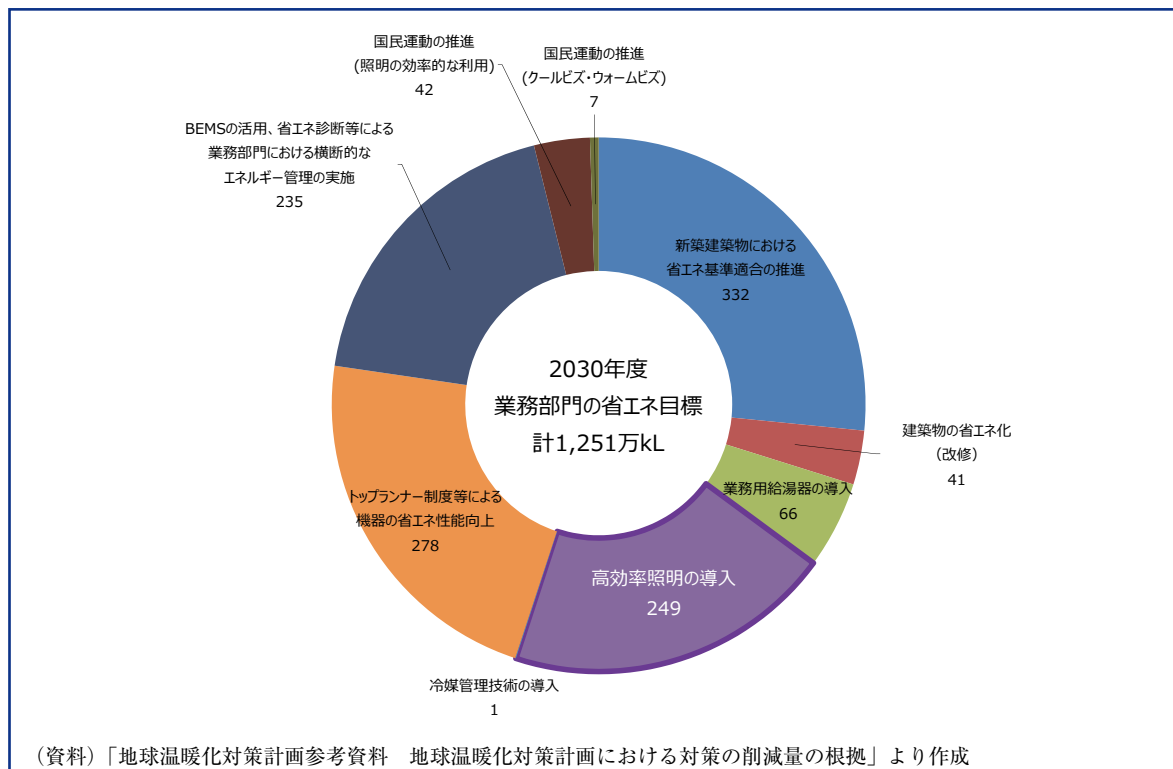
地球温暖化対策の総合的かつ計画的な推進を図るため、2016年5月に地球温暖化対策計画が閣議決定された。本計画は「少なくとも3年ごとに我が国における温室効果ガスの排出及び吸収の量の状況その他の事情を勘案して本計画に定められた目標及び施策について検討を加えるものとし、検討の結果に基づき、必要に応じて本計画を見直し、変更の閣議決定を行うこと」になっており、今後、見直しに関する議論が行われるものと考えられる。

地球温暖化対策計画では、産業部門、家庭部門、業務部門、運輸部門、エネルギー転換部門といった部門別に対策と施策を掲げ、各対策の進捗状況を毎年度評価している。このうち業務部門では、図表1に示す対策が掲げられている。

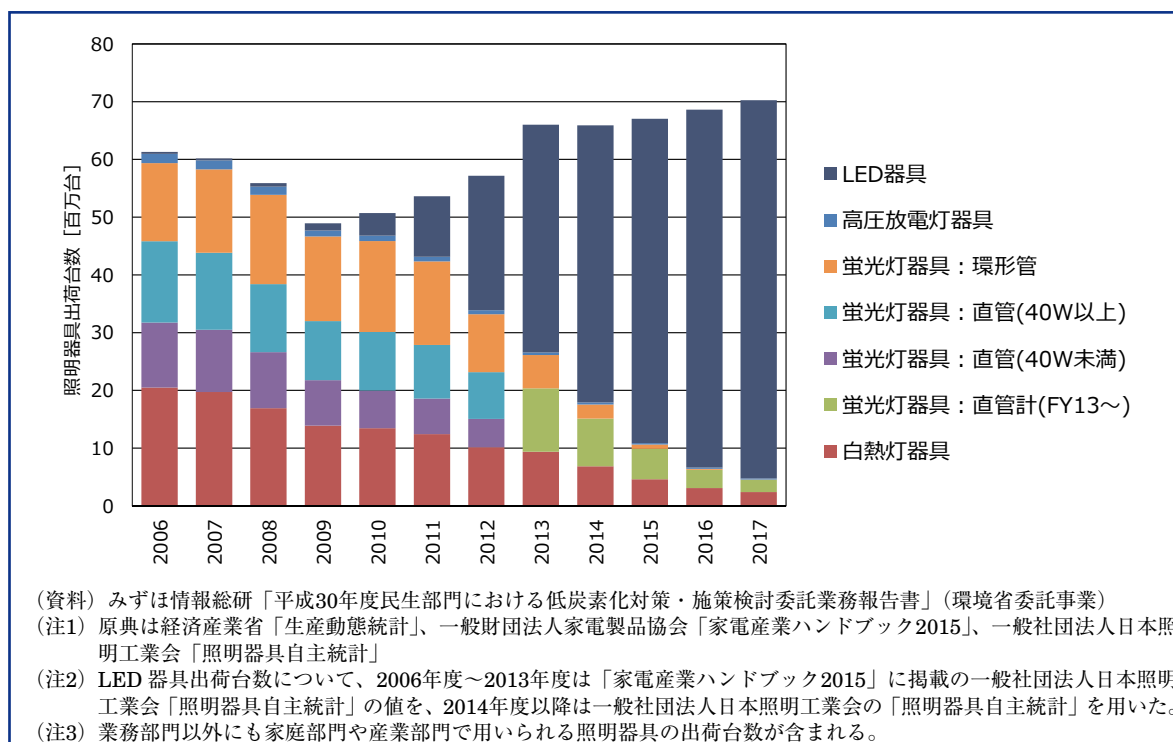
本稿で取り上げる業務部門の照明に係る対策である「高効率照明の導入」は直近の進捗状況の評価において、5段階評価で上から2番目の「B. このまま取組を続ければ目標水準を上回ると考えられる対策」と、比較的高い評価を得ている⁽²⁾。実際に、代表的な高効率照明である LED 照明は東日本大震災が起きた2011年頃から、節電ニーズを背景に急速に普及し、2017年度の照明器具出荷台数に占める LED 照明器具の割合は約93%に達する(図表2)。

このように一見順調に見える LED 照明の導入対策であるが、委託調査の一環で弊社が実施した「事業所における照明の利用状況に関する意識調査」の結果から、既築のテナントビルでの導入は必ずしも順調ではないなどの課題が明らかになった。地球温暖化対策計画では、業務部門の既存の照明設備(ストック)に占める LED

図表1 地球温暖化対策計画における業務部門の対策による省エネ量の内訳



図表2 照明器具の出荷台数の経年変化



照明等の高効率照明の割合を2030年度までに100%にすることを目指すとしているが、同意識調査の結果はその達成に向けて施策強化の必要性を示唆している。

また、2019年6月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（以下、長期戦略とする）においては、「カーボンニュートラルなくらしへの転換」に向けて、極限まで省エネルギー化を進めた設備・機器を最大限普及させるなど、長期的な温室効果ガスの大幅削減に向けて、更なる対策の必要性について言及されている。

上記の背景のもと、本稿では同意識調査の分析結果を示すとともに、地球温暖化対策計画の見直しに関する検討や、長期的な温室効果ガス

の大幅削減に向け、業務部門の照明を、白熱灯や蛍光灯などの従来型の照明からLED等の高効率な照明に置き換えていく対策について、さらなる対策の余地とそのために必要な施策を考察した。

2. 調査の概要

弊社が環境省より受託した「平成30年度民生部門における低炭素化対策・施策検討委託業務」の一環として、日本全国における事業所を対象として、「事業所における照明の利用状況に関する意識調査」を実施した。実施概要を図表3に示す。本調査では属性情報、LED照明の普及や改修に関する項目、LED照明の効率的な利用に関する項目について伺ったが、以降では、主に

図表3 事業所における照明の利用状況に関する意識調査 実施概要

実施期間	2019年1月16日(金)～2月18日(月)
調査対象	全国の業務部門の約20,000事業所
調査内容	・事業所の業種 ・事業所が入居する建築物の建物用途 ・事業所の従業員数 ・事業所が入居する建築物の所有関係(自社ビル／テナントビル) ・テナントビルにおける光熱費の支払方法 ・事業所の延床面積 ・現在の建築物への入居年 ・現在入居している建築物の竣工年 ・事業所の省エネルギー法への指定状況 ・事業所が立地する地域に電力を供給する旧一般電気事業者 ・事業所における照明の省エネに関する取組状況 ・LED照明のエネルギー消費効率に関する知識の保有状況 ・現在の事業所の主要なエリアにおける照明の種類 ・事業所の照明改修の実施状況 ・LED照明へ改修した事業所におけるLED照明の効率への意識 ・改修前の事業所における主要なエリアの照明の種類 ・主要なエリアの2016～2018年の照度 ・主要なエリアの2016～2018年の間引き・減灯の状況 ・照明の間引きを止めた、または、間引く照明を減らした理由 ・照明の間引きを継続している、または、間引く照明を増やした理由

(資料) みずほ情報総研「平成30年度民生部門における低炭素化対策・施策検討委託業務報告書」(環境省委託事業)

LED 照明の普及や改修に関する結果を示す。

3. 調査結果の分析

(1)建物用途別の LED の普及状況

主要なエリアにおける主要な照明の種類別（「LED 照明」、「蛍光灯」、「白熱灯」、「その他」、「分からない」の5つに分類）の導入比率を建物用途別に分析したものを図表4に示す。LED 照明導入比率⁽³⁾を見ると、娯楽施設(64%)や飲食店(61%)のように高い水準の用途がある一方、教育施設(13%)や博物館(8%)のように低い水準の用途もある。建物用途によって LED 照明の普及状況に大きな差が見られる。

先に述べたとおり、地球温暖化対策計画では、業務部門における LED 照明等の高効率照明の

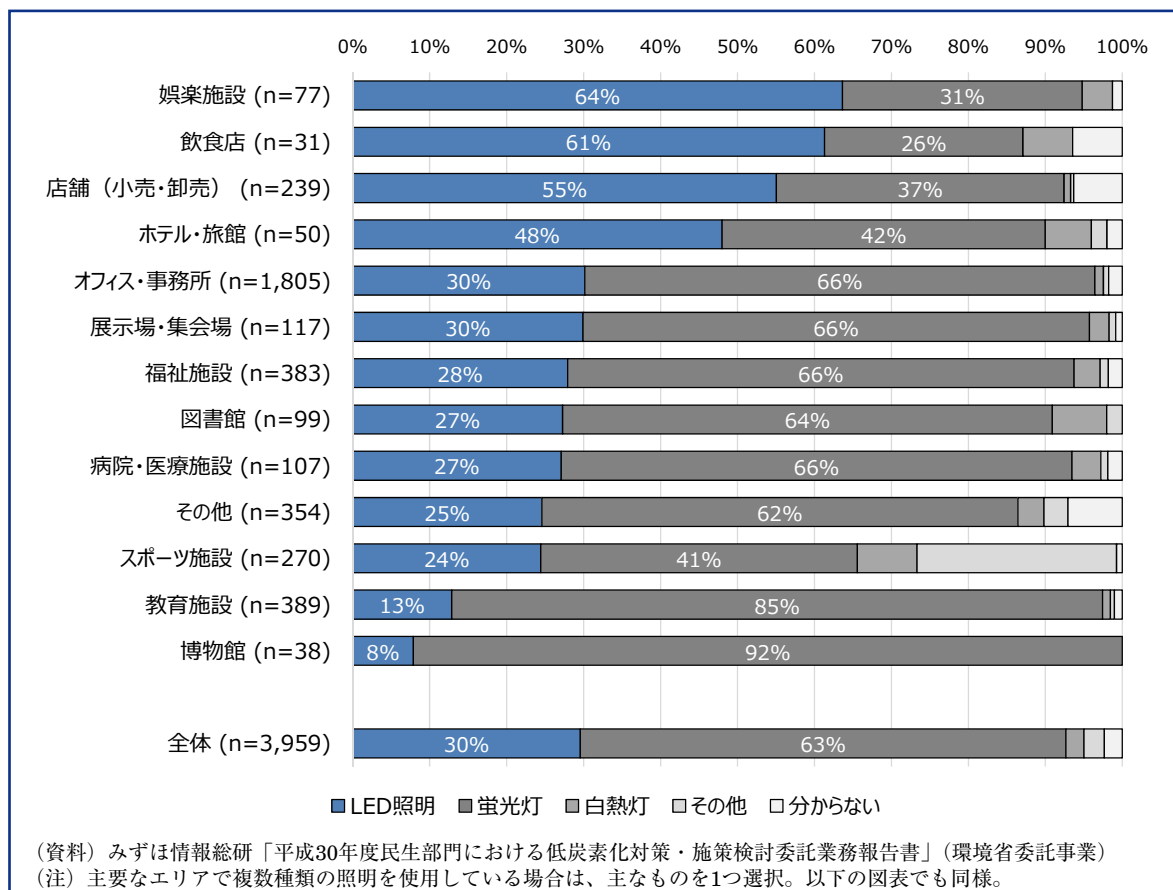
ストックに占める割合を2030年度までに100%にすることを目指すとしているが、達成に向けては建物用途に応じた施策の工夫、特に普及が遅れている建物用途に対する工夫が必要になると考えられる。

(2)竣工年別の LED の普及状況

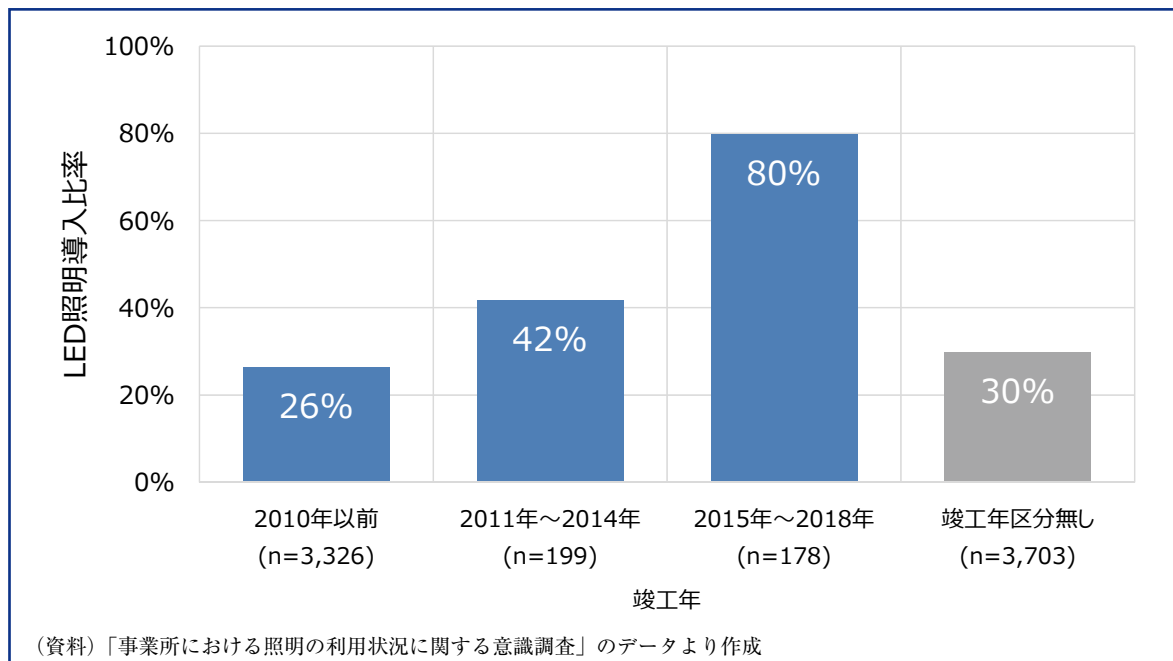
竣工年別のLED照明導入比率を図表5に示す。直近4年間(2015年～2018年)に竣工した建築物のLED照明導入比率は80%と高い値を示しており、最近の建築物ではLED照明の採用が標準的になっていることがわかる。

一方、竣工年が2010年以前の建築物のLED照明導入比率は26%であった。前述のとおりLED照明が本格的に普及し始めたのは2011年

図表4 主要な照明の種類別の導入比率(建物用途別)



図表5 竣工年別の主要なエリアのLED照明導入比率



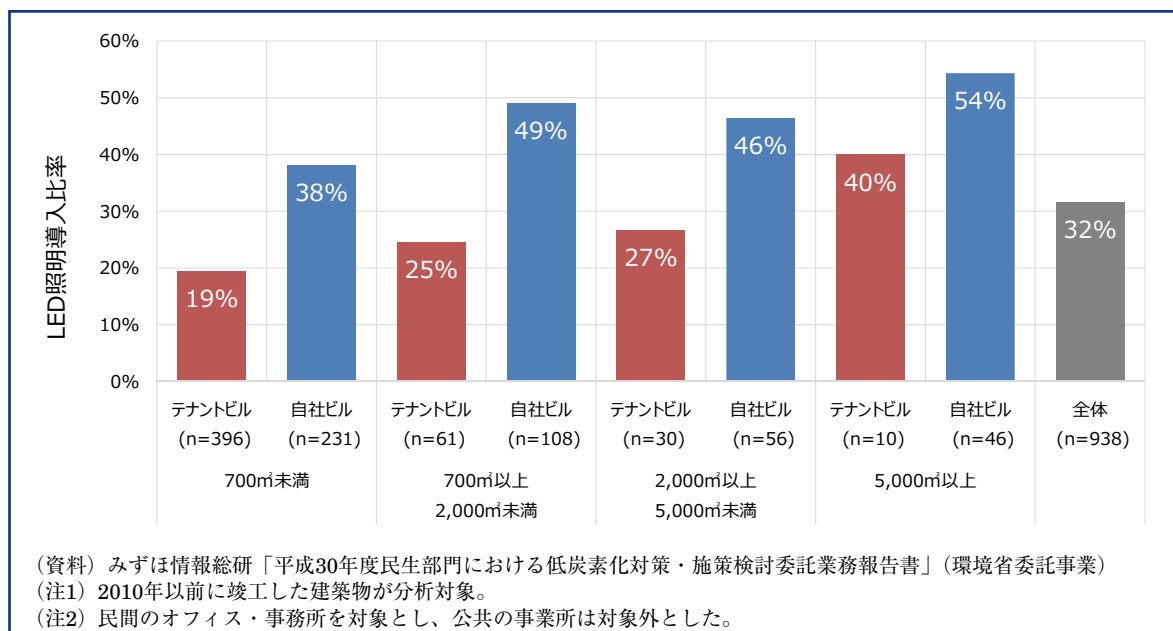
の東日本大震災以後であり、それ以前に竣工した建築物の多くは竣工時にはLED照明以外を設置していたものと考えられる。したがって、2010年以前に竣工した建築物でLED照明を導入している建築物の大部分は、LED照明を改修によって導入した建築物と考えることができる。LED照明導入比率が26%ということは、震災直後の2011年から調査時点の2018年末までの8年間の平均的な導入ペースは約3%/年(26%÷8年≒3%/年)となる。仮に照明器具の寿命を15年とし⁽⁴⁾、導入される照明がすべてLED照明だと仮定すると、導入ペースは約7%/年(100%÷15年≒7%/年)となる。これは現状の3%/年よりも大きいことから、ペースアップの余地があると言える。また、現在の導入ペースだと2030年のLED照明導入比率は約65%(26%+26%÷8年×12年≒65%)にとどまる。前述の地球温暖化対策計画の目標達成に向けては、既築建築物のLED照明への改修を促進する施策を充実させていく必要があるだろう。

(3)LED照明普及前に竣工したオフィス・事務所におけるLEDの普及状況

既築建築物のLED照明への改修状況をより詳細に分析するため、多くのサンプルが取得できた民間のオフィス・事務所について、LED照明導入比率を延床面積別(700m²未満、700m²以上～2,000m²未満、2,000m²以上～5,000m²未満、5,000m²以上)、所有関係別(自社ビル/テナントビル)に分析した(図表6)。

その結果、いずれの延床面積区分においても、テナントビルは自社ビルと比べてLED照明導入比率が10%～20%ポイント程度低かった。この原因として、いわゆる「オーナー・テナント問題」が考えられる。オーナー・テナント問題とは、テナントビルの専有部分に省エネルギー設備を導入する場合、導入費はオーナー負担となるが、導入による光熱費低減のメリットはオーナーではなくテナントが享受することが多く、結果として省エネ対策が進まないことを指す。本分析では、このオーナー・テナント問題をデー

図表6 民間のオフィス・事務所における延床面積別・所有関係別の主要なエリアのLED照明導入比率



タ的に捉えることができたといえる。

次に、テナントビルにおけるLED照明の導入ペースを分析する。LED照明導入比率は、延床面積の大きさによって若干異なっているが、ここでは700㎡以上2,000㎡未満を例にとる。このセグメントのLED照明導入比率が25%で、導入期間は震災直後から調査時点までの8年間であるから、平均的な導入ペースは約3%/年(25%÷8年≒3%/年)となる。このペースだと2030年のLED照明導入比率は約63%(25%+25%÷8年×12年≒63%)にとどまってしまう。先に述べたとおり、地球温暖化対策計画では業務部門におけるLED照明等の高効率照明のストックに占める割合を2030年度までに100%にすることを目指すとしている。この目標達成に向けては、既築の中でも特にテナントビルに対する施策を充実させていく必要があるだろう。

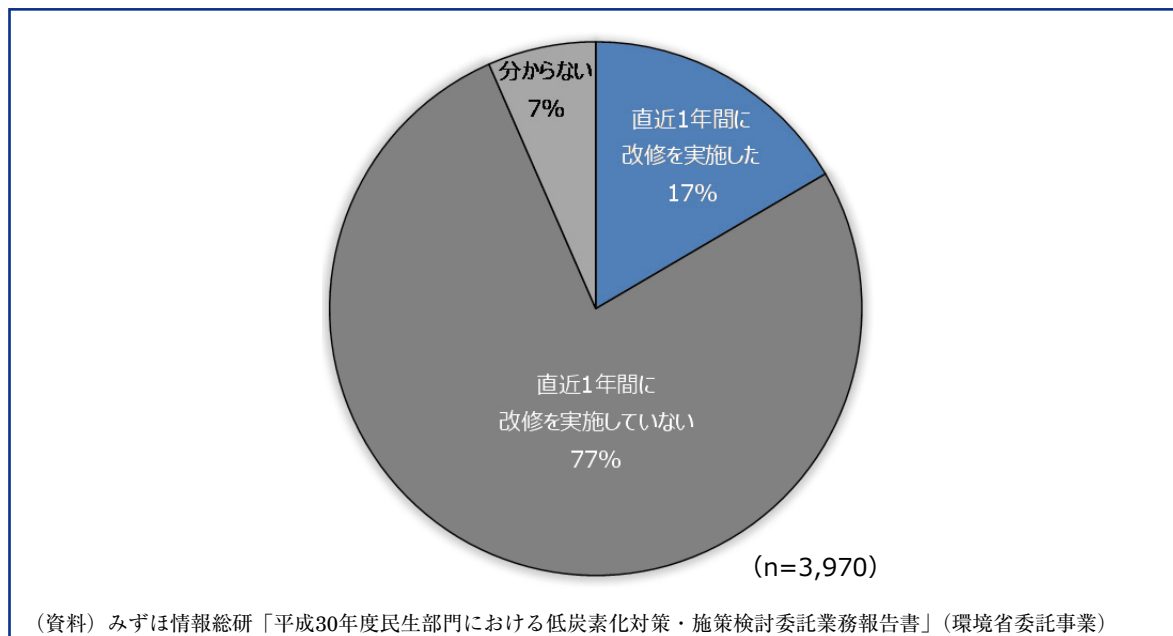
(4)直近1年間の照明の改修状況

続いて、足元の改修の状況を把握するため、図表7に直近1年間の照明の改修状況を示す。直

近1年間に改修を実施した事業所は回答が得られた事業所の17%となっている。仮に、照明器具の寿命を15年とすると、直近1年間に照明を改修した事業所は約7%(100%÷15年≒7%/年)になるため、直近の照明改修は相当早いペースで行われているといえる。なお、環境省グリーンビルナビによれば、照明のLED化は省エネ・コスト削減目的で計画よりも前倒して実施される場合があるため、他の改修(空調改修、外皮等を含む改修)と比べて高い頻度で行われる(図表8)。

図表9に、直近1年間に照明の改修を実施した事業所のうち、改修前後の照明の種類について回答が得られた事業所について、その改修内容を示す。蛍光灯からLED照明への改修が36%と最も多いが、蛍光灯から蛍光灯への改修も34%を占めている。LED照明への改修は一定水準では進んでいるが、先に図表2に示したとおり直近の照明器具全体の出荷台数に占めるLED照明器具の出荷台数の割合が約93%に達する状況を踏まえると、改修においては更なる対策の余地があることが窺える。

図表7 直近1年間における照明の改修状況

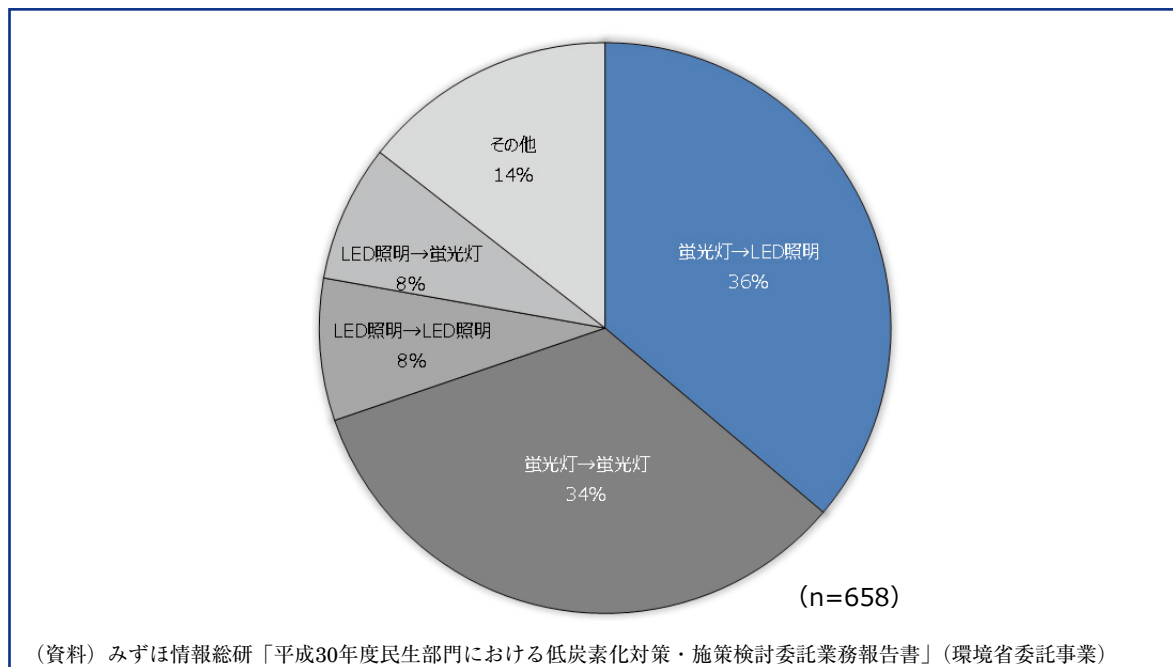


図表8 省エネ改修の頻度に応じた部位や改修等の動機

頻度	部位	改修等の動機
10～15年に一度	設備更新工事 (照明等)	・ 設備の故障、老朽化や耐用年数超過 ・ 照明のLED化は、省エネ・コスト削減目的で、計画よりも前倒しで工事が実施される場合がある
約20年に一度	設備更新工事 (空調等)	・ 設備の故障、老朽化や耐用年数超過 ・ テナントからの要請、クレーム(特に、空調を中央制御方式から個別制御方式に変更するニーズが高い)
20年に一度～ 建替えまで実施しない	大規模改修工事 (外皮等を含む)	・ ビル全体の老朽化、各設備等の耐用年数超過 ・ 耐震性能等へのニーズの高まりに伴い資産価値が相対的に低下 ・ 所有者の変更(大手資本による買収等)
随時	運用改善 (チューニング等)	・ 節電対応等の社会的要請 等

(資料) 環境省グリーンビルナビより作成⁽⁵⁾

図表9 直近1年間で照明の改修を実施した事業所の改修内容



(5) LED 照明の効率に対する意識

LED 照明は寿命が長く、一度設置されると長期にわたって使用される。そのため、もし、エネルギー消費効率の悪い LED 照明が導入されると、それが長期にわたり使用され、省エネ余地を損なう可能性がある。最新の LED 照明にはエネルギー消費効率が200lm/W⁽⁶⁾程度の製品が登場している一方で、100lm/W程度の製品もあるなど、製品によって効率に大きな差がある。このような状況を踏まえると、地球温暖化対策計画の見直しに関する議論や長期的な大幅削減を視野に入れる場合、単に LED 照明の普及を図るだけでなく、より高効率な LED 照明の普及を図る必要があると考えられる。このような問題意識のもと、以下2点の調査を実施した。

