



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



# 三菱電機技報

7

2015

Vol.89 No.7

## 未来社会を創るスマート化技術



## 目次

### 特集「未来社会を創るスマート化技術」

未来社会をスマートにデザインする .....	1
鈴木 浩	
未来社会を支えるスマート化技術 .....	2
武田保孝	
電力・エネルギーのスマート化技術 .....	7
泉井良夫・橋本博幸・岩田雅史・奥田達也	
未来社会に向けた水処理技術 .....	11
安永 望・稲永康隆・生沼 学・谷村泰宏	
鉄道を中心に描く次世代モビリティシステム .....	15
浅岡 洋・吉本剛生	
スマート化技術が拓く未来のパーソナルモビリティ .....	19
河合克哉・伊川雅彦・緑川哲史・松原 勉・小中裕喜	
未来社会の安全・安心－社会インフラを中心に－ .....	23
佐野恵美子・関 真規人	
未来の生産システム .....	27
古澤康一・大谷治之	
スマート化技術で進化する未来のビル .....	31
三浦健次郎・鈴木直彦・澤 良次・神田準史郎・小林信博	
スマートホームの未来と技術 .....	35
三木智子・高砂英之・矢野裕信	
未来の小規模コミュニティ向けIT基盤 .....	39
西村達夫・塩井川幸保・芳賀悠一・中井敦子・松浦遼太	
スマート社会を支える先進最適化技術 .....	43
ジョセフ・カッツ・ダニエル・ニコフスキ・キラン・パーソンズ・マシュー・ブランド・ケンジ・イノマタ	
スマート社会に向けた通信技術の役割 .....	47
ダヴィッド・モティエ・ロイック・ブルネル・尾崎圭介	
スマートコミュニティ・シティの国際標準化 .....	51
中根和彦・上野幾朗・小倉博行・山本正純	

### Smarter Technologies for Future Society

Designing Future Society Smartly  
Hiroshi Suzuki

### Smarter Technologies for Future Society

Yasutaka Takeda

### Smart Technologies for Supply & Demand of Electric Power and Energy

Yoshio Izui, Hiroyuki Hashimoto, Masafumi Iwata, Tatsuya Okuda

### Water Treatment Technology for Future Society

Nozomu Yasunaga, Yasutaka Inanaga, Gaku Oinuma, Yasuhiro Tanimura

### Future of Mobility System with Central Focus on Railway

Hiroshi Asaoka, Kouki Yoshimoto

### Future Personal Mobility Led by Smart Technologies

Katsuya Kawai, Masahiko Ikawa, Tetsuhito Midorikawa, Tsutomu Matsubara, Hiroki Konaka

### Safety and Reliability in Future Society with Focus on Society's Infrastructure

Emiko Sano, Makito Seki

### Manufacturing Systems of Future

Koichi Furusawa, Haruyuki Otani

### Smart Technologies for Future Buildings

Kenjiro Miura, Naohiko Suzuki, Yoshitsugu Sawa, Junshiro Kanda, Nobuhiro Kobayashi

### Future of Smart Home and Technologies

Satoko Miki, Hideyuki Takasago, Hirokoshi Yano

### Concept of Future IT Platform for Small Community

Tatsuo Nishimura, Yukiyasu Shioigawa, Yuichi Haga, Atsuko Nakai, Ryota Matsuura

### Advanced Optimization Technology for Smart Society

Joseph Katz, Daniel Nikovski, Kieran Parsons, Matthew Brand, Kenji Inomata

### The Key Role of Communication Technologies for Smart Society

David Mottier, Loïc Brunel, Keisuke Ozaki

### International Standardization for Smart Communities/Cities

Kazuhiko Nakane, Ikuro Ueno, Hiroyuki Ogura, Masazumi Yamamoto

## 特許と新案

### 「プラント運転評価装置」

### 「空気調和機の制御装置、冷凍装置の制御装置」 .....

### 「エネルギー電子取引システム及び

### エネルギー電子取引方法」 .....

## 表紙：未来社会を創るスマート化技術

2050年には、世界の人口が2010年の約70億人から約90億人へ増加し、エネルギー、水、食料などの資源の不足が予想されている。また、都市への集住が進み全人口の約66%が都市に住むと予想されている。

本号では、未来は環境性、利便性、快適性、効率性、経済性、安全性、頑強性を満たした上で人類が幸福かつ持続的に成長できる社会と想定し、この未来社会を実現・創造するための技術をスマート化技術と定義する。

①は未来のメガシティのパーソナルモビリティのイメージ図である。ここでは集中しすぎた人口に起因する生活空間の逼迫(ひっばく)や交通渋滞・事故での社会的損失を低減するため、都市の上空や地下の空間が効率的に利用される。

②は未来のターミナル駅のイメージ図である。ここでは都市間をつなぐ大容量輸送モビリティである“ライナー”と都市内交通向けの“通勤ター”の連携とバリアフリーな駅によって、安全で利便性の高い移動が実現される。



①



②

巻/頭/言

# 未来社会をスマートにデザインする

Designing Future Society Smartly



鈴木 浩  
Hiroshi Suzuki

我々が迎える未来社会とはどのようなものになるのか。科学技術の進歩によって、豊かで、便利な社会が実現することは疑いの余地がない。その一方で、科学技術の進歩によって多くの課題が生まれることはこれまでの歴史を見れば一目瞭然である。

人類は、これまで多くの課題を解決しながら生きてきた。これまで出現してきた課題は、はじめは簡単なものであった。問題が明らかで、単純で、その解決策も割と容易に見いだすことができた。近年は、問題が複雑となり、絡み合って、解決策を探るのが難しくなっている。将来には、より複雑でわけの分からない状況が生まれよう。このような状態を、ウィキッドな状態という。すなわち、問題自身がうまく定義できなくなってくる。そのために解決策が見つからない。では、こうした未来における課題の解決策は何か。

筆者は、こうしたウィキッドな課題を解決する方策として、従来のエンジニアリングの枠を超えた、メタエンジニアリングを提唱している。すなわち、第一に、見えている課題のうらにある根本的課題を見いだすことが肝要である。そのためには、なぜそれが課題であるのかを問い直すことが求められる。この課題に対し、一度制約を外して解決策を探る。解決策には、自然科学や技術のみならず、人文科学、芸術や感性などを取り入れる必要がある。こうした幅広い解決策を融合・統合し、見いだした課題に実装し、社会価値を上げてゆく。このプロセスをメタエンジニアリングと称している。

こうしたプロセスに従って、未来社会を考えると、社会の基本となるシステムとはどのようなものかをもう一度問うてみる必要がある。システムは、分かりやすく言うと、ハードウェアとソフトウェアで構成される。例えば、電気エネルギーインフラを考えると、原子力をはじめとする大規模発電がハードパスといえる。一方再生可能エネルギーは、ソフトパスの代表であろう。これらをうまく組み合わせることがシステムを最適化することになる。また、電源の最適化のために、デマンドレスポンスが取り入れられようとしている。これも、機器を用いた制御による需要調整(ハードウェア)と、電力料金の可変化による方式(ソフトウェア)の組み合わせが重要である。

こうしたシステムの最適化では、ハードウェアとソフト

ウェアの比率が半分ずつのときにシステムの生み出す利益が最大になるといわれている。しかし、これからのウィキッドな問題に対応してゆくためには、システムにスマートな特性を持たせなければいけない。ここで、スマートさを、ハードウェアとソフトウェアの積で定義してみよう。すると、その最適条件は、ソフトウェアがハードウェアの3倍のときであることがこれまでの研究でわかっている。すなわち、スマートを得るためには、ソフトウェアの比重を今まで以上に増やしてやらなければならない。未来社会ではハードウェアに勝るソフトウェアの構築が必要となろう。

近年、ネットワークの構築でも、ソフトウェア定義ネットワーク(SDN)なるものが主流になりつつある。これも、ハードウェアよりもソフトウェアに重心を置いたネットワークの方向性を示している。

スマートにデザインされた未来社会を評価するための指標はなんだろうか。それは住んでいる人々のスマイル(smile)の量ではないか。このsmileという語を2つに分解してみる。sm-と-ileである。sm-はsmartである。-ileで終わる語には次の8つが存在する。

Smart agile	：生産構造が機敏である
Smart flexile	：消費構造がフレキシブルである
Smart domicile	：居住がしやすい
Smart fertile	：食が充実している
Smart automobile	：移動、物流が便利である
Smart senile	：医療環境が良い
Smart juvenile	：教育環境が良い
Smart mobile	：サービスが充実している

この8つの軸が満たされているときに住んでいる人々のスマイルが増加し、スマートな社会が実現しているとみることができる。

未来社会では、住んでいる人がスマイルで満たされるようなスマートなものでなければいけない。その実現の道の中で、日本再生の礎となるイノベーション創生が新たに生まれてこよう。例えば、人と人とのつながりであったインターネットも、今や、IoT(もののインターネット)と、ものもつながる時代になってきている。よりスマートな未来社会の実現をイノベーションによって創出してゆこう。



武田保孝\*

# 未来社会を支えるスマート化技術

Smarter Technologies for Future Society

Yasutaka Takeda

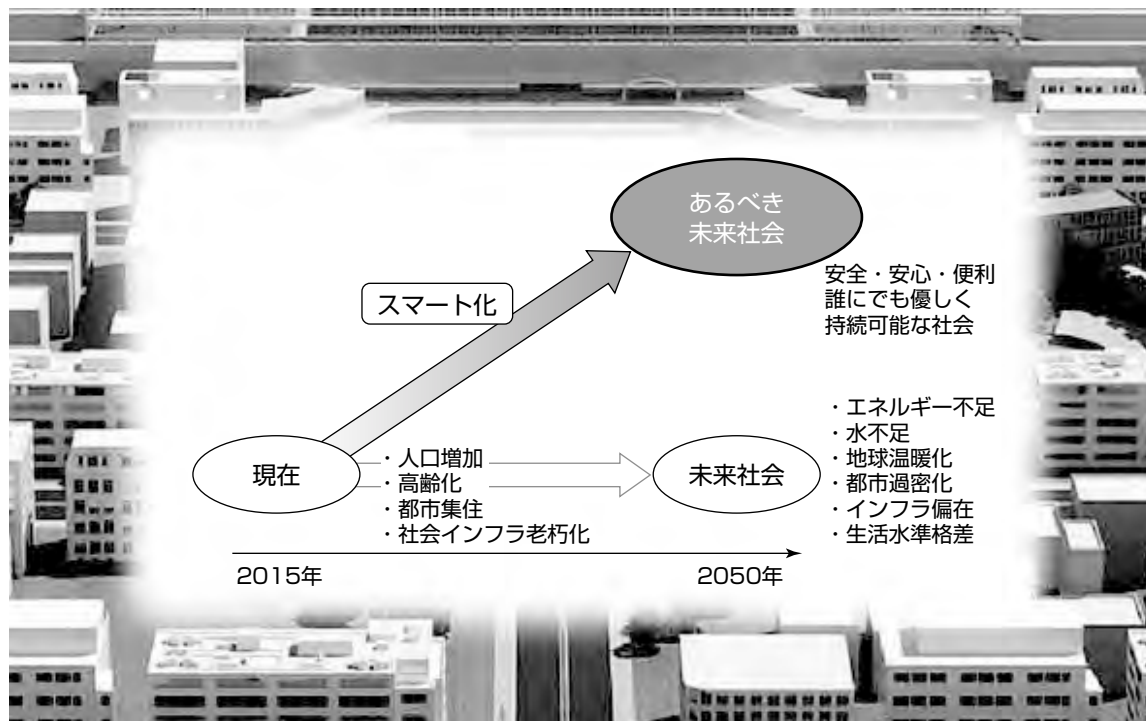
## 要 旨

社会のあるべき姿として、安全・安心な社会、利便性を高めつつ環境負荷が少なく持続可能な社会を目指して多くの取組みが行われている。2050年には世界の人口は約90億人へと増加する一方、労働人口比率は減少し、都市への集住が進むと予想されている。未来社会で、世界全体にあまねくあるべき姿を実現するためには、より高い生活水準をより少ない資源とより低いコストで達成することが必要となる。

このために、効率よく様々な資源を使うことや、現状で人間の知識や経験任せになっている様々なシステムの運用や制御等の活動をより確実にたゆまず行える仕組みに変えていくことが必要と考える。

これらを達成するために、情報通信技術を基盤として、従来局所的に行われていた最適化の範囲を拡大し、様々なものが自ら又は他のものと連携してより良い方向に向かっていくスマート化の仕組みを構築することが効率を向上させ、なおかつ利便性を提供する第一歩となる。

現在、三菱電機は、エネルギーや水といった資源の分野、交通システムや生産システムといった社会活動の手段、地域やビル、住宅といった社会活動の場についてスマート化に向けた取組みを行っている。また、これを効率よく実現するためのプラットフォームについても準備し、これらを通じてよりよい未来社会の実現に貢献していく。



## スマート化技術による未来社会の実現

現在、人口増加や高齢化、都市への集住が進んでおり、延長上の未来にはエネルギーや水資源の不足、エネルギー消費増大による地球の温暖化、都市の過密化による利便性や快適性の低下、社会インフラ老朽化による維持コストの増大や偏在化、これらによる生活水準の格差といった課題が考えられる。当社はスマート化技術を開発し、より効率良く社会インフラを運用することで安全・安心・便利で持続可能なあるべき未来社会の実現に貢献していく。



## 1. ま え が き

社会のあるべき姿として、安全・安心な社会、利便性を高めつつ環境負荷が少なく持続可能な社会を目指して多くの取組みが行われている。

あるべき姿を実現するためには、より高い生活水準をより少ない資源とより低いコストで達成することが必要となる。効率良く物やエネルギー、時間といった様々な資源を使うこと、現状、人間の知識や経験任せになっているシステムの運用や制御といった社会を維持するための活動をより効率的で確実にたゆまず実施する仕組みに変えていくことが必要となる。

これらを提供するために、情報通信技術を基盤とし、従来局所的に行われてきた最適化の範囲を広げること、さらには様々なものが自ら、又は他と連携して自律的に最適化を行う仕組みを構築することが効率を向上させ、よりよい未来社会を実現する基礎になると考える。

## 2. 未 来 社 会

2050年に向けて世界の人口は2010年の約70億人から約90億人へと増加し、それとともに高齢化が進展して世界全体では65歳以上の人口比率が8%から16%へと倍増して高齢社会となり、労働人口比率は減少すると予想されている<sup>(1)</sup>。また、都市への集住が進み、全人口の約66%が都市に住むとされている。

多くの人が水、エネルギー、通信、医療等の社会インフラの恩恵を受けると予想される一方、富める地域と貧しい地域があることは、依然として大きく解消されることはないと考えられる。現在からの延長では、全ての国が先進国並みに資源やエネルギーを消費することは難しいと考えられており、あるべき社会を全世界に実現することを目標にするのであれば、現在の生活水準をより少ない資源、エネルギーで提供することがその第一歩となる。

例えば社会の基本的なインフラであるエネルギーについて見てみると、2012年時点では、先進国を中心とするOECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) 加盟国の約12億人(世界人口の17%)が世界全体のエネルギーの約44%を消費している(図1)<sup>(2)</sup>。仮に、現状の下で発展途上国が先進国並みの生活水準を得ようとする場合、世界全体では4倍以上のエネルギーが消費される。2050年には90億人程度に人口が増加するとされているため、現状の5.5倍のエネルギー消費になる。このため、エネルギー分野で、あるべき社会を実現し、社会全体でその恩恵を得るためには、更なる効率化を図り、より賢くエネルギーを使う必要がある。

また、水資源については、河川や湖沼等の地表にあって人間が利用しやすい淡水は14万km<sup>3</sup>あるとされ、世界全体

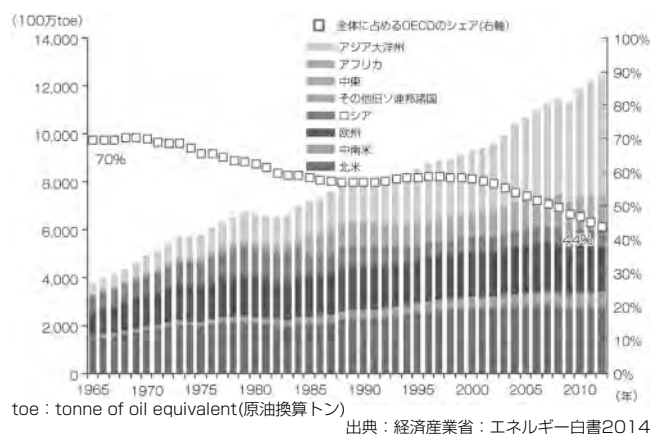


図1. 世界の地域別エネルギー消費の推移

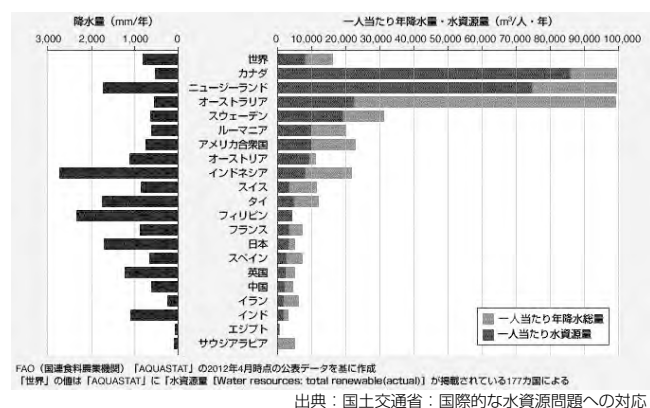


図2. 世界各国の一人当たり年降水量と水資源量

を見ると、全ての人に行きわたるのに十分なだけの水量が存在しているが、国・地域によって水資源の分配に大きな差がある。一人当たりの水資源量は、国・地域によって1,000倍以上の差異(図2)があり、世界の1/5の人は継続的に安全な水を手に入れている。

2050年に向け、水需要は、現在より55%増加すると予想され、世界人口の40%が水ストレスのある地域に住むことになる可能性がある<sup>(3)</sup>。水資源の問題に対して統合水資源管理(IWRM)として、水資源のより効率的な使用のため、上下水道、農業用水、工業用水、環境のための水など様々な用途を統合的に考慮し、政府、民間、住民等あらゆるレベルで水資源管理を行うことが提唱されている。

このような事情はエネルギーや水といった基本的な資源のみならず、これらを使用して建設・維持される鉄道や道路などの交通ネットワーク、住居やビル等の設備、教育・医療・防災などのサービスなどでも同様であり、世界全体にあるべき姿を実現するためには資源利用を始めとする社会活動の効率化と低コスト化が必要となる。

## 3. 社会と技術の変遷

人間の歴史では、農耕によって計画的な食糧生産が可能となり、生産性の向上による人口の増加と更なる生産力の向上、定住による集団、組織の大規模化と知識の集積によっ

て生活水準の向上がなされてきた。工業化の進展によって付加価値生産が空間的に集約されて都市化が進展するとともに、都市や工業生産手段には社会的な資本が蓄積され、生産活動の効率向上によって更に生活が改善されることとなった。

現在、情報化が進展しており、様々な物理現象や人間の活動状況が可視化、可測化されることによって、問題点や課題の発見、それに対する解決策として効率化や改善が可能となってきている。このような社会では、従来、モノに則していた活動の多くが情報によって置き換えられると考える。

例えば製造分野では製造プロセスが情報化することによって、熟練技術者がいなくても一定水準のものづくりが可能となり、開発の迅速化や品質確保に寄与する(表1)<sup>(4)</sup>。

また、3Dプリンターのように設計情報から比較的簡便に形を生成する機器が登場したことで、従来大規模な生産設備によって生産され、物流システムで消費者に届けられていた製品や交換部品、消耗品が設計情報に置き換わり、必要とされる所の近傍で生産されるようになる可能性がある。このように生産拠点が集中から分散に変化することによって物流コストが削減される。

また、あらゆる機器がネットワークに接続されることによって、従来、機器に組み込まれて作用していた計測や制御、情報の提示等の機能は機器を離れ、情報としてネットワークを介して収集、供給されるようになる。従来機器内にとどまっていた計測や制御といった情報や、生産設備に

蓄積されていた設計や生産に関わるデータ、機器の動作そのものに関するデータを広く収集、蓄積することが可能となり、この大量のデータ(ビッグデータ)を資源として分析・活用することによって更なる利便性の向上や効率の向上が可能となる(図3)<sup>(5)</sup>。

このような基盤の上に資源やエネルギーの効率的な利用と低コスト化がなされるとともに、従来人間が介在して連携していた分野同士が人を介在せず相互に連携し、更に効率的で強固な社会システムが構築されることによって、よりスマートな未来社会が実現される。

#### 4. スマート化技術

幾つかの分野についてスマート化の事例を示す。全世界の全ての人にあるべき社会を提供するには社会全体で長期の取組みが必要であるが、それを実現する一歩として取組みが始められているものである。

資源を提供する側としてエネルギーと水を、これを消費して高い生活レベルを提供する分野として交通システムと生産システム、地域・ビル・住宅をあげる。また、未来社会を支える基盤的な技術として社会インフラの維持管理とICT(Information and Communication Technology)の基盤技術、標準化に関する活動状況をあげる。

##### 4.1 エネルギー

国内で、動力や熱源として利用されるエネルギーは2012年時点で43%が電力の形で利用されている(図4)<sup>(6)</sup>。全世界では2050年に向けて主に新興国を中心とする利用拡大が見込まれる一方、2011年時点の一次エネルギーとしては石炭、石油、天然ガス等の化石燃料が82%を占めており、CO<sub>2</sub>排出の抑制も急務とされている(図5)<sup>(2)</sup>。これを達成するために、コンバインドサイクル等による発電の効率化、風力、太陽光等の再生可能エネルギーの利用拡大、送配電の効率化が進められている。

##### 4.2 水

水資源は世界全体で偏在しており、2001年に国連でミレニアム開発として“2015年までに安全な飲料水を継続して利用できない人口の割合を半減する”との目標が立てられ、ほぼ達成したとされているが、2010年でも基礎的衛生施設(トイレ)を継続的に利用できない人口の割合は37%程度であるとされ、2050年に向けては更なる需要が見込まれる(図6)。効率的な利用と安全な水の普及のため、従来一般的であった一過型の水処理システムに代えて、再利用を可能とする水処理技術が必要とされている。

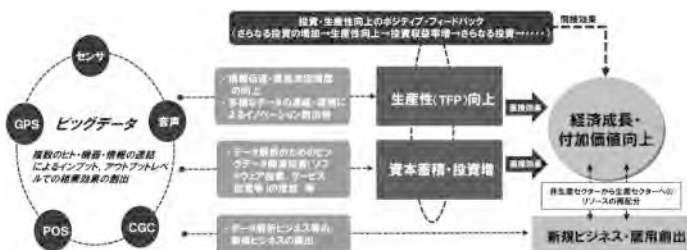
##### 4.3 交通システム

人口の増大と都市への集住が進むことによって、都市と地方の交通事情の差が拡大すると予想され、公共交通システムは大きく都市間と都市内に分けて進展すると考えられる。都市間交通では大量輸送向けに環境負荷が少ないとされる鉄

表1. 製造プロセスのデジタル化

アナログ時代の製造プロセス	デジタル化した製造プロセス	デジタル化のメリット
設計担当者の手作業による製図	CAD (Computer Aided Design) 高度な製図知識が不要に	2次元の設計、製図をコンピュータで支援し、作業効率化に貢献
試作と設計変更の繰り返し	3次元CAD CAE (Computer Aided Engineering)	3次元(立体映像)で動的な画像表示により視認性が向上 CADと連携し構造解析、流体解析等のシミュレーションをコンピュータ上で実施。開発コスト低減や開発短縮に貢献
粘土・木型等による試作	試作コスト低減・期間短縮 3次元プリンタ	3次元CADと連携し、樹脂や金属製の立件試作品を造形。試作コスト低減や開発短縮に貢献
加工担当者の経験・ノウハウ	CAM (Computer Aided Manufacture) 熟練技術者が不要に	CADと連携してNC装置・マシニングセンタへの指示プログラムを作成。高精度な加工を実現
汎用工作機械(旋盤・フライス盤、ボール盤)を手動で操作	NC装置 マシニングセンタ	コンピュータによる数値制御で自動運転。加工の失敗や精度のばらつきが少ない 多種類の加工を連続して行うことが可能。それぞれの加工に必要な工器具を自動で交換するなど、生産性が高い

出典：経済産業省：ものづくり白書



出典：総務省：情報通信白書

図3. ビッグデータ分析

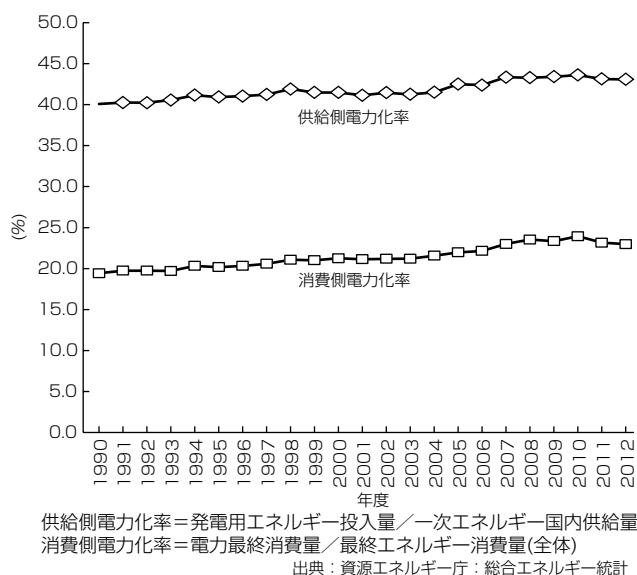


図4. 国内の一次エネルギーに占める電力の割合

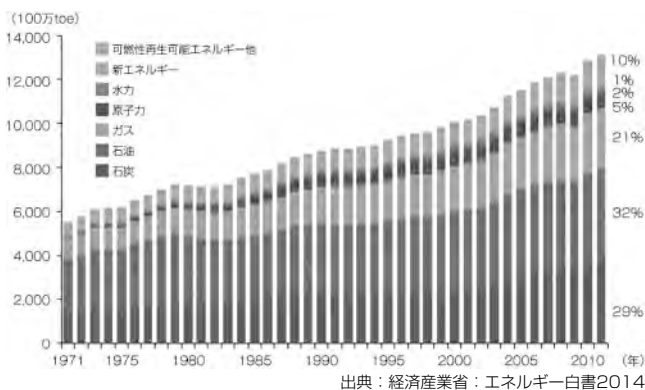


図5. 世界の一次エネルギー別消費推移

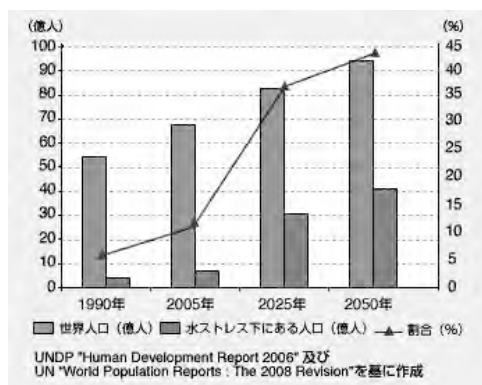


図6. 世界の水需要の逼迫(ひっばく)

道が主になる。都市内交通では、都市内の移動を面的に提供するとともに、軽便な輸送を低コストで実現する必要がある。

主な都市間交通手段としての鉄道は、自動車等の移動手段に比べて輸送単位あたりの消費エネルギーが少なく、輸送容量も確保できる利点がある。公共交通システム全体として考えた場合、都市内交通との連携による利便性の向上が課題である。

将来の都市への集住によって、地方では輸送人員が減少することによって公共交通が縮小し、自動車やLRT

(Light Rail Transit)のように軽便な交通機関やパーソナルモビリティが普及する。一方、世界に先だって高齢化の進む日本国内では、交通事故死傷者の約50%が65歳以上の高齢者であり、人口10万人当たりの死傷者数も他の年齢層の2.5倍以上と際立って高い<sup>(7)</sup>。モータリゼーションの進む地方での高齢化率は都市圏よりも高いことから、人的要素によらずに安全を実現する技術が望まれる。

#### 4.4 生産システム

生産システムでは、従来、比較的大規模な生産設備を用いて集中的に大量生産することによって低コストで均質な製品が供給されてきたが、より快適、便利な生活に向けて人々の求める製品が多様化するようになってきた。また、市場のグローバル化によって地域ごとに異なる要求にも応えることが求められている。

設計データの情報化と3Dプリンター等によって、小規模生産のコストが低減され、分散化された小規模生産設備による少量生産が可能となってきた。これによって、人々の嗜好(しこう)に沿ったカスタマイズや地域に応じたカスタマイズが可能になるとともに、物流コストやエネルギーの低減が可能となる。

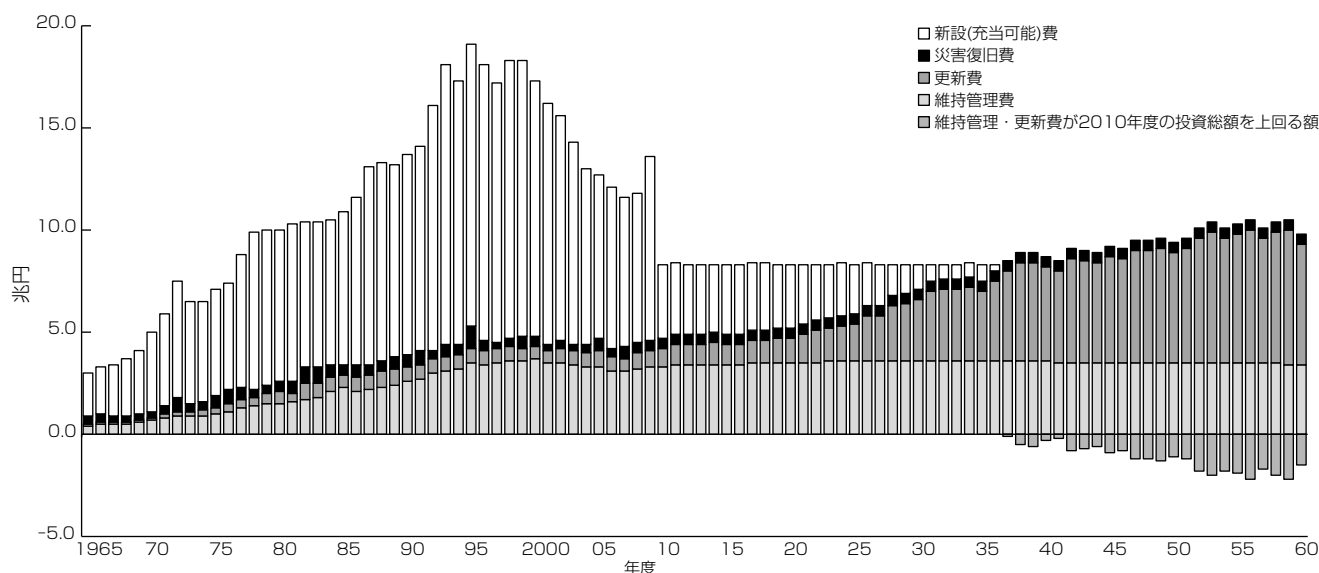
#### 4.5 地域・ビル・住宅

地域、ビル、住宅などの民生分野は日常多くの時間を費やす社会生活の主な場であり、より少ないエネルギーでより多くの利便性の提供が求められる。2013年度の日本国内の例では、民生分野におけるエネルギー消費は約1/3を占め、その約半分が電力とされている<sup>(6)</sup>。地域、ビルではエネルギーをより効率的に利用する技術を開発している。集住が進む都市で、複雑な構造をとる地域内・ビル内での移動の支援やセキュリティの提供は利便性を向上させるために必要な機能であり、人の位置情報を利用したスマートなサービスの実現が必要と考える。

また、予想される高齢社会で、住宅での利便性や安全性は生活レベルの向上を実現するための大きな要素であるとともに、住宅は人に対してセンシングや情報提供を行い、健康的で快適な生活を提供するもっとも身近な場でもあり、これを実現するネットワークやプラットフォームも基盤として準備が必要となる。

#### 4.6 社会インフラの維持管理

電力や水、交通といったインフラは、社会資本として経済活動に大きな影響を及ぼす。一方、建設後の時間経過によって老朽化が進行することは避けられず、既にインフラの普及が進んでいるOECD諸国では、今後、維持管理・更新費用の増大が見込まれる。日本の例では、維持管理・更新費用が増大することによって2011年度から2060年度までの50年間に必要な更新の1/6が実施できないと試算されている(図7)<sup>(8)</sup>。これを受け、老朽化したインフラを効率的に更新することを目的に、老朽化の程度や保守のための



(注) 推計方法について  
 国土交通省所管の8分野(道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸)の直轄・補助・地単事業を対象に、2011年度以降につき次のような設定を行い推計。  
 ・更新費は、耐用年数を経過した後、同一機能で更新すると仮定し、当初新設費を基準に更新費の実態を踏まえて設定。耐用年数は、税法上の耐用年数を示す財務省令を基に、それぞれの施設の更新の実態を踏まえて設定。  
 ・維持管理費は、社会資本のストック額との相関に基づき推計(なお、更新費・維持管理費は、近年のコスト縮減の取組み実績を反映)。  
 ・災害復旧費は、過去の年平均値を設定。  
 ・新設(充当可能)費は、投資総額から維持管理費、更新費、災害復旧費を差し引いた額であり、新設需要を示したものではない。  
 ・用地費・補償費を含まない。各高速道路会社等の独法等を含まない。なお、今後の予算の推移、技術的知見の蓄積等の要因により推計結果は変動しうる。

出典：国土交通省：国土交通白書

図7. 従来の維持管理・更新をした場合の費用推計

コストを把握し、適切な計画に基づき計画的に補修・更新することが求められている。

#### 4.7 ICTの基盤技術と標準化

あるべき社会を実現するために、スマート化の技術を開発するとともに、信頼性の高いシステムを迅速に社会に届けることを可能とする、システム構築のためのプラットフォームが必要となる。エネルギー管理やデータ分析などの機能を部品とし、省エネルギーや利便性をサービスとして提供する、小規模コミュニティ向けのプラットフォームが提供され始めている。