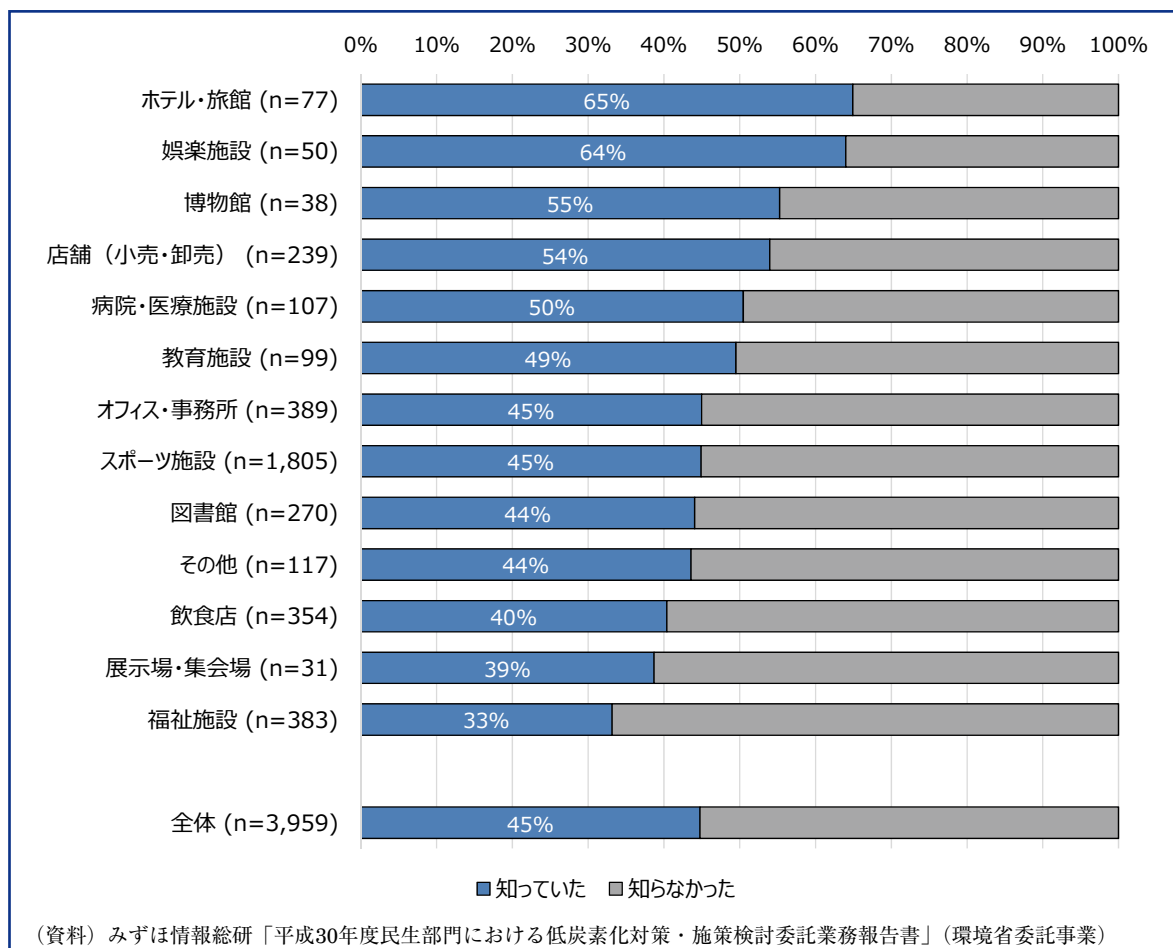
- ・ LED 照明のエネルギー消費効率に関する知識の有無(事業所の担当者は、LED 照明にも様々なエネルギー消費効率の製品があることを認識しているか否か)。
- ・ 直近1年に LED 照明への改修を実施した事業

所における、照明器具選定の際のエネルギー消費効率の考慮の程度。

図表10に、LED 照明のエネルギー消費効率に関する知識の有無に関する結果を示す。本調査において「LED 照明でも製品によりエネルギー消費効率に相当の差がある状況を知っていたか」について尋ねたところ、全体ではおよそ半数の45%の事業者が「知っていた」と回答し、製品によってエネルギー消費効率に差がある状況がある程度認知されていることが確認された。建物用途別に見ると、ホテル・旅館、娯楽施設などでは60%以上の事業者が「知っていた」と回答した。一方で、中小規模の事業所が多いと考えられる飲食店や福祉施設などでは30~40%程度となっており、建物用途によって差がある状況が確認された。

図表11に、直近1年に LED 照明への改修を実施した事業所における、照明器具選定の際のエネルギー消費効率の考慮の程度を示す。およそ

図表10 建物用途別のLED照明のエネルギー消費効率に関する知識の保有状況



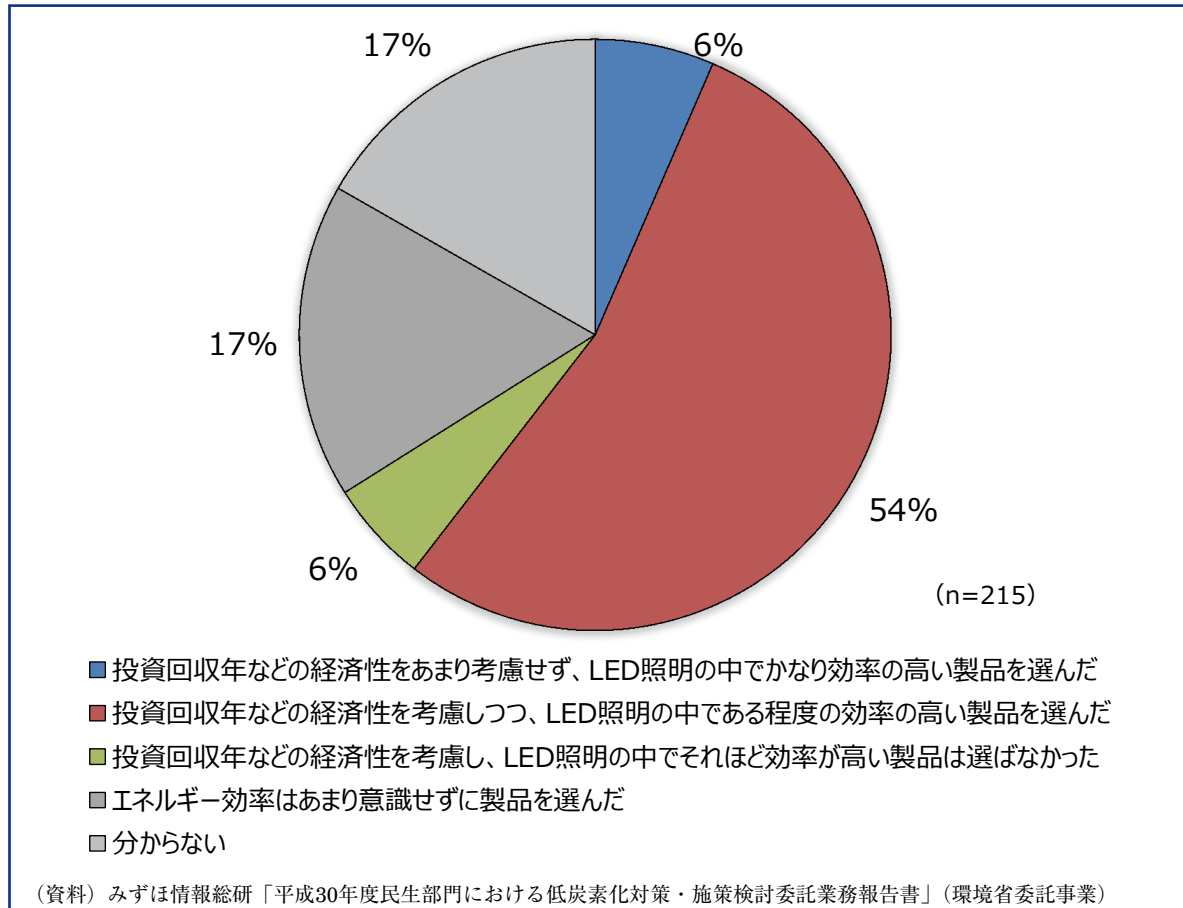
半数の54%の事業者が投資回収年などの経済性も考慮しつつある程度効率の高い製品を選択していたが、17%の事業者はエネルギー消費効率を意識せずに製品を選択しており、必ずしも効率のよいLED照明が導入されているとは限らない可能性が示された。後者の割合はそれほど大きくないものの、限られた省エネ余地の中でさらに省エネ対策を進めようとしている現状においては、見逃せない割合であるだろう。

4. 照明の温暖化対策の更なる推進に向けて

前述の分析結果より、直近(2015年～2018年)に竣工した建築物ではLED照明導入比率は

80%に及ぶこと、既築建築物でのLED照明への改修が進んでいること、しかし目標対比での改修ペースは十分とはいえないこと、特にオフィス・事務所においてはテナントビルでの導入ペースが遅いことが明らかとなった。テナントビルでの導入ペースが遅い要因としては既述のとおりオーナー・テナント問題が考えられる。この問題を解決する方法の一つとして「グリーンリース」の普及が考えられる。グリーンリースとは、ビルオーナーとテナントが協働し、不動産の省エネなどの環境負荷の低減や執務環境の改善について契約や覚書等によって自主的に取り決め、その取り決め内容を実践していく取組である⁽⁷⁾。この取組を円滑に進めるためには、オーナーと

図表11 直近1年間に改修を行った事業所における照明を改修した際のLED照明のエネルギー消費効率に対する意識



テナントの仲介ができ、契約等の手続きにも詳しいプレーヤーが必要となる。環境省と国土交通省は昨年度まで「テナントビルの省CO₂促進事業」などの予算により、この取組を支援してきた。しかし、そのようなプレーヤーはまだ十分には育っておらず、グリーンリースも進んでいない。長期戦略においても、オーナー・テナント問題は取り上げられていることも踏まえれば、前述のようなプレーヤーを育成するためにも、引き続き政策的支援が必要ではないだろうか。

また、LED照明の導入は全体としては進んでいるものの、必ずしも効率のよいLED照明が導入されていない可能性が示唆された。照明器

具は法定耐用年数が15年であり、長期間にわたって使用されると考えられる。地球温暖化対策計画の見直しや長期的な大幅削減を視野に入れた場合は、より高効率なLED照明の導入を推進していくべきであると考えられる。そのためには、単に高効率なLED照明の導入に対する支援を行うだけでなく、高効率な製品の認知度を高める普及啓発も必要となるだろう。また、中小規模の事業所が多いと考えられる飲食店や福祉施設などが主たるターゲットとなることを踏まえ、セグメントに応じたアプローチ手法や発信内容の工夫も必要となるだろう。各セグメントにおける省エネに関する情報取得チャネル、設備導入に関する意思決定プロセス、担当者の

省エネに関する理解度等に応じた普及啓発が望まれる。

注

- (1) 民生部門は家庭部門と業務部門の総称。
- (2) 地球温暖化対策計画では計画に掲げた110個の対策（業務部門以外も含む）の進捗状況を毎年点検してAからEの5段階で評価をしている。2019年3月に公表された最新の評価結果ではB以上の評価を得た対策は30個（約27%）であった。
 - A. このまま取組を続ければ目標水準を上回ると考えられる対策のうち、実績が既に目標水準を上回るもの：10件
 - B. このまま取組を続ければ目標水準を上回ると考えられる対策（A. を除く）：20件
 - C. このまま取組を続ければ目標水準と同等程度になると考えられる対策：50件
 - D. 取組がこのままの場合には目標水準を下回ると考えられる対策：25件
 - E. その他定量的なデータが得られないもの等：5件
- (3) 主要なエリアの照明の種類について回答があったサンプルのうち、主要なエリアの照明の種類が「LED照明」と回答したサンプルの割合。
- (4) 社団法人照明学会・社団法人日本照明器具工業会（2011）「えっ…まだ昭和の器具をお使いですか？」より。
- (5) 環境省グリーンビルナビ <http://www.env.go.jp/earth/info/greenbuilding/>
- (6) lm/W は全光束（lm）を効率（W）で除したエネルギー消費効率を表す単位で、数値が大きいほどエネルギー消費効率が優れている。
- (7) グリーンリースの定義は環境省ホームページ「グリーンビルナビ」に基づく。<http://www.env.go.jp/earth/info/greenbuilding/tool/doc.html>

社会動向レポート

中長期的な気候変動対策における
国際協力とコ・イノベーション

環境エネルギー第1部 地球環境チーム グローバルイノベーション&エネルギー部
 コンサルタント 長島 圭吾 シニアコンサルタント 熊久保 和宏

はじめに

2015年12月、フランス・パリで開かれた気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)において新たな地球温暖化対策の国際的枠組み「パリ協定」が採択され、世界共通の長期削減目標として、「世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力の追及」や「全ての締約国は温室効果ガスについて低排出型の発展のための長期的な戦略を立案、及び提出するよう努力すべき」ことなどが規定された。

このような背景のもと、環境省では、低排出型の発展のための長期的な戦略の立案も見据えて、2018年3月、中長期的な気候変動緩和策における国際協力のあり方を「気候変動緩和策に関する国際協力ビジョン⁽¹⁾」としてとりまとめ、中長期的な気候変動対策の国際展開の重要な手法として「コ・イノベーション(Co-innovation)」を以下の通り提示した：

コ・イノベーションとは、我が国の技術や制度をパートナー国⁽²⁾にそのまま導入・普及させる一方向のものではなく、パートナー国と我が国の協働により、パートナー国に適した脱炭素製品・サービス・技術の市場創出と経済社会システム、ライフスタイルの大きな変革をもたらすイノベーションである。

世界の経済成長と脱炭素化をけん引するべく、次の2点を柱として国際展開を実施していく。

- ①日本の強みである環境技術、質の高いインフラ・製品・サービスを世界に展開。
- ②パートナー国と我が国の協働を通じて、双方に裨益(ひえき)あるイノベーション(コ・イノベーション)を創出。

このように、コ・イノベーションは、環境省において中長期的な気候変動対策に関する国際展開の重要な手法として位置付けられた。一方で、新しい手法であるため、未だその定義の解釈や具体的なイメージが定まっていない状況である。

そこで本稿では、中長期的な気候変動対策の国際展開においてコ・イノベーションが必要とされる背景や、コ・イノベーションと既往手法を整理するとともに、当社がコ・イノベーションをテーマに開催した「みずほビジネスイノベーションフォーラム」での意見も踏まえて、今後のコ・イノベーションの促進に向けて有効となる政策を提示する。

1. コ・イノベーションが必要とされる背景

はじめに、コ・イノベーションが必要とされる背景について、世界のエネルギー起源CO₂排出量の見通し、世界のGDP構成の見通し、2050

年までの CO₂排出量の削減経路の3つの観点から説明する。

(1)世界のエネルギー起源 CO₂排出量の見通し

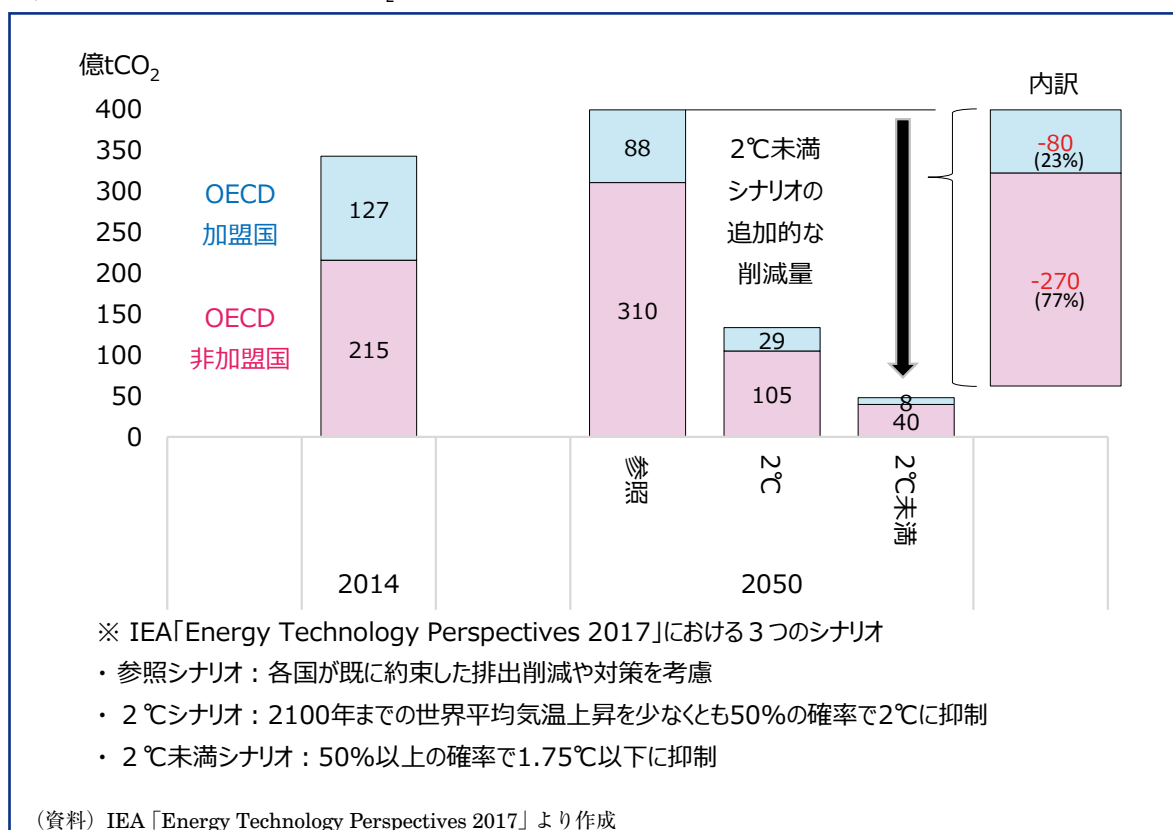
はじめに、世界のエネルギー起源 CO₂排出量の見通しを確認する。IEA⁽³⁾の「Energy Technology Perspectives (エネルギー技術展望) 2017」では、将来の CO₂排出量について、参照シナリオ、2℃シナリオ、2℃未満シナリオの3つのシナリオについて分析を行っている。参照シナリオとは各国が既に約束した排出削減や対策を考慮したもので、2℃未満シナリオとは2100年までの世界の平均気温上昇を50%以上の確率で1.75℃に抑制するものであるが、図表1が示すように、この両シナリオを比較すると、OECD加盟国で2050年に80億 tCO₂、OECD 非加盟国

で270億 tCO₂の CO₂を追加的に削減することが必要とされている。OECD 非加盟国が世界全体で2050年に追加的に必要とする削減量の約8割を占めており、世界全体でのパリ協定の目標達成のためには、現在の途上国の取組が鍵となることがわかる。

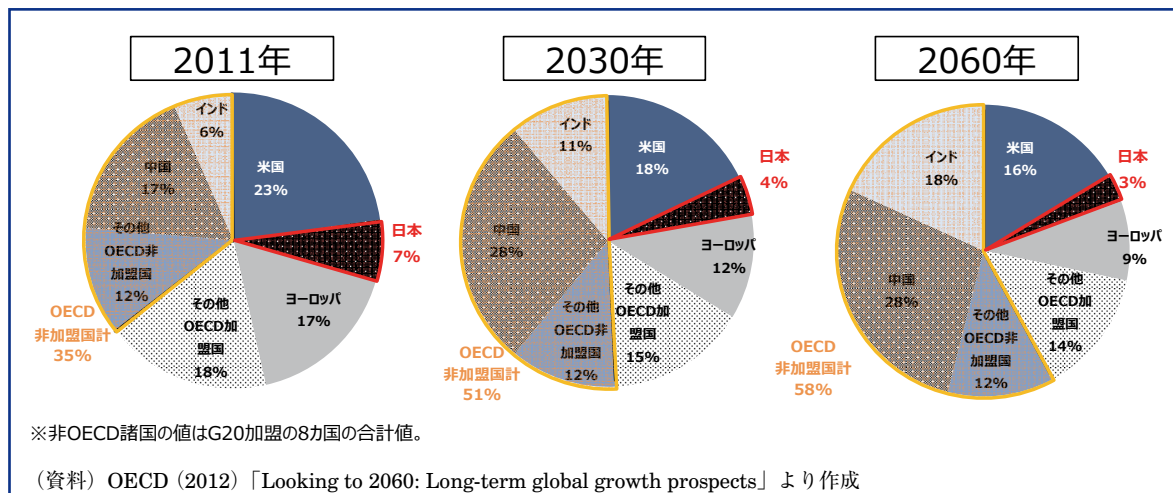
(2)世界の GDP 構成の見通し

次に、GDP 構成についてみる。図表2の通り、OECD (2012)の見通しでは、世界全体の GDP に占める OECD 非加盟国の割合は、2011年の35%から2060年に58%に大きく拡大している。一方で、日本は、2011年の7%から2060年には3%に低下すると見込まれている。今後、現在の途上国が世界経済におけるプレゼンスを大きく高め、日本との経済格差は縮小することが予

図表1 世界のエネルギー起源 CO₂排出量と削減量の内訳



図表2 世界の GDP 構成の予測



想される。

(3) 2050年までの CO₂排出量の削減経路

最後、3つ目が、2050年までの CO₂排出量の削減経路である。図表3の青線にあるように、先進国はこれまで、CO₂排出量を増加し続けながら社会・経済を発展させる、いわば、“エネルギー・資源浪費型の発展”を遂げてきた。しかし、パリ協定の目標達成のためには、“経済成長と温室効果ガスの排出削減との両立”を図ることが求められる。一方、現在の途上国は、今後社会・経済の成長が見込まれる中で、先進国がこれまで歩んできた“エネルギー・資源浪費型発展”を追従する形(図表3のオレンジ点線)で発展するのではなく、先進国が歩んできた経路を飛び越えて直接、脱炭素社会へ移行する削減経路(図表3の緑点線)が必要とされる。

以上のように、世界全体でのパリ協定の目標達成のためには、途上国の取組が鍵となり、今後、途上国と日本の経済格差は縮小することが予想される。また、途上国には、先進国が歩んできた経路を飛び越えて直接、脱炭素社会へ移行する削減経路が必要とされる。

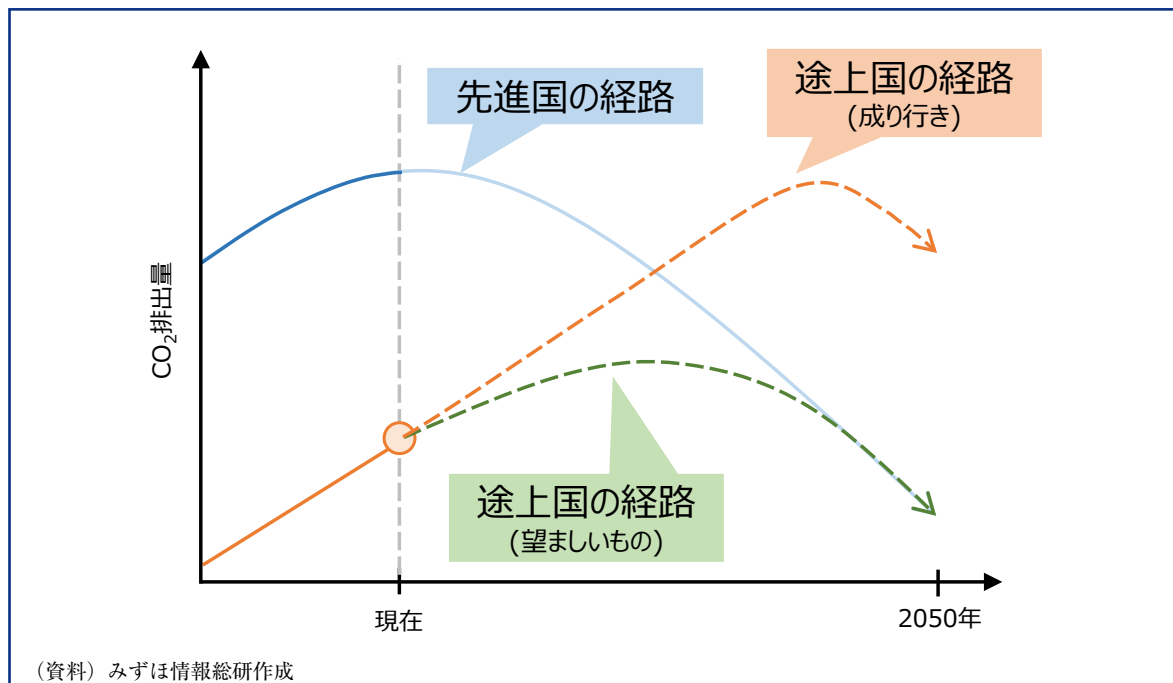
先進国・途上国の2050年までに歩むべき経路が異なる中、途上国では、先進国と比べてインフラ整備が遅れている反面、インフラの新規導入の余地が多く、脱炭素技術の短期の導入可能性が高い。一方で日本には、途上国と比べて資金、技術、人材、制度が豊富である。中長期的な気候変動対策における国際協力においては、お互いの強みを活かしつつ、日本と途上国の協働により、脱炭素製品・サービス・技術の市場創出と経済社会システム、ライフスタイルの大きな変革をもたらすイノベーション(「コ・イノベーション」)が重要となると考えられる。

2. 既往手法とコ・イノベーションの整理

このように、中長期的な気候変動対策に関する国際協力では、コ・イノベーションが重要となるが、コ・イノベーションは未だ新しい手法で、解釈や具体的なイメージが明確ではない。そこで、本項では、既往手法を参照しながら、コ・イノベーションとはどのような手法なのか、整理を試みる。

(1) 既往手法の整理

はじめに、国際協力における既往手法として、

図表3 先進国・途上国のCO₂排出量のイメージ

環境省「気候変動緩和策に関する国際協力ビジョン」の検討において取り上げられた、技術移転、現地化、ジュガード・イノベーション、リバース・イノベーションの4つの手法について確認する。

第一の手法は、技術移転である。図表4の左上にあるとおり、先進国内での課題・ニーズがまず先にあり、その課題を先進国のソリューションで解決する(①)。そこで活用したソリューションを、そのまま途上国に移転し(②)、そのソリューションで途上国の課題・ニーズを解決する(③)。

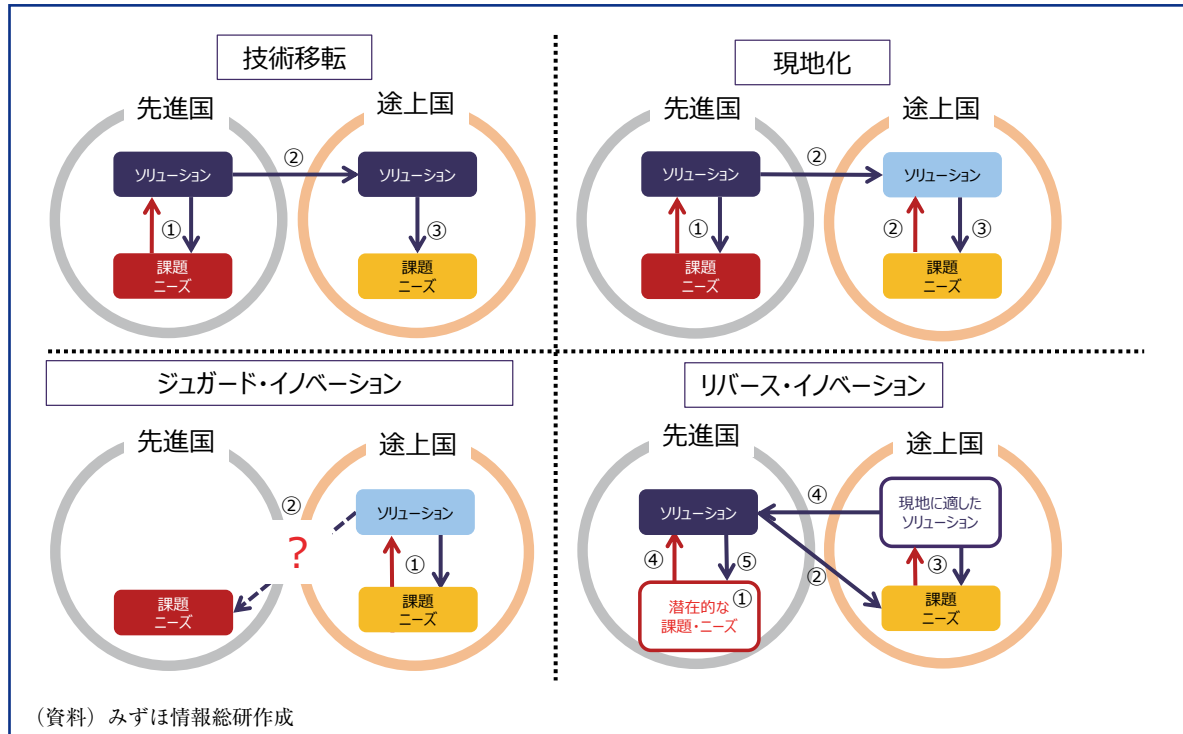
第二の手法は、現地化である。図表4の右上にあるとおり、先進国内で課題・ニーズがまず先にあり、その課題を先進国のソリューションで解決する(①)。次に、現地化では、活用したソリューションを途上国の課題・ニーズに応じてカスタマイズし(②)、そのソリューションで途上国の課題・ニーズを解決する(③)。先進国のソリューションをそのまま途上国に展開しな

い点で、技術移転とは異なる。

第三の手法は、ジュガード⁽⁴⁾・イノベーションである。図表4の左下にあるように、途上国特有の市場環境・ニーズがまず先にあり、それに対応するソリューションが生まれる(①)もので、生まれたソリューションが先進国に還元されるかどうかは問わない(②)。

第四の手法は、リバース・イノベーションである。図表4の右下にあるように、先進国に潜在的な課題・ニーズがまず先にあり(①)、それに対応する技術的な能力が先進国内にある中で、途上国のほうがソリューションを創る環境が整っている等の理由で、先進国の技術的能力を途上国に持ち寄り(②)、途上国で現地に適したソリューションを生み出し、途上国の課題・ニーズに対応(③)した上で、先進国の潜在的な課題・ニーズを踏まえながらそれを先進国に取り入れる(④)ことで先進国の潜在的な課題・ニーズに対応させるものである(⑤)。

図表4 先進国の途上国に対する国際展開の手法(例)