また、未来社会で様々な機器やシステムを連携させて安全・安心や快適性を実現するためには、相互に情報交換を行い、全体として1つのシステムとして振る舞うための全体アーキテクチャや連携のためのルールが必要となる。このための取組みとしてスマートコミュニティ、スマートシティにおける国際標準化活動が進められている。

### 5. む す び

安全、安心で高い利便性と少ない環境負荷による持続可能な社会を実現することを目的に、最小限の資源消費で気のきいた機能の実現をめざし、様々な機器をよりスマートにする技術を提供していく。情報通信技術を基盤として、従来局所的に行われてきた最適化の範囲を広げ、様々なものをより効率よく制御していくこと、さらには様々なものが自ら、又は他と連携してより良い方向に向かっていくスマート化の技術を開発していくことで、持続可能で快適な未来社会を実現する基礎になると考える。

### 参 考 文 献

- (1) 総務省統計局：世界の統計 2015  
<http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm>
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書2014, 第2部 エネルギー動向 第2章 国際エネルギー動向  
[http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf\\_2\\_2.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf_2_2.pdf)
- (3) 国土交通省 水管理・国土保全局 水資源部：国際的な水資源問題への対応  
[http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/j\\_international/](http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/j_international/)
- (4) 経済産業省：2014年版 ものづくり白書  
<http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2014/>
- (5) 総務省：平成25年版 情報通信白書  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/pdf/>
- (6) 経済産業省：平成24年度におけるエネルギー需給実績  
[http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/stte\\_014.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_014.pdf)
- (7) 警察庁交通局交通企画課：交通事故統計（平成27年度1月末）  
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001129564>
- (8) 国土交通省：平成23年度 国土交通白書  
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/>



# 電力・エネルギーのスマート化技術

泉井良夫\* 奥田達也\*\*\*  
橋本博幸\*\*  
岩田雅史\*\*

Smart Technologies for Supply & Demand of Electric Power and Energy

Yoshio Izui, Hiroyuki Hashimoto, Masafumi Iwata, Tatsuya Okuda

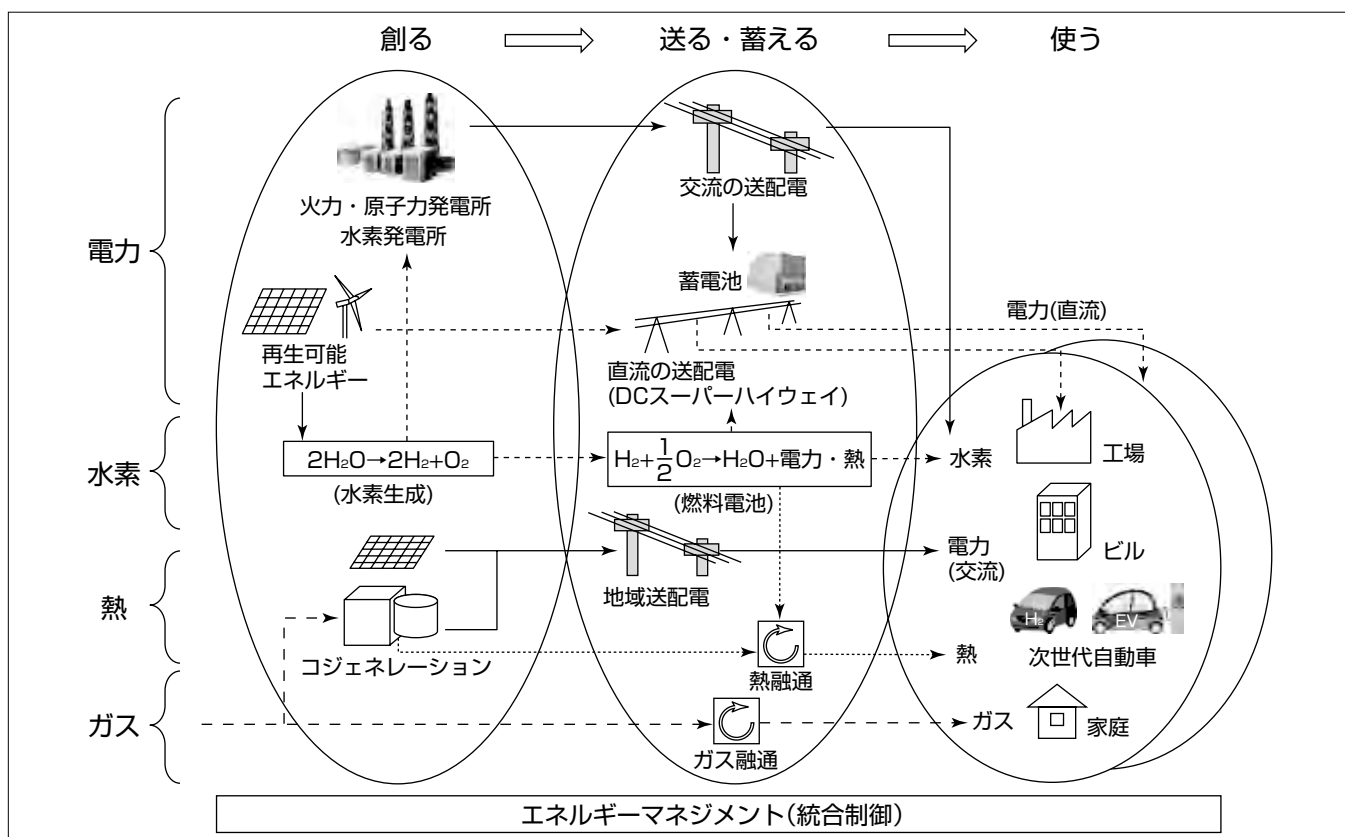
## 要 旨

我が国における電力・エネルギー資源は、そのほとんどを輸入に頼っており、かつ、地球温暖化効果ガスの大半を排出している。このため、我が国のエネルギーの骨格を定めるエネルギー基本計画<sup>(1)</sup>でも、3E+S(Energy Security, Economic Efficiency, Environment+Safety)、すなわち、エネルギーの安定供給、経済性、地球温暖化問題への対応、及び、安全・安心がキーワードとなっており、その方向性は将来も堅持されると思われる。

そこで、今後、30年程度のオーダーで将来を想定すると、まず、国産エネルギーである再生可能エネルギーの導入拡大は疑いない。また、燃料電池車など需要家側でも水素活用が進む。電力と水素は、電気分解や燃料電池等によって

相互変換が可能なため、蓄電池と同様に水素による蓄エネルギー、また、移動する分散型電源としての燃料電池車の活用が進展する。さらに、電力やガス市場が完全に自由化され、電力・エネルギーを、創る、送る・蓄える、使うの各段階をトータルに統合してスマートに制御するエネルギーマネジメントが導入されていると想定される。

このため、三菱電機は、30年程度先までを見込み、電力・エネルギーのスマート化技術の検討を行った。これらは、まだ、DC(直流)スーパーハイウェイなど概念検討の部分もあるが、今後の研究開発によって、我が国における3E+S、及び地球規模での低炭素化社会の実現に貢献していく所存である。



## スマートグリッド3.0(2050年)の電力・エネルギーのバリューチェーンとエネルギーマネジメント

再生可能エネルギーの導入量はますます拡大し、水素の利活用も進展する。同時に、電力やガスの市場自由化が実現されており、電力や水素、熱、ガスの垣根が低減する。このため、電力ではDCスーパーハイウェイなどの直流網が導入され、水素による再生可能エネルギーの出力余剰補償も導入される。創る、送る・蓄える、使うの全てのエネルギーにわたって統合的に制御するエネルギーマネジメントも導入される。

## 1. ま え が き

未来社会では、日本を含め人口減少に直面する国もあるが、総じて世界人口は増加を続けて2030年に83億人を突破し、2050年頃に90億人のピークを迎える。大都市圏への一層の人口集中によってメガシティが誕生し、人々は高密度空間の中で生活する社会が予想される。メガシティより小さい地方都市は、人口減少が進む中で効率的な行政サービスを提供するためコンパクトシティ化が避けられない。このような社会が想定される2050年のインフラのインフラとも言える電力・エネルギーシステムを対象に、30年先の姿にいたる発展経緯を見込み、電力・エネルギー関連機器・システムの利活用を中心にスマート化技術の検討を行った。

## 2. 未来の電力・エネルギーシステム

### 2.1 未来の電力・エネルギーシステムの姿

未来社会で人と都市の生活を支える食料、水、エネルギーの需要は現在に比べて増大する。特に電力需要の伸びは大きく、全ての地域で産業・業務・サービス部門の電化が進むことから、2040年に世界の電力需要は2012年比で約80%増加すると言われている<sup>(2)</sup>。一方、2050年に我が国で約2.1℃の気温上昇が予想される地球温暖化問題<sup>(3)</sup>を背景に、地球規模での低炭素化社会の実現を目指して各国がCO<sub>2</sub>排出量削減に向けた取組みをあらゆる分野で進めることが要求され、環境制約がより強い社会となる。このような状況から、電力・エネルギー分野では、化石燃料を使用する火力発電所の割合は使用量(kWh)ベースで増加するものの、再生可能エネルギーは1/3以上を占めるまでに飛躍的に成長すると予想される。

このような背景のもと、未来社会の基幹インフラとなる電力・エネルギーシステムを次のように想定する。エネルギー供給安定性及び地球温暖化問題への対応の観点から、国産エネルギーとしての再生可能エネルギーの導入拡大が進み、燃料電池車の普及を背景に2020～2030年頃には家庭用燃料電池から水素活用が日常的になっていく。また、都市・地域単位の集約需要に対してはコジェネレーションによる電熱併給の高度活用が進む。さらに、系統用大型蓄電池の普及に加えて、2050年には、水素生成による蓄エネルギーと大規模水素発電所による発電を利用したエネルギーキャリア変換が有機的に連動し創・蓄エネルギーの自由度が向上する。電力系統は、長距離大容量送電に適した直流(DC)送電を基幹系統に採用して再生可能エネルギーを直流のまま接続し、多数の蓄電池や水素生成装置等によって再生可能エネルギーの出力変動抑制をDC側で実施した上で電力品質を維持してメガシティを中心に効率的に供給する。

### 2.2 現在から未来の姿への経緯<sup>(4)(5)(6)</sup>

現在から未来の姿にいたるまでの発展の経緯をおよそ

10年単位に3段階に分けて述べる。

#### 2.2.1 スマートグリッド1.0(2030年)：地産地消の実用化

現在、日本で実証実験段階にあるスマートグリッドは、まず再生可能エネルギーの導入拡大、次に電力供給力不足への対応を狙いとして段階的に実施されている。今後は、地域単位で分散型電源の導入が進んだ場合を想定し、需要家をも中心とするスマートグリッド形態となる(図1)。電力に加えて熱やガスの複数エネルギーネットワークの統合が進み、再生可能エネルギーを有効利用して電力・エネルギーの地産地消が実用化レベルに達する。これは地球温暖化問題に普遍的に親和性が高く低炭素社会実現に貢献する、広義のスマートグリッドであるスマートシティのエネルギー基盤になると考えられる。電力系統では、洋上風力などオフショア電源からの送電にDC送電の導入が進む。再生可能エネルギーの出力変動に対して、基幹系統に設置された複数の大規模蓄電池による集中型抑制制御が行われる。

#### 2.2.2 スマートグリッド2.0(2040年)：DC化の進展

再生可能エネルギーの導入が一層進む中で、大規模な再生可能エネルギー出力を集約して変動抑制を行うDCスーパーハイウェイ(DC基幹送電系統)が構築され、高度に需要が集積したメガシティへの効率的な電力供給が実現される(図2)。例えば、日本ではDCスーパーハイウェイは、列島を縦断するとともに国土を取り囲み海外系統とも接続するように海底敷設されたループ系統からメガシティに供給し、メガシティ近隣の火力・原子力発電と連系して周辺コンパクトシティへ二次供給する構成が考えられる。メガシティからの送配電は主として交流(AC)系統が担うが、一部のエリアでは都市再開発に合わせてDC送配電ネットワークも存在する。また、安価な水素輸入による大規模水素発電所によって、エネルギーミックスの多様化が進展する。

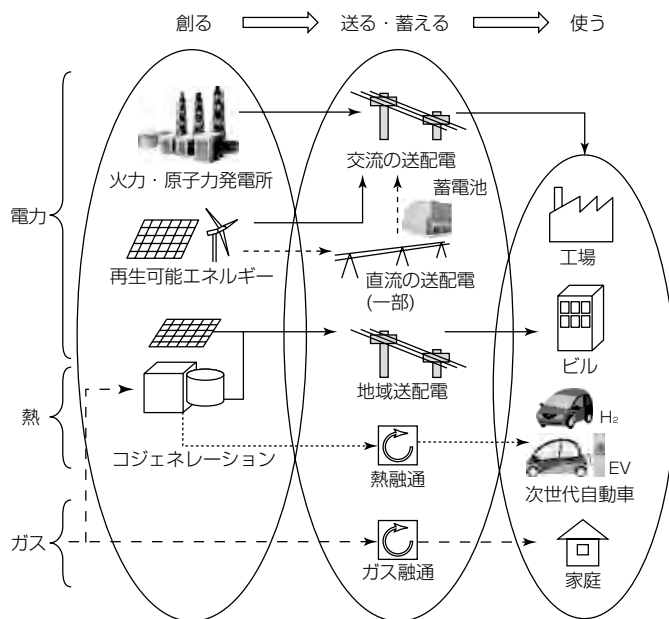


図1. スマートグリッド1.0(2030年)のイメージ

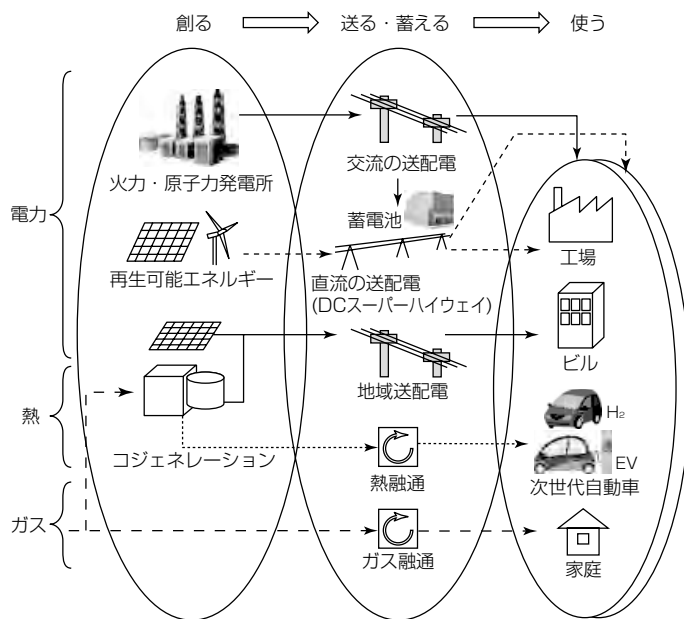


図2. スマートグリッド2.0(2040年)のイメージ

## 2.2.3 スマートグリッド3.0(2050年)：統合エネルギー制御の実現

2050年には、再生可能エネルギー導入による余剰電力から環境負荷の低い水素への生成が実用化され、全ての地域、需要家にCEMS(Community Energy Management System)、BEMS(Building EMS)、HEMS(Home EMS)等の自律的なエネルギーマネジメントが広く設置される。また、宇宙太陽光発電が一部実用化され、メタンハイドレート活用も進んでいる可能性が高い。これによって、基幹システムレベルから需要家レベルにいたるまで電力・エネルギーの“創る+送る・蓄える+使う”という環境負荷の低いバリューチェーンをレベル間で相補的に結合し、自律的かつ全体最適な統合エネルギー制御を可能にする(要旨の図)。統合エネルギー制御の実現は、再生可能エネルギー大量導入の阻害要因であった需給ギャップを解消するであろう。

各発展段階における電力・エネルギーシステムの特徴を表1に示す。

## 2.3 解決すべき技術課題

未来の電力・エネルギーシステムにいたるまでの発展段階(スマートグリッド1.0及び2.0)で、例えば次のような技術課題が挙げられる。

- (1) 電力・エネルギーの地産地消
- (2) スマートシティにおける電力・エネルギーによるLCP(Life Continuity Performance)
- (3) システムに多数接続した大型蓄電池の利用
- (4) 水素を含むエネルギーバリューチェーンの形成
- (5) DCシステムを構成する電力機器や超電導機器
- (6) DCシステムとACシステムの電力ネットワーク協調
- (7) DCシステム・蓄エネルギー装置を統合活用した再生可能エネルギーのスマート変動・余剰対策

表1. 未来の電力・エネルギーシステムの特徴

	特徴
スマートグリッド1.0 (2030年)	・電力、熱、ガスのエネルギーネットワークの統合 ・電力・エネルギーの地産地消
スマートグリッド2.0 (2040年)	・DCスーパーハイウェイによる再生可能エネルギー出力の変動抑制とメガシティへの効率的な電力供給
スマートグリッド3.0 (2050年)	・水素生成・発電による創・蓄エネルギーの自由度向上 ・基幹システムから需要家レベルにまでいたる電力・エネルギーのバリューチェーンの統合エネルギー制御