(2)コ・イノベーションとは

—新しい時代の協力のあり方—

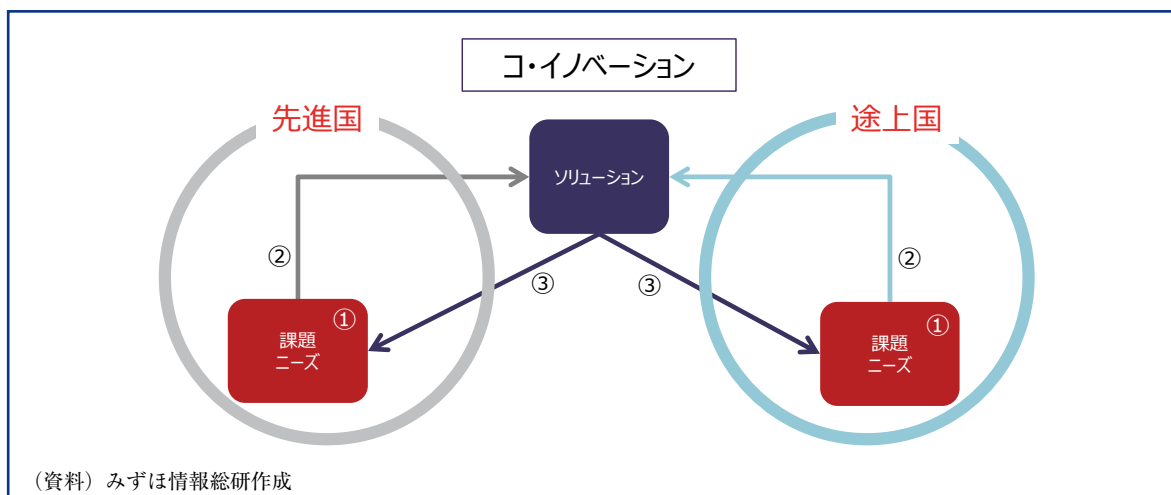
以上の4つの手法に対して、コ・イノベーションとは、どのような手法なのだろうか。冒頭で説明したように、コ・イノベーションとは、「我が国の技術や制度をパートナー国にそのまま導入・普及させる一方向のものではなく、パートナー国と我が国の協働により、パートナー国に適した脱炭素製品・サービス・技術の市場創出と経済社会システム、ライフスタイルの大きな変革をもたらすイノベーション」である。すなわち、図表5に示したとおり、途上国では、社会・経済の成長とともにビジネスの環境が徐々に整い、先進国と共通の課題が出現する(①)。それぞれの強みを活かしつつ、途上国と我が国の協働により共通のソリューションを生み出し(②)、そのソリューションで先進国・途上国の課題・ニーズを解決する(③)ものである。

「Co」という言葉には「一緒に」の意味がある。途上国を“パートナー”と捉え、一緒にその国に合った製品やサービスの市場を創り、イノベーションにつなげていきたい、というメッセージがこの言葉には込められていると感じる。これまでの国際展開の手法に、新しい手法が提示された形だ。

3. 今後の気候変動対策における国際協力のあり方

以上をふまえ、中長期的な気候変動対策に関する国際協力において重要となるコ・イノベーションを促進するために、今後、どのような考え方や取組が必要とされるのか、考えてみたい。これに関連して、今年1月に「コ・イノベーション」をテーマに当社が開催したフォーラム⁽⁵⁾において、官民4名の有識者から様々な意見があった。ここでは、コ・イノベーションを促進する

図表5 コ・イノベーションのイメージ



ためには、政府による具体的な目標設定やその実現のための政策の策定・実施が必要であるとの意見が挙げられた。具体的には、政府として何を目指すのかというゴールが明確に示されているからこそ企業は中長期的なビジョンを掲げることができるということ、そして投資環境整備は、政府による目標や政策によって担保されるということであった。それでは今後、政府には、コ・イノベーションを促進するためにどのような目標や政策の策定が求められるのか、以下に3つ取りあげたい。

① 気候変動緩和策に関する国際協力の長期目標の策定

まず、気候変動緩和策に関する国際協力の長期目標の策定である。気候変動緩和策に関する国際協力に関連して現在定められている目標としては、日本の約束草案(2020年以降の新たな温室効果ガス排出削減目標⁽⁶⁾)においてはJCM(二国間クレジット制度)の日本政府事業分により2030年度まで累積で5,000万から1億t-CO₂の削減目標が記載されており、内閣府「エネルギー・環境イノベーション戦略⁽⁷⁾」においては、2050年に全世界で数10～100億トン規模の削減

ポテンシャルが記載されている。長期についてはポテンシャルの記載に留まっており、目標値はない。2018年6月より、首相官邸で「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」が開催され、2050年を見据えた議論が始まっており⁽⁸⁾、気候変動緩和策に関する国際協力においても、明確な長期の定量目標の策定について議論が行われることを期待したい。

② 気候変動緩和策に関する国際協力のロードマップの策定

次に、気候変動緩和策に関する国際協力のロードマップの策定である。気候変動緩和策に関する国際協力の実行にあたっては、政府、自治体、業界団体、企業、専門家、NGO、研究機関等、様々なステークホルダーによる取組が必要となる。2018年3月に策定された「気候変動緩和策に関する国際協力ビジョン」及び2018年6月より首相官邸で開催されている「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」等を受けて、どのような体制で進めていくか、どの主体がどのような削減行動をすべきなのか、より具体化するロードマップを策定し、様々なステークホルダーの取組強化の促

進が重要と考えられる。

③ 気候変動適応策への拡充

最後に、気候変動適応策への拡充である。途上国においては、気候変動の適応にも高いニーズが存在しており、市場規模も拡大傾向にある⁽⁹⁾。しかし、2018年3月に策定された「気候変動緩和策に関する国際協力ビジョン」では、適応策については、「このビジョンは気候変動緩和策を対象とするものであるが、持続可能な開発目標(SDGs)に基づく施策の推進の観点も含め、適応策についても積極的な国際協力を行う」と記載するに留まっている。2018年6月に公布された気候変動適応法においては、4つの柱の1つとして「適応の国際展開等」が位置づけられており、適応策に関する国際協力についても、中長期のビジョン、ロードマップの策定が重要と考えられる。

4. おわりに

本稿では、気候変動緩和策に関する国際展開において重要な手法となるコ・イノベーションについて、必要とされる背景や既往手法も踏まえた整理を行った。今後、コ・イノベーションの促進が期待されるが、そのためには、政府による明確な目標や政策の策定が必要となるだろう。2018年6月より首相官邸では「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会」が開催され、2050年を見据えた議論が始まっており、2019年6月には、G20（金融世界経済に関する首脳会合）が日本で初めて開催される。世界が日本に注目する中、気候変動緩和策に関する国際協力の長期目標やロードマップの策定、気候変動適応策への拡充など、明確な目標や政策の策定に期待したい。

注

- (1) 気候変動緩和策に関する国際協力ビジョン(環境省ウェブサイト https://www.env.go.jp/earth/post_37.html)
- (2) 環境省「気候変動緩和策に関する国際協力ビジョン」によると、パートナー国とは、「我が国と気候変動緩和策に係る国際協力を行う途上国」とされる。
- (3) IEA (International Energy Agency: 国際エネルギー機関)は、第1次石油危機後の1974年に、キッシンジャー米 국무長官(当時)の提唱を受けて、OECDの枠内における機関として設立された。事務局所在地はパリ。エネルギー政策全般をカバーし、①石油・ガス供給途絶等の緊急時への準備・対応と市場の分析、②中長期の需給見通し、③エネルギー源多様化、④電力セキュリティ、⑤エネルギー技術・開発協力、⑥省エネルギーの研究・普及、⑦加盟国のエネルギー政策の相互審査、⑧非加盟国との協力等に注力している。
- (4) ジュガード(Jugaad)はヒンディー語で「革新的な解決策」や「創意工夫と賢さから生まれた解決策」の意。
- (5) みずほビジネスイノベーションフォーラム(みずほ情報総研ウェブサイト <https://www.mizuho-ir.co.jp/seminar/info/2019/bif0128.html>)
- (6) 日本の約束草案(2020年以降の新たな温室効果ガス排出削減目標)(環境省ウェブサイト <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2020.html>)
- (7) エネルギー・環境イノベーション戦略(NESTI2050)(内閣府ウェブサイト <https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/index.html>)
- (8) パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略策定に向けた懇談会(首相官邸ウェブサイト <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/parikyoutei/>)
- (9) 国連環境計画(2018)「The Adaptation Gap Report」によると、「気温上昇を産業革命前から2℃に抑えた」状態では、適応対策にかかるコストは2025～2030年では年間1,400億米ドル～3,000億米ドル、2030～2050年では年間2,800億米ドル～5,000億米ドルと試算している。

社会動向レポート

グリーンボンドと EU タクソノミー

—企業の移行と他者貢献の促進に向けて—

環境エネルギー第2部

シニアコンサルタント 永井 祐介

近年、グリーンボンドを発行して自社戦略の訴求や投資家拡大を行う企業が急増している。本稿ではグリーンボンドの概要や資金使途に関する EU 基準(タクソノミー)案を紹介し、企業の新たな選択肢となり得る「移行」や「他者貢献」グリーンボンドについて考える。

1. はじめに

パリ協定が目指す「脱炭素社会」の実現や「SDGs⁽¹⁾」の達成には、そうした目標に貢献する企業活動を促進していく必要がある。現在その手法の一つとして、資金使途を環境改善効果のある事業に限定した債券である「グリーンボンド」⁽²⁾が注目されている。

企業にとって、グリーンボンドは脱炭素社会の実現や SDGs に対する自社の貢献をアピールするだけでなく、自社の成長戦略を投資家等に訴求し投資家層を拡大する手法でもある。実際にそうした効果を狙ってグリーンボンドを発行する国内企業も急増しており、資金使途も再エネ発電や省エネビルのみならず再エネ調達や部品工場建設、研究開発まで多様化している。今後も、ESG 投資の拡大を背景に様々なグリーンボンドの発行が続くと予想される⁽³⁾。まだグリーンボンドを発行していない企業も、自社戦略や取組を投資家に適切に訴求すべく、発行機会を見逃さないことが重要である。

そしてグリーンボンドを投資家に効果的に訴求するには、資金使途の適切な設定が重要である。最近では資金使途の環境改善効果の有無だけでなく、その改善効果の度合い(グリーン性)

も問われる傾向となっており、EU や ISO においてグリーンボンド適格事業の基準も検討されている。特に2019年6月に EU が公表した基準案は非常に厳しい基準値を提示しており、大きな議論を呼んでいる。今後は、これらの基準の考え方や基準値を把握した上で自社の訴求ストーリーを構築することが必要である。なお、これらの基準はグリーンボンドのみならず、今後どのような活動を「環境に優しい」活動と定義するか、という議論でもあり、グリーンボンド発行予定の有無にかかわらず注視すべき議論である。

そこで本稿では、グリーンボンドの概要や EU 基準案を紹介し、企業にとって有望な選択肢となり得る「移行」や「他者貢献」を資金使途とするグリーンボンドについて考える。

2. グリーンボンドとは

グリーンボンドとは、資金使途を「グリーンな活動(CO₂削減等の環境改善効果のある活動)」に限定した債券である⁽⁴⁾。

企業がグリーンボンドを発行する狙いは、投資家等に自社の中長期的な成長戦略や環境ビジョンや具体的な取組を訴求し、環境や社会課題に貢献する投資先を重視する ESG 投資家(年

金基金や保険会社、運用機関)等の新たな投資家からの資金を呼び込むことである(図表1参照)。

但し、ESG 投資家がどのような資金用途を「グリーンな活動」と捉えるかは、投資家によっても異なり、また NGO や EU 等の国際的な議論にも影響される。グリーンボンドを発行したものの、NGO 等から批判を受けてかえって評

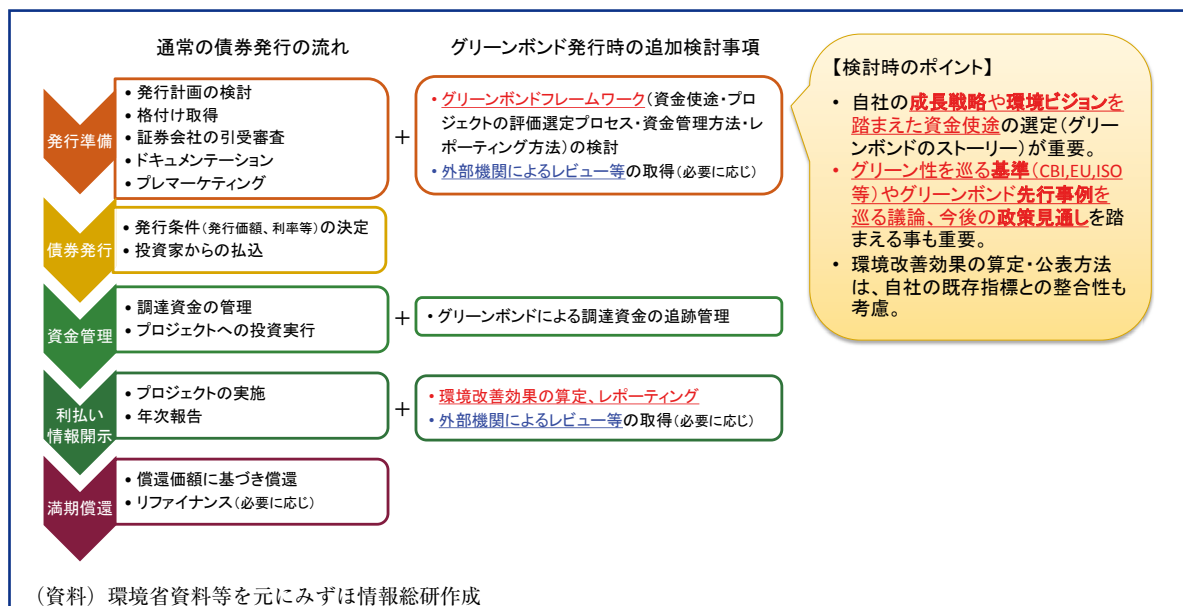
判が落ちるような事態は避けねばならない。そのため、資金用途選定の際には、自社の成長戦略や環境ビジョン等を踏まえたストーリーを描くと共に、グリーン性を巡る最新の議論動向や今後の政策見通しも踏まえる事が重要である(図表2参照)。

図表1 グリーンボンド発行の狙い

[1] 投資家等に対し 自社の戦略・取組 を訴求	グリーンボンド発行を機に、脱炭素社会や SDGs 達成に向けて変化する社会環境下における自社の中長期的な成長戦略や、環境ビジョンや具体的な取組を、投資家やメディアに訴求することが可能となる。また外部機関による外部評価(レビュー等)を受けることで、自社目標や取組のグリーン性について説得力を増すことも可能となる。
[2] 投資家層の拡大 による資金調達基 盤強化	ESG 投資家はグリーンボンドの購入に積極的であり、通常の社債であれば購入実績がない企業の社債もグリーンボンドであれば購入する傾向にある(特に今はグリーンボンド等が需要に対して供給不足のため、この傾向が強いと考えられる)。その結果、企業はグリーンボンド発行により投資家層の拡大が可能となる。
[3] 低金利での資金 調達の可能性	通常の債券よりも低金利での資金調達が実現したとの事例もあるが、検証データ蓄積も不十分であり金利面の優位性は不明確。今後、政府の推進策拡大や規制強化、ESG 意識の高まり等が起こると低金利での資金調達可能性は高まる。
[4] ESG 取組に対す る社内理解の促進	一般的に企業の ESG 取組は長期視点に立ったものであり短期的な成果は見えにくいだが、グリーンボンド発行により ESG 投資家の資金を実際に呼び込み、直接的な成果として具現化することは、ESG 取組に対する社内理解の促進にも寄与しうる。

(資料) みずほ情報総研作成

図表2 グリーンボンド発行時の流れとポイント



3. グリーンボンドの対象活動を巡る議論

グリーンボンドにより投資家に適切に訴求するには、資金使途の適切な選定が重要である。グリーンボンドは黎明期でもあり、これまでは資金使途のグリーン性はあまり厳しく問われなかったが、最近ではグリーン性の疑わしいものを排除しグリーン性の優れたものを高く評価するために、資金使途に関する基準作りも進んでいる。そこで本章では、既存のガイドライン類と現在検討中の EU 基準案を紹介する。

3.1. 既存のガイドライン類

(1) ICMA「グリーンボンド原則」

現在世界で広く参照されているガイドラインは ICMA（国際資本市場協会）が作成した「グリーンボンド原則」である。この原則は、グリーンボンドの透明性確保と情報開示を促進するためのガイドラインであり、グリーンボンド発行主体が策定・公表すべき要素（[1] 資金使途、[2] プロジェクトの評価及び選定のプロセス、[3] 調達資金の管理、[4] レポーティング）を規定している。

但しこの原則は、あくまでも透明性や情報開示に焦点を置いたものであり、資金使途の例示はしているが、資金使途を限定する性格のものではない。

(2) 環境省「グリーンボンドガイドライン」

日本の環境省が ICMA の原則を参考に作成したものが「グリーンボンドガイドライン」である。ICMA の原則と同じ4要素の手続きについて、対応方法の例や日本の特性に即した解釈を示したものであり、資金使途の例示はしているが限定はしていない。むしろ基本的考え方として「グリーンボンドが投資の対象として選択されるか否かは、最終的には市場に委ねられるものと考えられる。」と明記している。

現在、このガイドラインの見直しが行われているが、資金使途の厳格化については今のところ時期尚早と整理されている。

(3) CBI「気候ボンド基準」

一方で、資金使途について明確な基準を設定しているのが、国際 NGO の CBI（気候債券イニシアティブ）⁽⁵⁾が作成した「気候ボンド基準」である。これは、グリーンボンドの透明性や情報開示ではなく、資金使途がパリ協定の目標に対して十分かどうかを認証するための基準であり、活動毎に基準値が設定されている。既に風力、太陽光、電車、水、住宅等の11の活動の基準が策定済みであり、今後も廃棄物や農業、送電網、IT 等の様々な基準が策定される予定である⁽⁶⁾（図表3参照）。

この基準は、先述した ICMA の原則や環境省

図表3 CBI 基準策定状況

	基準策定済み	基準策定中	近々検討開始
エネルギー	風力／太陽光／地熱／海洋	水力／バイオマス	送電網
運輸	電車／車／バス・高速輸送	海運	－
ユーティリティ	水	リサイクル・再利用／廃棄	IT／通信
建物	住宅／商業ビル	－	－
天然資源	森林	農業／漁業	－
産業	－	－	セメント／鉄鋼／製造・加工

（資料）CBI 資料を元にみずほ情報総研作成

ガイドラインと補完関係にある。すなわち、グリーンボンドの全体枠組みである4要素（[1] 資金使途、[2] プロジェクトの評価及び選定のプロセス、[3] 調達資金の管理、[4] レポーティング）について ICMA の原則や環境省ガイドラインに準拠した上で、資金使途のグリーン性について CBI 基準に準拠することでグリーンボンドのグリーン性の説得力を高める、といった使い方がされている。

CBI は規制当局ではないが、主要なグリーンボンド指数の中には CBI が認めたものしかグリーンボンドと認めないもの⁽⁷⁾もあり、また CBI のメンバーは後述する EU や ISO における基準作りにも関与している等、その影響力は大きい。

また CBI は基準策定や認証とは別の活動として、世界各国で発行されたグリーンボンドの資金使途についてグリーンと呼べるか否かを独自に判断し、ホームページ上で公表する活動も行っている。企業にとっては、せっかく自社の戦略訴求のためにグリーンボンドを発行しても、CBI に批判されることで評判が落ちる可能性もある。そのため、CBI の基準や最近の類似グリーンボンドに対する CBI の評価等を把握しておくこと

も重要である。

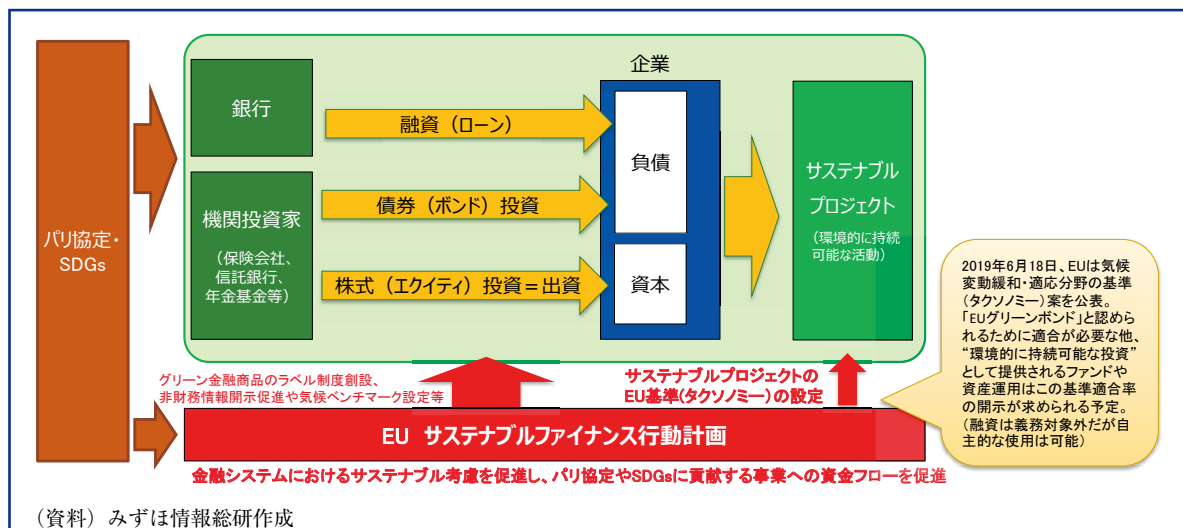
3.2. EU：サステナブルな活動に関する基準（タクソノミー）

(1) 背景

資金使途に関する公的基準作りで最も先行しているのは EU である。EU は2018年3月に、金融システムにおけるサステナブル考慮の強化等を促進するために「EU サステナブルファイナンス行動計画」を策定。現在、同計画の最優先事項として、脱炭素社会と SDGs 達成に資する「環境的にサステナブルな活動」の定義や基準値を定める「タクソノミー（taxonomy）」を策定中である（本稿ではタクソノミーおよびその中の基準を総称して「EU 基準」と呼ぶ）。2021年末までに気候変動緩和⁽⁸⁾・適応⁽⁹⁾・水・循環・汚染削減・生態系の6つの環境分野の EU 基準を完成予定であり、2019年6月には先行して気候変動緩和と適応分野の案が公表された（詳細は後述）。

EU 基準完成後は、「EU グリーンボンド」と認められるには資金使途の活動が EU 基準を満たす必要がある。またサステナビリティをテ-

図表4 企業の資金調達と EU 基準（タクソノミー）の位置づけ



マにしたファンドや資産運用は、EU 基準への適合率の開示が求められる。なお融資は適用対象ではないが、銀行が EU 基準に適合した活動向けのローン商品を組む可能性はある⁽¹⁰⁾。

企業にとっては、EU 基準に適合する活動を増やす事により、グリーンボンドやグリーンファンド、グリーンローン等による資金調達の可能性を高めることが出来る。更に、EU 基準は企業評価の指標としても活用される可能性も高く、グリーンな資金調達を行わない企業にとっても影響が大きい。

(2) 気候変動緩和に関する EU 基準案

2019年6月に公開された気候変動緩和に関する EU 基準案では、CO₂排出量の多い部門や主要な温室効果ガス削減・吸収対策として、7部門の67種の活動について「環境的にサステナブルな活動」と認められる為の基準等が示された(図表5、図表6参照)。

これらの基準の最大の特徴は、「2050年 CO₂ 排出量実質ゼロ(ネットゼロ)⁽¹¹⁾」を念頭において非常に高い水準となっている点である。これまで環境に優しい活動の代名詞でもあった「ガス火力発電」や「ハイブリッド自動車」も認めない他、石油からのプラスチック製造を認めない等、脱炭素社会における各産業の姿を示しているとも言える(具体的には、ガス火力発電の基準はライフサイクル排出量100gCO₂e/kWh となっており、CCS (CO₂の回収・隔離)無しでの基準達成は困難であるほか、乗用車も50gCO₂/km (WLTP⁽¹²⁾)となっており、ハイブリッドではなくプラグインハイブリッド等でないと達成できない水準となっている。プラスチック製造はリサイクル品または再生可能資源からの製造のみが認められている(図表6参照))。

この基準案のもう一つの特徴が、「①：既に脱炭素(CO₂排出ゼロ)な活動」に加えて、「②：現

時点では脱炭素ではないが、2050年脱炭素への移行段階の活動」、「③：①や②を支える活動」も適格とした点である。

①とは、例えば、再エネ発電や電車、電気自動車等の直接的 CO₂排出が無い活動である。これらは活動開始時点で既に脱炭素社会に適合するものであり、適格であることが非常にわかりやすい。

②とは、例えば、CO₂排出の少ない発電や自動車等、排出ゼロの活動ではないが、排出ゼロへの移行段階と認められる活動である。具体的には、発電と自動車の基準値はそれぞれ100gCO₂e/kWh、50gCO₂/km から開始されて次第に厳格化され、それぞれ2050年、2026年には0となる(図表6参照)。また、工業の低炭素化に向けた活動もここに含まれ、例えばアルミ、製鉄、セメント、化学品等における省エネ投資も、その投資により EU 内トップ事業者の原単位基準等をクリアした場合には適格となる。

③とは、①や②の活動を可能にする活動のことであり、「低炭素技術の製造」として、再生可能エネルギー向けの製品・主要部品・機器・機械や、低炭素輸送車両・鉄道車両・船舶の製造、ビル向け省エネ設備(断熱窓、省エネ家電、ヒートポンプ等)の製造、その他低炭素製品の製造(カーボンフットプリント評価を行い、第三者検証を得ることが条件)が位置づけられている(図表6参照)。

なお①と②は自社の排出削減を行う「Greening of」と呼ばれる活動であり、③は自社技術等により他者の削減に貢献する「Greening by」と呼ばれる活動である。

図表5 気候変動緩和分野の EU 基準(タクソノミー)が示された7部門・67活動

農林水産業	・多年生作物の栽培 ・非多年生作物の栽培 ・家畜生産 ・植林 ・復旧、復元 ・再植林 ・既存の森林管理	水、下水、廃棄物、浄化	・取水、処理、供給 ・中央排水処理システム ・下水汚泥の嫌気性消化処理 ・非有害廃棄物の排出源別の個別回収・輸送 ・バイオ廃棄物の嫌気性消化処理 ・バイオ廃棄物のコンポスト化 ・廃棄物からの資源回収 ・埋立地ガスの回収とエネルギー利用 ・大気からの CO₂直接回収 ・人為的排出の回収 ・CO₂の輸送 ・回収した CO₂の永久隔離
製造業	・低炭素技術の製造 ・セメントの製造 ・アルミニウムの製造 ・鉄鋼の製造 ・水素の製造 ・その他無機基礎化学品の製造 ・その他有機基礎化学品の製造 ・肥料や窒素化合物の製造 ・原料プラスチックの製造	運輸	・旅客鉄道輸送(都市間) ・貨物鉄道輸送 ・公共交通 ・低炭素輸送のためのインフラ ・自動車、商用車 ・貨物の道路輸送サービス ・都市間の定期道路輸送 ・国内の旅客水上輸送 ・国内の貨物水上輸送 ・水路の建設
電力、ガス、蒸気、空調の供給	・太陽光発電 ・集光型太陽光発電 ・風力発電 ・海洋エネルギー発電 ・水力発電 ・地熱発電 ・ガス火力発電 ・バイオエネルギー発電 ・送配電 ・エネルギー貯蔵 ・バイオマス、バイオガス、バイオ燃料の製造 ・ガス輸送・供給網の改修 ・地域熱/冷熱供給 ・電気ヒートポンプの設置・稼動 ・集光型太陽光からの熱/冷熱と電力のコージェネ ・地熱エネルギーからの熱/冷熱と電力のコージェネ ・ガス燃焼からの熱/冷熱と電力のコージェネ ・バイオエネルギーからの熱/冷熱と電力のコージェネ ・集光型太陽光からの熱/冷熱の生産 ・地熱からの熱/冷熱の生産 ・ガス燃焼からの熱/冷熱の生産 ・バイオエネルギーからの熱/冷熱の生産 ・排熱を用いた熱/冷熱の生産	ICT	・データ処理、ホスティング、関連活動 ・温室効果ガス排出削減用データ主導型ソリューション
		建物・不動産関係	・ビルの新設 ・既存建物の改修 ・個々の改修取組、オンサイトでの再エネ設置、専門的・科学的・技術的活動 ・建物の入手

(資料) EU 資料を元にみずほ情報総研作成

図表6 EU 基準(タクソノミー)例

ガス火力発電	●ライフサイクル排出量※が100gCO₂e/kWh より少ない施設が適格 ・ 閾値は5年毎に厳格化し、2050年には0gCO₂e/kWh となる ・ タクソノミー承認を受ける時点でこの閾値を満たさなければならない ・ 2050年以降も続く活動は、実質ゼロ排出の達成が技術的に可能でなければならない ※事業固有値を用いた ISO14044準拠のライフサイクル排出量評価が必要
乗用車、軽商用車	●直接排出ゼロの車(水素自動車、燃料電池自動車、電気自動車)は適格 ●2025年までは最大50gCO₂/km (WLTP ※)の車も適格(2026年以降は0gCO₂/km (WLTP)の車のみが適格)。 ※乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法(WLTP)
プラスチック原料の製造	●以下の3基準のうち少なくとも一つを満たす活動が適格 1. 機械リサイクルによるプラスチック原料製造 2. 化学リサイクルによるプラスチック原料製造 3. 再生可能原料を使用したプラスチック製造 ※基準2と3は、化石燃料原料由来よりもカーボンフットプリントが低いものが対象 (ISO14067:2018準拠のカーボンフットプリント計算と第三者検証が必要) ※基準3には再生可能原料の種類(バイオマス、産業バイオ廃棄物、都市バイオ廃棄物)毎の追加基準もあり
低炭素技術の製造	●他の経済部門の排出削減に資する以下4種類の活動が適格 1. 適格な再生可能エネルギー技術(地熱、水力、集光型太陽光、太陽光、風力、海洋エネ)に不可欠の製品、主要部品、機械の製造 2. 各基準を満たす車両、鉄道車両、船舶の製造(詳細省略) 3. 建物用の高効率機器やその主要部品の製造(詳細省略) 4. その他、他の経済部門(家庭を含む)の大幅な削減につながる技術の製造※ ※市場にある最善の代替技術／製品／ソリューションと比べて大幅な GHG 削減があることが、定評のある／標準的な cradle-to-cradle (ゆりかごからゆりかごまで)のカーボンフットプリント評価(例: ISO 14067, ISO 14040, EPD, PEF 等)に基づき実証され、第三者が検証した場合に適格

(資料) EU 資料を元にみずほ情報総研作成

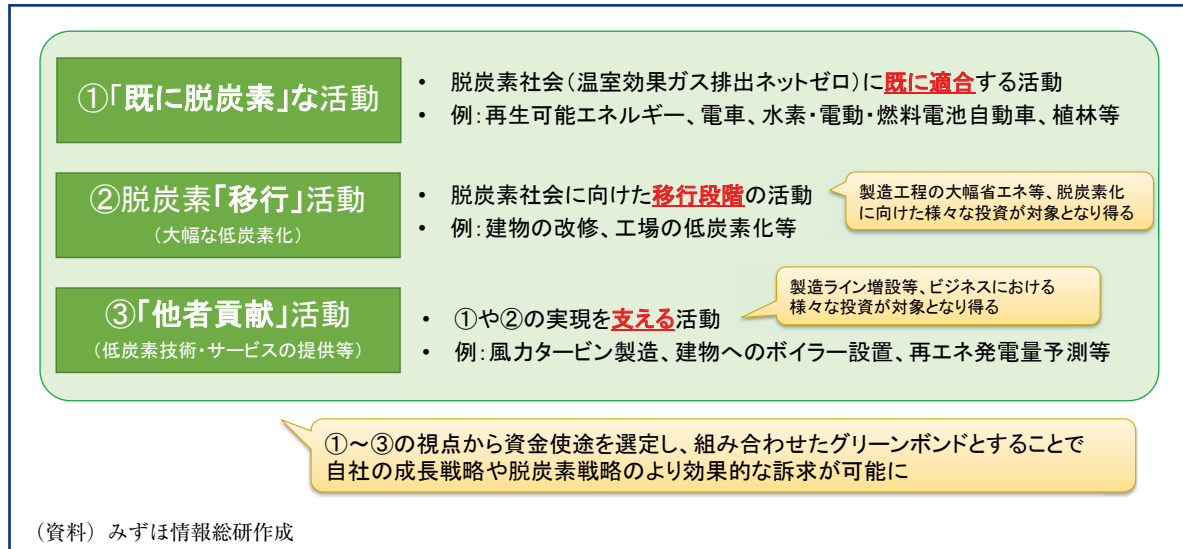
4. 新たなグリーンボンドの考え方 —移行と他者貢献—

このEU基準はEU域外におけるグリーンファイナンスやサステナブルファイナンスの考え方にも大きな影響を与えうる。実際、EUはこの基準のグローバル展開を目指すことを公言しており、2019年10月には中国やインド、カナダ等とフォーラムを立ち上げた⁽¹³⁾ほか、先行して議論されているISOにおけるグリーンボンド等の基準検討⁽¹⁴⁾にも参加している。EU基準で示された基準値は非常に高く、そのまま他国に適用される可能性は低いが、先述した①～③を適格と認めるという考え方(すなわち、①再エネ導入

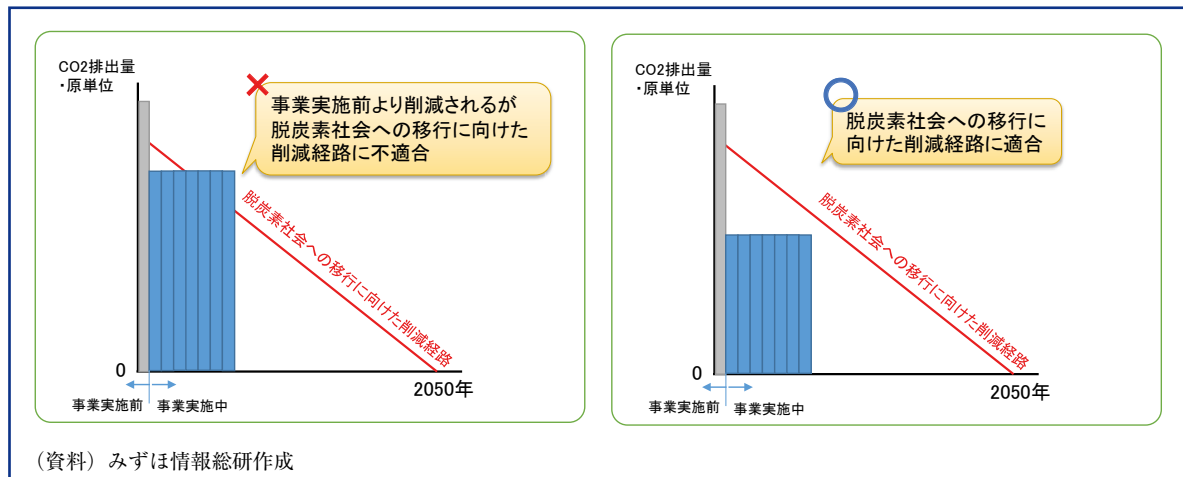
等の「既に脱炭素な活動」に加えて、②製造プロセスの低炭素化等の「脱炭素への移行」、③低炭素製品・サービスの販売等の「他者の削減への貢献」を認める考え方。図表7参照)等がグローバルスタンダードとなる可能性もある。

企業から見ると、この考え方は製造プロセスの低炭素化や低炭素製品の販売等も含めた企業全体としての取り組みを、グリーンボンド適格とし得るものである。自社の成長戦略や環境ビジョン等を訴求する為には、グリーン性の説明しやすい一部の環境取組だけでなく、自社事業の中核となる投資や気候変動による影響や機会に対応する投資こそグリーンボンドで資金調達を行い訴求することが重要であり、①～③を組

図表7 グリーンボンド適格事業の3つの考え方



図表8 脱炭素「移行」活動への適合の考え方



み合わせる考え方は有効であろう。

そしてその際には、先述した②や③の考え方、つまり、脱炭素社会への移行経路や他社の活動への貢献量等についての説明を適切に行うことが必要である。

②の脱炭素「移行」グリーンボンドは、厳密に言えば、活動毎にパリ協定に沿った削減経路を設定(又は既存のものを参照)し、その削減経路と整合する(活動が終了時点においても削減経路で示された当該年の排出原単位等を満たす)活

動を適格とする考え方である(図表8参照)。少し柔軟に解釈すると、活動毎の削減経路は示さずとも、企業として2050年 CO₂排出実質ゼロ目標にコミットして中期目標(2030年 XX%削減等)を設定し、その目標達成のための活動を適格とする考え方もあり得る(このような考え方は個別活動のグリーン性の評価基準である EU 基準では認められないかもしれないが、個別活動ではなく事業者の ESG パフォーマンス向上に注目する「サステナビリティ・リンク・ボンド」

等の考え方には沿うものであり、移行グリーンボンドの一つとして有効と考えられる)。なお、SBT (Science Based Target)の設定等を行ってきた企業は、その内容も活用して脱炭素「移行」グリーンボンド発行が可能と考えられる。

③の「他者貢献」グリーンボンドは、厳密に言えば、当該製品の材料調達・輸送・製造・使用・廃棄・再利用に伴う温室効果ガス排出量を評価し、それが市場の最善代替技術と比較して大幅な削減に繋がる事等を示せば、適格とする考え方である。これまで、LCA等によって自社製品・サービスの他社への貢献量等の評価を行ってきた企業は、その内容も踏まえ、こうした「他者貢献」グリーンボンドの発行が可能と考えられる。

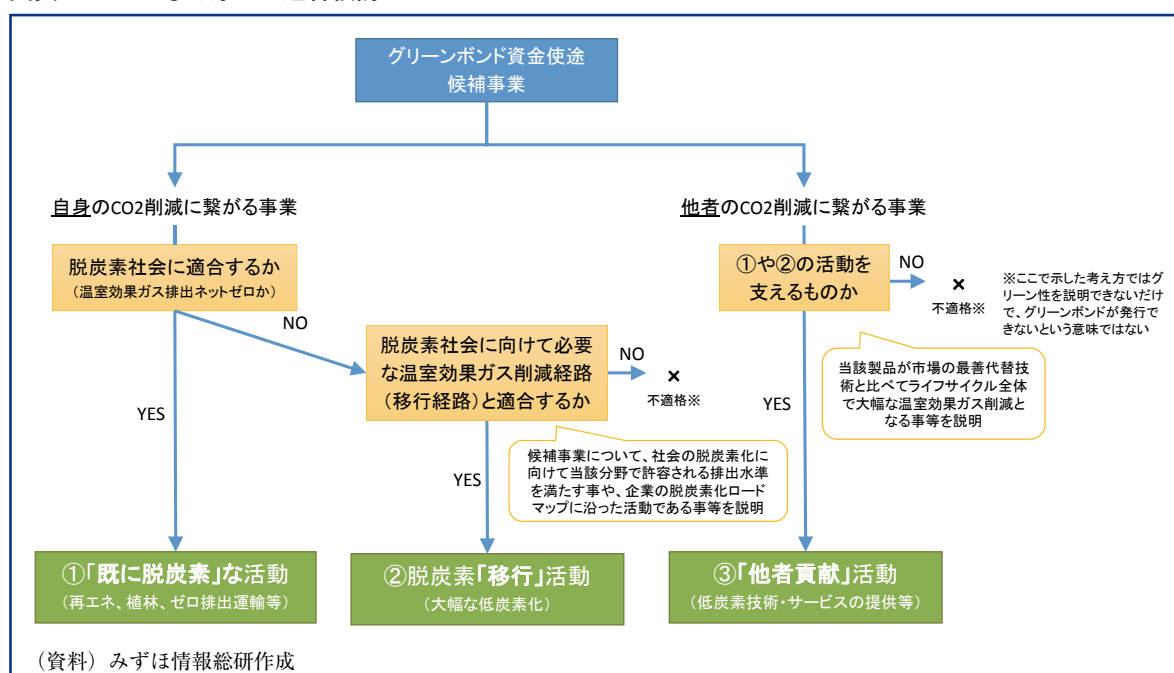
参考までに、グリーンボンド資金使途候補事業を①～③の考え方の視点で検討する際のフローを図表9に示す。

5. 終わりに

これまで見てきたように、グリーンボンドとは自社の成長戦略や環境ビジョンを投資家等に訴求し、投資家層を拡大する手法である。グリーンボンド活用の際に実務上悩ましい点が資金使途の選定であるが、資金使途についての公的基準はまだなく、判断に迷うことも多い。そのため、これまではグリーンな活動であることが説明しやすい再エネ発電や省エネビル(認証制度が整っているためグリーンなビルであることについて共通認識が持ちやすい)を対象とするグリーンボンドが多かった。

しかしEU基準(タクソノミー)案等も示しているように、再エネではなく化石燃料を使用する活動や、低炭素製品や部品を製造する活動のように、グリーンな活動であることの説明が単純ではない活動も、CO₂排出実質ゼロへの削減経路と合わせて説明する事や、LCA的視点で評価を行う事等によりグリーンボンドとして認め

図表9 3つの考え方への適合検討フロー



られるようになってきた。実際に国内でも LNG 船や電気自動車部品製造を資金使途とするグリーンボンドの事例等が出てきている。

更に、本稿では紹介を割愛したが、最近では海洋プラスチック問題等の様々な環境問題をテーマとしたグリーンボンド、幅広い社会問題を対象とする「ソーシャルボンド」や「サステナビリティボンド」、更には資金使途を限定せず発行体の ESG 目標等への達成状況に応じて利回りが変わる「サステナビリティ・リンク・ボンド」等、様々なボンドも生まれてきている。

こうしたグリーンボンドの対象拡大や様々なボンド手法の登場により、これまでグリーンボンド等とは無関係と考えていたような業種にも、グリーンボンド等の発行機会が到来している。まだグリーンボンド等を発行していない企業においても、この機会を活かし、自社戦略の訴求や資金調達基盤の強化を図ることが重要ではないか⁽¹⁵⁾。

注

- (1) 2015年9月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」にて記載された2016年から2030年までの国際目標。貧困、飢餓、保健、教育、ジェンダー、水・衛生、エネルギー、成長・雇用、イノベーション、不平等、都市、生産・消費、気候変動、海洋資源、陸上資源、平和、パートナーシップの17のゴールと169のターゲットから構成される。
- (2) なお、環境以外の社会課題の解決に繋がる活動を資金使途とする「ソーシャルボンド」や、環境と環境以外の社会課題の解決に繋がる活動を資金使途とする(つまりグリーン+ソーシャルな)「サステナビリティボンド」、それらのローン版としての「グリーンローン」「ソーシャルローン」「サステナビリティローン」等の様々な類似スキームがあるが、それぞれのメリットや論点は共通性があるため、本稿では最も発行が多く議論が進んでいるグリーンボンドを例に整理する。
- (3) 例えば現在多くの企業がTCFD(気候関連財務情報開示タスクフォース)に基づく気候変動リスクと機会の財務的影響の把握・開示やSBT(Science Based Targets: パリ協定目標に整合した意欲的な

温室効果ガス削減目標)の設定等に取り組んでいるが、これらの企業が次の一手としてグリーンボンド発行に進み、発行事例が更に増加する可能性もある。

- (4) 資金使途はグリーンな活動に限定されるものの、償還金の原資は当該グリーン活動には限定されない。例えば風力発電を資金使途とするグリーンボンドにおいて、その風力発電が失敗してもグリーンボンドを発行した企業が残っていれば、グリーンボンド購入者は他事業からの収益を元に償還金を受け取ることが出来る。また、厳密には、資金使途と償還金原資が同一である「プロジェクト債」のグリーンボンドも存在するが、その発行量は限定的である。
- (5) Climate Bonds Initiative は、ロンドンに拠点を置く国際 NGO で、100兆ドルの債券市場を気候変動対策のために活用することを目的とし、低炭素・気候レジリエントな経済への迅速な移行のために必要なプロジェクトや資産への投資を促進する活動を行っている(なお、みずほ証券もCBIのPartnerである)。日本国内では、鉄道建設・運輸施設整備支援機構と明電舎がCBI基準に準拠したグリーンボンドを発行している(2019年11月時点)。
- (6) 基準作りには民間企業も参加可能であり、参加することで基準作りに影響を与える事や、国際的な議論動向をいち早く把握する事も有益と考えられる(例えば海運の基準策定には日本郵船が参加している)。
- (7) 米国の指数会社S&P Dow Jonesやドイトの指数会社Solactiveが提供しているグリーンボンド指数
- (8) CO₂等の温室効果ガスの排出削減や吸収増加により気候変動の進行抑制を目指す活動。再エネ、省エネ、植林等。
- (9) 既に起こりつつある気候変動の影響に対処し、被害を回避・軽減していく活動。防災減災、農作物の改良等。
- (10) 国連環境計画の金融イニシアティブ(UNEP FI)と欧州銀行協会(EBF)は、銀行がタクソノミーを融資判断で適用するためのガイドラインを検討中である。2020年2~3月にガイドライン公表予定。
- (11) 人為的なCO₂の排出量と人為的な吸収量を均衡させ、その排出量を実質ゼロ(ネットゼロ)とすること。パリ協定が言及している気温上昇を1.5℃に抑えるという目標を50%の確率で実現するには、CO₂等の温室効果ガス排出量を2030年までに45%削減し、2050年前後に実質ゼロにする必要があると言われており、EU基準はその水準を目指している。「2050年温室効果ガス排出実質ゼロ」は、2019年9月の国連気候行動サミットにおいて、欧州を中心とする66の国・自治体、93の企業、12の投資家が表明・賛同をする等、気候変動対策としての先進性を示す目安となりつつある。
- (12) WLTP: 乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法
- (13) 2019年10月、EUは中国、インド、カナダ等7か国と共にIPSF(サステナブルファイナンスに関する

国際プラットフォーム)を立ち上げ。今後タクソノミーや開示、基準やラベルに関する好事例の共有や協調を行う予定。

- (14) ISO においてグリーンファイナンスやサステナブルファイナンスに関する4つの国際規格が検討中であり、その一つである ISO 14030では資金使途に関する基準(タクソノミー)が議論中。
- (15) みずほ情報総研では、気候変動対策に関する政策立案支援や民間コンサルティングに加えて、みずほ証券と連携したグリーンボンド等の発行支援も実施しております。お気軽にご相談ください。

社会動向レポート

MaaS の現状と、わが国で MaaS を導入する上での重要な2つの視点

～地域ごとの“MaaS+”～

経営・IT コンサルティング部
コンサルタント 西脇 雅裕

本稿では、まず MaaS の概要や、移動手段であるモビリティや MaaS アプリケーションといった MaaS の構成要素に関する最新の取組の動向など、MaaS の現状について紹介する。続いて、わが国において、今後 MaaS を導入していく上で重要となる視点について考察を行い、最後に、日本における MaaS のあるべき姿の一つとして、“MaaS+(マース・プラス)”という考えを提唱する。

1. MaaS とは何か

(1) MaaS の概念と効果

MaaS (Mobility as a Service) という言葉を聞いた時に、どのようなイメージを持つだろうか。現在のところ、MaaS に関して、世界的に統一された定義は存在しないことから、人によってイメージが異なるのではないだろうか。

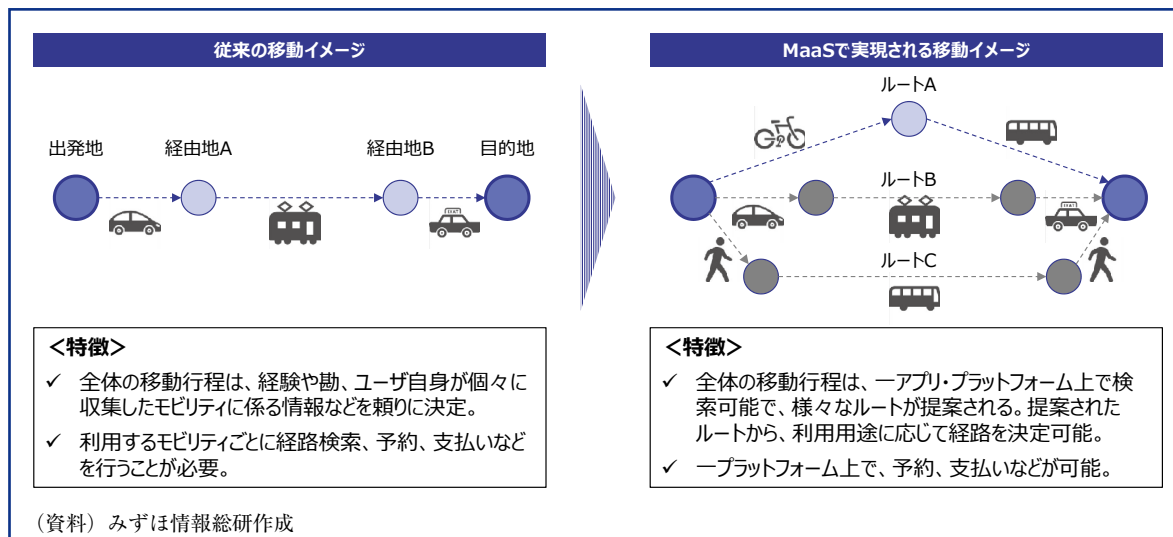
いくつかの取組では MaaS の概念を示しているものがある。例えば、MaaS の展開促進を目的に、欧州の官公庁や民間企業を中心に結成されたパートナーシップ、MaaS Alliance では「Mobility as a Service (MaaS) is the integration of various forms of transport services into a single mobility service accessible on demand.⁽¹⁾」としており、MaaS を「様々な形式の交通サービスを、オンデマンドでアクセス可能な単一のモビリティサービスに統合するもの」としている。一方、日本に目を向けると、国土交通省は「ICT を活用して交通をクラウド化し、公共交通か否か、またその運営主体にかかわらず、マイカー以外のすべての交通手段に

よるモビリティ（移動）を1つのサービスとしてとらえ、シームレスにつなぐ新たな『移動』の概念である。⁽²⁾」と MaaS の概念を示している。

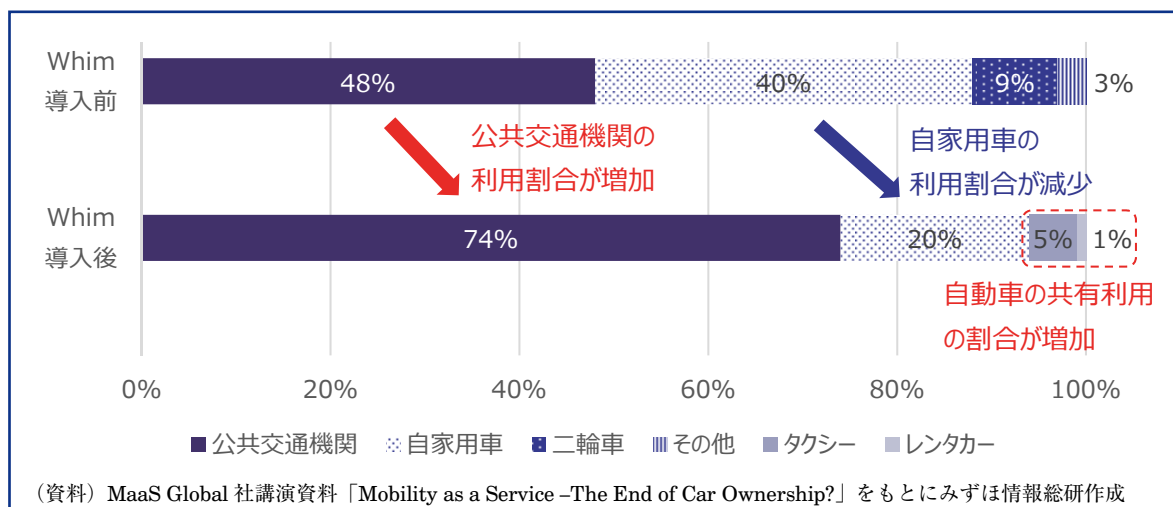
これらの概念を整理すると、MaaS のポイントは「個々のモビリティごとに分散されていた各種情報を単一のアプリケーション等に統合することで、様々なモビリティを活用したシームレスな移動を実現すること」と言える。従来の移動は、移動ユーザ自身の経験や勘のほか、移動ユーザ自身が独自に収集した各モビリティのルートや運行情報等に基づき、出発地から目的地までの移動全体の行程を移動ユーザ自身が計画していた。また乗車するモビリティごとに予約や支払い等を行う必要があった。一方、MaaS が実現されれば、移動ユーザは MaaS アプリケーションに出発地と目的地を入力するだけで、アプリケーションから提案される複数のルートを元に移動経路を計画することができる。また、一つのアプリケーション上で、利用する全てのモビリティの予約や支払いが可能となる(図表1)。

このように、MaaS の実現によって、移動計画時や移動時に係る手間が省け、よりシームレ

図表1 MaaSによって実現される移動のイメージ



図表2 モビリティの利用状況と MaaS がもたらす効果



スな移動が可能になることで、移動ユーザの利便性が高まる。

MaaS は移動ユーザの利便性を高めるだけでなく、モビリティの利用状況にも変容をもたらす。特に顕著に変容が現れた事例が、フィンランド・ヘルシンキにおける取組である。MaaS Global が提供する Whim⁽³⁾ と呼ばれる MaaS アプリケーションの導入前後を比較すると、モビリティの利用状況が大きく変化した(図表 2)。

具体的には、公共交通機関の利用が48%から74%に増加した一方、自家用車の利用割合は40%から20%に低下した。また、共有の自動車(タクシーやレンタカー)を利用する割合も増加している。MaaS は、利便性向上だけでなく、自家用車から公共交通機関へのシフト、自動車の所有から共有へのシフトをもたらすポテンシャルも秘めている。

(2) MaaS のレベルとわが国の現状

スウェーデン・チャルマース工科大学の Jana Sochor 氏によると、情報統合の程度によって MaaS には5つのレベル、具体的には、レベル0（統合なし）からレベル4（政策の統合）までのレベルがあるとしている（図表3）。

この内、レベル1は「情報の統合」段階であり、様々なモビリティの運行情報や運賃情報が統合され、それら情報を元に、多様な移動計画を一つの MaaS アプリケーションが提示する段階にある。例えば、ジョルダン、NAVITIME といった乗換案内サービスや、Google マップ等の経路案内サービスは、出発地と目的地を設定することで、その目的地に向かうための様々なモビリティを取り込んだ経路案内や運賃等の情報を表示できることから、それらサービスはレベル1に該当する。日本では既にレベル1は実現していると言える。

続いて、レベル2は「予約・決済の統合」段階であり、予約や決済に関する様々なモビリティの情報が統合されている状態を指す。これにより、一つの MaaS アプリケーション上で複数のモビリティの予約・支払いが可能になる。日本では、都市部を中心に Suica や PASMO といった交通系 IC カードが活用されており、複数の

モビリティに対する運賃の支払いを一つのカードで対応である。MaaS アプリケーション上で支払いは行われていないものの、一つのカードで様々なモビリティの支払いが可能という点で、MaaS レベル2の一部が実現されているという見方もある。

一方、レベル3は「サービス提供の統合」段階である。例えば、鉄道やバス、タクシーといった複数のモビリティが毎月定額で乗り放題というサブスクリプション型のサービスなどがこのレベルに該当する。日本では、例えば東京フリーきっぷに代表される一日乗車券など、有効期限内であれば定額で鉄道やバスなどが乗り放題になる仕組みが既に導入されており、MaaS アプリケーションを介さない形態で MaaS レベル3が一部の取組で実現されているという見方もある。

(3) MaaS の構成要素

MaaS を実現するためには、まず移動を司るモビリティの存在が前提条件となる。従前のモビリティとしては、鉄道やバス、自転車、タクシー等があったが、近年ではパーソナルモビリティやライドシェアリングといった新たなモビリティや移動サービスが出現しており、それらが MaaS の中で活用されることが今後期待され

図表3 MaaS のレベルと定義

MaaSのレベル分類	レベル4	政策の統合	都市計画やインフラ整備などの交通政策が一体となって立案され推進されている状態
	レベル3	サービス提供の統合	さまざまな移動手段が定額制などの一元化されたパッケージとして利用者に提供される状態
	レベル2	予約、決済の統合	さまざまな交通手段の予約・発券・決済がアプリなどを通じて一括して行うことができる状態
	レベル1	情報の統合	さまざまな交通手段の利用料金や経路などの情報が一元化されて表示される状態
	レベル0	統合なし	交通手段がそれぞれ独立しており、分離している状態

Jana Sochor, Hans Arby, Mari Anne Karlsson, Steven Sarasini : A topological approach to Mobility as a Service: A proposed tool for understanding requirements and effects, and for aiding the integration of societal goals

(資料) Jana Sochor, Hans Arby, I.C. MariAnne Karlsson, Steven Sarasini “A topological approach to Mobility as a Service: A proposed tool for understanding requirements and effects, and for aiding the integration of societal goals”

る。また、それらモビリティの情報を統合してサービス提供を行うアプリケーションも MaaS 実現に必須な要素である。本章では、昨今注目されている MaaS アプリケーションのほか、新たなモビリティ及び移動サービスの最新動向を紹介する。

① MaaS アプリケーション

MaaS の取組が先行する欧州の中でも、特に目を引く取組が、MaaS Global が提供する Whim である。フィンランド・ヘルシンキを中心に提供されている MaaS であり、鉄道やバスなどの公共交通機関のほか、タクシー、シェアリングカー、シェアサイクルといったモビリティを含め、最適な経路を案内する。Whim の特徴的な点は、サブスクリプションでモビリティを利用できる仕組みを構築している点にあり、月額約500ユーロを支払うことで、上記に示すモビリティ全てが乗り放題になる仕組みを導入している。

他の欧州の取組については、例えばドイツでは、完成車メーカーである Daimler、鉄道事業者である Deutsche Bahn (ドイツ鉄道) も MaaS の取組に力を入れている。Daimler では moovel⁽⁴⁾ というサービスを展開している。moovel の特徴は、取り扱うモビリティの幅の広さにあり、公共交通機関(バス、電車、地下鉄、ライトレール、路面電車等)のほか、同社が事業を行っているカーシェアリングサービスや、タクシー配車プラットフォームとも情報を統合し、多様なモビリティによる最適ルートを表示する。また、Deutsche Bahn では Qixxit⁽⁵⁾ というサービスを展開している。Qixxit は国や地域を跨いだ中長距離の移動での利用を一つのターゲットにしておき、鉄道や飛行機、長距離バスといった中長距離での移動手段を対象にした経路検索が可能となっている。

他方、わが国においても MaaS の取組が始ま

りつつある。例えば、WILLER⁽⁶⁾ では、生活型 MaaS や観光型 MaaS といったように、移動の目的に沿った MaaS の実現を目指している。生活型 MaaS については、京都丹後鉄道の沿線に住む移動手段の少ない人々に対して、様々な移動手段が選択できるような MaaS の実現を目指し、取組を進めている。また観光型 MaaS については、北海道の釧路・網走間を結ぶ JR 釧網本線の鉄道駅を起点に、鉄道のみでは観光しづらいエリアに対し、地元のバスを活用した周遊ルートを設定し、事前にそのバスを予約できる仕組みを構築している。また、トヨタ自動車は、移動や物流、物販等の様々なサービスや用途に対応した、MaaS 専用の次世代電気自動車「e-Palette Concept⁽⁷⁾」のプロトタイプを公表しており、新たなモビリティの提供を通じて、人の暮らしを支えることを目標としている。

いくつか MaaS の取組事例を紹介したが、それぞれの MaaS について、活用されているモビリティの種類、連携内容、取組地域の観点から整理した結果を図表4に示す。一言 MaaS といっても、そのサービスは多種多様であり、各地域の状況に根ざしたサービスが展開されている様子が伺える。

② 新たなモビリティ及び移動サービス

今後 MaaS で活用されることが想定される新たなモビリティや移動サービスとして、短距離向けのパーソナルモビリティ、短中長距離向けのライドシェアリング(二輪・四輪自動車、自転車)、中長距離向けのマイクロトランジットが挙げられ、その詳細を後述する。

パーソナルモビリティは、歩行と既存モビリティの間を補完する、1人から2人用のモビリティである。車両形態は様々であるが、例えば車椅子事業を行う WHILL⁽⁸⁾ は、車椅子をパーソナルモビリティとして位置づけ、年齢や障害

図表4 MaaS の取組状況の比較

取組主体	MaaS Global (フィンランド)	Daimler (ドイツ)	Deutsche Bahn (ドイツ)	WILLER (日本)	トヨタ自動車 (日本)
区分	MaaS事業者	完成車メーカー	鉄道事業者	バス事業者	完成車メーカー
連携対象の モビリティ	自動車	自動車	自動車	自動車	自動車
	バス	バス	バス	バス	バス
	自転車	自転車	自転車	自転車	自転車
連携する 情報の内容	経路案内	経路案内	経路案内	経路案内	経路案内
	予約・決済	予約・決済	予約・決済	予約・決済	予約・決済
	定額制	定額制	定額制	定額制	定額制
取組地域	大都市	(公知情報より不明)	大都市	大都市	(公知情報より不明)
	中核都市		中核都市	中核都市	
	過疎地域		過疎地域	過疎地域	

(資料) 各種資料に基づきみずほ情報総研作成

の有無に関わらず、誰もが利用できるラストワンマイルでの新たな移動手段として提供することを目指している。

ライドシェアリングは、既存のモビリティ（二輪・四輪自動車、自転車）をシェアして利用するサービスである。二輪・四輪のライドシェアリングについては、Uber⁽⁹⁾やLyft⁽¹⁰⁾、Grab⁽¹¹⁾といった企業がユニコーン企業として台頭しており、欧米や東南アジアを中心にオンデマンド型の配車サービスを提供している。自転車のライドシェアリングについては、既定のステーションに管理されている自転車を様々なユーザが利用できるサービスであり、NTTドコモ⁽¹²⁾のバイクシェア事業など、日本でも既に各所にて取組が行われている。

マイクロトランジットは、バスを活用したオンデマンド型の配車サービスを指し、タクシーの配車機能とバスの大量輸送といった両方の特徴を兼ね備えるモビリティとして注目を集めている。例えば、シンガポールでは、Beeline⁽¹³⁾というマイクロトランジットサービスが運用されており、事前にアプリケーション上で現在位置、目的地、到着希望時刻などを入力すると、