- (8) エネルギー供給側と需要側の双方向の高度協調制御
- (9) 再生可能エネルギー大量導入時の交直連系システムの故障波及・大停電防止
- (10) 技術開発にかかる標準化とビジネスモデル

## 3. 必要な要素技術

2.3節に挙げた技術課題のうち代表的なものについて、未来の電力・エネルギーシステムに必要な要素技術について述べる。

### 3.1 電力・エネルギーの地産地消<sup>(7)(8)(9)</sup>

分散型電源の導入が進むスマートグリッド1.0の未来都市では省エネルギー、省CO<sub>2</sub>の観点でのエネルギー高度利用と、エネルギーセキュリティLCPの観点からコジェネレーションによる電熱併給の活用が拡大し、2030年時点で国内の総発電量の15%程度の約1,500億kWhの発電量に達すると見込まれる。コジェネレーションのコストとしては燃料費に次いで熱導管などのインフラ整備コストの占める割合が大きく、エネルギー密度の高い人口密集地域の方が採算を取りやすい。メガシティ化や地方都市のコンパクトシティ化の進展に伴いコジェネレーションの重要性が増す。

コジェネレーションの方式としては熱需要が豊富な需要家が導入しているガスエンジン、ガスタービン方式に対して、発電効率の良い燃料電池で低コスト化・高耐久化の技術課題が解決されることによって、2030年頃には熱需要の比較的小さな需要家での利用が広がっていくと考えられる。さらに2050年頃にはトータルでCO<sub>2</sub>フリーな水素サプライチェーン(図3)の構築に伴って、直接供給される水素を利用した純水素型定置用燃料電池の普及が見込まれる。海外での褐炭等の未利用エネルギー由来の水素製造にCCS(Carbon dioxide Capture and Storage: CO<sub>2</sub>回収貯蔵)を組み合わせることや、再生可能エネルギー由来の余剰電力を利用した水電解による水素製造が本格化すれば、水素サプライチェーンの実現が近づく。また、輸送については、有機ハイドライドや液化水素の形で海外や国内での輸送が本格化するとともに、地域限定で水素パイプラインの整備も徐々に進む。

### 3.2 DCシステムネットワークの活用

DCシステムは送電ロスが小さいことから大電力・長距離送電に適している。太陽光発電や風力発電といった天候に左

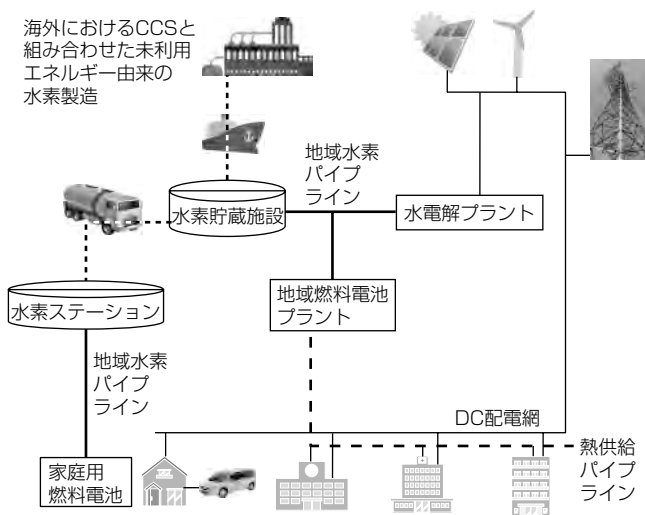


図3. CO<sub>2</sub>フリーな水素サプライチェーン

右される再生可能エネルギー電源出力を一次側直流のままDC系統につなぎ、DC基幹系統として広域に接続して地域的な出力変動偏りの緩和を図る。このとき、DC系統に接続される大規模蓄電池を含む変換器の高速制御性を利用して再生可能エネルギー出力変動を抑制するため、DC系統上の複数変換器を使った出力変動抑制技術が重要となる。また、拡大するDC系統と既存AC系統が混在する電力系統の需給面及び系統運用面からの協調制御技術も欠かせない。

### 3.3 DC系統を支える電力機器

再生可能エネルギー電源からの電力注入やメガシティなど需要系統への電力供給には変換器を使用するため、大容量DC/AC・DC/DC変換技術の開発が必要である。また、AC系統と同じ基準の供給信頼性を維持するためには、故障発生時に高速に大電流が流れる故障設備の除去を可能にする大容量直流遮断器の開発も必要となる。

DC/DC変換器は、現在、MW(メガワット)級以下の低圧機器を中心に開発が進められ実用化されているが、炭化ケイ素(SiC)、窒化ガリウム(GaN)、酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)等を用いた10kV超級の超高耐圧半導体デバイスの実現によって、送配電関連設備にも適用できる大容量・高電圧の高効率DC/DC変換器が実用化される。次世代半導体デバイスによって、DC基幹系統とAC系統を接続するためのDC/AC変換器の高効率化も可能となる。変換器の高効率化は、省エネルギーや低炭素化社会に貢献できるだけでなく、冷却装置の簡素化による小型、軽量、高信頼性にも寄与する。未来の電力・エネルギーシステムでは、人口減少に突入する国・地域でメンテナンスコストが高くなる。高信頼性によるメンテナンスフリー化が、ライフサイクルコストの削減を実現するために重要となる。

## 4. 電力・エネルギーシステムの統合制御(スマート化技術)

未来の電力・エネルギーシステムでは、様々な機器・システム群を統合する統合制御システムがスマート化技術として必要となる。それは、基幹系統から需要家レベルまでの各レベルで再生可能エネルギーを始めとする複数エネルギーを適切な形態で柔軟に出し入れし、最小ロスで供給・融通を行い、高精度な再生可能エネルギー出力予測に基づき必要に応じて供給側と需要側のコントロールを一体的に行う技術である。多数の個別システムが各々自律的にマネジメントを行いつつ、相補的に協調し合い全体として安定かつコスト最小化に向かうシステム制御技術が必要となる。これによって、エネルギーの安定供給、経済性、地球温暖化問題への対応、並びに、安全・安心(3E+S)の社会効用を最大化する基盤インフラを提供する。

## 5. む す び

2050年の未来社会を想定して電力・エネルギーシステムの姿、そこにいたるまでの発展段階で必要な要素技術と完成のために必要なスマート化技術について述べた。これらはまだ概念検討の部分もあるが、今後の研究開発によって、地球規模での低炭素化社会の実現に貢献していく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) エネルギー基本計画, 2014年4月11日閣議決定
- (2) IEA World Energy Outlook 2014
- (3) 国土交通省 国土審議会政策部会長期展望委員会:「国土の長期展望」中間とりまとめ (2011)
- (4) 泉井良夫:スマートグリッド・スマートコミュニティの現状と展望, システム制御情報学会誌, **59**, No.3, 106~111 (2015)
- (5) 横山明彦:新スマートグリッド 電力自由化時代のネットワークビジョン, 日本電気協会新聞部 (2015)
- (6) 経済産業省 資源エネルギー庁:エネルギー関係技術開発ロードマップについて, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第14回会合) (2014)
- (7) 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会:第30回基本問題委員会配布資料, コジェネ(熱電併給型のエネルギーシステム)の導入促進のための取組について (2012)
- (8) 資源エネルギー庁燃料電池推進室:業務・産業用燃料電池について (2014)
- (9) 経済産業省 水素・燃料電池戦略協議会:水素・燃料電池戦略ロードマップ~水素社会の実現に向けた取組の加速~ (2014)

# 未来社会に向けた水処理技術

安永 望\* 谷村泰宏\*\*\*  
稲永康隆\*\*  
生沼 学\*\*

## Water Treatment Technology for Future Society

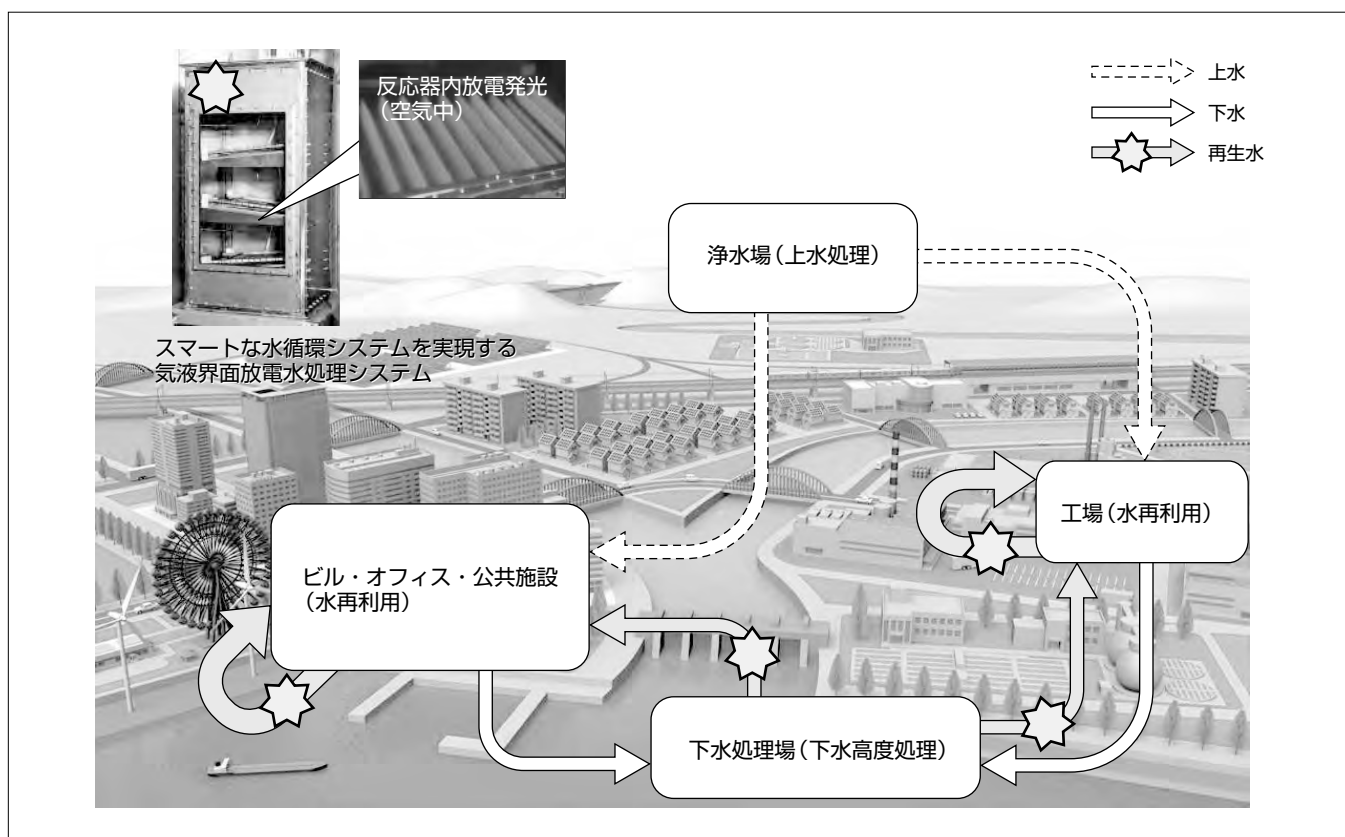
Nozomu Yasunaga, Yasutaka Inanaga, Gaku Oinuma, Yasuhiro Tanimura

### 要 旨

異常気象による水需給のアンバランス、不適切な廃水処理に由来する水質汚染とそれによる安全な飲料水不足等、水環境の悪化は深刻な問題であるが、社会の成長には水資源が必須である。一方、現在の上下水処理システムは、上水処理で大量に取水し、上下水処理の前後で長距離輸送し、下水処理した水を河川や海に放流する。このような一過型水循環システムはエネルギー消費量が大きく、国内総電力消費量に対して上水処理で約0.9%<sup>(1)</sup>、下水処理で約0.7%<sup>(2)</sup>を占める。さらに、水の位置エネルギーを無駄に消費するだけでなく、膨大な数や長さの管路の老朽化による維持管理費の増大も予想される。このような課題を解決するための手段として水の再生がある。オンサイトで水を処理、再利用することで、水質に見合った高効率な水処理プロセス

を適用するとともに水の輸送に必要とするエネルギーを大幅に削減し、低炭素社会におけるスマートな水循環システムを実現できる。

本稿では、未来社会の水循環システムのあるべき姿と、それを実現するために必要な水処理技術について述べる。三菱電機は、気液界面でパルスコロナ放電を誘起させて非常に酸化力の強いOH(ヒドロキシル)ラジカルを生成し、これによる水中の難分解性有機物質を分解する水処理技術を開発中である。湿潤酸素ガス雰囲気中で安定して放電場を形成することによって酸素を有効に活用し、実験室レベルで従来比2倍以上の分解効率が得られた。当社はこの技術で未来社会に向けたスマートな水循環システムの構築に貢献していく。



### 2050年のスマートな水循環システム

上下水処理場での水の集中処理、分配、供給システムはエネルギー消費量が大きく、限りある水資源を有効に活用できていない。当社が開発中の気液界面放電水処理システムによる難分解性有機物質の分解技術を適用し、ビル、工場、下水処理場等におけるオンサイトで水の再生を省エネルギーで実現してスマートな水循環システムを構築する。



# 1. ま え が き

図1に地球上の水の所在<sup>(3)</sup>をグラフにして示す。地球上に存在する水量はおよそ14億km<sup>3</sup>であり、そのうちの約97.5%が海水で淡水は約2.5%である。淡水の大部分は氷河として存在し、地下水や河川、湖沼の水等として存在する淡水の量は地球上の水の約0.8%である。この水のほとんどが地下水として存在するため、河川や湖沼等として存在する淡水量は、地球上に存在する水量の僅か約0.01%、約0.0014億km<sup>3</sup>に過ぎず、棒グラフでは示すことができないほど少ない。これらの水は地球上に偏在するため、我々が使用可能な水量はさらに限定される。

世界的な人口増加や地球温暖化の進行によって、異常気象による利用可能な水の不足、水質汚染による生態系への影響が懸念されている。また、水の安全性への要求度は今後ますます高くなり、水の量と質についての総合的な管理が必要になると考えられる。一方で、国内の上下水処理のエネルギー消費は大きく、一過型の水循環システムに起因する水の長距離輸送がその主要因である。低炭素社会を実現するためにはこれらの課題を解決する必要がある、その手段として水の再生がある。

本稿では、これらの課題を解決するスマートな水循環システムと、それを実現するために必要な水処理技術について述べる。

## 2. 未来社会の水循環システム

### 2.1 水循環システムの課題

現在の水循環システムは、大量に取水、処理、長距離輸送し、使用後は処理して大量に排水する一過型である<sup>(4)</sup>。上水道ではその95%のエネルギーが取水、導水、給水、配水のために消費されているが、水処理プロセスの占めるエネルギーは僅か5%に過ぎない。また下水道では、水・汚泥処理で約2/3のエネルギーが消費され、残り約1/3が水の輸送分である<sup>(3)</sup>。さらに、これらの水循環システムは膨大な

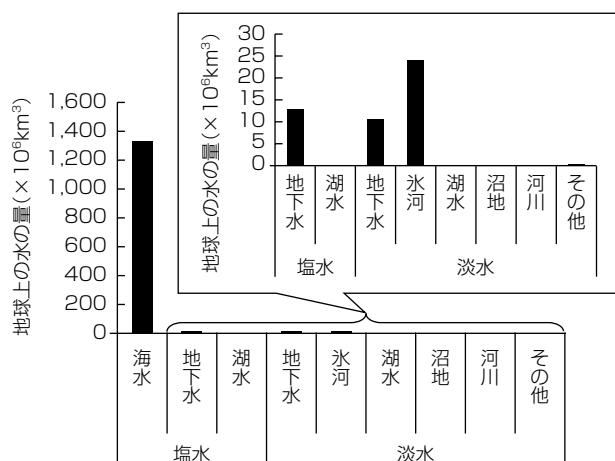


図1. 地球上の水の所在<sup>(3)</sup>

数、長さの管路を持ち、老朽化による維持メンテナンスコストも莫大(ばくだい)になる。これに加えて、大量取水による河川水量の低下、水域生態系の変化等、様々な課題を抱えている。

### 2.2 スマートな水循環システムの提案

2.1節で述べた課題を解決するための手段として、水の再生がある。これによって、水質の改善と省エネルギーを同時に実現できる可能性がある。すなわち、オンサイトで処理をして再利用することで、輸送に関するエネルギー消費を大幅に削減できるとともに、廃水水質に見合った高効率な水処理プロセスを適用することで水量及び水質の安定性が期待でき、スマートな水循環システムの構築が可能となる。

## 3. 水の再生の最新動向及び水処理技術

### 3.1 各国の水の再生動向

日本は、一部の地域や季節において渇水となる場合があるが、世界的にみて降水量に恵まれた国である。年間の下処理水139.3億m<sup>3</sup>のうち、再利用水量は約2.0億m<sup>3</sup>、再利用率にして1.5%と僅かである。図2に下水処理水の再利用状況<sup>(5)</sup>を示す。この図に示すように、そのほとんどが河川維持用水、修景用水、融雪用水として利用されているだけであり、積極的な再利用は一部の地域を除いて進んでいない。

一方、海外の下水処理水の再利用率はイスラエル83%、スペイン12%、米国6%であり(2007年)、イスラエルが圧倒的に高い。再生水の量としては米国が約365,000万m<sup>3</sup>/年とイスラエルの約28,000m<sup>3</sup>/年を大きく引き離している<sup>(6)</sup>。

慢性的な水不足の状態であるイスラエルは国家的な水政策の一環として、下水処理水を主に農業用水として使用している。プラスチック製のパイプを使用して農地に必要な量の水を適切に、無駄なく供給できる点滴灌漑(かんがい)

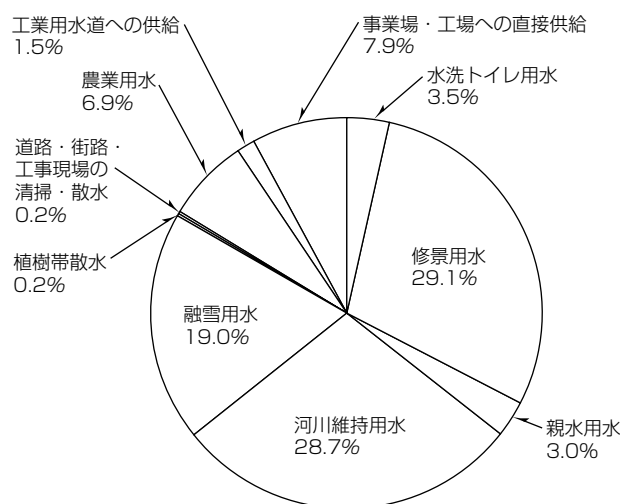


図2. 日本の下水処理水の再利用状況(平成19年度)<sup>(5)</sup>

法によって生産効率を高め、農作物の輸出額は日本と同程度にまで達する。さらに、水の再利用の専門委員会ISO/TC 281の議長国として水の再利用に関する国際標準化を進めている。

更に進んだ下水処理水の再利用として、間接的飲用化がシンガポールや米国カリフォルニア州で進められている。すなわち、高度に処理した下水処理水を貯水池で表流水と混合したり、地下水涵養(かんよう)したりすることによって上水原水として使用している。将来的には下水処理水の直接的飲用化も視野に入っているが、そのハードルは高い。特に長期にわたる健康リスクの評価、さらには心理的な問題を解決する必要があるが、安全な水を確保する選択肢の1つとして今後も考慮されると考えられる。

### 3.2 再生水市場の見通し

人口の増加や経済発展に伴い、水処理に対する需要が急速に高まると考えられるが、使用可能な水資源には限りがある。図3に水の分野別世界市場規模予測<sup>(7)</sup>をグラフにして示す。上下水が占める割合は2025年でも依然として高い。しかし再生水市場の現状はその市場規模は小さいものの、今後の成長分野として注目されており、2025年には2007年の約3倍の2.1兆円になると見込まれている。

### 3.3 水の再生に必要な水処理技術

下水処理の主要なプロセスは生物処理であるが、微生物に水中の有機物を分解させる方法のため、処理可能な有機物の量、種類には限界がある。さらに、有害な化学物質やウイルス等の除去も期待できない。したがって、人が再生水に直接触れて使用する点を考慮すると、膜分離、酸化分解等の物理・化学的な処理が必須であり、またそれらの処理水を使用することに対する化学物質や微生物に対するリスク管理も重要である。また膜分離では必ず分離された濃縮水が発生し、難分解性有機物質は分解されずにこれに濃縮されるため、これらを高効率に分解する技術の開発が必須である。

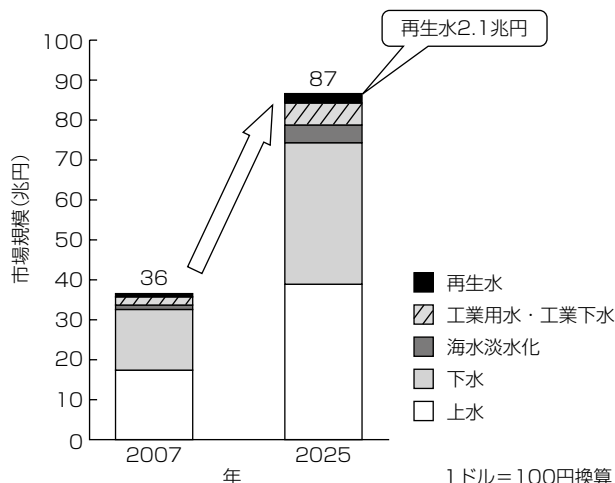


図3. 水の分野別世界市場規模予測<sup>(7)</sup>

現代社会では膨大な化学物質を日常的に使用していることから、パーソナルケア製品や医薬品等に由来する難分解性有機物質が下水に混入する。さらに、微生物を用いた廃水処理技術では、先に述べたようにこれらの物質の十分な除去が期待できないため、下水放流水を介して海や河川等の環境水中にこれらの物質が拡散し、水道水源がこれらの物質によって汚染される可能性がある。当社はこのような状況に鑑み、難分解性有機物質を高効率分解可能な廃水処理技術の開発に着手した。

## 4. スマートな水循環システムのための水処理技術

### 4.1 難分解性有機物の分解技術

図4に示すように、難分解性有機物を分解する方法の1つとして、オゾン( $O_3$ :酸化還元電位2.07eV)、及びこれよりもさらに酸化力の大きいOHラジカル( $\cdot OH$ :酸化還元電位2.85eV)を使用する促進酸化処理がある。OHラジカルによって、原理的には有機物質を水と二酸化炭素に完全に分解可能である。オゾンと過酸化水素( $H_2O_2$ )や紫外線(UV)を併用してOHラジカルを生成させる方法が主流であるが、オゾンを水中に溶解させる必要があるため、有機物質分解効率は決して高いとは言えない。

### 4.2 気液界面放電による水処理技術

当社は山形大学理工学研究科南谷研究室の技術協力<sup>(8)</sup>の基に、気液界面での放電によって水中に直接OHラジカルを生成する新たな水処理技術を開発中である。図5に気

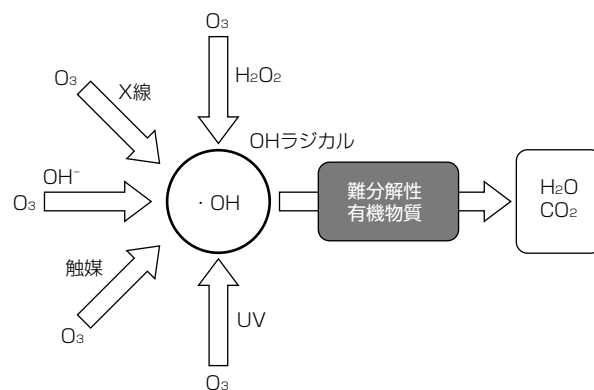


図4. オゾンによるOHラジカルの生成方法

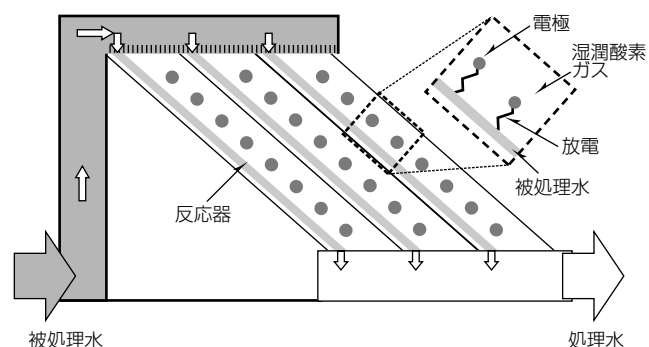


図5. 気液界面放電水処理システム

液界面放電水処理システムを示す。この図に示すように、被処理水表面で効率的に放電できるよう、被処理水の水深を浅く保つことが可能な流下方式を採用した。被処理水が流下する傾斜面に複数の電極を配置し、湿潤酸素ガス中で被処理水の気液界面に放電時間約100nsのパルスコロナ放電を誘起させて気液界面放電水処理を実施する。この処理では湿潤酸素ガス中で安定して放電できるため、湿潤酸素ガス中の水分を除去せずに酸素を循環使用できる。その結果、酸素使用量を大幅に削減できる。

図6に気液界面放電水処理の原理を示す。湿潤酸素ガス中の放電によってOHラジカル( $\cdot\text{OH}$ )を発生させ、これが水中に取り込まれる。その際にOHラジカルが持つ強い酸化力で、塩素やオゾンでは分解が難しい界面活性剤やジオキサン等の難分解性有機物質を分解、低分子化し、最終的には二酸化炭素や水に分解する。

オゾン処理では分解できない酢酸ナトリウムを被処理物質として10mgC/L添加した場合の分解効率(消費電力量当たりの分解量)について、従来の促進酸化処理であるオゾン+UV法と比較した結果を図7に示す。この図に示すよ

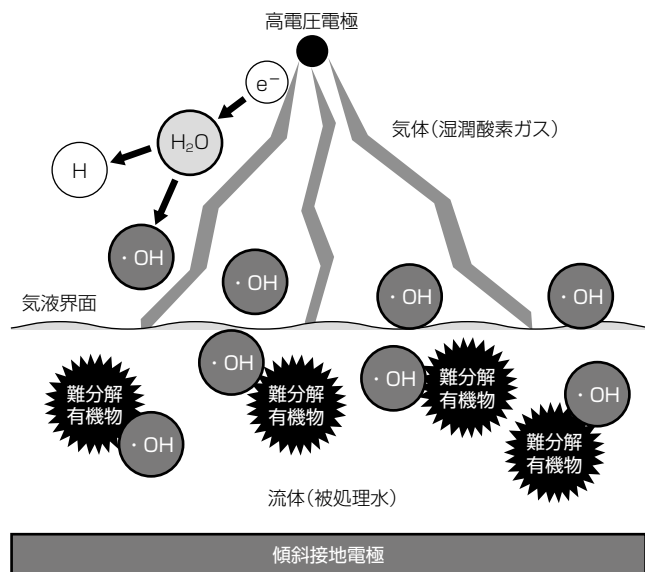


図6. 気液界面放電水処理の原理

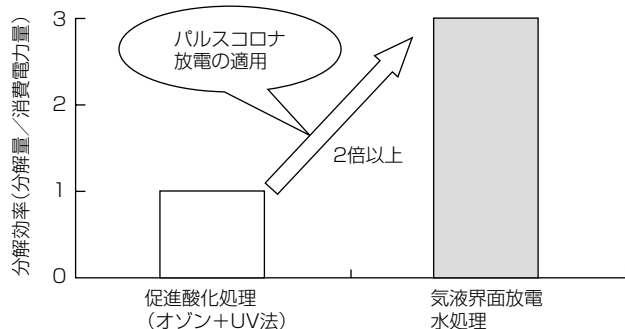


図7. 有機物の分解効率の比較

うに実験室レベルでオゾン+UV法と比較して、気液界面放電水処理では従来比2倍以上の分解効率を得られた。これは先に述べたように、OHラジカルを水中で直接発生させることができるためと考えられる。

## 5. む す び

気液界面放電水処理システムの実用化に向けた今後の課題として、反応器のモジュール化と装置構成の簡素化による装置コストの低減、スケールアップ等が挙げられる。今後も、より効率的な水処理技術の開発を進め、未来社会が目指すべきスマートな水環境システムによる循環型社会の構築に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 厚生労働省 健康局 水道課：水道事業における環境対策の手引書(改訂版) (2009)  
<http://www.mhlw.go.jp/za/0723/CO2/CO2-O2.html>
- (2) 国土交通省 資源のみち委員会：資源のみちの実現に向けて報告書(案) (2007)  
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/sigen7th/02.pdf>
- (3) 国土交通省 水管理・国土保全局水資源部：平成26年版日本の水資源について～幅を持った水システムの構築～次世代水政策の方向性～ (2014)  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo\\_mizsei\\_fr2\\_000012.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr2_000012.html)
- (4) 田中宏明：21世紀型都市水循環系の構築の鍵となる水生成技術の開発と評価, 科学と工業, **88**, No. 6, 214～220 (2014)
- (5) 国土交通省 下水道部：我が国における下水処理水の再利用状況 (2009)  
<http://gcus.jp/report/groupReport/pdf/ballast03.pdf>
- (6) 国土交通省 下水道部：下水処理水の再利用のあり方に関する懇談会中間とりまとめ (2008)  
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/shorisui/chukan/01.pdf>
- (7) 経済産業省 水ビジネス国際展開研究会：水ビジネスの国際展開に向けた課題と具体的方策 (2010)  
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/004625/pdf/g100426b01j/pdf>
- (8) Minamitani Y, et al.: Decomposition of dye in water solution by pulsed power discharge in a water droplet spray IEEE Trans. on Plasma Sci. **36**, 2586～2591 (2008)

# 鉄道を中心に描く次世代モビリティシステム

浅岡 洋\*  
吉本剛生\*\*

*Future of Mobility System with Central Focus on Railway*

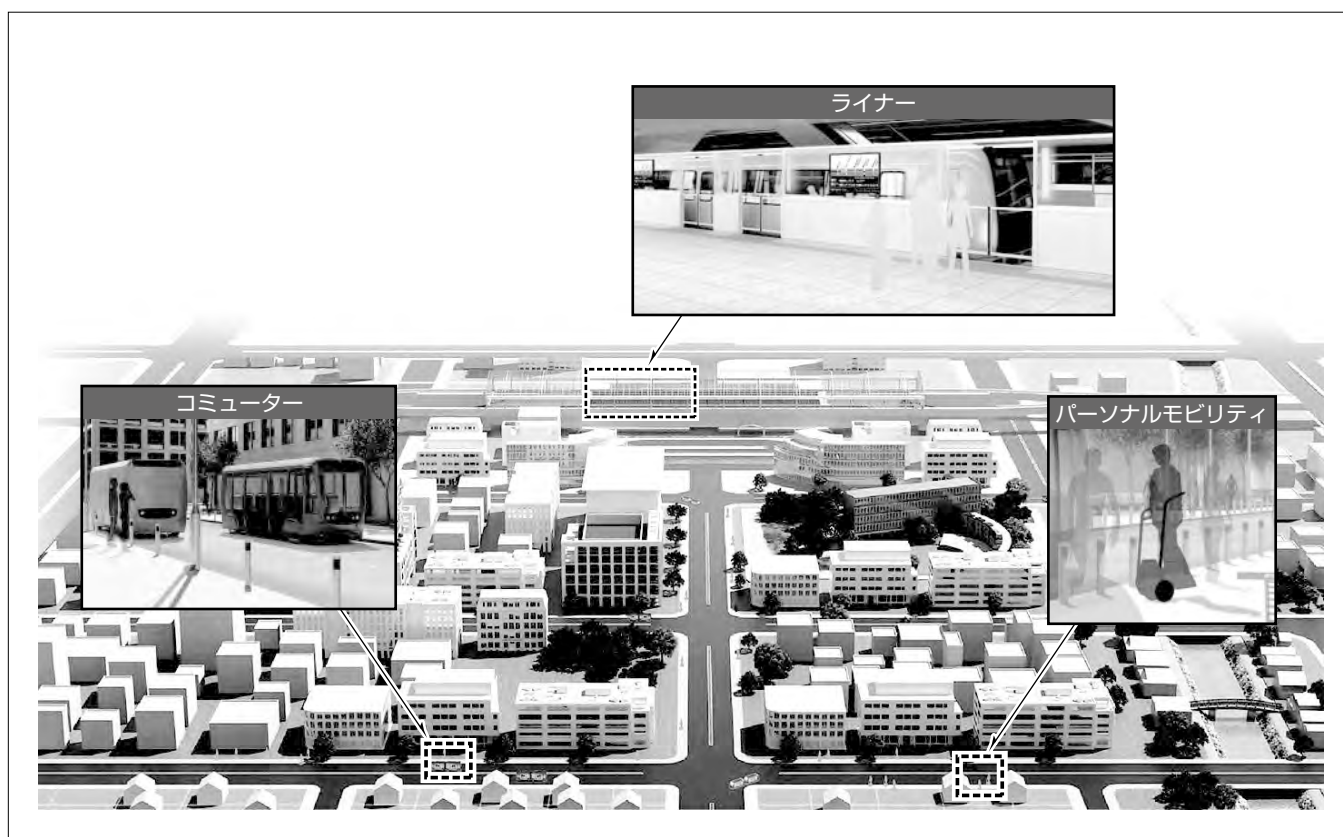
*Hiroshi Asaoka, Kouki Yoshimoto*

## 要 旨

都市への人口集中が進む2050年頃の街の姿をベースに、その時代で想定されるライフスタイル、そこに見えてくる移動の機会、その機会に必要な鉄道の役割を他の移動手段との関係を含めて考察した。

2050年の日々の暮らしではITの劇的な進化(ユビキタスセンサネットワーク等)によって、人々は“今だけ”“ここだけ”“私だけ”の様々な個人向け情報サービスをスムーズに利用していると想像する。また、街の姿は商業・医療・文化・娯楽施設などが、徒歩圏内に整備され、地域内で不自由なく暮らすことができる“都市機能の集約”が進むと予想される。仕事はテレワークの浸透で、自宅勤務など、様々な勤務形態で働けるようになる。また、ITの進化は、地域内外とのコミュニケーションの機会を増やし、家族、学