配車される仕組みを構築している。また Beeline 上でのユーザが入力した情報をユーザのニーズデータとして分析し、その分析結果から既存のバス路線や運行スケジュールの見直しにも活用している。

上述したように、様々なモビリティ及び移動サービスが誕生しつつある。パーソナルモビリティは徒歩、ライドシェアリングは自転車・自動車・公共交通機関等、マイクロトランジットは基幹バス等の公共交通機関やタクシー等の代替移動手段となることから、利用者の利便性向上に繋がることが期待される。ただし、わが国においての普及に当たっては課題も多く、法規制面、インフラ面、ビジネス面などの課題が残っている（図表5）。

2. わが国において MaaS を導入していく上で重要となる2つの視点

以上までは、MaaS の取組の現状について紹介したが、以降は、今後 MaaS を日本で導入していく上で重要となる視点について説明していきたい。本稿では、地域ごとの交通特性と、移動ユーザの利便性という2つの視点から、わが

図表5 新たなモビリティ及び移動サービスの利点と普及に当たっての課題

＜短距離向け＞パーソナルモビリティ		＜短・中・長距離向け＞ライドシェアリング（二輪・四輪自動車）	
利点	■ 徒歩の代替移動手段となりうる。 ■ 高齢者や郊外居住者などの移動困難者にとってはニーズが高いことが想定される。高齢者が多く、交通の足が少ない、過疎地での活用が期待される。	利点	■ 様々な距離の移動での移動手段となりうる。 ■ 諸外国ではタクシー等に比べて安価に料金設定されていることが多く、ユーザの金銭的負担が少なくなる。 ■ 目的地に直接向かえる。
課題	■ 購入には数十万円というオーダーの初期費用がかかり、さらに電気の充電等のランニングコスト及び手間がかかる。 ■ 現行の道路交通法では、多くのパーソナルモビリティは公道での走行が禁止されており、また免許が必要なものもあるため、利用が認められていない場合が多い。	課題	■ 現行の道路交通法等では、利用が認められておらず、普及の上では法的課題のクリアが必須。 ■ タクシー運転手の職が奪われる。 ■ ドライバーと利用者での暴行等の事件が発生している。
＜短・中距離向け＞ライドシェアリング（自転車）		＜中・長距離向け＞マイクロトランジット（バス）	
利点	■ 公共交通機関では時間がかかったり、公共交通機関が運行していない地域におけるラストマイルでの利用により、ユーザの高効率な移動を実現できる。 ■ 各所で取組が行われ、現行法で事業可能。	利点	■ 鉄道、バスを始めとした公共交通機関の代替移動手段となりうる。 ■ ライドシェアリング（二輪・四輪）、タクシーよりも大人数を輸送できるため、それらサービスに比べ安価に利用可能。
課題	■ ステーションのインフラ整備が必要。 ■ ステーション間の台数バランスを定期的に整える必要があり、事業者にとっての負担になる。 ■ 自転車での走行が危険な空間が多い。	課題	■ 需給ギャップにより採算性が合わず、事業が赤字化するリスクが高い。 ■ 道路運送法3条に基づき、デマンド型バスの運行には、地域公共交通会の協議が必要。

（資料）みずほ情報総研作成

国における MaaS のあり方について検討する。

（1）視点①：地域ごとの交通特性

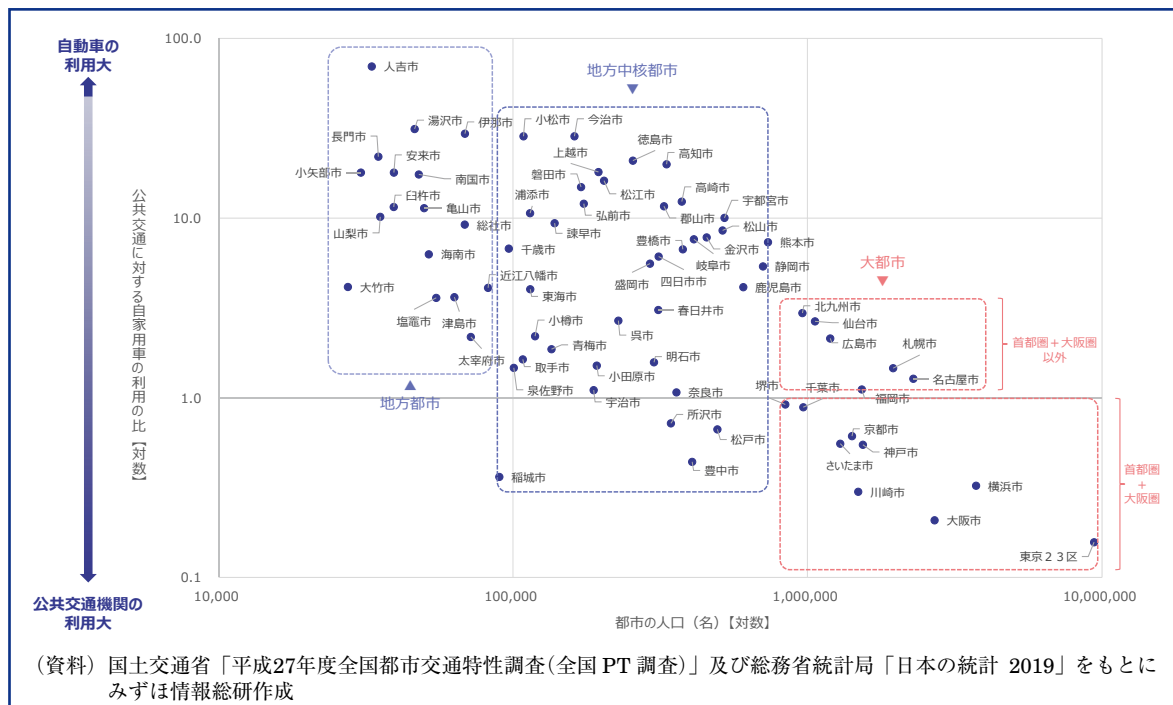
モビリティがなければ MaaS は実現できない。したがって、MaaS の導入を検討していく上では、まずモビリティがどの程度整備されているか整理する必要がある。わが国においては、都市部では、鉄道、バス、タクシーといった様々なモビリティが既に存在しており、また路線数や本数、台数も多いことから、MaaS を実現するための下地は大いにあると言える。一方、郊外では、都市部に比べてモビリティの数や量が限定的であり、MaaS の導入に当たっては工夫が必要になる。このようにわが国では、モビリティの整備状況は地域ごとに大きく異なるという特徴を有する。

こうしたモビリティの整備状況の地域ごとの差は、モビリティの利用状況にも現れる。図表6に、地域ごとのモビリティの利用状況を示す。縦軸は下に行くほど公共交通機関（鉄道及びバ

ス）の利用割合が高いことを示し、横軸は各都市の人口規模を示している。グラフ全体を俯瞰すると、人口の多い地域ほど公共交通機関の利用割合が高い傾向にある。また、都市の規模によってモビリティの利用状況が大きく異なる。具体的には、約100万人以上の大都市では、首都圏や大阪圏は公共交通機関の利用割合が高く、首都圏及び大阪圏以外では公共交通機関に比べて自家用車の利用割合がやや高い。一方、約10万人から約100万人の人口規模である地方中核都市は、一部の都市では公共交通機関の利用も見られるものの、多くの都市では自家用車の利用割合が高い。さらに約10万人以下の地方都市では、公共交通機関の利用がほとんどなく、ほぼ自家用車による移動が主流となっている。

このように、モビリティの整備状況及び利用状況は地域ごとに大きく異なる。図表4において先述したように、世界の先進的な MaaS の取組を見ると、各地域の状況に合わせた MaaS が展開されていることが伺える。日本において

図表6 利用する交通手段から見た地域の類型



MaaSを導入していくに当たっては、日本全体として画一的な MaaS を導入するという考えではなく、モビリティの整備状況や利用状況といった各地域の交通特性に合わせ、その地域に根ざした MaaS のあり方を検討するという視点が求められるのではないかと。

(2)視点②：移動ユーザの利便性

先述したように、わが国では MaaS レベル1（複数のモビリティの経路検索、運賃表示）はほぼ実現されており、またアプリケーションを介さない形態でレベル2（複数モビリティの予約・決済）、レベル3（定額制）が一部の地域や事業者の中で実現している。すなわち、既にわが国では、一定水準の移動サービスが実現されており、かつ、ある程度の MaaS レベルが実現されている状況にあると言える。

こうした状況の中、仮にシームレスな移動のみに閉じた MaaS が日本で導入されるとした場合

合、移動ユーザである我々はどれほど利便性を感じるのでしょうか。一つのアプリケーション上で経路検索、予約・決済等が可能になった場合、我々はその MaaS を利用するのであろうか。おそらく、既に一定水準の移動サービスが実現しているわが国においては、MaaS によって実現されるサービス水準が高かったり、MaaS を利用することによって移動料金が低くなるといったメリットがないと、MaaS の利用が限定的になると思われる。より幅広いユーザが MaaS を利用するためには、「移動 + α 」といった、移動以外の付加価値を提供し、移動ユーザの利便性を高める MaaS が求められるのではないか。

+ α とは何か。筆者は、移動する動機、すなわち「移動の目的」にヒントがあると考えている。観光、エンタメ、医療、買い物といった移動の目的に寄り添った MaaS があれば、ユーザはさらなる利便性を感じるのではないだろうか。例えば、観光(移動目的)と移動をセットにした

MaaSであれば、MaaSを利用することで観光地までシームレスに移動できるだけでなく、MaaSのアプリケーション上で現地の観光地や食事処などの観光スポットに関する情報の検索や予約、決済が可能であったり、移動ユーザの嗜好に合わせて観光スポットをMaaSアプリケーション側が提案したり、それら観光スポットの入場料や割引クーポンが得られたり、あるいはMaaS利用者限定で現地ガイドがついて案内するサービスが付与されるといったMaaSが、観光を目的としたMaaSの一つの形態として考えられる。また、言語変換機能がMaaSに搭載されていれば、そのMaaSが訪日外国人にとってのコミュニケーションツールとしても活用されることが想定される。こうしたMaaSの実現により、その土地に精通していない観光客にとっての利便性は大きく高まるであろう。

移動と移動以外のサービス（移動＋ α ）をセットにしたMaaSを、我々は“MaaS＋（マース・プラス）”と呼びたい。“MaaS＋”、すなわちユーザの利便性という視点から、移動のみに閉じないMaaSのあり方を検討することが、今後さら

に求められるのではないかな。

3. わが国における MaaS の在り方 ～地域ごとの MaaS＋～

以上の2つの視点を踏まえ、わが国において求められるMaaS＋を整理する。図表6で示した地域の内、求められるMaaS＋の違いが特に顕著に現れると考えられる、大都市（首都圏と大阪圏）と地方都市を一例にとり、交通特性と既存の交通課題、それら特性や課題に応じて求められるMaaS＋の一例を、図表7に整理する。

まず、大都市（首都圏と大阪圏）については、鉄道やバス、タクシーなどの多様なモビリティが整備されており、それらモビリティの利用割合も高く、さらにライドシェアリング（二輪車）等の新たなモビリティが出現している。また、単一の公共交通のみでは移動しにくい地域が一定数存在する点、道路の渋滞や公共交通機関の混雑及び遅延が多い点、公共交通機関の乗り入れが複雑で、その土地に馴染みのない移動ユーザは公共交通機関を利用しづらい点などが、既存の交通課題として挙げられる。

図表7 利用する交通手段から見た地域の類型

	大都市（首都圏＋大阪圏） ※約100万人以上の都市	地方都市 ※約10万人以下の都市
交通特性	■ 鉄道やバス、タクシーなどの多様なモビリティが整備されており、それらモビリティの利用割合も高い。 ■ ライドシェアリング（二輪車）等の新たなモビリティが出現中。	■ 公共交通機関がほとんど整備されていない。 ■ 自家用車による移動割合が非常に高い。
既存の交通課題	■ 単一の公共交通機関のみでは移動しにくい地域や移動に時間がかかる地域が一定数存在。 ■ 平日の朝夕、休日を中心に渋滞しやすい。また、公共交通機関が混雑しやすく、遅延も多い。 ■ 公共交通機関の乗り入れが複雑で、その土地に馴染みのないユーザが利用しづらい。	■ 自宅等から目的地まで距離がある。 ■ モビリティを整備しても、事業を成り立たせることが難しい。路線廃止等を行う交通事業者も多い。 ■ 高齢者の割合が急増しており、免許返納等を行った交通弱者は移動することが極めて困難。
求められるMaaS＋（一例）	■ 多様なモビリティの情報が集約され、かつ渋滞情報、構内情報などの情報を取り入れたMaaS。 ■ 観光、エンタメ、医療、買い物など、様々な移動目的があることから、様々な移動の目的と連携したMaaS。	■ オンデマンド型の乗り合いモビリティを予約し、乗車できるMaaS。 ■ 医療、買い物など、ニーズの高い目的地までスムーズに移動できるMaaS。

（資料）みずほ情報総研作成

この時、公共交通機関だけでなく、新たに出て現しているモビリティを含めた多様なモビリティの情報が集約され、さらに、複雑な鉄道駅等の構内情報や渋滞情報など、今まであまり連携されていなかった情報を取り入れた MaaS+ が求められるであろう。これにより、自家用車に限らず様々な移動手段を組み合わせにより様々な目的地にスムーズに移動することができ、移動ユーザの利便性が大きく向上することが期待される。また、大都市(首都圏と大阪圏)では、移動する目的が多様であることから、様々な移動の目的と連携した MaaS+ に移動ユーザは利便性を感じ、MaaS+ の利用が促進されるであろう。

他方、地方都市については、公共交通機関がほとんど整備されておらず、自家用車による移動が一般的である。こうした地域の課題としては、目的地までの距離がある点、交通事業を成り立たせることが困難である点、高齢者等の交通弱者は自家用車以外で移動することが困難である点などが挙げられる。

こうした地域の MaaS+ のあり方としては、乗り合いモビリティを導入し、そのモビリティを予約できる MaaS+ が期待される。地域住民のリアルタイムのニーズに合わせて送迎するオンデマンド型の移動サービスは、特に交通弱者の多い地方都市ではニーズが高いことが推察される。また、特に高齢者の多い地域では、医療機関への診療等のための移動ニーズも多いことが想定されることから、こうしたニーズの高い目的地へのスムーズな移動に特化した仕組みを作ることも一案かもしれない。ただし、地方都市の中には、移動ニーズが少ない地域も一定数存在することから、こうした地域においては、ビジネスモデルや事業の運営方法等に関する工夫が必要になる。

本稿では、MaaS の現状について整理したほか、わが国で求められる MaaS の視点及び MaaS+ というあり方を提唱した。移動ユーザの利便性を大きく向上できるポテンシャルを秘める MaaS。ただし、移動ユーザが求めるサービスは多様であり、また地域ごとにサービスの特色も変わる。より利便性が高く、日本の地域特性に合った、日本ならではの“MaaS+”の実現に期待したい。

注

- (1) MaaS Alliance Web ページ
<https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas/>
- (2) 国土交通省国土交通政策研究所「国土交通政策研究所報」第69号～2018年夏季～
- (3) Whim Web ページ
<https://whimapp.com/>
- (4) moovel Web ページ
<https://www.moovel.com/en>
- (5) Qixxit Web ページ
<https://www.qixxit.com/en/>
- (6) WILLER Web ページ
<https://travel.willer.co.jp/maas/>
- (7) トヨタ自動車 Web ページ
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/20508200.html>
- (8) WHILL Web ページ
<https://whill.jp/>
- (9) UBER Web ページ
<https://www.uber.com/>
- (10) Lyft Web ページ
<https://www.lyft.com/>
- (11) Grab Web ページ
<https://www.grab.com/sg/>
- (12) ドコモ・バイクシェア Web ページ
<https://docomo-cycle.jp/>
- (13) Beeline Web ページ
<https://www.beeline.sg/>

技術動向レポート

蓄電池技術はどこに向かうのか？

—次世代・革新型蓄電池技術の現状と課題—

サイエンスソリューション部	グローバルイノベーション&エネルギー部	環境エネルギー第1部
チーフコンサルタント	コンサルタント	チーフコンサルタント
茂木 春樹	佐藤 貴文	吉田 郁哉

2019年のノーベル化学賞は、リチウムイオン電池開発に貢献した吉野彰旭化成名誉フェローら3名が受賞した。リチウムイオン電池は既に、スマートフォンやパソコンをはじめとする電子機器、通信などの産業機器を中心に世界的に普及しており、このような世界的な貢献が評価されたものである。これまでもノーベル賞受賞候補として期待されてはいたが、改めて心より祝福したい。

蓄電池はその高性能化、低コスト化により、いままでの小型機器への搭載からモビリティを含む大型機器への展開が急速に進みつつあり、近年改めて多くの関心を集めている。一方で蓄電池は技術に難しい点が多く、将来的な技術進展も見通しにくい。また、用途毎に要求される仕様や特性が大きく異なることも、蓄電池技術を理解するにあたっての障壁となっている。

そこで本稿では、改めてリチウムイオン電池を含む現状の蓄電池技術の適用先に関する技術動向、および次世代・革新型蓄電池の研究開発動向についてまとめ、それらが実用化されるにあたって必要となる共通の技術的課題について考察した。

1. はじめに

電気エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵する技術を電池と呼び、電池のなかでも充電により電気を蓄えることができ、繰り返し使用可能な電池を蓄電池⁽¹⁾と呼ぶ。現在、リチウムイオン電池を筆頭とする小型の蓄電池は、スマートフォンやノートPCをはじめとする情報端末に多く搭載されており、現代人の多くが日常的にその恩恵を受けている。ほとんどの人は、外出中に情報端末の電池残量を気にかけたり、充電可能な店舗を探したり、持ち歩いている予備の蓄電池を活用する、といった思考や行動を日常的に行っているのではないだろうか。また、近年蓄電池を搭載した自動車であるハイブリッ

ド自動車(Hybrid Electric Vehicle; HEV)や電気自動車(Electric Vehicle; EV)を街中で見かけることが多くなった。一昔前と比較しても、蓄電池は私たちの生活になくてはならない身近な存在になったと言える。

また最近、蓄電池に関係する報道を目にする機会が増え、様々な新しいタイプの蓄電池が登場するとともに、従来の蓄電池と何が違うのか、どのような用途に使えるものなのか、などといった疑問も増えていることだろう。一言に「蓄電池」といっても、様々な仕組みのものがあるうえに、同じ種類の蓄電池であっても構成材料が変わるだけで特性がまったく変化してしまうものもあるなど、非専門家にとっては難しい点多い。また、報道によっては読者に誤解を与え

かねない表現がみられることもある。たとえば、最近では自動車の電動化、特にEVへの関心が高いことから、新しい蓄電池が出るとEVに結び付けた報道がされていることも多いが、必ずしもすべての蓄電池がEVをはじめとした自動車に向いている訳ではない。

蓄電池は種類によってそれぞれ作動原理、特徴、課題が異なるため、技術進展の仕方は蓄電池の種類毎に異なる。蓄電池の種類を限定したとしても、構成する材料やその組み合わせにその特性が大きく左右されることから、個別の技術進展について見通しを立てることも難しい。半導体の集積率向上を予測したムーアの法則のような経験則が、蓄電池技術について存在しないことも、蓄電池技術の進展が見通しにくいことを示している。

蓄電池技術の進展について見通しを立てることが難しくても、自動車の電動化、電力自由化、再生可能エネルギー（再エネ）やスマートコミュニティ（スマコミ）⁽²⁾の社会実装拡大などを背景として、今後蓄電池の役割と需要が大幅に拡大することはほぼ間違いないだろう。しかしながら、すべての用途に使える万能な蓄電池は現時点では存在せず、用途に合わせた蓄電池の更なる性能向上が不可欠であり、各国が産学官の総力を挙げて研究開発や実証事業に取り組んでいる状況にある。

本稿では、技術進展の見通しが困難な蓄電池技術について、蓄電池の適用先に関する技術動向、および次世代・革新型蓄電池を主な対象とした研究開発の動向について述べる。また、次世代・革新型蓄電池が実用化されるにあたって解決が必要となる共通の技術的課題について考察した。

2. 蓄電池適用先毎の技術的要求事項と現状

現在、様々な蓄電池が存在しているが、性能、特性、コストなどの観点からすべての用途に向く万能な蓄電池は現時点では存在しないことは既に述べた。ここでは、蓄電池の適用先として今後更なる普及拡大が期待される車載用および電力貯蔵用に注目して、蓄電池へ要求される性能や特性などの技術的な要求事項と現在の技術動向を、適用先毎に整理した。

(1) 車載用蓄電池

車載用蓄電池としては、エンジンの始動や車室内の電力を担う目的で鉛蓄電池が古くから採用されているが、近年では駆動用としての蓄電池が搭載された車両が増加している。ここではEVやプラグインハイブリッド自動車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle; PHEV)などの、モーターのみによる電動走行が可能な自動車に適用する蓄電池を対象として、技術的な要求事項と現状の技術動向について述べる。

① 技術的な要求事項

車載用蓄電池に要求される事項を以下にまとめる。ここに掲げた蓄電池の要求事項すべてに応えることが理想的ではあるが、すべてを満たす蓄電池の実現は現時点では見通せない。ただし、自動車はシステムとしてユーザーの利便性と安全性を確保すればよいとため、他の手段によって蓄電池への要求事項を緩和することができる可能性がある。これら蓄電池以外の電動車に関係する技術動向にも注視する必要がある。

A. 高いエネルギー密度

詳細は後述するが、電動車両の電力消費率⁽³⁾は走行抵抗に大きく依存し、走行抵抗の

大部分は車重に大きく左右されることから、搭載される蓄電池の重量は可能な限り軽いことが望ましい。自動車に搭載される蓄電池の容量を維持して重量を軽くするためには、蓄電池の単位重量あたりの容量を大きくする必要がある。また、重量以外にも自動車内の限られたスペースになるべく多くの蓄電池を搭載しなければならないため、蓄電池そのものがコンパクトであることも必要である。そのためには、単位体積あたりの容量を大きくする必要がある。前者を重量エネルギー密度、後者を体積エネルギー密度といい、それぞれ蓄電池の研究開発目標として掲げられる重要な指標である。

B. 充電時間が短い

ガソリンの給油と比較して、蓄電池の充電時間が長い傾向にあることは電動車の課題であることは周知の通りである。航続距離延伸を目的として搭載蓄電池の高容量化が進むにつれ、充電時間がより長くなってしまいう傾向があることから、充電時間短縮のため更なる大電力による充電も検討されている。ただし、大電力による充電では発熱量が大きくなるため、蓄電池内部の抵抗を低減する必要がある。

C. 温度変化が充放電特性に与える影響が小さい

蓄電池は化学反応を利用しているため、一般的に温度が低くなると性能が低下する。外気温より高い作動温度が要求される場合、起動時に加温などで時間がかかってしまうとユーザー利便性が低くなってしまふ。また、高温になると蓄電池内部の副反応(劣化反応)が進行し、性能や容量が低下する場合もある。これらの課題を、冷却システムや充放電の制御によって解決する手段もあるが、ユーザーの利便性と安全性を確保するためには、蓄電

池そのものが温度変化に対して今以上に強靱になることが望ましい。実際、CHAdeMOなどの現在の充電規格では充電時に蓄電池側の温度を監視しており、低温時と高温時で充電が停止される。

D. 寿命が長い(サイクル、カレンダー)

自動車はユーザーによっては、10年以上使用される場合があり、使用期間中にユーザーの利便性が損なわれるレベルでの劣化が起きないことが望ましい(カレンダー寿命が長い)。長期間に渡って運用されると同時に、走行距離としては10万 km 程度使用される場合もある。走行時には、加速時は放電、減速時は充電などと負荷サイクルがかかっても、劣化量が小さいことが望まれる(サイクル寿命が長い)。

コストによっては、蓄電池の定期的な交換という手段も想定されるものの、安全性などを考慮するとユーザー自身が交換するより、専門の技術者による交換が望ましいため、少なくとも車検の期間まではユーザーの利便性が損なわれるレベルでの劣化が起きないことが求められるだろう。

E. コストが低い

現状では、蓄電池のコストが高いため、EVやPHEVは従来車より価格が高い傾向にある。特にEVでは蓄電池のコストが大半を占めているとされており、従来車と同等の価格とするためには蓄電池の低コスト化が必要となる。自動車を駆動させるための電源としては、蓄電池のセル⁽⁴⁾を複数直並列接続してモジュールを構成し、このモジュールを複数接続し冷却システムや制御システムまで含めたパックとする必要がある。現状では、これらセルとパックのコスト差も大きいとされてお

り、この差分を小さくすることも重要である。自動車メーカー各社や各国の研究開発プロジェクトの目標としては、電池パックで約1万円/kWh以下が目安として掲げられている。

F. 高い安全性の確保

衝突時に圧壊した場合、電池の内外で短絡が起きた場合においても、発火や爆発はもちろん、発煙などの異常が起こらないことが要求される。本質的な安全確保のためには、これらのリスクがない蓄電池が求められるが、適切な安全対策やシステムによる制御によって安全性を確保することも想定される。

また、車載用としては複数の蓄電池セルを直並列接続することから、各蓄電池セルの状態をリアルタイムに把握する技術が安全性確保や性能維持の観点から必要となる。

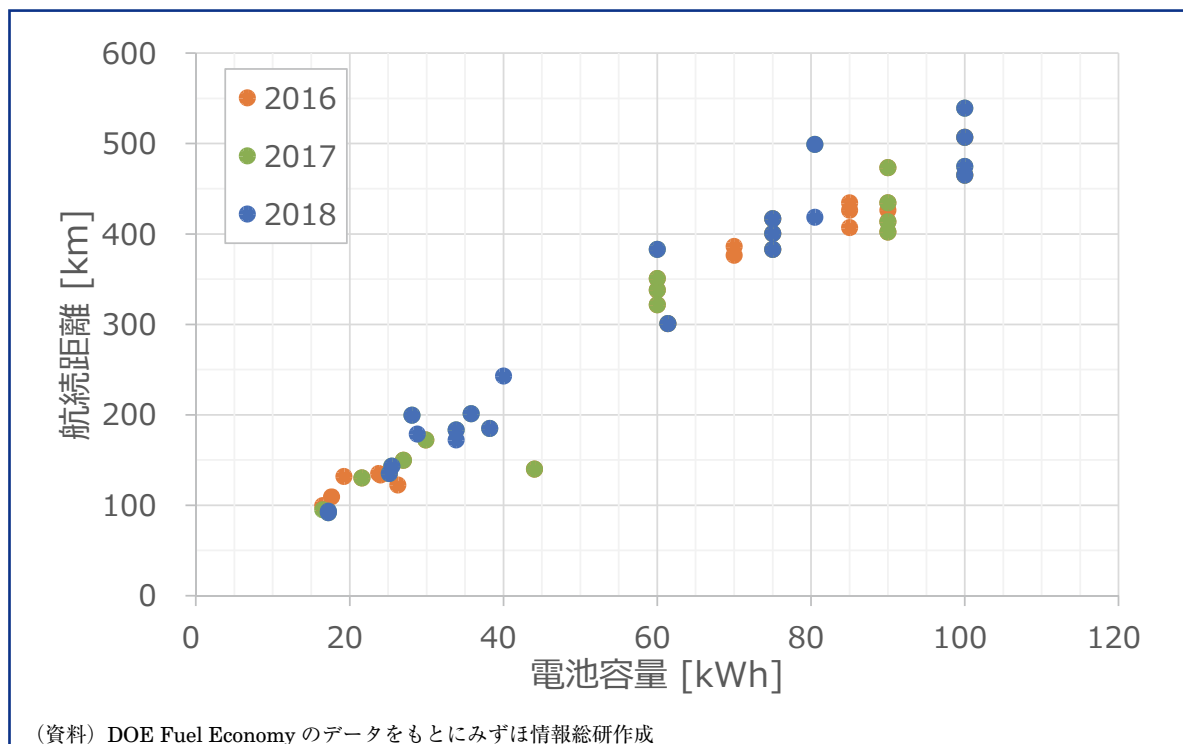
②現状の技術動向

現在市販されている電動走行が可能なEVとPHEVの技術動向を調べるため、航続距離、搭載されている蓄電池容量、および車両重量に関する情報を抽出した。航続距離と蓄電池容量は、米国エネルギー省(Department of Energy; DOE)とアメリカ合衆国環境保護庁(United States Environmental Protection Agency; EPA)が共同で運営しているデータベース Fuel Economy⁽⁵⁾から、2016年～2018年までの3年分のデータを抽出、車両重量は各社のカタログなどの公知情報から可能な限り抽出して、整理した。

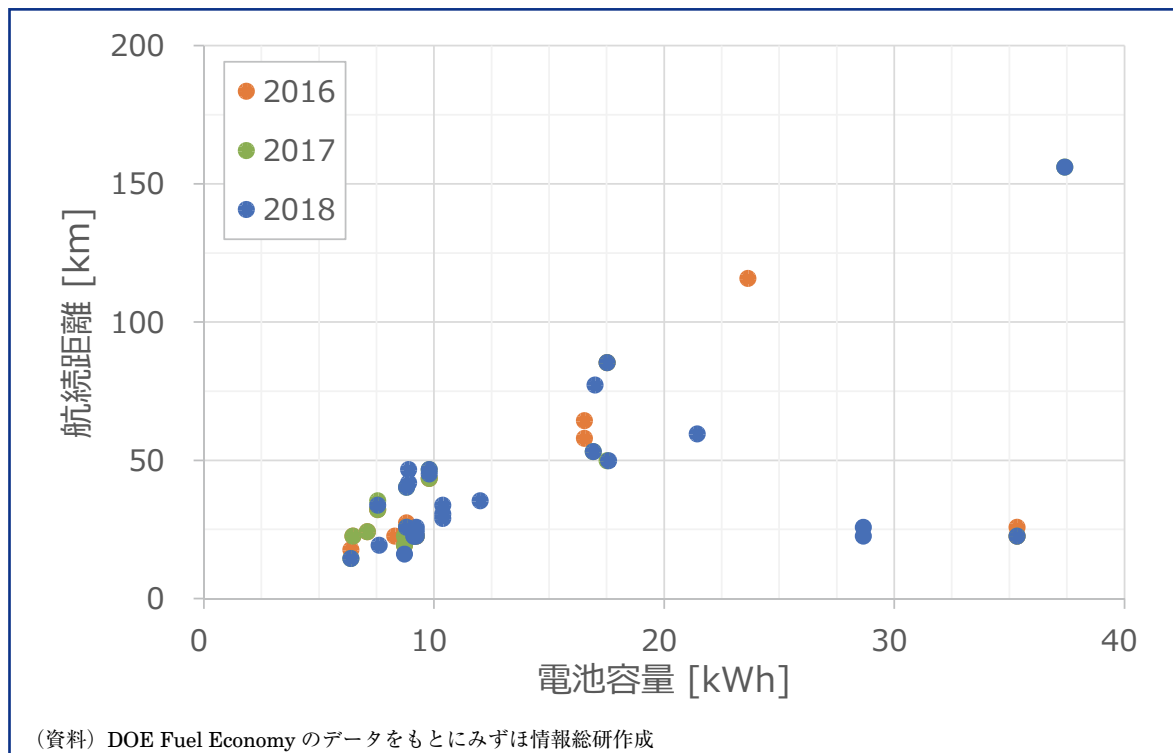
図表1、図表2は、それぞれEVとPHEVにおける航続距離と搭載されている蓄電池容量の相関である。EVとPHEVで航続距離に大きな差異があるため、縦軸と横軸のレンジが異なるが、比率は揃えてグラフ化した。