校、職場以外の様々なコミュニティを誕生、活性化させると考える。移動手段としてはユーザー一人ひとりに向けたパーソナルモビリティが普及する。子供から高齢者、障がい者等、誰もが便利で安全、快適に利用可能なモビリティシステムが確立される。自動車事故は抑制され、渋滞緩和システムが充実する。高齢者、障がい者を含め、運転資格保有者は増加する。結果として、公共交通の役割は大きく変化し、毎日の通勤での利用は減少する。そのような環境の中で、大規模・高効率・省エネルギー輸送を得意とする移動手段である鉄道は自動車・パーソナルモビリティ等とシームレスに連携して、今までにない新たな役割、利用機会が生まれると予想される。



## 2050年の街と移動手段の全体像

ターミナル駅周辺に都市機能が整備された未来都市では、移動の目的ごとにその手段は細分化され、公共交通は都市間鉄道“ライナー”、都市内交通“通勤ター”、個人移動をサポートする“パーソナルモビリティ”の3つに分類されると予想される。



## 1. ま え が き

日本は今後、人口減少が続くと予想されている。その中で、国土交通省が描く“国土のグランドデザイン2050”<sup>(1)</sup>では、今後の豊かな国づくりに向けたキーワードとして“コンパクト+ネットワーク”を打ち出し、人口が減少する将来に向けて、都市機能はサービス提供の効率化のためにコンパクト化するとしている。そして、コンパクト化で縮小するマーケットを補うため、都市同士のネットワーク化を促進する。このコンパクト化とネットワーク化は交通とITの革新を取り込みながら進めるとしている。一方で、海外新興国では人口の都市集中が進み、2050年には全世界の人口の7割が都市に居住すると予想されている。

このような未来の都市では、IT活用による全く新しいビジネススタイル・ライフスタイルが登場してくるとともに、鉄道などの公共交通の在り方が大きく変化すると考えられ、今までにない新たな役割、機能、利用機会の創出が求められる。

## 2. 2050年の街と生活

### 2.1 多様化するライフスタイルと情報サービス

2050年になると、人々は高度に進化したITで、自分専用にカスタマイズされた“今だけ”、“ここだけ”、“私だけ”の様々な情報サービスが受けられるようになる(図1)。その結果、個人ごとの価値観はますます多様化し、一人ひとりが自分に合った夢、豊かさを多くの選択肢から自由に選び、より自分らしいライフスタイルを求めるようになる。

そのライフスタイルの実現には、大人や子供、高齢者、障がい者を含め、誰もが平等にその豊かさを実体験できる社会の仕組みが必要である。また、人々の暮らしを支える様々なソリューションは、このような時代に寄与する姿に進化していかなければならない。

### 2.2 街の姿

毎日の暮らしに必要な都市機能は“歩いて暮らせる街”をコンセプトに整備されたコンパクトなエリアに集約される。駅は鉄道の乗客サービスだけでなく、あらゆる生活サービスの拠点となり、住宅は駅からの徒歩圏内に整備されてい

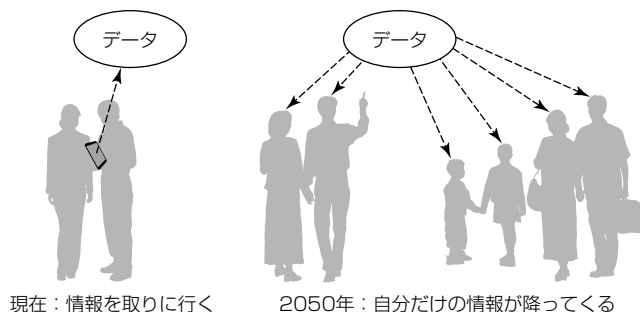


図1. “今だけ”、“ここだけ”、“私だけ”  
個人向け情報サービスイメージ

ると予想される。

地方では人口の減少によってできた空き地の統合化が進み、地域色豊かな、又は自然を満喫できるエリアが各所に現れる。一方、メガシティ化が進むと言われている首都圏や海外新興国でも、一定の人口規模のエリアごとに、街に必要な機能の集約化が進むと考えられる。同時に、地域の歴史や伝統、景観、特色等、そのエリアに根付いた文化を大切に、それに誰もが平等に触れられる、恩恵を享受できる、そのような街の姿を想像する。

### 2.3 暮らし方・働き方

個人向け情報サービスが誰でも平等に受けられる時代、そのサービスは存在を意識させることなく、毎日当たり前、そして自然に人々の生活に取り入れられていく。買物や生活上の各種手続等はいつでも簡単に済ませられる。自宅でできることが増え、仕事や勉強、医師の診察まで、誰もが様々なサービスを個々が望むスタイルで受けられるようになっていると想像する。

一方、家で済ませられることが増えた結果、外出せずに不健康な生活を送る人が増えてしまうのではないかと懸念もある。そのため、社会の仕組みはこれらの心配とは無縁な、人々が積極的に外へ出かけたいくなる、毎日ワクワクするような生活が送れるように進化していなければならない。

日々の生活では、ITによって地域活動は活性化し、また、家族で過ごす時間が充実し、友人、恋人、趣味の合う仲間と交流する場も拡大する等、生活のあらゆるシーンで人と人が直接触れ合える機会が増えていることを想像する。仕事では、様々な選択肢の中から勤務場所、時間帯や休日を自由に選べるようになる等、よりゆとりのあるワークライフバランスが実現しているであろう。子供たちにとっては、外で伸び伸びと遊び、遠くの学校でも安全に通える等、友達と出会える機会が飛躍的に増える。その子供たち同士が安心して遊び、学べる、2050年にはこれら環境が整っていると考える。

行きたい場所に誰でも不自由なく安心して行ける。同時に、そのリスクや危険はあらかじめ取り除かれている、2050年のITや交通系ソリューションはこれら仕組みの一端を担う姿での進化が求められる。

## 3. 移動の機会について

2050年、ITや交通系ソリューションの進化で実現させたい外出・移動の機会について、幾つかの例を述べる。

#### (1) 子供が安心して一人旅に行ける

子供を見守るシステムが普及し、鉄道を含め移動中のあらゆる移動手段が連携しながら、常に子供を危険から守る。子供たちがネットで全国に広げた友達との直接的な交流が活発に行えるようになる。

#### (2) 移動に不自由していた障がい者が、より自由に外出で



きるようになる

今まで介添えが必要であった障がい者に、いつでも自由に行きたい場所へ行ける移動手段が提供される。彼らが今まで以上に多くのコミュニティに参加できるようになる。

(3) 外国人がどこでも安心して観光できる

自動翻訳システムの進化によって、言葉の壁がなくなった外国人の観光エリアが拡大する。その外国人たちが決して迷わずに日本中どこへでも安心して移動できるようになる。

(4) 遠くの会いたい人とすぐに会えるようになる

鉄道の高速化で長距離移動が劇的に短縮される。生活や仕事でバーチャルコミュニケーションにはない、人同士のリアルな対話を求める人たちの移動が活発になる。

(5) 自分の住みたい街からの通勤が可能になる

田舎に暮らしながら都会への通勤が可能になる。又は、都会に暮らしながら、地方で農業を営むことが可能となる。単身赴任という概念がなくなる等、新しい通勤スタイルが誕生する。

これら機会を求める全ての人にとって、平等かつ安心に移動可能なモビリティシステムの実現が望まれる。

#### 4. 最適な移動手段

2050年になると鉄道や車、ほかの様々な移動手段は、輸送距離・規模・用途・目的ごとに最適化した形に変貌している<sup>(2)</sup>。その姿は、お年寄り、障がい者等の今まで交通弱者と呼ばれていた人たちの弱みを解消している。これらは時に、相互にその機能を連携させ、人々を安全で快適、正確に目的地へ移動させる。

自動車では自動運転技術が確立している。業務用の車の多くは自動運転で運用されている。一方、自家用車は、外出という機会を誰もが楽しめる姿に進化し、自動運転のほか、適度な運転感覚を残しながら、事故を未然に防ぐ高度なセーフティ機能を備えた車となっていると予想される。また、従来型の車に加え、一人乗り用の超小型車(パーソナルモビリティ)が普及する。

一方で、移動速度・エネルギー問題・渋滞問題・コスト等の観点から、全ての移動手段がパーソナルモビリティに集約することはない。パーソナルモビリティが移動の末端部分を快適化する一方で、従来の鉄道やバスに相当する大量輸送型の移動手段は、引き続き省エネルギーな効率輸送を担う公共交通の中核となる。そして、人々に効率の良い公共交通を気軽に使ってもらえるように、様々なモビリティ間の乗換え負担を低減し、シームレスな移動を実現しなければならない。

次に、この時代における個人の移動を、誰もが平等に外出、移動できる社会をテーマに、“パーソナルモビリティ(短距離移動用)”と地域内交通向け“コムーター(中距離移動用)”，都市間交通向け“ライナー(長距離移動用)”を想

定し、それぞれの役割とその関係を描く。

##### 4.1 パーソナルモビリティ

パーソナルモビリティ(詳細はこの特集号の論文“スマート化技術が拓く未来のパーソナルモビリティ”参照)は、ユーザーの属性や好みによって様々なスタイルが登場してくると予想される。ここでは公共交通の一部として徒歩圏内の利用に限定された姿を想定して話を進める。

パーソナルモビリティの利用は、利用者がネットワーク上で目的地などの利用情報をパーソナルモビリティへ通知するところから始まる。その情報は、必要に応じて次に登場するコムーター、ライナーにも送られ、3者は利用者が最終目的地に到着するまで、常に連携しながら運行する。パーソナルモビリティは主に徒歩圏内で利用され、その先の移動が必要な際は、街中を循環する公共交通の1つ“コムーター”を利用する。障がい者や高齢者は、このコムーターへパーソナルモビリティごと乗車が可能となる。

##### 4.2 コムーター

コムーターは現在のバスやBRT(Bus Rapid Transit)、LRT(Light Rail Transit)の進化系で、特定のエリア内半径約2～3kmの移動が主な役割である。一般道路だけでなく、病院や大型商業施設等へはその建物内にも直接乗り入れる。乗車人数は現在の路線バス程度である(図2)。コムーターは、ライナーへ接続する駅ではライナーに乘換える利用者のために駅のホームに直接乗り入れる。

一般道路は“モータ+タイヤ”で走行し、運行経路上駅周辺では、専用レーンに切り換えて走行する。動力は電動で、その専用レーンを走行中、急速充電を行う。パーソナルモビリティからの乗換え時はコムーターとの間で車両間通信が行われ、両者は相互の位置関係を常に把握して、利用者の最終目的地に対し、いつ、どの場所でどのコムーターに乗換えれば良いかの指示をコムーターからパーソナルモビリティ側に送信する。指示を受けたパーソナルモビリティは、乗換えに最適な場所へ自動で移動する。コムーターの利用は、時刻表に合わせてバス停で待つという現在の方法ではなく、利用者の求める場所、時間に合わせてコムーターがやってくるというスタイルになる。

コムーターは完全な無人自動運転を実現している。自動車の自動運転技術は、現在活発に研究が進められており、お互いの位置や速度を把握しつつ、安全に目的地まで自動



図2. 街中を走るコムーターのイメージ

走行することが目標とされている。コンピューターは、これらの自動運転技術に加えて、ライナーとの接続時間調整まで考慮した走行を行う。また、予定通りの接続タイミングを実現するためには、渋滞を発生させないことが不可欠となる。このために、街単位でのモビリティの流動を最適化する全体交通流最適化技術や、そのための情報収集・配信技術が不可欠となる。また、接続時間に余裕があった場合には、その余裕時分を省エネルギーや別のコンピューターを優先させることに使うことで、全体最適を促進する（最適化技術の詳細は、この特集号の論文の“スマート社会を支える先進最適化技術”参照）。

#### 4.3 ライナー

ライナーはコンパクトに集約された街と街を結ぶ長距離、大量輸送を想定した鉄道である。編成は5から最大20両程度で、利用者の規模によって、常にその車両数は柔軟に変化する。例えば、小規模な街を発車した5両編成のライナーは大量の利用客が予想されるメガシティ駅に向かうまでの間、走行しながら効率的に車両を増設していく。このとき、車両間は現在のように物理的に接続する必要はなく、車両間が短い距離を維持しながら追従走行を行うソフト連結が用いられる。

各車両は全て2階建て、室内は半地下階が立ち席、2階がシート席、また、1階に障がい者用パーソナルモビリティ受入れスペースがある（図3）。あらゆる目的、属性の乗客を想定した情報提供サービスの充実、ユニバーサルデザインを駆使した安全な車内環境、需要変動に対応した編成管理で混雑を解消させる等、誰でも不自由なく快適に利用できる車両が完成している。

ライナーは駅でコンピューターからの乗換え客をスムーズに受入れるため、コンピューターとライナーとの間で様々な情報のやり取りが自動で行われる。コンピューターは、現在の乗車人数、利用者の属性情報をライナーに伝える。ライナーはその情報から、例えば、障がい者や高齢者の有無によって、ホームのどの位置にコンピューターが停車すべきかの情報を伝える。またコンピューターからの情報で利用者数を予測して、そのデータを基にライナーは車両数の増減を随時調節することによって、必要十分な車両数で運行し、乗客に不満を抱かせることなく、エネルギーの効率利用を実現する。

しかし、大容量輸送の移動手段であるライナーがコンピューターやパーソナルモビリティからの要求に即時に応じることは困難である。このため、あらかじめ1日の需要予測を行い、需要変動に備えておく必要がある。そして、その精度を高めるために高度な大規模需要予測技術が必要となる。この需要予測は、過去の旅客流動履歴や、都市内の様々なイベント、天候などから作成する。

ライナーは次の駅に到着する前に、コンピューターへの乗換え利用者のためにコンピューターに駅ホームでのスタンバ

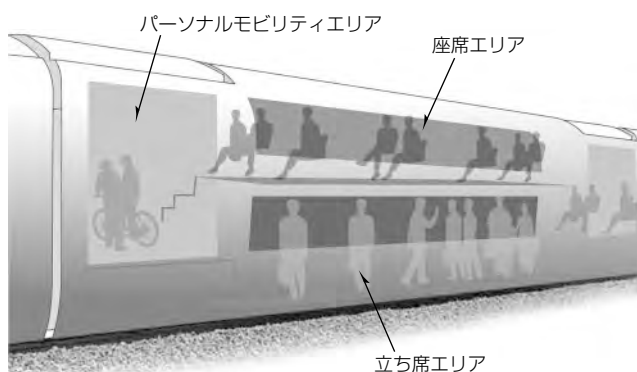


図3. ライナー客室構成のイメージ



図4. 駅でのライナーとコンピューターのイメージ

イを指示する。ライナーは現在乗車している利用者の属性情報からコンピューターへ適切な数、待機場所を算出して伝える。そのコンピューターは乗換え客を乗せて発車した後、利用者ごとの最終目的地にアクセスしやすい乗換え場所で、適宜、乗客をパーソナルモビリティへとつなぐ（図4）。

#### 5. む す び

2050年に向け、鉄道を始めとする移動手段の進化の目標について、今回は“全ての人が平等に安心・安全な外出、移動が可能な社会の実現に寄与する”ことと位置付けた。そこで本稿ではそれらを実現する鉄道のかたち、役割、そこに登場する他の移動手段との連携を中心に述べた。もちろん、その目標の達成のためには、社会を構成する様々な仕組み全体と連動した鉄道の進化が必要となる。同時に、それを維持していくための制度、ビジネスモデル等との連携も不可欠である。

今後、我々はこれら社会の動きと密に連動・連携し、2050年、ここに描いたライナー、コンピューター、パーソナルモビリティが当たり前のように走る、そんな社会の実現を願いながら、今後も技術開発を進めていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 国土交通省：国土のグランドデザイン2050－対流促進型国土の形成－（2014）  
[http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk3\\_000043.html](http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html)
- (2) 日本科学未来館：2050年くらしのかたち  
<http://life2050.jp/>

# スマート化技術が拓く 未来のパーソナルモビリティ

河合克哉\* 松原 勉†  
伊川雅彦\*\* 小中裕喜\*\*  
緑川哲史\*\*\*

*Future Personal Mobility Led by Smart Technologies*

*Katsuya Kawai, Masahiko Ikawa, Tetsuhito Midorikawa, Tsutomu Matsubara, Hiroki Konaka*

## 要 旨

未来の都市空間では、高速通信、高精度測位、環境センシング、ビッグデータ処理などの技術革新によって、完全自動制御による移動が実現され、人々の暮らしは大きく変化する。その中で新たな都市構造が生み出され、人々の移動手段もそれぞれの都市の特徴に特化した形で提供される。