図表1より、EVは搭載している電池容量と航

図表1 EVの電池容量と航続距離の相関



図表2 PHEV の電池容量と航続距離の相関



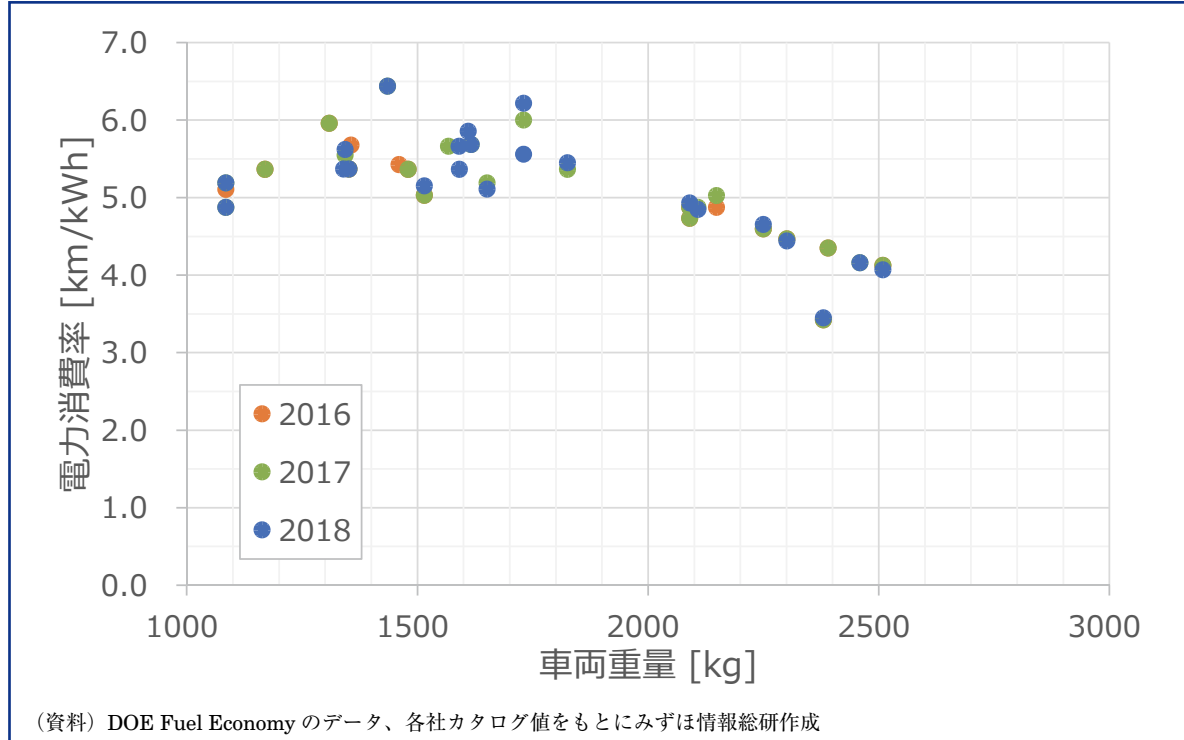
航続距離の関係が正の相関関係にあることがわかる。このことは、搭載される電池容量に比例して航続距離が長くなり、車両効率に大きな違いはないことを示唆している。これに対してPHEVでは図表2に示す通り、電池容量と航続距離の関係がEVと比較して相関性が低いことがわかる。また、図表1、2の傾きは電力消費率に相当するが、EVでは約5 km/kWhであり、PHEVでは2~3 km/kWh程度であることがわかった。これらのことは、PHEVはEVと異なり、電動走行だけでなくハイブリッド走行にも対応する必要があること、様々なタイプの車両が存在しており、搭載している蓄電池の容量が小さくても重量の大きい自動車があること、などが背景にあるものと考えられる。

このことを考察するために、車両重量と電力消費率の相関を取ったものを、図表3 (EV)、および図表4 (PHEV)に示した。双方とも車両重

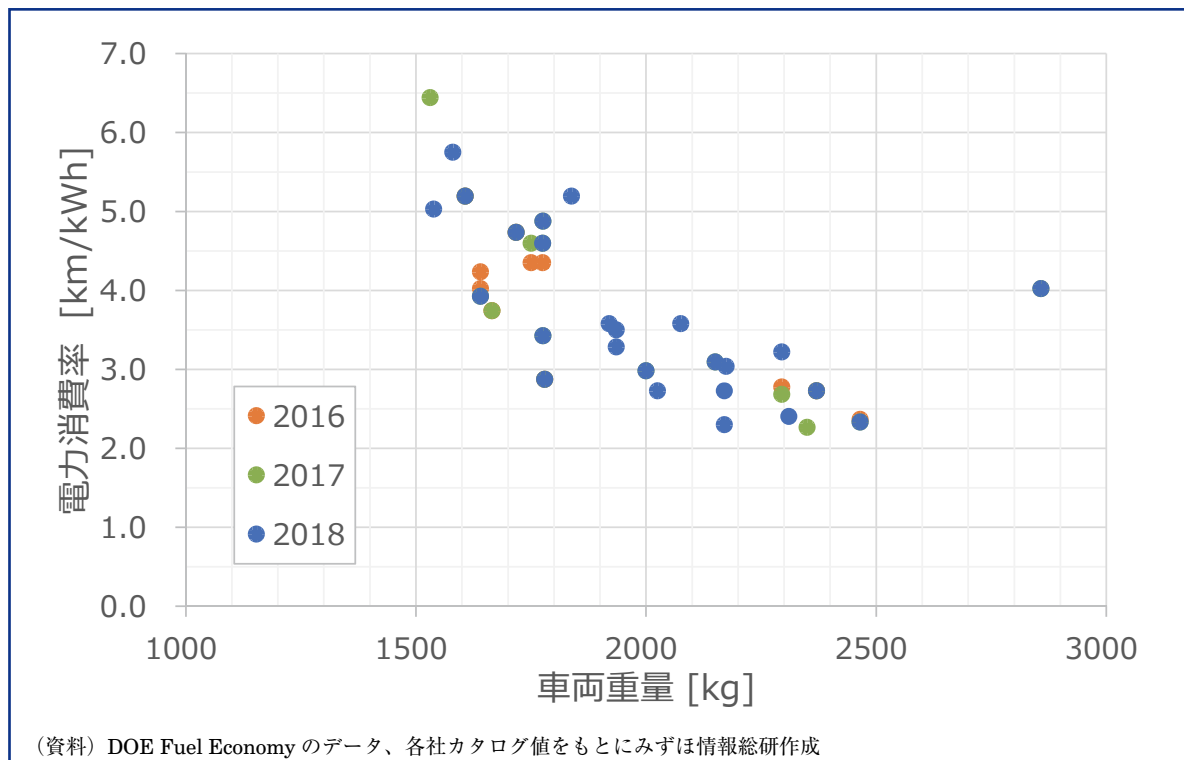
量が増大するにつれ、電力消費率が低下する傾向がみられた。

図表3をみると、EVは車両重量が1,800kg以上になると車両重量が増加するにつれて、電力消費率がほぼ線形に低下していることがわかる。電力消費率は走行抵抗に依存することは既に述べたが、走行抵抗は、①空気抵抗、②転がり抵抗、③加減速抵抗、④勾配抵抗によって決まることが知られており、このうち②、③、④は車両重量に比例する。蓄電池の搭載容量を単純に増加させると、現時点では車両重量の増加にもつながり、走行時の抵抗増大を招く結果、電力消費率の低下を招くこともあるだろう。蓄電池の重量エネルギー密度の向上は、同じ容量の蓄電池を搭載しても車両重量が軽くなることから、図表3で電力消費率が線形に低下している部分の傾きを改善する効果が見込める。

図表3 EV の電力消費率と車両重量の相関



図表4 PHEV の電力消費率と車両重量の相関



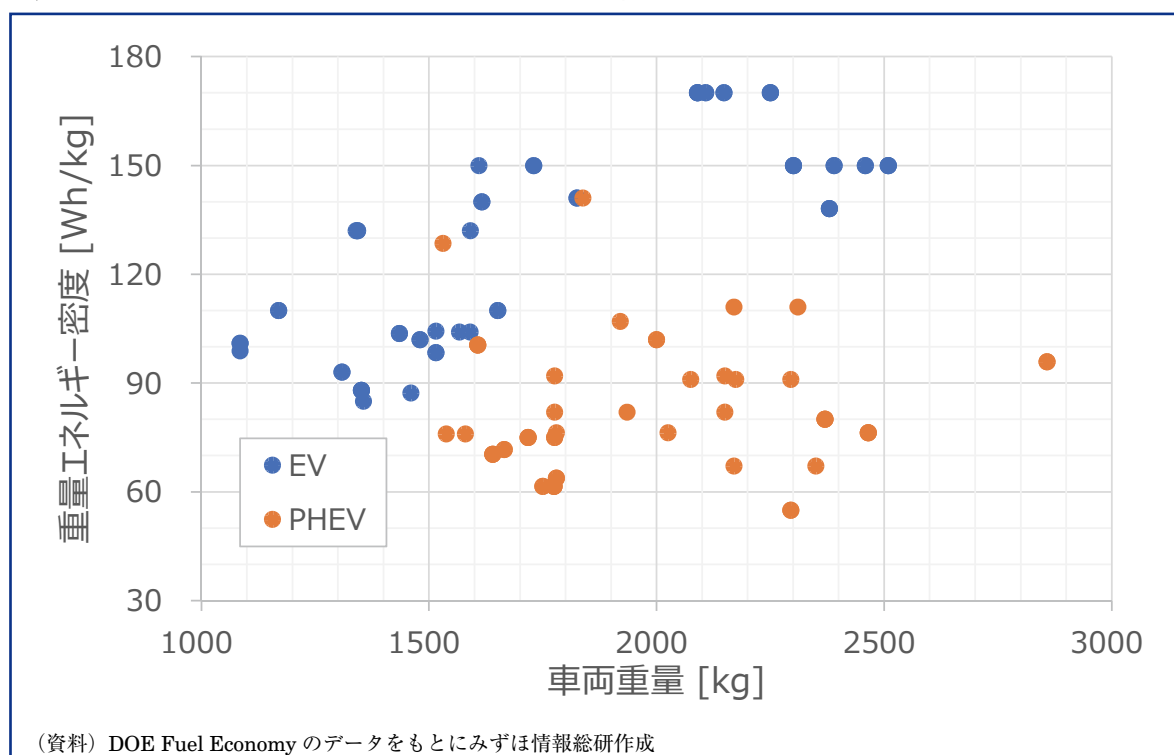
これに対して図表4に示した PHEV では、線形関係がみられなかった。この原因については、前述の考察通り PHEV ではハイブリッド走行にも最適でなければならないことによる違いや様々なタイプの車両が存在していることが表れているものと考えられる。蓄電池の特性に注目して考察すると、ハイブリッド走行では出力が重視されることから、搭載されている蓄電池の容量が小さい PHEV では、蓄電池そのものの出力密度を高める必要がある。一般的に、蓄電池の出力密度とエネルギー密度はトレードオフの関係にあることから、PHEV ではハイブリッド走行に対応するためエネルギー密度を犠牲とし、出力密度を高めた蓄電池が採用されている可能性が高い。

このことを確かめるために、EV と PHEV で採用されている蓄電池の重量エネルギー密度を抽出し、車両重量との相関を調べたものを図表

5に示す。なお、重量エネルギー密度は、航続距離と同様のデータベースから抽出したものである。図表5より、車両重量が1,500kg 程度を超える範囲では、PHEV に搭載されている蓄電池より EV に搭載されている蓄電池の方が、重量エネルギー密度が高いことがわかる。これらの事実は、前述の考察と矛盾せず、EV と PHEV では異なる諸元の蓄電池が使われていることがわかった。

ここでのデータ分析で得られた考察や示唆は、現状の EV や PHEV の技術動向の一面を捉えているものと推測されるが、自動車には様々な設計点が存在するため、個々の詳細な分析が必要であることも言及しておきたい。特に EV や PHEV は、まだ普及の初期段階であり、挑戦的な設計による自動車も含まれていることも想定される。

図表5 EV と PHEV に用いられている蓄電池の重量エネルギー密度比較



(2)電力貯蔵用蓄電池

電力自由化、再エネの導入量拡大、災害対応、スマコミの社会実装などを背景として、今後電力系統内で電力貯蔵を行う必要性が増していくことだろう。電力貯蔵には既に活用されている揚水式水力発電などの他に様々な方法があるが、電気エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵する蓄電池にも一定の役割が期待されている。ここでは、電力貯蔵用に適用される蓄電池を対象として、技術的な要求事項と現状の技術動向について述べる。

①技術的な要求事項

NEDO 技術戦略研究センターがまとめたレポート⁽⁶⁾によれば、蓄電池に期待される役割として主に3つ挙げられている。ここでは、蓄電池に期待される役割毎に技術的な要求事項について述べる。また、期待される役割によらず電力貯蔵用に共通して求められる要求事項についても、最後に言及する。ここで、電力分野では出力に対して「容量」という言葉がしばしば用いられるが、本稿では蓄電池の容量との混乱を避けるため、出力容量 [kW] と蓄電容量 [kWh] (= 定格出力における放電時間 [時間]) のように区別して用いることとした。

なお、蓄電池に期待される役割が同じでも、電力系統内のどの領域に設置するかによっても技術的な要求事項は異なる。具体的には、発電の上流側から発電領域、送配電領域、需要家領域と大きく3領域あるが、どの領域でどの程度の電力貯蔵が必要となるかは、再エネを含む電源の地域差、電力市場における価値を含めた経済合理性などに大きく左右されることから、ここでは可能な範囲で言及するにとどめた。

A. 中小規模の余剰電力への対応

太陽光発電や風力発電のように、気象条件

によって出力が変動する再エネの導入が拡大すると、気象条件によっては供給が需要を上回り余剰電力が発生する。たとえば、春から初夏にかけては、日射量が多いものの気温が低く半導体での損失が少ないため、太陽光発電の発電量が一年で最も多い。一方で、春から初夏にかけては電力需要が少ないため余剰電力の発生頻度が高くなる傾向にある。余剰電力を蓄える観点からは、電力系統内の位置によらず設置スペースは可能な限り小さく、蓄電容量を大きくすることが重要となるため、エネルギー密度が重要となるだろう。要求される蓄電容量としては、再エネの余剰電力への対応を考慮すると、数時間から半日程度の時間で充放電に対応することが求められる。なお、要求される出力容量については、電力系統安定化および需要変動への対応にて後述する。社会全体で見た場合に、蓄電より出力制御に経済合理性がある、また、蓄電池は余剰電力を十分に吸収するためには規模が小さいという意見もある一方で、太陽光発電等の自家消費を行っている個々の需要家の受益で見れば、蓄電池の価格が十分に低下すれば余剰電力貯蔵のメリットがあるとされ、いずれの場合においても蓄電システムの価格低減が求められる。

B. 見かけの需要変動への対応

見かけの需要変動とは、需要家が保有する自家発電量や蓄電量をトータルの需要から差し引いた需要量の変動である。たとえば、太陽光発電では朝夕の出力変動速度が大きく、火力や水力などの出力制御可能な大規模発電設備の出力調整では対応が困難である。これらに対応するためには、発電領域、送配電領域、需要家領域のそれぞれにおいて、負荷を平準化(ピークカット、ピークシフト)するこ

とが必要となる。

発電領域においては、出力変動の大きい再エネ由来の発電設備に蓄電池を併設し、出力を安定化させることが期待される。太陽光や風力発電設備の出力は、短時間で定格出力からゼロまで変動する可能性もあることから、発電設備と同等の出力容量をもつ蓄電池が望ましいものと考えられる。蓄電容量については、30分以下の比較的短時間で変動する出力に対して大規模発電設備の出力調整で対応することが困難であることから、30分程度の放電時間に相当する蓄電容量を有していることが望ましい。これに対して送配電領域、および需要家領域においては、送電電力や消費電力より小さい出力容量で、数時間から半日程度の充放電に対応可能な蓄電容量をもつ蓄電池が必要となるだろう。しかしながら前述の通り、これらは再エネを含む電源の地域差、電力市場における価値などによって要求仕様が変化する可能性が高いことに注意が必要である。

C. 電力系統安定化への対応(調整力)

見かけの需要変動への対応でも述べた通り、再エネ電源は気象条件の変化などに応じて予測困難な出力変動を生じやすい。これらは、電力系統の需給バランスを崩し、周波数に影響を与える潜在的なリスクがあり、最悪の場合は停電に至る可能性もある。通常、これらの周波数調整は、火力や水力などの出力制御可能な大規模発電設備の出力調整で対応しているが、再エネ電源による発電の出力容量が増加すると、これら出力制御可能な大規模発電設備の出力が抑制され、周波数調整能力が小さくなってしまう問題が発生し得る。この周波数調整能力としての役割が蓄電池に期待されており、欧米では導入が進められている。

この役割に対しては、蓄電容量より出力容量が優先される傾向にあると考えられるが、特に送配電領域においては系統の出力容量と同程度の出力が必要となるため、数秒から数分程度の時間であっても、大きな蓄電容量が必要となることが想定される。

D. 蓄電池への共通要求事項

電力貯蔵用として蓄電池を活用するにあたっては、電力系統内での役割や領域によらずインフラ機器として連続運用される必要があることから、安全性、信頼性(低故障率)、コスト、設置性(設備サイズが小さい)、長期耐久性、および蓄電池の状態診断・監視技術が重要である。特に状態診断・監視技術は、安全性や耐久性を確保する上でも重要である。たとえば、メンテナンス時に蓄電池を交換するためには、各蓄電池の劣化状態を正確に診断する技術が必要となる。また、出力容量と蓄電容量が大きいものでは多数の蓄電池を直並列接続することから、運転状況下において蓄電池の充電状態や劣化状態を把握する技術も重要である。一般的に、蓄電池は初期性能が均一に製造されていた場合でも、運用中における劣化量の違いから性能にバラツキが生じることが多いため、蓄電池の劣化状態を把握し均等な充放電を行うことが必須となる。

本稿では、大規模な電力系統における蓄電池の役割に注目したが、電力系統に接続されていない地域において再生可能エネルギーと組み合わせた自立型電源システム、いわゆるマイクログリッドの構築においても蓄電池の役割は重要となることを最後に言及しておきたい。

②現状の技術動向

電力貯蔵用途における蓄電池の現状の技術動

向として、蓄電池を用いた電力貯蔵システムの定格出力と持続時間の関係をプロットしたものを図表6に示す。図表6は、米国 DOE 主導のもとで構築されたデータベース「Energy Storage Database⁽⁷⁾」より、現在電力貯蔵に比較的多く適用されているリチウムイオン電池、フロー電池、NAS[®]⁽⁸⁾電池の3つを対象としてデータを抽出し、グラフを作成した。図表6の具体的な作成方法を以下に示す。尚、各蓄電池の作動原理や技術動向については、次章を参照されたい。

- 1) DOE Energy Storage Databaseにおいて“Technology Type”から“Electro-chemical”を選択し、蓄電池に関するデータを抽出
- 2) 抽出したデータの“Technology Type”、および“Technology Type Category”から、リチウムイオン電池、フロー電池、NAS電池を抽出

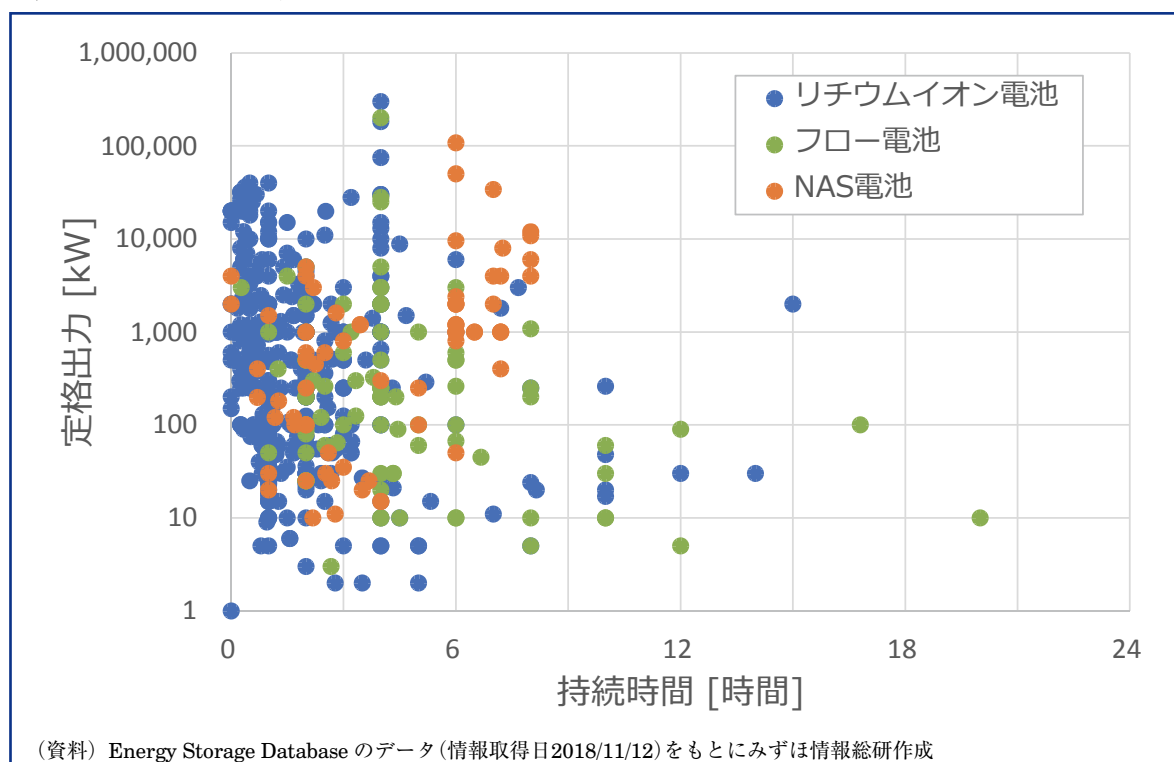
- 3) 抽出したリチウムイオン電池、フロー電池、NAS電池に対して、定格出力と持続時間をプロット

備考：

- ・データベースからの情報取得日は2018年11月12日
- ・複数の蓄電池やキャパシタを組み合わせた電力貯蔵システムは除外した⁽⁹⁾
- ・フロー電池は、電解液の違い(バナジウム系、亜鉛-臭素系、など)まで特定したデータも存在するが、今回のプロットでは全てフロー電池として分類した

図表6より、電力貯蔵用途に適用されたリチウムイオン電池、フロー電池、NAS電池の適用状況やその特徴についてまとめる。

図表6 蓄電池を電力貯蔵に適用したシステムにおける出力と放電時間の関係



A. リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は普及が進んでいる蓄電池であり、高出力タイプや高容量タイプなど様々な性能の蓄電池が市場に投入されている。これらは、材料や蓄電池の最小単位であるセルの設計変更、およびセルの直並列接続によって実現されており、出力、放電持続時間(容量)ともに、様々なシステムが存在していることの一因となっているものと考えられる。また、他の蓄電池と比較して、放電時間が1時間以下と比較的容量の小さいシステムが多い傾向にある。これは、リチウムイオン電池の高速な充放電特性を活かし、周波数変動への対応を志向した電力貯蔵システムであると推測される。

B. フロー電池

フロー電池では、周波数調整の役割を担うシステムが少ない一方で、放電持続時間が12時間以上と蓄電池としては長いシステムがみられるところに特徴がある。フロー電池は、作動原理的に電解液のタンク容量を増やすことで高容量化できることから、様々な放電持続時間を実現できる。出力についても、電解液や蓄電池本体の設計などによって様々な出力を実現可能である。また、出力が高いものは放電時間が短く(蓄電容量が小さい)、出力が低いものは放電時間が長い(蓄電容量が大きい)傾向がみられた。

C. NAS 電池

NAS 電池では、放電持続時間は数時間以内に留まるが出力は幅広く試されており、負荷平準化から調整力を志向したシステムまで幅広く対応しているものと推測される。また、フロー電池とは異なり、周波数調整の役割を担っているものと推測される放電持続時間1

時間以下のシステムが2件みられた。

現状、NAS 電池を製造可能なメーカーは日本ガイシ株式会社1社のみであり、製造されている NAS 電池のセル(蓄電池の最小単位)が限定されている可能性が高く、セルの直並列接続によって出力と容量が調整されているものと推測される。放電持続時間が数時間以内のシステムしかみられないのは、システムとして成立させるための要請(熱自立、均等充放電制御、など)から、接続可能なセル数が限定されていることが一因となっている可能性も考えられる。

3. 次世代、革新型蓄電池の技術動向

現在広く普及し、さらなる発展も期待されているリチウムイオン電池は、このまま技術開発が進めば、さらに高性能(高容量、高電位、高サイクル寿命)となっていくように見える。しかしながら、リチウムイオン電池の改良を重ねても高性能化には限界があることがわかっており、たとえば重量エネルギー密度の理論的限界値は、およそ662Wh/kgと算出されている⁽¹⁰⁾。一方でガソリンの重量エネルギー密度は12,000Wh/kg以上⁽¹¹⁾もあり、ガソリン車なみの蓄エネルギー性能を電池に求めることはいかに困難かが分かる。

また、限られた資源量の問題も重要である。現在のところリチウムイオン電池をめぐる資源問題は大きく顕在化していないが、地球上で採掘できる金属の資源量には限界がある。よく話題に挙がるのは正極に用いられているコバルトであり、その調達リスクや需給見通しに、しばしば注目が集まっている⁽¹²⁾。また、電池内部で電荷の移動を担っているリチウム金属においても、同様に資源量の限界がある。地殻中の元素存在量を表現する数値として「クラーク数」があるが、蓄電池内を移動するイオンとして利用できる金属のクラーク数は、マグネシウムが約

2、アルミニウムが約7.5、ナトリウムが約3であるのに対し、リチウムは0.006しかない。今後、電気自動車をはじめ蓄電池のニーズが爆発的に高まることが予想されるなか、いずれリチウム金属の枯渇問題が顕在化する可能性もある。

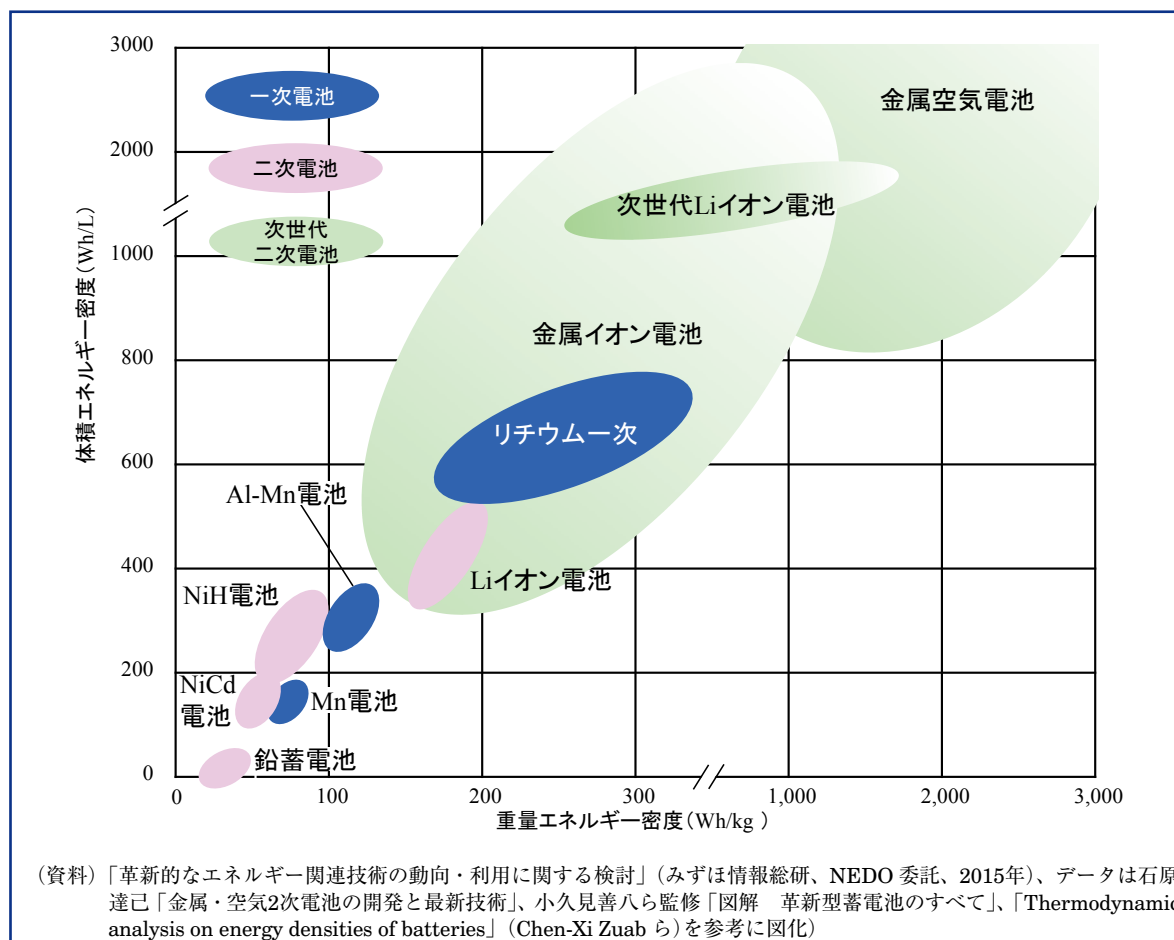
それでは、リチウムイオン電池を凌ぐ他の金属イオンを用いた蓄電池は実現できないのだろうか。あるいは、蓄電池そのものの構造を変えた新しい蓄電池は実現できないのだろうか。