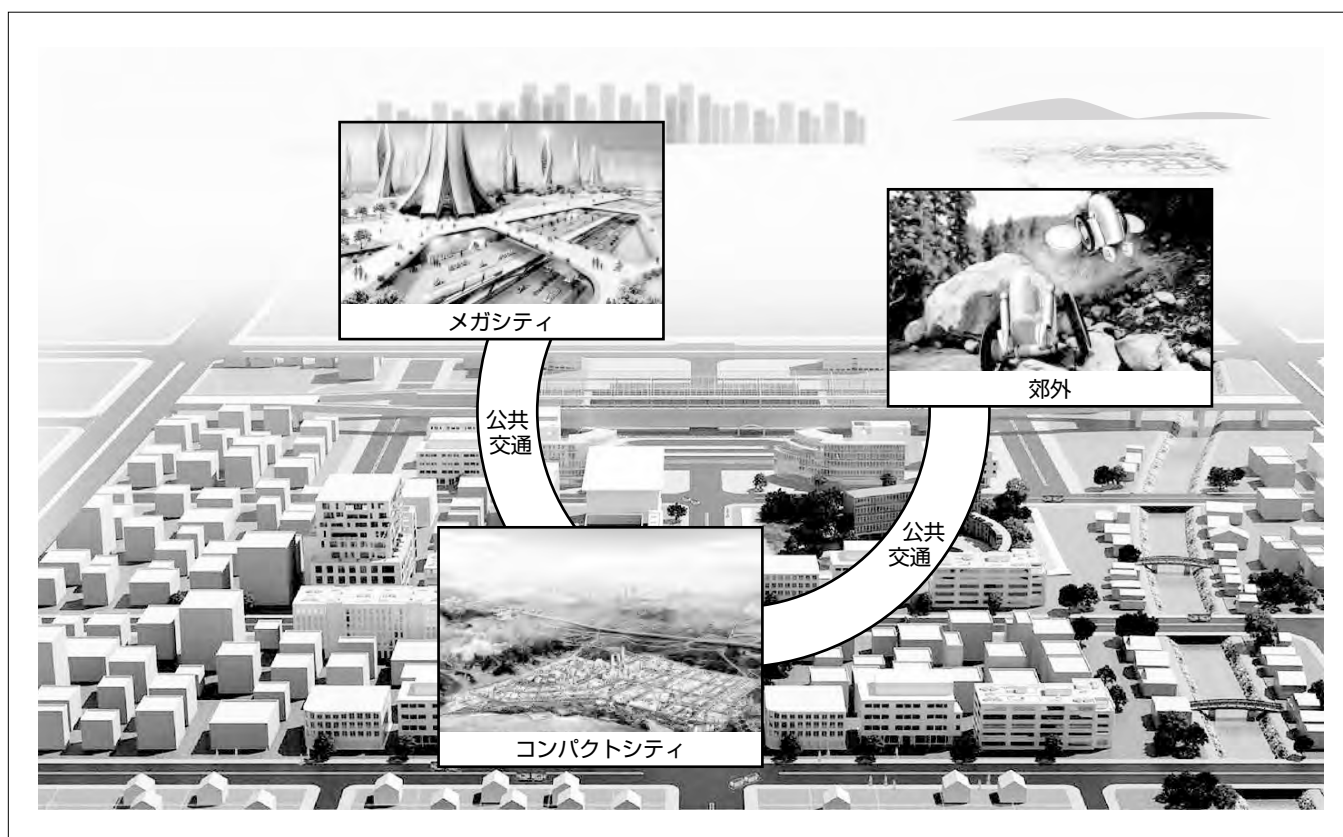
先進国で形成される、都市機能を中心エリアに集約したコンパクトシティでは、自動配車されるパーソナルモビリティ (PM) が近～中距離の移動を担う。ここでは、需要に応じた配車最適化技術、混在する様々な移動手段に対する道路領域最適化技術、移動手段をシームレスに切り換える車体モジュール化・変形技術の進展が課題となる。

一方で、新興国で形成される、都心部へ極端に人口が集

中したメガシティでは、都市の上空や地下空間などを活用して歩行者やそれぞれの移動手段が完全に分離される。ここでは、移動手段全体の移動を最適化するための交通需要管理技術、移動手段ごとの交通流最適化技術の進展が課題となる。

道路インフラや都市機能が整備されない地域でも、状況に応じた適切な移動手段が提供される。ここでは、様々な移動能力を実現するための車体軽量化・小型化技術や姿勢制御技術、自らの移動能力と環境要因から経路を決定する環境センシング技術、事故や急病を検知して自動通報するための人間センシング技術の進展が課題となる。

これらの課題を解決し、全ての人が平等に行きたいところへ行ける社会が実現されるよう、研究開発を進めていく。



## 都市構造の特性に応じた移動手段の提供

未来の都市空間では、その都市構造の特性に応じた移動手段が提供される。コンパクトシティでは、都市機能が中心エリアに集約され、その中でPMや公共交通が混在する。メガシティでは、都市空間が階層化され、移動手段の種別ごとに完全に分離される。道路インフラの整備されない郊外では、災害時などの状況に応じた適切な移動能力を持つPMが提供される。これらの都市の間は公共交通で結ばれる。

## 1. ま え が き

将来の都市空間で個人や個別配送されるモノの安全、快適かつ効率的な移動を可能とする乗り物(PM)と、それを取りまくシステムの概要及び技術的課題を述べる。

2章では未来社会で想定される都市パターンの分類について述べる。3章、4章、5章では、それらの都市パターンごとに、個人に対して提供される移動手段と、その課題を解決するスマート化技術について述べる。

## 2. 想定する未来社会

### 2.1 背 景

国土交通省が発表した“国土のグランドデザイン2050”<sup>(1)</sup>によると、2050年には我が国の総人口は約9,700万人まで減少し、その高齢化率は4割を超えると推計されている。また、アジア新興国の成長によって国際的な都市間競争が激化するなど、グローバリゼーションが地方都市にまで進展すると見られている。その影で巨大災害への不安、インフラの老朽化、資源枯渇や大気汚染といった地球環境問題など課題は山積していると見られる。

一方で、情報通信技術の劇的な進歩によって、多様な情報を統合した知識空間が構築され、現実の空間と高度に結びつけられる。この知識空間では、全ての人とモノが、様々なデバイスで高速なネットワークに常時接続され、リアルタイムでの高精度測位と、周囲状況の正確なセンシング、それに関連するビッグデータが瞬時に処理される。これによって、多くのサービスがバーチャルで提供され、人々を距離の制約から解放する。また、人もモノも完全自動制御でどこにでも移動できることを当たり前のように享受できる時代になっているであろう。

### 2.2 都市構造の変化

このような革新的な知識空間と移動手段を手に入れることによって、人々の暮らしは大きく変化し、新たな都市構造が生み出される。

日本などの先進国では、特に地方都市の人口減少が進み、そのままでは運営継続が難しくなった行政や医療福祉、商業などの、生活に必要な各種のサービスを維持して効率的に提供するため、都市機能や商業拠点が都市の中心エリアに集約されていき、周辺エリアと交通ネットワークで結ばれるコンパクトシティが登場する<sup>(2)</sup>。さらに、規模の小さい都市や集落でも、遠隔医療や配送サービスの充実によって、最低限の生活や医療・福祉を維持可能な小さな拠点(村役場、道の駅など)で生活基盤を維持できるようになる。これらの都市間が物理的、仮想的にネットワーク化された新しい地域構造がかたち作られることで、過疎によるコミュニティ消滅の危機に直面している中山間部への地方回帰を促し、大都市圏への極端な人口集中も緩和され则认为る。

知識空間と移動手段の革新は更に多様な暮らし方を可能とする。限界集落や山間部など、道路インフラや都市機能が整備されない地域でも、通信インフラとPMの高度化によって、状況に応じた適切な移動手段が人々に提供される。

その一方で、発展する新興国では、人口増加によって人・モノが都心部へ集中する。我が国の大都市圏に並ぶメガシティが次々と誕生するであろう。

このように、未来における都市は幾つかのパターンに分類される。その中で、人々の移動もそれぞれの都市パターンに特化した課題を解決する形で提供される。表1における“○”は、それぞれの都市パターンにおける課題、それぞれの課題を解決するスマート化技術を示している。

次に、コンパクトシティ、メガシティ、郊外という未来の都市パターンそれぞれにおける移動手段について、実現に向けた課題と、これらの課題を解決するために必要なスマート化技術を述べる。

## 3. コンパクトシティにおけるPMの課題とスマート化技術

コンパクトシティでは、徒歩での移動が可能な範囲を拠点として最低限の都市機能が集約され、このエリアが生活

表1. 都市パターンごとの課題とスマート化技術

	課題	自動配車	移動の連続性	混在交通	過密交通	様々な移動能力	自動通報	遠隔操作
都市パターン	コンパクトシティ	○	○	○	○	○	○	○
	メガシティ	○	○	○	○	○	○	○
	郊外					○	○	○
スマート化技術	配車最適化	○						
	道路領域最適化			○				
	交通流最適化				○			
	交通需要管理				○			
	環境センシング			○		○	○	○
	人間センシング			○			○	○
	車体軽量化・小型化					○		
	車体モジュール化		○					
	車体変形		○					
	姿勢制御		○			○		○
	操作仮想化							○

の基盤となる(図1)。

### 3.1 自動配車と混在交通

高齢者や障がい者など徒歩での移動が困難な人々も、自宅と駅(停留所)、商業施設、病院などの施設との間、施設内などの移動についてはPMを利用することができる。PMは無人での自動駐車や自動配車が可能であり、無人タクシーのような形態で必要な時に必要な地点に配車されて利用者を目的地に運び、駅や目的地で乗り捨てる共有型の利用が基本スタイルとなる。これによって、利便性が向上するとともに、自宅や施設に隣接した駐車場所を確保する必要がなくなる。限られた設備で効率よく配車するために、ビッグデータ解析によるユーザーの移動需要の予測、高度に集約された予約システムの構築など、配車最適化技術の進展が必要である。

このように近～中距離の移動をPMが担う一方で、公共性の高い施設や商業拠点間、都市中心部と外周部の間といった中～遠距離の移動は、バスなどの都市内公共交通が担う。さらに、点在する各都市間の移動は、ライナーなどの都市間公共交通や都市間高速道路を利用することとなる。都市内ではPM、都市内公共交通と徒歩といった様々な移動手段が混在し、同一の道路空間を共有することとなる。それぞれの安全で円滑な移動を実現するために、移動手段の種別や時間帯、エリアなどを基準とした柔軟なロードプライシング<sup>(3)</sup>などを用いてバーチャルに道路空間を分離・活用する、道路領域最適化技術の進展が必要であると考えられる。

### 3.2 移動の連続性

先に述べたような様々な役割を担う移動手段は、移動の目的や段階に応じてその移動モードを選択でき、シームレスに切り換えることができるようになることで、移動の利便性や効率が更に向上する。例えば、PMは、移動段階に応じて移動エリア・速度・形状が変化する。つまり、施設内や出発地点周辺では歩行型(低速移動に向けた立位型)の形状で歩行エリアを移動し、途中で走行型(高速移動に向けた座位型)に変形して走行エリアを移動する。目的地

周辺では再び立位型に変形する。また、幹線道路では複数のPMが合体することで更なる移動の効率化が図られる。PMから公共交通への切り換えでは、シートのみで車体に変形して公共交通に乗り込むような形態も想定される。これらの実現のため、現在開発が行われているモジュール組立て型スマートフォン<sup>(4)</sup>のように、車体を標準化した様々なブロックの組合せで構築する車体モジュール化技術や、布のように自在に変形可能な素材<sup>(5)</sup>で車体を構築する車体変形技術などが進展する。

## 4. メガシティにおけるPMの課題とスマート化技術

新興国の発展に伴い増加するメガシティでは、集中し過ぎた人口に起因する生活空間の逼迫(ひっばく)や、過密な交通需要によって慢性的に発生する渋滞、交通事故などの社会的損失を低減するため、都市の上空や地下などを活用して空間を効率的に利用する構造改革が行われる。地中でも移動空間は階層化され、地下の深い層を都市内公共交通(地下鉄)、都市間公共交通が走り、それより浅い層をPMが走る(図2)。

### 4.1 過密交通

先に述べたように公共交通とPMの移動空間が分離される中で、さらにPMについては、上空は無人ヘリコプターやドローン、地上は徒歩や歩行型PM、地下空間は走行型PM、輸送専用PM、都市間高速専用PMなど、各移動手段の専用階層として再分化され、完全分離される。

これによって、交通容量の最大化・効率化が図られるとともに、高い安全性が確保されるが、極端に人口が集中した都市では、通勤や帰省など季節・時間帯や突発事象によって過密状態が発生する。これに対して、ロードプライシング<sup>(5)</sup>を活用した高速道路における迂回(うかい)誘導やピークシフト、鉄道の動的ダイヤ変更などの移動手段ごとの最適化が検討されているが、将来的には、全体としての移動手段を最適化するため、ロードプライシングは、個別交通から公共交通へのシフトや発生時間帯のシフトによ



図1. コンパクトシティのイメージ

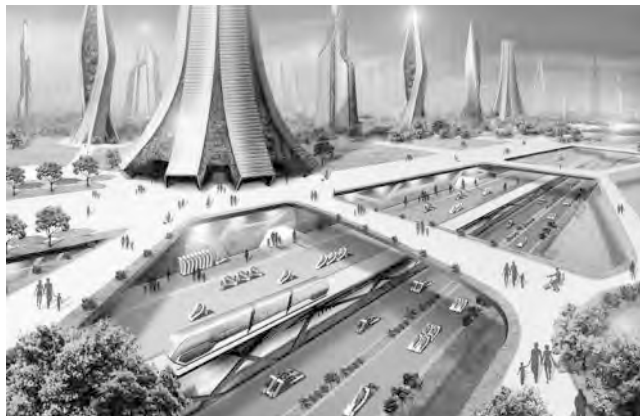


図2. メガシティのPM



て道路インフラが持つ交通容量以下に発生交通量を抑制する高度な交通需要管理技術として発展していくであろう。

また、移動手段ごとの最適化についても、全ての車両の走行経路を把握し、各道路インフラの利用率が一定となるような交通流最適化技術の組合せによって、道路インフラの持つ能力(交通容量)を最大限に活用する形に進化させていくことが望まれる。これを実現するために、メガシティではPMの利用が共有のインフラとして完全に管理される。

## 4.2 移動の連続性

都市内での市民の移動は、コンパクトシティと同様、都市機能の集約化に伴い、徒歩と歩行機能を補佐する歩行型PMが担う。PMは地上から地下へシフトすると同時に歩行型から走行型に変化する必要があるため、コンパクトシティ同様、移動手段のシームレスな切り換えを実現するための車体モジュール化技術や車体変形技術が必要である。

## 5. 郊外におけるPMの課題とスマート化技術

郊外については、整備コスト、環境保全、災害対策の観点から、居住地から拠点までの公共交通や道路インフラの整備・整備が行き届かない箇所が多数存在すると思われる(図3)。

### 5.1 様々な移動能力

こうした状況では、小さな拠点までの市民の移動は、個人の事情や好み、道路インフラ環境の状況などによって全く異なる移動能力を持つ多様なPMが担うことになる。各PMは各個人の要求・要望に応じてカスタマイズされ、専用のPMとして各個人に所有されるであろう。例えば、山の斜面や壊れた橋をホバリングによって飛び超えるPM<sup>(6)</sup>や、悪路や瓦礫(がれき)を移動する脚型・クローラ型のPM<sup>(7)</sup>が実用化されるだろう。このようなホバリング機能を実現するために、現在航空機で使用されているカーボンファイバーなどの素材自体の軽量化に加え、完全自動運転の実用化によって衝突安全のための構造や機構が不要となり、車体軽量化・小型化技術が進展するであろう。また、



図3. 郊外のPM(災害時の例)

三次元空間での移動を実現するために高度な姿勢制御技術も必要であろう。

道路以外の様々な環境も走行可能となるため、水陸両用などのPMが、自らの走行(飛行)能力と環境要因とを判断し、目的地への経路を決定する環境センシング技術が必要である。地図についても従来の道路地図ではなく、PMの能力で検知した情報や通過できた情報をサーバで動的地図情報として集約することが必要となる。

### 5.2 自動通報と遠隔操作

監視インフラの整備されていない地域では、災害・事故や移動者の急病をPMが検知し、自動で通報するとともに、救急センターからPMを操作仮想化技術による遠隔操作で病院まで誘導するような救急医療体制となるであろう。自動通報や遠隔操作の実現のために、物体としてのセンシングではなく、人間の状態や動作のコンテキストを理解可能となるような人間センシング技術が進展するであろう。

## 6. む す び

2050年に想定される都市空間とそこで用いられるパーソナルモビリティ、及びその課題とスマート化技術について述べた。

2050年には、PMを含めた様々な移動手段が連携することで、あらゆる場所に住む全ての人が、何不自由なく、平等に行きたいところへ行ける、そんな社会が実現されるよう研究開発を進めていきたい。

## 参 考 文 献

- (1) 国土交通省：国土のグランドデザイン2050～対流促進型国土の形成～(2014)  
[http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk3\\_000043.html](http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html)
- (2) 国土交通省：コンパクトシティ～より良い暮らしのために～  
<http://www.thr.mlit.go.jp/compact-city/>
- (3) 關 哲雄，ほか：ロード・プライシングー理論と政策，日本交通政策研究会研究双書23(2007)
- (4) Project Ara Official Web Site  
<http://www.projectara.com/>
- (5) BMW of North America：GINA Light Visionary Model  
<http://www.bmwusa.com/standard/content/allbmws/conceptvehicles/gina/>
- (6) Aerofex  
<http://aerofex.com/>
- (7) 磯田隆司，ほか：オフロード走行用のローラ・クローラ型全方向移動ロボット，日本機械学会論文集 C編，65，No.636，3282～3289(1999)