NEDO「二次電池技術開発ロードマップ2013」によると、現在のリチウムイオン電池を凌ぐ高容量・高出力の革新的蓄電池の実現には、2030年頃に“ブレークスルーが必要”との記載があるものの、どの蓄電池技術がブレークスルーと

なるのかについては明示されていない。これについて、「革新的なエネルギー関連技術の動向・利用に関する検討」（みずほ情報総研、NEDO委託、2015年）によると、現行のリチウムイオン電池のエネルギー密度をはるかに凌ぐ革新的電池としては、次世代リチウムイオン電池、金属イオン電池、金属空気電池といった蓄電池が挙げられている（図表7）が、どの蓄電池がポストリチウムイオン電池を担う主役となるかについては、現時点では明らかでない。

本節では、これらのポストリチウムイオン電池となりうる次世代・革新型蓄電池を中心に、その特徴や課題、研究開発動向のトピックを述べていく。

図表7 重量エネルギー密度と体積エネルギー密度の関係



(1)全固体電池

全固体電池は、最近で最も報道を賑わせた蓄電池ではないだろうか。一言で説明してしまえば、従来型リチウム電池で使用される液体の電解質を固体の電解質で代替した電池である。しかしながら、報道されている全固体電池にはいくつか種類があることに注意が必要である。

まず、固体電解質には大きく無機系固体電解質と高分子系固体電解質が存在する。最近話題となっていたのは、前者の無機系固体電解質であり、粉状の物質をイメージすればよい。また、同じ無機系固体電解質を用いていても、薄膜型とバルク型の2種類の全固体電池が存在する。前者は既に実用化されているが、この薄膜型全固体電池は小型・小容量向けであり、自動車の駆動用蓄電池としては用いることができない。自動車の駆動用蓄電池として期待されているのはバルク型全固体電池であり、両者はまったく別の技術と言っても過言ではない。ここでは、このバルク型全固体リチウムイオン電池に着目して技術動向をまとめる。

全固体電池は1970年代から研究され始めたが、元々は内部抵抗が高いため高出力化に課題がある蓄電池とされていた。しかしながら現在では液系リチウムイオン電池より高出力化が可能とされており、全固体電池がここまでの注目を集めるに至った要因のひとつとなっている。全固体電池の高出力化を実現するにあたっては、大きく2つのブレークスルーが挙げられる。1つは、固体電解質の研究開発の進展である。従来の固体電解質では、液系電解質と比較してリチウムイオン伝導度が室温で一桁以上低く、蓄電池に適用しても高速な充放電ができない状況にあった。しかし、2011年に室温でも液系電解液と同等のリチウムイオン伝導度をもつ硫化物系固体電解質 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ が、東京工業大学のグループによって発見されたのを皮切りとして、2016年

には同グループによって室温で液系電解質を凌駕する $\text{Li}_{9.54}\text{Si}_{1.74}\text{P}_{1.44}\text{S}_{11.7}\text{Cl}_{0.3}$ が発見された⁽¹³⁾。固体電解質には、他にも課題があるものの、室温におけるリチウムイオン伝導度が液系と同等かそれ以上になったことは、全固体電池の実用化に向けた大きな進展となっている。

2つ目のブレークスルーは、電極活物質と固体電解質の界面に数ナノメートル程の緩衝層を設けることで、全固体電池内部の反応に起因する内部抵抗を低減し、高出力化を実現したことが挙げられる。全固体電池で高速な充放電を行うためには、固体電解質のイオン伝導度向上だけでは不十分であり、化学反応が起こる電極活物質と固体電解質の界面における抵抗が問題であることを国立研究開発法人物質・材料研究機構の研究グループが突き止め、界面をニオブ酸リチウム LiNbO_3 などのリチウム酸化物で修飾して緩衝層を設けることで、内部抵抗を低減、高出力化を実現した⁽¹⁴⁾。どちらも国内の研究グループの手によって成し遂げられたことは、世界に誇るべき成果であるといえる。

それでもなお、全固体電池にはまだ様々な課題が残っており、現在も国の研究開発プロジェクトを通じて、産学官の総力を挙げて研究開発が進められている。たとえば、全固体電池は粉状の材料によって構成されることから、従来のリチウムイオン電池の製造プロセスをそのまま適用できないため、量産可能な製造プロセスを開発する必要がある。また、充放電によって電池内部の構造が壊れないよう高い圧力⁽¹⁵⁾による加圧拘束が必要であったり、固体電解質中で金属リチウムの析出が報告されたりするなど、全固体電池特有の課題も報告されている。

これらの課題を考慮すると、今後数年で実用化されたとしても、全固体電池のメリットを最大限に活かし、液系リチウムイオン電池を超えた性能および信頼性に達するまでには、まだ相

当な時間がかかるのではないだろうか。今後も研究開発動向を注視し、実用化に向けた動向を詳細に追っていく必要がある。

(2)次世代リチウムイオン電池

次世代を担う蓄電池として、やはりリチウムイオン電池の技術動向を取り上げない訳にはいかないだろう。リチウムイオン電池の研究開発により、今後さらに高エネルギー密度化が進むことが予想されるが、これとトレードオフの関係にあるのが安全性の確保である。一般的なりチウムイオン電池では、有機電解液と負極に広く採用されているカーボンおよびセパレータは可燃性であり、金属酸化物で構成される正極からは材料によっては熱分解によって燃焼を助ける酸素が放出されるため、内部短絡等により充電されたエネルギーが一気に放出されると電池の破裂や場合によっては発火から火災に至る恐れがある。

現在では、バッテリーマネジメントシステムによる電池の状態監視・制御技術の向上や製造プロセスにおける異物混入の排除、熱暴走にくい電極材料である LiFePO_4 や $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ の採用、耐熱性の高いセパレータの開発等、研究機関とメーカーの不断努力により、安全性は飛躍的に向上してきている。しかしながら、それでもリチウムイオン電池搭載製品の普及拡大、ユーザーの使用過誤、海外無名メーカーの安価な製品の流通などを背景として、発火や火災に至る事故はいまだに発生し続けている⁽¹⁶⁾。また、毎年発生している大規模地震・災害や事故による圧壊、外部の火災など外的要因で発火、破裂が起る可能性は、可燃性材料を用いる限り、どんなに安全性を追求しても最後まで残ることになる。

一方で、約4Vというリチウムイオン電池の高い電圧に耐えることができ、発火性を持たず高

いイオン伝導性を示す電解液の存在が東京大学らの研究グループによって明らかにされ、安全性向上に資する発見として注目を集めている。

従来、リチウムイオン電池の電解液にはリチウム塩を溶解した炭酸エステル類が主として採用されており、これらは幅広い電位で安定であることや安価であることから広く採用されているが、発火点が低くリチウムイオン電池が熱暴走した際に発火する要因となっている。水系の電解液を用いれば可燃性という課題は解決できるが、最大4Vという高電圧に起因する水の電気分解や、水とリチウム金属の反応により水素ガスが発生するために水系の電解液は使えないというのがリチウムイオン電池の常識であった。

しかしながら、2016年には水をベースとしたリチウムイオン伝導性液体、水の電気分解される電圧を超える3V以上で作動するリチウムイオン電池が実現された⁽¹⁷⁾ほか、2017年には①発火点を持たない、②200℃以上への温度上昇時で蒸気が発生し自己消火性を示す、③優れた電極反応耐久性を示す電解液が発表され大いに注目を集めた⁽¹⁸⁾。

このような電解液の急速な研究進展により、前述の全固体電池に劣らない安全性を示す液体系リチウムイオン電池の実現が可能性を帯びてきた。液体の電解質を利用するということは、既に導入済みの量産ラインでも軽微な改変により適用できる可能性があり、製造コストを低く抑えつつ安全性を飛躍的に高めることができるポテンシャルがあるとも言える。負極にシリコン、セパレータにフッ素系樹脂、そして前述の電解液を利用すれば、原料価格が高くなる傾向はあるが、全体的に可燃性を示す材料を利用しない、全固体電池と同レベルの安全性を備え持つリチウムイオン電池を近い将来実現できるかもしれない。

(3)ナトリウム硫黄電池

リチウムと同じアルカリ金属であるナトリウムを用いた蓄電池として、既に商用化し広く普及しているものの代表格が、大規模な電力貯蔵用に開発されたナトリウム-硫黄電池(NAS電池)だろう。NAS電池は日本ガイシ株式会社によって2002年から事業化されている蓄電池で、正極に硫黄、負極に金属ナトリウム、電解質には固体電解質である β -アルミナが用いられている。放電時には、負極のナトリウムが Na^+ となり、 β -アルミナ中を伝導して正極まで Na^+ が輸送され、正極の硫黄によって Na^+ が還元されて多硫化ナトリウムとなる。作動中はナトリウムと硫黄を熔融させ、 β -アルミナでの Na^+ 伝導度を高く保つために、300℃程度的高温条件が必要となる。高温条件での作動が必須であることから、ヒーターでの加熱や放電時の反応熱を活用して、作動温度を維持(熱自立)する必要がある。

鉛蓄電池と比較すると3倍のエネルギー密度をもち、耐久年数も約15年と長寿命であるため、電力貯蔵用途に適した蓄電池である。更に構成材料が資源的に豊富に存在することから、他の蓄電池と比較してコスト競争力が高いとされており、この観点からも経済合理性が重要視される電力貯蔵用途での活用が期待される。

NAS電池は、過去に発火事故が発生したことがあるが、金属ナトリウムが用いられているため、消火にあたっては通常の水系の消火液を用いることができない。当時の発火原因は既に究明されており、単電池(蓄電池の最小単位)の破壊から短絡が生じ、隣接するモジュールに延焼が拡大したものとされている。これらの原因に基づき、現在では短絡防止策や延焼防止策などが図られており、安全性が向上しているものと考えられる。

既に普及が進んでいるNAS電池であるが、次

世代で更に活躍が期待される蓄電池として本稿でも取り上げた。今後の動向が注目される。

(4)リチウム硫黄電池

リチウム硫黄電池は、通常のリチウムイオン電池で用いられる金属系正極の代わりに、地球上に豊富に存在し、NAS電池でも電極として実用化されている硫黄を封入した次世代型リチウムイオン電池である。正極としての硫黄は、通常のリチウムイオン電池と比較すると電圧が2~2.5V程度と低いものの、電気エネルギーを貯蔵する電極活物質が軽量であることから従来型のリチウムイオン電池セル比で2~3倍の重量エネルギー密度が可能になると期待される。従来型のリチウムイオン電池の正極に含有されるコバルト、ニッケル、マンガンのような価格の高い金属を低価格の硫黄で代替できることから原料コストの大幅な削減も期待される。

実用化にあたっての課題は、硫黄が電解液に溶解し易いことに起因する充放電容量の急速な劣化や、正極に用いる硫黄の電気伝導性が低く、充放電のエネルギーロスが大きい点などがある。これらの課題解決に向けた研究開発は徐々に進められており、たとえば固体電解質を適用して、正極の硫黄が溶出することを防ぐ試みなどがある。

リチウム硫黄電池は、大学や研究機関のみに限らず日本企業でも研究されており、複数の企業が過去にプレスリリースを行っているほか、海外では英国のベンチャー企業OXIS Energyが先行している。これらの企業や研究機関では、ラボレベルではリチウムイオン電池のエネルギー密度を超えるセルの作成に成功した事例もみられ、OXIS Energyでは既に450Wh/kgのエネルギー密度を実用的なサイズのセルで達成したとしており、空気電池や多価イオン電池よりも研究開発が進んでいると推測される。

現状では長期耐久性の確認やスケールアップの可能性について検討されているが、既にコイン電池やコンデンサの代替として日本企業により実用化され、大型用途でもサンプルセルの出荷が行われている全固体電池と比較すると、リチウム硫黄電池の実用化にはまだ時間がかかるとみられる。

(5)レドックスフロー電池

化学反応を利用したすべての蓄電池に共通する事項として、電気エネルギーと化学エネルギーの変換に酸化還元反応を用いていることが挙げられる。還元は英語で Reduction、酸化は Oxidation であることから、両者を短縮して酸化還元反応を Redox（レドックス）反応と表現することが多い。この“レドックス”を名前に冠したレドックスフロー電池も、電解液中に存在するイオンの酸化還元反応を利用した蓄電池の一種である。

レドックスフロー電池では、酸化還元反応を担うイオンを含んだ溶液を、ポンプを駆動力とした流動（フロー）によって循環させるという点に特徴がある。充放電時には、蓄電池本体の電極における酸化還元反応によって、電解液中にあるイオンの価数が増えることなどによって電気の充放電を行う。電極が変化せずに、電解液が変化するという点にも特徴があるといえる。

レドックスフロー電池は、タンクやポンプが必要となることからシステム全体が大きくなるためエネルギー密度は小さいが、電解液によっては劣化がないため耐久年数が10～20年以上と長寿命であり、不燃性または難燃性の材料から構成されるため、安全性が高く電力貯蔵用途に適している。また、蓄電容量を増やすためには主にタンクを増設すればよいから、大規模な電力貯蔵用途に適用可能である。

国内では、既に住友電気工業株式会社が全バ

ナジウムレドックスフロー電池を開発、事業化しており、コンテナ型とすることで設置性の向上も図られている。その他にも、大企業からベンチャー企業まで、電解液の組成や電池本体の構造が異なる様々なレドックスフロー電池が開発されている。

研究開発の動向としては、電池本体の性能向上を目指して、より化学反応にかかる抵抗を小さくする取り組みが多い。具体的には、電池内部の流動を改善するための流路構造や電極の微細構造の検討、電解液の改良などがある。特に電解液の改良としては、新たな電解液の開発だけでなく、酸化還元媒体(Redox Mediator)という酸化還元反応を助ける物質を電解液中に導入し、化学反応に伴う抵抗を低減する取り組みもみられる。また、近年では高エネルギー密度化を目指した電解液の研究開発として、固体粒子を懸濁させた電解液を用いたスラリー型レドックスフロー電池というタイプの蓄電池も提案されている。一般に従来のレドックスフロー電池では金属イオンの溶液を用いるため、エネルギー密度が他の蓄電池と比較して低いが、溶液よりも固体中のほうが酸化還元反応を担う金属イオンの密度が高くなるという特徴を利用することで、体積エネルギー密度の向上が見込まれる。スラリー型レドックスフロー電池はセミソリッドフロー電池と呼ばれることもある。

一般的には、電力貯蔵用途が想定されているレドックスフロー電池であるが、電気自動車へ適用する試みもみられる。これまで、レドックスフロー電池を車載用として適用するには、大量の電解液を搭載するための大容量タンクが必要となり、システム全体を車両に搭載できないという課題が存在した。しかし、2013年に設立されたスイスのベンチャー企業である nanoFlowcell[®]により、新たに開発された電解液を用いたレドックスフロー電池は、出力密度、エネルギー

密度ともに従来のレドックスフロー電池のみならず、リチウムイオン電池をも大きく上回るものとされ、既に電気自動車で複数モデルを商品化しているという。フロー電池の車載への適用を可能とした電解液についての詳細は明らかにされておらず、リチウムイオン電池を上回るエネルギー密度を達成しているかどうかは現時点では確認できないが、今後も動向に注目していきたい。

(6)多価イオン電池

リチウムイオン電池はリチウム金属がイオンとなって正極と負極の間を出入りすることで充放電が可能となる。リチウムは電極に1個の電子を渡しイオンとなる(Li^+)ことで、電極間を行き来することができるが、もし、より多くの電子を渡すことができるイオンがあれば、より容量の大きな蓄電池が実現する可能性がある。このような、より多くの電子の受け渡しのできるイオン(多価イオン)となりうる金属を用いた電池を、多価イオン電池という。多価イオンになりうる金属としては、例えば、マグネシウムイオン(Mg^{2+})、アルミニウム(Al^{3+})、鉄(Fe^{2+})、亜鉛(Zn^{2+})などが挙げられる。

多価イオン電池としての代表格は、最近国内外の研究機関から次々と新たな研究成果が発表されているマグネシウムイオン電池が挙げられるだろう。マグネシウムは、蓄エネルギーの性能としては理論的には重量エネルギー密度が最大約2,000Wh/kg、体積エネルギー密度が最大約6,000Wh/L、電圧も最大約4Vにも達し、実用化されているリチウムイオン電池の性能をはるかに凌駕する⁽¹⁹⁾。しかし、多価であるがゆえ、結晶中でも溶液中でも移動速度が遅くなり、また相互作用が弱く電極における反応も鈍いという課題がある。また、負極にマグネシウムを用いると、デンドライトが析出⁽²⁰⁾し反応が著しく鈍

くなる課題もある。さらに、安定かつ安全に充放電を行うためのマグネシウム電解液が存在していないことも課題である。このように、実用化に至るまでには様々な困難な課題が山積しており、我が国の研究グループをはじめ世界各国の研究グループがしのぎを削って研究開発が行われているが、ポストリチウムイオン電池として製品化・量産化される状況には至っていない。ポストリチウムイオン電池を目指し、製品化・量産化に向けたもう一段の技術革新が求められる。

また同様に、アルミニウム、鉄、亜鉛といった多価金属を用いた蓄電池も、理論的には可能性はあるが、マグネシウムと同様にデンドライト析出によるサイクル寿命の課題が大きい。一部の企業で蓄電池の製品化までこぎつけた例はあるが普及しておらず、根本的な課題解決には至っていないと言わざるを得ないだろう。

(7)ナトリウムイオン電池

ナトリウムは、リチウムと同じアルカリ金属でありながら海水中をはじめ豊富に存在し、また化学的特性がリチウムと似ていることから、リチウムに代替する蓄電池材料として期待されており、ポストリチウムイオン電池としてナトリウムイオン電池の研究開発も進められている。

金属イオン電池材料としてのナトリウムは、標準電極電位⁽²¹⁾がリチウムより0.3V高い分、電池としたときの電圧が低下してしまうことから、リチウムイオン電池ほどエネルギー密度を大きくできないという問題がある。また、ナトリウムはリチウムよりも活性であるため過充電するとデンドライトが形成されてショートや爆発する可能性がある点も大きな課題である。これら課題を克服すべく、日本、アメリカ、欧州、中国、韓国など世界各国で研究開発が行われており、そのなかでも我が国の研究機関による研究

開発レベルは世界トップレベルにある。実用化に向けた動向としては、2015年にはフランスの国立科学研究センターが中心となって、民生用で普及している18650サイズのリチウムイオン電池のプロトタイプを開発し、2017年にTiamat Energyというベンチャー企業を立ち上げている。

また、先述したようにナトリウムはリチウムと化学的特性が似ていることから、量産化段階でリチウムイオン電池のノウハウを多く転用できる可能性がある。今後の研究開発動向が注目される。

(8)金属空気電池

金属空気電池とは、負極においては金属が活物質として出入りする一方、正極には空気中の酸素を活物質として用いる電池である。既に一次電池(一度放電するのみで充電が不可能な電池)としては亜鉛空気電池が広く商用化されており、ボタン電池などで我々にもなじみがある電池である。

金属空気電池は、正極で空気(酸素)を活物質とするため、高いエネルギー密度が可能で、理論的には重量エネルギー密度で1,000Wh/kg以上、単位重量あたりの容量が大きいリチウムであれば10,000Wh/kg以上にもなる⁽¹⁰⁾。先述したリチウムイオン電池の理論的限界値(662Wh/kg)と比べても、ガソリンに匹敵する圧倒的なエネルギー密度である。しかし、これはあくまで理論的な値であり、充放電を繰り返す蓄電池の実現には大きな課題がある。

まずは、負極における金属イオンの出入りに関しては、充電時にデンドライトが生成される問題、また高電圧に伴い電解液から水素が生成するなどの問題がある。また、正極においては、酸素の発生・還元を繰り返しが著しく電極を劣化させ、蓄電池の性能上重要となるサイクル寿

命が極めて短くなる。正極はまた、一方は電解液に浸りながら一方は空気に触れることから、撥水性と反応性の両立が必要であり、開発のハードルが極めて高い。

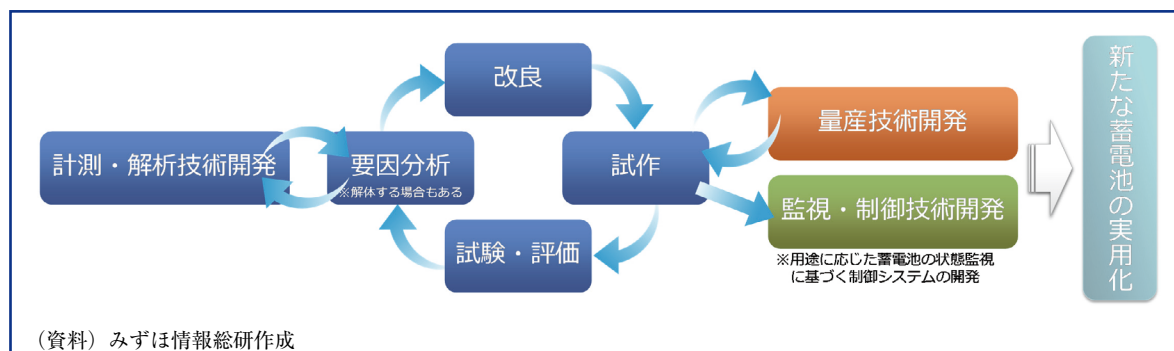
以上の課題解決に対し、有機系電解液の開発、正極の機能分離化(第三電極方式と呼ばれる)などの技術開発が進められている。金属イオンとしては、資源枯渇問題のあるリチウムイオン以外の、例えば亜鉛、鉄、アルミニウムといったありふれた金属も用いることができ、これでも十分なエネルギー密度が取れるため、特に系統向け、電気自動車向けなどの中型～大型の蓄電池として大きなポテンシャルがあると考えられるが、現在のところ実用化に耐えうる金属空気蓄電池は実現していない。その他の蓄電池と同様、もう一段の技術革新が期待される。

4. 次世代・革新型蓄電池の実用化にあたっての技術的課題

ここまで述べてきたように、いずれの次世代・革新型蓄電池も、ポストリチウムイオン電池として主役となりうるポテンシャルは有しているものの、すぐに代替として期待できるレベルには至っていないと考えられる。本節では、それぞれの蓄電池が有する個別の技術課題ではなく、蓄電池が実用化されるときに解決されるべき共通の技術的課題について考察した。

新たな蓄電池が実用化されるために解決が必要な技術的課題を考察するために、蓄電池が実用化されるまでに必要な開発プロセスの概念図を図表8に示す。図表8より、次世代・革新型蓄電池が実用化されるためには(1)量産技術開発、(2)蓄電池の監視・制御技術開発、(3)計測・解析技術開発、の3つの技術的課題が存在するものと考えられる。以下にそれぞれの課題について、リチウムイオン電池を例に挙げながら解説する。

図表8 新たな蓄電技術実用化に向けた開発プロセスの概念図



(1)量産技術開発

新たな技術を実用化し広く普及させるためには、高い信頼性をもちつつ、可能な限り安価に大量生産を可能とする技術が必要となる。蓄電池もこの例外ではないが、量産技術には制約が多いため、試作段階から量産技術を意識した開発が必要となる。リチウムイオン電池は現在広く普及しているが、その歴史は、1979年の Goodenough 博士(2019年、吉野彰氏とともにノーベル化学賞を受賞。当時は、東大から留学していた水島公一氏も共同研究。)らの正極材料としてのリチウム系酸化物の発見、その後の吉野彰氏のリチウムイオン電池の原型の完成まで遡る。しかし、普及へのブレークスルーは、1991年にソニー株式会社の西美緒氏ら(当時)によって成し遂げられた製品化によるものと言っていだろう。ソニーにおける開発には多くの苦勞を要しており、有機電解液を用いた蓄電池すら存在しなかった時代、多くの試行錯誤を繰り返したという。すなわち、新たな蓄電池が広く普及するためのブレークスルーは、実験室の研究成果でポテンシャルを見出すことだけでなく、その後の量産化の道筋が見えて初めて成り立つといえる。

(2)蓄電池の監視・制御技術開発

蓄電池は電気を充放電する機能を担う以上、

外部回路からの要請に対しては常に「受け身」の状態である。蓄電池を適切に活用しないと安全性が著しく損なわれることは、リチウムイオン電池において周知の事実である⁽²²⁾。安全性が高いと言われている蓄電池でも、適切な使用条件は必ず存在するため、蓄電池の状態を監視し、適切な使用条件の範囲で運用する必要があるだろう。また、蓄電池の性能を長期間に渡って維持する観点からも、適切な充放電の制御は重要である。

蓄電池を適切に制御するためには、蓄電池の状態を監視する必要があり、これら状態監視と制御を担うシステムをバッテリーマネジメントシステムと呼ぶ。蓄電池の状態監視は、即時性(リアルタイム性)のある計測技術と内部の作動原理に基づいた状態推定技術の2つが必要であるため、新しい蓄電池にはその特性や作動原理に応じたバッテリーマネジメントシステムの開発が用途毎に必要となる。たとえば、リチウムイオン電池のバッテリーマネジメントシステムでは、用途に応じて必要とされる技術水準が異なるだけでなく、蓄電池の構成材料によっても適用される監視・制御技術が異なる。同じリチウムイオン電池でも、中身が異なると共通のバッテリーマネジメントシステムを適用できないことから、蓄電池の素性に応じた監視・制御技術の必要性がわかるだろう。

(3)計測・解析技術開発

蓄電池の開発において、試行錯誤にかかる負荷は大きな課題のひとつである。図表8に示す通り、要求仕様や開発目標を満たす新たな蓄電池の開発では、まず研究室レベルで試作し、性能や特性を試験によって評価することが必要となる。性能を評価した後、性能発現や劣化の要因を分析し、改良方針を定め、再度試作と評価を行うという試行錯誤を繰り返すことになる。このとき、試験では劣化特性のように評価が完了するまでに長い時間⁽²³⁾を要するものもあるため、開発にかかる負荷が大きいことは想像に難くないだろう。これらは、蓄電池の性能発現メカニズムや劣化メカニズムが完全には解明できていないことが一因である。蓄電池の開発指針となるメカニズムを解明するためには、計測技術やシミュレーションなどの解析技術の開発、実証が必要であり、実用的な計測技術や解析技術が開発されれば、蓄電池開発における試行錯誤の負荷を軽減することが期待される。

最後に、技術が関係する課題について、もうひとつ言及しておきたい。次世代・革新型蓄電池の実用化に向けた共通の課題として量産技術やシステム技術を挙げたが、新しい蓄電池技術の実用化にあたっては、ユーザーや社会的、制度的な課題も重要な因子であることは言うまでもないだろう。蓄電池の技術進展にあわせて、そのようなユーザー側の課題と各蓄電池技術の特長とのマッチングについて分析を行うことは、技術開発の方針を決める上でも今後いっそう重要となっていくものと考えられる。

5. おわりに

今後どの蓄電池がポストリチウムイオン電池になるのか、あるいは現在のリチウムイオン電池の発展系が主役になり続けるのか、現時点で

断定することは難しい。いままでの蓄電池をみても、広く普及しているタイプは数種類しかないことも事実であることから、基礎研究段階から量産化段階にステップを進めることは極めて難しく、これこそが生き残る必須条件であることは確かである。リチウムイオン電池やNAS電池をはじめとして、蓄電池は我が国が得意とする技術分野でもあることから、今後いっそうの技術開発が期待される。

なお、本稿では紙面の都合上、取り上げることができなかった蓄電池もある。それらの蓄電池にも一長一短あり、用途毎の要求仕様にあわせて実用化に向けた研究開発が進んでいくだろう。今後も当社では、蓄電池技術とその適用先に関する技術動向について情報整理、分析を継続するとともに、当社の特色でもある解析技術を駆使した蓄電池の研究開発支援^{(24), (25)}を通じて、少しでも我が国の蓄電池関連産業の一助となることができれば幸いである。

注

- (1) 充放電可能な電池を示す技術用語としては“二次電池”も用いられるが、本稿では“蓄電池”で統一して述べる。なお、一般的には“充電電池”と呼ばれることもある。
- (2) 街や地域など特定の範囲において、電力をはじめとしたエネルギーを有効活用する社会システムのこと。近年では、交通システムも含めた検討が行われている。
- (3) 蓄電池の容量1kWhあたりで、走行可能な距離。エンジンの燃費と同様で、値が大きい程効率が高い。なお、海外では100kmまたは100マイルを走行する際に必要な容量で表される。
- (4) 蓄電池の最小単位。単電池と表現される場合もある。
- (5) DOE Fuel Economy, <https://www.fueleconomy.gov>
- (6) NEDO技術戦略研究センターTSC Foresight, vol.20 2017年7月「電力貯蔵分野の技術戦略策定に向けて」
- (7) National Technology & Engineering Sciences of Sandia, LLC, DOE Global Energy Storage Database, <https://www.energystorageexchange.org>
- (8) 「NAS」は日本ガイシ株式会社の登録商標です
- (9) 単一の蓄電池についての技術動向把握が目的である

- ため今回の分析では除外したが、複数の蓄電池を組み合わせたシステムを否定するものではないことに注意されたい。特性が異なる蓄電池を複数組み合わせたシステムでは、互いに苦手な部分を補うことができる点などにメリットがある。
- (10) 小久見善八ら監修「図解 革新型蓄電池のすべて」オーム社、2011年
- (11) 「高電圧・高安全性蓄電池を実現するフッ素系電解液」ダイキン工業、関西大学、(NEDO プレス発表資料) 2010年。ただし、ガソリンの熱量のうち実際の動力に利用できるエネルギー効率は一般に50%以下であることに注意(蓄電池から電力を取り出す際のエネルギー効率は90%以上)。
- (12) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、「EV 電池および電池材料(Ni, Co, Li)の市場動向 —Battery Materials 2019 参加報告—」、<http://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20190604/113521/>
- (13) Y. Kato, S. Hori, T. Saito, K. Suzuki, M. Hirayama, A. Mitsui, M. Yonemura, H. Iba, R. Kanno, High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy*, **1**, 16030 (2016)
- (14) N. Ohta, K. Takada, I. Sakaguchi, L. Zhang, R. Ma, K. Fukuda, M. Osada, T. Sasaki, LiNbO₃-coated LiCoO₂ as cathode material for all solid-state lithium secondary batteries, *Electrochem. Commun.*, **9**, 1486 (2007)
- (15) 数十 MPa (数百気圧)以上の加圧拘束を必要とする場合もある。
- (16) (独)製品評価技術基盤機構、「5年で2倍以上に！リチウムイオンバッテリー搭載製品の事故～モバイルバッテリーは購入時にPSEマークを確認しましょう～」、<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/press/2018fy/prs190124.html>
- (17) Y. Yamada, K. Usui, K. Sodeyama, S. Ko, Y. Tateyama, A. Yamada, Hydrate-melt electrolytes for high-energy-density aqueous batteries, *Nature Energy*, **1**, 16129 (2016)
- (18) J. Wang, Y. Yamada, K. Sodeyama, E. Watanabe, K. Takada, Y. Tateyama, A. Yamada, Fire-extinguishing organic electrolytes for safe batteries, *Nature Energy*, **3**, 22 (2018).
- (19) C. X. Zu, H. Li, Thermodynamic analysis on energy densities of batteries, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 2614 (2011).
- (20) 金属が樹状に析出する現象。電池内部で発生すると内部短絡などの問題を引き起こす。
- (21) 水素の酸化還元反応の電位を基準とし、反応物の活量が1のときの酸化還元電位。電池電圧の理論値を算出する際などに用いる。
- (22) (独)製品評価技術基盤機構、「急増！ノートパソコン、モバイルバッテリー、スマホの事故～リコール製品や誤った使い方に注意しましょう～」、<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/press/2017fy/prs170727.html>
- (23) たとえば、蓄電池のサイクル劣化試験では数100～数1000回の充放電試験を行う。充電と放電にそれぞれ1時間かけるとしても、数1000時間(数ヵ月)程度の時間が必要となる。期間短縮のために、高温状態での加速劣化試験なども行われるが、実際の劣化挙動と異なる場合があるなどの課題もある。
- (24) 茂木春樹, 高山務, 米田雅一, 電池開発現場での活用を目指した二次電池シミュレーション技術開発(1), みずほ情報総研技報, **8**, 15 (2016).
- (25) 茂木春樹, 仮屋夏樹, 高山務, 米田雅一, 電池開発現場での活用を目指した二次電池シミュレーション技術開発(2), みずほ情報総研技報, **10**, 22 (2019).

技術動向レポート

関連語辞書の自動生成技術の研究開発

—「寄り道検索」が導く新発想—

情報通信研究部

チーフコンサルタント 山泉 貴之

同義語・類義語よりも緩やかな関係を持つ単語の組の集合である関連語辞書の自動生成手法について検討した。関連語辞書によって「寄り道検索」、すなわちユーザが思いつく範囲を超えた情報へ到達するための検索モデルを実現できる。

1. はじめに

スマートフォンまたはパソコン等でのインターネットの利用が日常的となっている現在では⁽¹⁾、ユーザがスマートフォンまたはパソコン等の検索画面で単語を入力するといくつかの検索結果が表示され、その検索結果の中から知りたい情報にアクセスすることが日常的に行われている。また、それらの検索結果の中には指定した単語と同じまたは類似の意味を持つ単語が含まれることもある。

しかしながら、既存の情報検索システムにおいてはその検索結果が実際に検索を行ったユーザが知りたい情報と異なる場合には、

- ・ユーザ自らが別の単語を指定して検索をやり直す。
- ・情報検索システムが過去の検索履歴(誤入力やスペリングの間違い)をもとに検索語の候補を提示し、その中からユーザ自らが単語を選択して検索するよう促す。

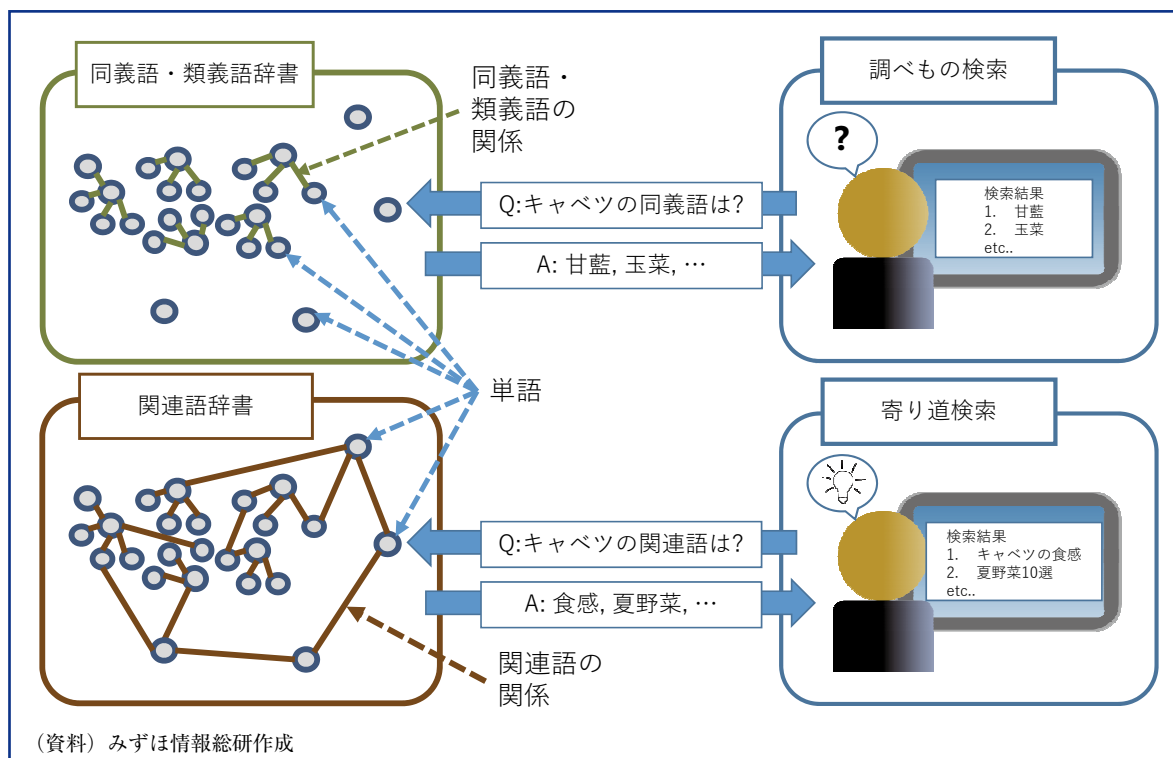
という手段によって再検索する必要があるため、過去の検索履歴から提示された検索語の候補の中に知りたい情報に関係する単語がない場合や、知りたい情報に関係する単語が思い浮かばない場合には、知りたい情報に到達することが難し

いことがある。

そこで、ユーザが真に知りたい情報に到達するまで自力で考えた単語を指定して検索を繰り返し実行する情報検索モデル(以下、「調べもの検索」と記す。)とは異なる新しい情報検索モデルとして、最初に指定した単語をもとにして情報検索エンジンが関連する単語をユーザに代わってその候補を広く提示してユーザに選択を促す等の方法でユーザを新しい情報に到達させる情報検索モデル(以下、「寄り道検索」と記す。)を考える。例えば、「調べもの検索」では最初に「キャベツ」で検索を行っても、「夏野菜についての一般的な情報」を得ることは(「夏野菜」という単語を思い浮かべない限り、)困難であるが、「寄り道検索」の場合は、「キャベツ」の関連語として「ズッキーニ」→「夏野菜」のように検索語の候補をユーザに代わって考えて提示することで、「夏野菜についての一般的な情報」を得ることができる。これは、ユーザが真に必要な情報が最初に思い付いた「キャベツ」ではなく、「夏野菜についての一般的な情報」であった場合にはユーザの真のニーズを満足させることができるものである(図表1)。

本稿では上記の寄り道検索の実現のために必要な技術として同義語及び類義語よりも緩やか

図表1 「調べもの検索」及び「寄り道検索」における同義語・類義語辞書並びに関連語辞書の利用イメージ



な関係を持つ単語の組の集合である関連語辞書に着目し、寄り道検索に利用できる関連語辞書を低コストで生成する手法について検討する。次に、関連語辞書を利用した寄り道検索の実現の可能性、及び寄り道検索によって開拓可能なマーケットについてもあわせて考察する。

2. 調べもの検索と同義語・類義語辞書

(1) 情報検索システム等における同義語・類義語辞書の役割

最初に、関連語辞書よりも厳しい条件の単語の組の集合から構成され则认为られる同義語・類義語辞書について考察する。

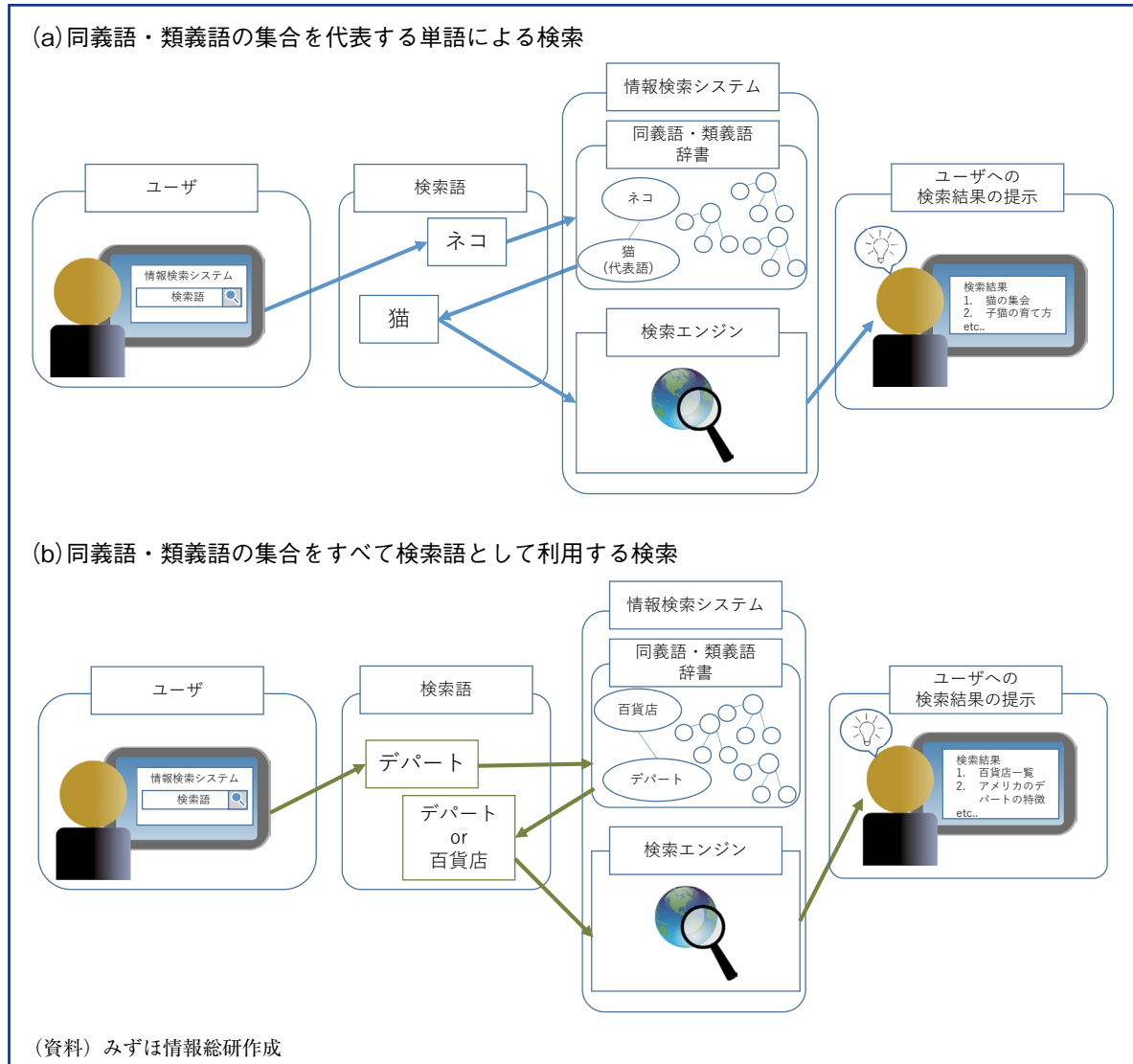
ユーザが情報検索システムなどを利用して必要な情報を得る場合、ユーザが真に求める情報へ誘導するための手段として、検索の結果とともに同義語および類義語⁽²⁾を提示する機能を持つ情報検索システムが日常的に利用されている。

同義語や類義語の提示は単語間の関係を定義するためのデータを検索システム等が保持することにより実現される。

情報検索システム内においては、同義語・類義語辞書は以下の用途に利用されていて、必要な情報への到達性の向上に寄与している(図表2)。

- ・ 検索語の送り仮名やかな漢字、外来語などの表記の揺れへの対応(例:「借り入れ」=「借入」、「猫」=「ネコ」、「ベネチア」=「ヴェネチア」)。特に同義語については同義語の集合に対してそれを代表する単語を定義することで、検索エンジン内部における語彙の正規化が可能となる(図表2 (a))。
- ・ 検索語として指定された語に対する検索結果の他に同義語・類義語の検索結果もまとめて取得して、ユーザに提示する(例:「百貨店」=「デパート」)(図表2 (b))。
- ・ 検索語に誤字・脱字が含まれると考えられる

図表2 情報検索システムにおける同義語・類義語辞書の利用イメージ



場合には、単語として正しいと考えられる検索語を推定またはユーザに提示して選択を促すことで、検索語に対応する情報を得る(例：「パンタ」→「パンダ」)。

同義語・類義語辞書を情報検索システムに組み込むことにより、ユーザにとって必要と思われる同義語・類義語を検索結果とともに提示できるため、最短の検索回数で目的の情報に到達することを可能とする検索、すなわち調べもの検索を行う情報検索システムを構築することが

できる。

また、同義語・類義語辞書は、情報検索システム以外のコンピュータシステムにおける日本語の自然言語処理においても、以下の用途等に利用されている。

- ・コンピュータ上における文書作成の基本となるかな漢字変換の際の変換候補(入力されたかなに対応する漢字かな混じりの語句等)の提示。
- ・上記のかな漢字変換の際の変換候補への類義

語の提示⁽³⁾。なお、提示される類義語は入力されたかなとは読みが異なっているもよい（例：「パンタ」→「パンダ」または「パンタグラフ」）。

(2)調べものの検索についての課題

調べものの検索モデルの情報検索システムは日常的に利用されている反面、情報検索システム全体としては以下の課題を内包している。

①検索語の再検討に伴うユーザ体験の低下

情報検索システムを利用するユーザの視点から見た場合、ユーザが最初に指定した検索語そのものが適切でなかった場合には、同義語・類義語辞書による検索語の再選択によって検索を繰り返しても目的の情報にたどり着くことが難しい。適切な検索語を用いた検索が実行されるまでの間、検索語そのものの再検討が繰り返しの必要になることで引き起こされるユーザ体験の低下への対処が課題となっている。

②同義語・類義語の判定に伴うコスト

情報検索システムを含むコンピュータシステムにおける上記の用途に使用可能な同義語・類義語辞書を構築するためには、2つの異なる単語を同義語・類義語とすべきか否かの判断が必要となる。しかし、その判断を客観的に行い、かつ完成度の高い辞書を作り上げるためには高度な国語学及び言語学の専門的な知識に基づく判断が必要であることが課題である。

(3)情報検索システムそのものの高度化についての研究の動向

同義語・類義語辞書を用いたコンピュータシステムにここまで概観したユーザ体験及び辞書の構築時についての潜在的な課題がある一方で、情報検索システムの高度化のための研究⁽⁴⁾

等を通して、データを組み合わせて新たな価値を創造することの重要性が指摘されている。もっとも単純かつ直観的なデータの組み合わせの方法として、2つの異なる単語を何らかの基準により結びつける方法が考えられるが、これは辞書を作成する作業に他ならないものである。

3. 寄り道検索と関連語辞書

(1)調べものの検索と同義語・類義語辞書の関係からの類推

調べものの検索の性能向上のためには同義語・類義語辞書が不可欠であるように、寄り道検索の実現のためにも、独自の「辞書、または類似のソフトウェアまたはシステム」の存在が不可欠であると考えられる。

そこで、単語または単語の組について「単語の意味が同一、または似通っているかどうかの判断」を必須としない関連語の組を生成し、その集合体をもって辞書を生成する手法、すなわち関連語辞書を生成する手法について検討する。

関連語辞書は収録の対象となる単語の組、関連語の抽出の対象となる文書群における単語の組の出現数がある閾値以上であるか否かによってのみ決定する。これにより、「単語の意味が同一、または似通っているかどうかの判断」が必須でなくなるため、その判断のために必要な人的コストを削減することができる。

本稿で検討する関連語辞書を構成する単語の組に類似した概念として、指定された語に対して次の単語の候補としてユーザに提示するための単語の組を集めた辞書があり、はてなキーワード連想語 API⁽⁵⁾や Google サジェスト⁽⁶⁾等がそれぞれ独自に辞書を構築している。これらの辞書は、検索語として得られた単語どうしのみを直接用いて「単語の意味が同一、または似通っているかどうかの判断」を行っていないため、関連語辞書に分類できる。しかし、これらの辞

図表3 同義語・類義語辞書及び関連語辞書と想定される用途の対応

辞書の種類	単語間の意味の同一性または類似性	情報源	構築のために必要なコスト	想定される用途
同義語・類義語辞書	必須	従来型の辞書等	国語学及び言語学の知識が必須	調べものの検索
関連語辞書	必須でない	ユーザが入力した検索語	入力された単語及び付随する情報(指定の順序等)	
	必須でない	一般的な文書等	文書内における出現数の閾値	寄り道検索

(資料) みずほ情報総研作成

書はユーザが検索を行った際に指定した検索語とともに検索語として指定した順序についての情報等を蓄積及び利用することで辞書を構成する単語の組を抽出しているため、ユーザがほぼ同時に思いついた単語どうしが単語の組として抽出されやすい。また、より一般的な文書等から単語の組を自動的に抽出する手法を採っていないことにも留意する必要がある。

ここまでの考察をもとに、同義語・類義語辞書及び関連語辞書と想定される用途の対応を図表3に示す。

(2) 寄り道検索の有効性と調べものの検索との関係

同義語・類義語辞書を用いた従来型の検索手法である調べものの検索はユーザの検索についてのニーズが顕在化しているときに有効である。一方、関連語辞書を用いた新しい検索手法である寄り道検索はユーザの潜在的なニーズを顕在化させるのに有効である。

つまり、ユーザのニーズが定まっていない段階で検索する上では、同義語・類義語辞書で範囲を狭めた検索のみで必要な情報を得るよりも、関連語辞書で範囲を広げて検索を行うことで、ユーザが「実はそれが知りたかった」情報に辿り着き易くする効果を得ることができる。

したがって、寄り道検索及び調べものの検索は互いに排他的なものではなく、ユーザにとってのニーズの顕在度に応じて2つの検索手法を補完的に使い分けることにより、ユーザにとってより最適な検索結果を得ることができると考えられる。

4. 関連語辞書の生成

(1) 関連語辞書を生成するための技術的な課題

次に、寄り道検索の実現に必要な関連語辞書の生成手法について検討する。

関連語辞書を生成するためには以下の技術的な課題が存在する。

① 関連語辞書に収録するための単語の組を集計するための効率の良いメモリの利用法及び処理方法の確立

関連語辞書は2個の単語の間の関係の強さを評価し、関連性が強いものを抽出することで生成できる。関係の強さを評価するためには、文、文書または文書群(以下、単に「文書等」と書く。)に現れる文字を単語に分解し、その中から任意の2つの単語の組及びその関係の強さを表す量の三つ組のデータを抽出して、その途中経過または結果を配列として保持する必要がある。

2つの単語の組み合わせの数は文書等に現れる単語の数の2乗に比例して増加することから、それらの組み合わせをすべて格納することとした場合、メモリの使用量も単語の数の2乗に比例して増加する。したがって、メモリの使用量を抑制しつつ、2つの単語の関係の強さを評価する手法を確立することを技術的な課題として挙げることができる。

②2つの単語の関係の強さを求めるための評価手法の選択

関連語辞書の生成にあたっては2つの単語の関係の強さ同士を比較する適切な手法を選択する必要がある。2つの単語の関係の強さ及びその比較のための手法としては以下の手法がすでに提案されている。

- ・共起分析：単語の組が同時に出現したかどうか、また出現した場合にはその出現状況(単語の組の出現回数や連続して出現したか否か等)をもとに単語の組についての関連度の強さなどの分析を行う手法である。
- ・Word2Vec⁽⁷⁾, Glove⁽⁸⁾, fastText⁽⁹⁾：ニューラルネットワークを利用して単語に対応するベクトル値を求め、そのベクトル値の近さで関係の強さを求める手法である。
- ・Poincare Embeddings (ポアンカレ空間への埋め込み)⁽¹⁰⁾：単語をユークリッド空間におけるベクトル値へ変換するかわりに、双曲空間(Hyperbolic Space)におけるベクトル値へ変換する(埋め込み)することでベクトルの次元数を削減する手法である。

関連語辞書を自動的に生成するにあたってはコンピュータのメモリ資源の効率的な利用の観点から2つの単語の関係の強さを表すパラメータをできるだけ少ない次元数で保持することと、関係の強さの計算及び比較についてもできるだけ単純な計算式で実行できることが望ましい。

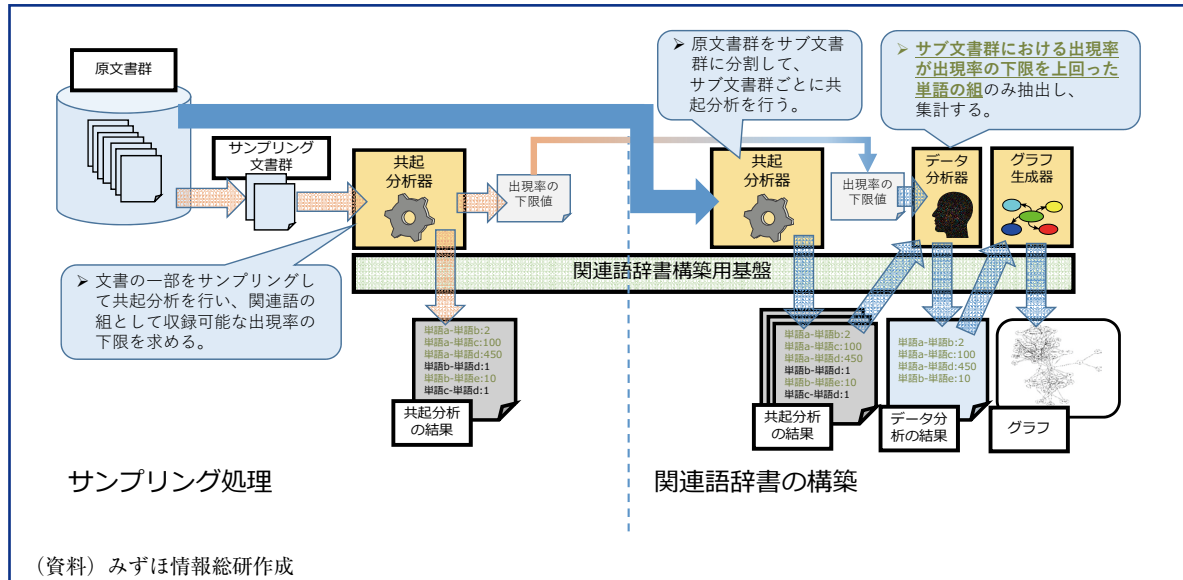
本稿では、上記の手法のうち2つの単語の関係の強さを表すパラメータ(=「単語の組の出現回数(または出現率)」)を最も少ない次元数で保持できる共起分析を用いて単語間の関係の強さを求める。2つの単語の関係の強さの比較は単語の組の出現回数(または出現率)を比較するだけで行うことができる。

(2)関連語辞書の自動生成手法とその生成例

関連語辞書生成のためのメモリの効率のよい利用法を探るため、弊社において以下の手順により関連語辞書を自動的に生成する手法を考案し、関連語辞書の生成を試みた。

- ①大量の文書群(以下、「原文書群」と記す。)から一部の文書群(以下、「サンプリング文書群」と記す。)をランダムに抽出し、共起分析器を用いて共起分析を行う。具体的には、1個の文書内で2つの単語の組(以下、「単語組」と記す。)が出現する文書数を集計し、文書数の分布を求める。
- ②文書数の分布、原文書群の文書数及びサンプリング文書群に属する文書数(以下、「サンプリング文書数」と記す。)から関連語辞書に収録可能な出現率の下限值⁽¹¹⁾を決定する。
- ③原文書群の文書群を複数の文書群(以下、「サブ文書群」と記す。)に分割する。なお、サブ文書群の個数は原文書群の文書数をサンプリング文書数で割った値をもとに決定する。
- ④手順③で作成したサブ文書群ごとに手順①と同様の方法で単語組のサブ文書群における出現率を求め、データ分析器を用いて手順②で決定した関連語辞書に収録可能な出現率の下限值以上の単語の組のみを抽出する。
- ⑤手順④でサブ文書群ごとに抽出した単語組の出現数を集計し、関連語辞書を得る。関連語辞書は無向グラフの形式で表現できるので、グラフ生成器を用いてその内容を確認できる。

図表4 関連語辞書の生成例



図表4は上記の手順①～⑤の手法を図解したものである。

5. 関連語辞書の生成結果例と応用例

4節で示した手法により関連語辞書を生成すると、辞書内における単語間の関係性は無向グラフや隣接行列⁽¹²⁾等で表現できる。日本語版 Wikipedia⁽¹³⁾を原文書群として用いて生成した関連語辞書内において、関連性が特に強いと判定できる単語間の関係について無向グラフを用いて描いたものを図表5に示す。

次に、原文書群自体を交換することで専門性を持った関連語辞書が作成できるかどうかについての初歩的な検討を行うために、日本語版 Wikipedia から「野菜」のカテゴリに属する文書を抽出して原文書群とし、4節で記述した手法で3,251個の単語及びそれらの単語間の関係から構成される関連語辞書を生成した。さらに、生成した関連語辞書を用いて、関連語と判定された単語をどのように辿ることができるかを確認するため、最初の検索語として「キャベツ」を指定した場合に辿ることのできる単語の例を

有向グラフで描いたものを図表6に示す。図表6より、「キャベツ」を起点に「ズッキーニ」→「夏野菜」→「ナス」→「作品」という経路や「食感」→「特産」→「文化」→「キャラクタ」という経路での関連語の検索ができることが確認できる。

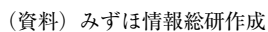
6. 今後の展望及び課題

本稿で検討した関連語辞書の生成手法によって生成した関連語辞書は、文書群の種類を変えることにより、元の文書群が持っていた書き癖や専門性等を反映させることが可能である。また、3節で検討した通り、従来から利用されている同義語・類義語辞書及び調べものの検索との併用も可能である。

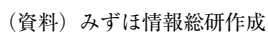
関連語辞書は書き癖や専門性等を反映させることができるという特徴を持つことから、以下のような用途例が考えられる。

- ・企業内のドキュメントをコーパスとして用いてその企業が持っている専門性を反映した関連語辞書を生成し、それを利用した関連語の提示機能を情報検索システムに付加すること

図表6 関連語辞書により辿ることのできる関連語の経路例



図表6 関連語辞書により辿ることのできる関連語の経路例



で、企業内の異なる部門間での意思疎通の円滑化を促進する。

- ・E-コマースのサービスを提供しているWebサイトでは、情報検索システムに関連辞書を用いた関連語の提示機能を追加し、ユーザを寄り道検索へ誘導することで、Webサイトへの滞在時間を増大させ、サイト内の商品にできるだけ多くアクセスさせることにより、ユーザ体験の向上が期待できる。

また、本稿における考察及び検討の結果より、今後は以下の課題についての検討が必要であろう。

- ・企業の内部に蓄積されている文書群を入力として関連語辞書を生成する場合、本稿において関連語辞書の生成に用いた日本語版Wikipediaと比較して、文書の長さのばらつきが大きいことが考えられる。4.(2)節で試みた手法では、メモリの使用量は文書内に現れる単語数の2乗に比例して増加するため、比較的少ない文書量でもメモリの必要量がコンピュータに搭載されているメモリ量を超えてしまい処理が難しくなることがある。そのため、メモリの使用量を抑制する手法の検討が必要である。
- ・本稿では大量の文書群を対象とした辞書の生成を想定し、文書群の中からサンプリングして抽出したサブ文書群における単語の組の出現率の分布のみを用いて閾値を設定し、それを用いて関連語辞書への収録の可否を決定している。本稿で検討した関連語辞書への収録条件及び生成された関連語辞書は簡易的なものであり、収録条件及び関連語辞書に収録されている単語の組の範囲の妥当性については詳細な検討が必要である。

注

- (1) 「令和元年版情報通信白書」によると、2018年のスマートフォンの世帯保有率は約8割(79.2%)であり、20代以下では(2015年時点における)インターネットの利用時間はテレビの視聴時間よりも多くなっている。
- (2) 同義語は意味がほぼ同じ言葉を指し、類義語は相互に変更可能で文脈によっては代替(言い換え)が可能である語で、類語ともいう。
- (3) 角川類語新辞典 for ATOK: <https://www.justsystems.com/jp/products/kadokawa/>
- (4) コンテキスト検索エンジン: <http://krectmt3.sd.tmu.ac.jp/cse.html>
- (5) はてなキーワード連想語API: <http://developer.hatena.ne.jp/ja/documents/keyword/apis/association>
- (6) Google サジェスト: <https://support.google.com/ime/japanese/answer/166768?hl=ja>
- (7) Word2Vec: Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen, Greg Corrado, and Jeffrey Dean, "Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality.", In Proceedings of NIPS, 2013.
- (8) Glove: J. Pennington, R. Socher and C. D. Manning, "Glove: Global vectors for word representation," In Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, pp. 1532–1543, 2014.
- (9) fastText: O. Levy and Y. Goldberg, 「Neural word embedding as implicit matrix factorization,」 In Advances in Neural Information Processing Systems, 27, pp. 2177–2185, 2014.
- (10) Poincare Embeddings (ポアンカレ空間への埋め込み): Maximilian Nickel and Douwe Kiela, "Poincaré Embeddings for Learning Hierarchical Representations," In Advances in neural information processing systems, pp. 6338–6347, 2017.
- (11) サンプリング文書群に属する文書の数とサブ文書群(後述)に属する文書の数が一致するとは限らないため、単語組の出現回数に代えて出現率を求めている。
- (12) グラフ理論において有限グラフを表すために使われる行列である。行列の要素は頂点の対を表し、その値が0でない場合にはその頂点の対の間が辺によって直接接続されていることを示す。
- (13) 日本語における大規模文書群で、かつフリーで利用可能なものが少ないため、本稿においては日本語版Wikipediaを利用して関連語辞書を生成し、それを用いた検索モデルについて検討した。

みずほ情報総研レポート

vol.18 2019年12月25日 発行

発行：みずほ情報総研株式会社 コンサルティング事業推進部
〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3
info@mizuho-ir.co.jp 電話：03-5281-5301
<http://www.mizuho-ir.co.jp/>

Copyright © 2019 Mizuho Information & Research Institute, Inc. All rights reserved.

無断転載を禁ず。本誌に掲載の記事・写真・図表などは、著作権法によって保護されており、
無断で転用・転載・複製することはできません。



みずほ情報総研レポート



みずほ情報総研株式会社