# 未来社会の安全・安心 —社会インフラを中心に—

佐野恵美子\*  
関 真規人\*\*

*Safety and Reliability in Future Society with Focus on Society's Infrastructure*

*Emiko Sano, Makito Seki*

## 要 旨

未来社会では海外でも少子高齢化と社会インフラの老朽化が予測されているが、膨大な人と費用が必要な現在の維持管理の仕組みはいずれ限界を迎える。その一方で、センサ、ロボット、IT等の技術は発展を続けている。様々なデータに位置情報を付加して、その膨大なデータから新しい発見を得たり、高精度測位技術の発達に伴って、各種データに高精度三次元位置情報を付加したりできる社会が到来する。このような未来社会での安全・安心に必要な維持管理の姿を日本の社会インフラを中心にまとめた。

### (1) 現在～近未来

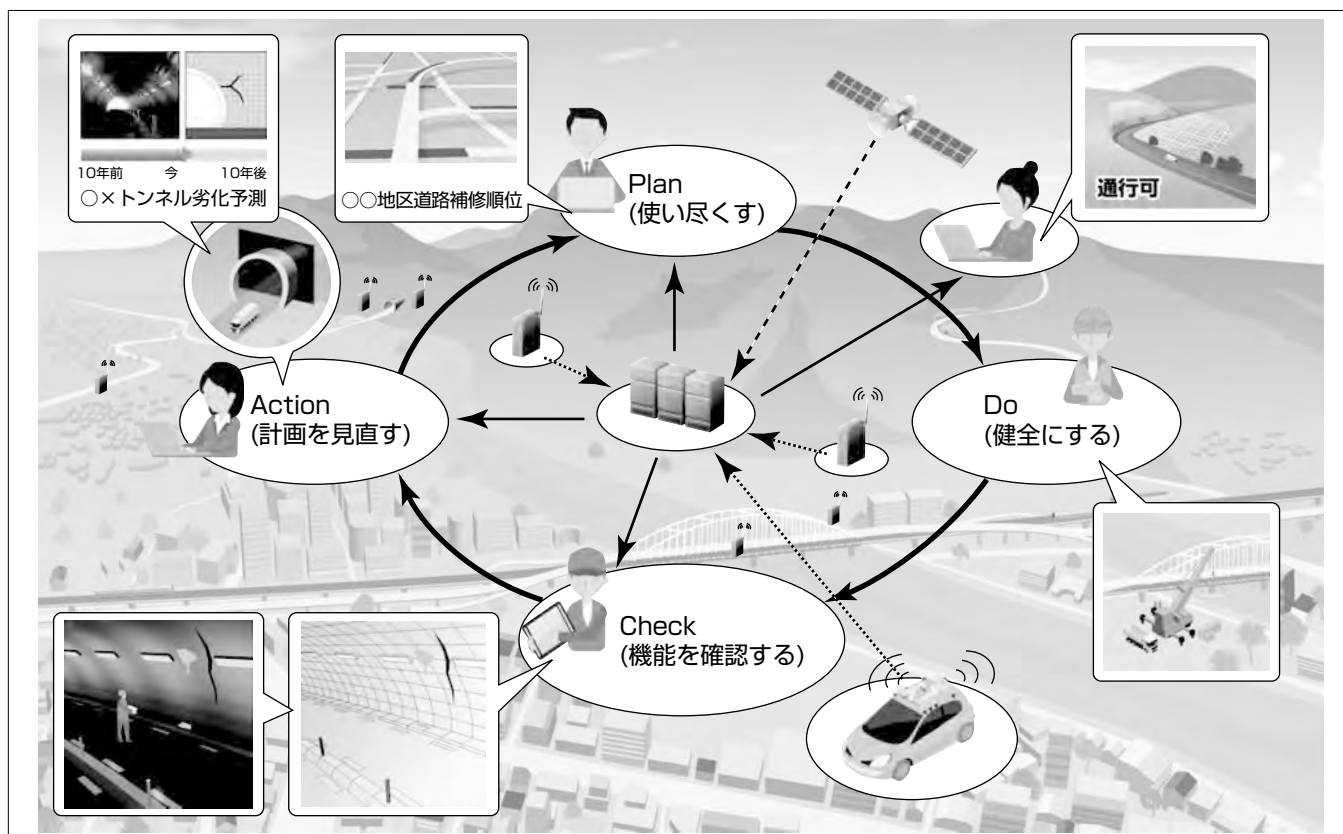
現在の事後保全型からPDCA (Plan, Do, Check, Action) サイクルをまわす予防保全型への転換が進んでいる。三次元形状を持ち複雑に交差するインフラを効率的に点検してPDCAサイクルをまわすために、三次元情報+時

間の四次元情報管理、センサ技術を使ったスクリーニングの一般化、PDCAサイクル上での共通基盤データのフォーマット化が導入される。

### (2) 近未来～未来

更に少子高齢化がすすみ、国土の1/3の地域に人が住まなくなる。安全・安心な社会を実現するためには、社会インフラ単体の維持管理のみならず、災害や交通なども含めて地域全体で安全・安心を確保する。さらに、修理だけではなく新設・廃棄も含めてドラスティックにインフラ資産が活用される。

また、未来社会実現のキーとなる高精度三次元測位技術の代表例として準天頂衛星システムとタブレットなどを用いた三次元モデル構築技術について述べる。



## 未来社会における安全・安心な社会の実現

社会インフラ維持管理のPDCAサイクルと近い概念だが、更に地形や交通流、天候なども考慮して地域全体の安全・安心を守る。

# 1. ま え が き

日本のみならず、世界的に少子高齢化が進行していく一方、安全・安心な我々の社会を支え続けてくれている社会インフラの老朽化が進行している。

本稿では、そのような状況で、何をすれば安全・安心な未来社会を実現できるかを述べる。

# 2. 社会インフラを取りまく世界の姿

日本は長期の人口減少社会に突入しており、2050年には総人口が1億人を切る一方で高齢者率は増加し、2050年には39%が65歳となる少子高齢化社会の到来が予測されている<sup>(1)</sup>。また世界の人口も2050年から減少し、人口大国の中国も含めて世界的に少子高齢化社会へ突入すると予測されている<sup>(2)</sup>。

社会インフラの老朽化はアメリカがいち早く問題に直面している。1930年頃のニューディール政策で大量に整備されたインフラの老朽化が進み、1980年頃には大きな社会問題となり、“荒廃するアメリカ”が1981年に出版された。23年後の2004年の段階でも全体の30%に当たる橋梁(きょうりょう)が欠陥を抱えていた<sup>(3)(4)</sup>。日本はアメリカに30年ほど遅れた1950～1970年代の高度経済成長期にインフラの建設が進み、今、同じように老朽化問題に直面している。内閣府作成の“日本の社会資本2012”<sup>(5)</sup>では17部門にわたる各種社会インフラのストックピラミッドをまとめており、1990年にストックピラミッドのピークがあり、これらの平均耐用年数が30～60年であることに鑑みると、今後数十年で老朽化する設備が急増することが指摘されている。17部門とは道路、航空、鉄道、上下水道などの土木インフラから、治水、治山、農林水産業などの第1次産業関連、公共住宅や都市公園などの建築物、郵便も含んだものである。例えば老朽化の目安である建設後50年を経過する橋梁は2032年には全体の65%、トンネルは47%を占める<sup>(6)</sup>。さらに、現在発展著しい中国などのアジア諸国や中南米も先進国の後を追う可能性が高い。

このような状況下では、次のような深刻な課題が発生する。

## (1) インフラの維持管理費用のひっ迫

国内では2025年に維持管理に必要な費用が投資可能額を上回るという試算がある<sup>(7)</sup>。

## (2) 維持管理業務関係者の減少

資金と人材の不足によって、現状と同等の維持管理が不可能になる時代が到来する。

その一方で、明るい面もある。IT、センシング技術、ロボット技術などの発展は著しい。全てのデータに位置情報がタグ付されるIoT(Internet of Things)社会となり、集まったビックデータの解析から今までは知ることのできなかった情報が得られる社会がやってくる。3章でも触れるが、インフラの維持管理へこれらの技術の活用が進み始め

ている。さらに、衛星やモバイルマッピングシステム(MMS)などを利用した高精度測位技術が進み、地形やインフラの形状を高精度な三次元で表現した地図を誰もが利用できる社会が到来する。また、社会を支えるほとんどの年齢層がデジタルネイティブとなり、SNS(Social Networking Service)、タブレット、3Dグラフィックスなどを当たり前に使う世代になり、先に述べたように発展する技術を最大限に活用することができる。

# 3. 現在から未来への安全・安心な社会

そのような社会における社会インフラの維持管理はどのように変わっていくのだろうか。この章では国内の土木インフラ維持管理を中心に、社会インフラの維持管理に関する動向やあるべき姿を述べる。

## 3.1 過去～現在～近未来

### 3.1.1 過去～現在社会の動向

維持管理には大きく分けて、壊れてから治す事後保全と、壊れる前に治して長寿命化する予防保全があり、現在にいたるまでは事後保全型が主流である。事後保全型の維持管理業務では人手作業が主流で、点検作業では作業員による打音検査や近接目視を行い、点検結果を記録する台帳も紙で保管しているところが多い。特に点検では資格や経験年数を要するなど人のスキルに大きく頼っている面があるため、要件を満たす人員が確保できていない自治体もある。そこに少子高齢化が加わり、ますますインフラ管理業務従事者の減少が問題となりつつある。さらに、人手で検査して検査結果を記録するため、時間がかかり、全国の膨大なインフラの点検が追いつかないという課題がある。一方で、予防保全型への取り組みも少しずつ進んでおり、2004年頃からアセットマネジメントが導入され、自治体では青森県や大阪府がいち早く取り入れている。しかし、大半の自治体では手作業と紙台帳が主流であり、アセットマネジメントの導入までいたっていないのが現状である。

これらの課題に対し、国や自治体、高速道路会社などの土木インフラ管理者は来るべきインフラ老朽化時代に備えて検討を重ねてきたが、2012年の笹子トンネル天井板落下事故をきっかけに一気に改革が加速した。国土交通省の“社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置”では、道路(トンネル、橋梁、舗装、道路路面工・土工構造物、道路附属物)、河川、ダム、下水道、鉄道、公園、住宅にいたる様々なインフラに対し、2014年までに維持管理計画を策定、ITやロボット技術の活用などを進め、2015年から本格的なPDCAサイクル(後述)への移行という方針が出された<sup>(8)</sup>。さらに、2013年には国土交通省のみならず各省庁が連携したインフラ長寿命化基本計画<sup>(9)</sup>の発表、道路法改正による5年に1回の定期点検の義務化など、対策が進んでいる。このように、インフラの維持管理は事後保全か

ら予防保全による長寿命化へ本格的に移行を開始している。

### 3.1.2 現在～近未来の維持管理のあるべき姿

このようにPDCAサイクルを導入した予防保全型へ移行が進む近い将来、維持管理のあるべき姿として重要な考え方を次のように整理した。

#### (1) 三次元情報+時間=四次元情報の導入

インフラの形状や変状を三次元で経時変化が分かるように三次元情報+時間の四次元情報を付加した四次元電子データで管理する。

現在：紙資料、二次元情報

近未来：電子データ、三次元情報+時間=四次元情報

#### (2) 人手とロボットの最適配置

スクリーニングを一般化し、専門スキル保有者とセンサやロボットの得意分野を最大限に生かす。

現状：打音や目視検査から点検結果記入まではほぼ全て手作業で実施

近未来：一部先行しているスクリーニングを一般化する。点検対象をMMSやドローンなどに搭載した各種センサで粗くスクリーニングし、人の目の精度や判断が必要な部分、特に専門スキル保有者の能力が必要な部分を要注意箇所として抽出。最終的には人が要注意箇所を現地やセンサ解析結果から確認し、危険性を判断する。

#### (3) PDCAサイクルをつなぐ

異なるインフラ管理者間(例：隣接する自治体同士、地下エリアを共有する鉄道・道路・ガス・電気・地下街など)のデータのやりとりを簡単にする。

現状：二次元情報の紙資料でのやりとりや、電子データでも相手にあわせた加工をしている。

近未来：PDCAサイクルに共通する必要最小限のデータフォーマットを決定し、異なる管理者でも必要な情報をスムーズにやりとりできるようになる。

(1)～(3)によって、まず現状を把握する点検から始まり、PDCAの次のステップに進み、さらに各ステップを円滑につないでPDCAサイクルを途切れずに回す。図1に(1)～(3)を反映したあるべき姿を示す。

(1)～(3)が導入された維持管理の姿を述べる。ここでは、維持管理におけるPDCAサイクルをC(点検)→A(評価)→P(計画)→D(施工)と定義する。

C(点検)：走行車両によるスクリーニングやセンサネットワークで網羅的に取得した三次元インフラ形状や変状に時間情報を付加し、四次元電子データとして、データベースに蓄積する。そのデータを基に人が最終点検を行い、その結果は更にデータベースに蓄積される。これによって、限られた人員・費用で点検が実施できる。

A(評価)：修繕計画やライフサイクルコスト見直しに必要な情報を解析する。あるべき健全な姿とC(点検)で得られた差異を把握し、必要に応じて劣化診断も実施する。こ

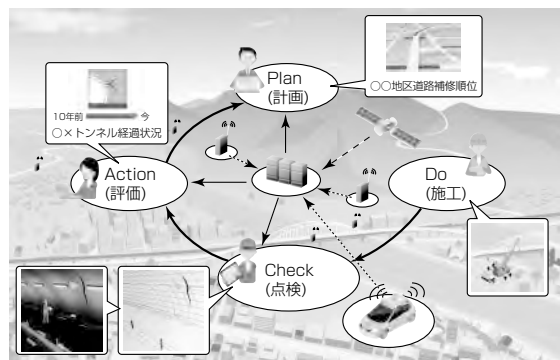


図1. 近未来での社会インフラ維持管理の姿

こで、電子データによる四次元情報管理が生きてくる。変形や歪(ひず)みなどの経年変化の把握、特に形状変形が大きい新設時からの変化把握が可能になり劣化診断に大いに役立つ。

P(計画)：修繕計画やライフサイクルコストの算定などを行い、今後の維持管理計画を策定する。ここでも四次元情報管理の利点が生かされる。道路1本だけではなく、鉄道の高架橋と道路の交差のように管理者の異なるインフラの位置関係などの把握が容易になり、相互の影響を見込んだ管理計画を策定することができる。

D(施工)：壊れる前に小規模補修や大規模修繕を行う。

### 3.2 近未来～未来

#### 3.2.1 近未来～未来社会の動向

老朽化インフラの増加と少子高齢化はますます進み、国土交通省発表の“国土のグランドデザイン<sup>(10)</sup>”では、2050年には約6割の地域で人口が半分以下になり、そのうち1/3の地域には人が住まなくなると予測している。

一方、インフラ維持管理に関する技術発展は進み、また、インフラ長寿命化基本計画<sup>(9)</sup>では予防保全への転換、データベースやプラットフォームなどのIT技術、各種センサやロボットの開発・導入を経て、2030年ごろをめどに老朽化に起因する重要インフラの重大事故をゼロにする目標を掲げている。さらに、高精度測位社会の基になる三次元地図の整備は進み、社会インフラの維持管理、自動走行、防災・減災など様々な分野で活用されるだろう。

#### 3.2.2 近未来～未来社会の維持管理のあるべき姿

人が住む地域が縮小を続ける中で、少ない人・資金で安全・安心を維持するためには、どのような姿であればよいのか。ここで、“社会インフラのみ”を“維持管理する”という概念から更に発展させた姿を考える。

##### (1) 社会インフラから街全体へ

社会インフラ単体の維持管理のみならず、地形や交通流、天候なども含めて地域全体で安全・安心を守る。

##### (2) 維持管理から資産活用へ

インフラの機能維持だけではなく、周辺情報も活用してインフラが持つポテンシャルを使い切る。

維持管理の姿(要旨の図)の基本は図1と同じであるが、PCDAをより広い概念で考え、D(健全にする)→C(機能を

確認する)→A(計画を見直す)→P(使い尽す)と定義する。

D(インフラ網を健全な状態にする)：

- (1) 機能が健全な状態を維持する⇒何もしない
- (2) 機能が不健全な状態から回復する⇒補修、新設(施工)
- (3) 機能が不健全な状態なので廃棄する⇒取り壊し

C(インフラ網としての機能を確認)：

- (1) インフラが支えているもの(交通、水など)
- (2) インフラそのもの(点検対象)
- (3) インフラを支えるもの(土壌、天候、地形など)

A(Cの結果とDの目指す姿との差分からPの修正箇所を抽出)：

- (1) Cの結果から劣化予測、ライフサイクルコストの算出
- (2) Cの(1)～(3)を総合的に見てA-(1)をさらに見直し

P(インフラ網の価値を増大させる)：

限られた人・資金の資産を最大限に活用して、保有のインフラ網を資産として最大限に使い切る計画を立案する。

- (1) 気候や交通流、イベント情報などの周辺環境も含めてインフラ網を生態系のように考える。
- (2) 国土のグランドデザイン<sup>(10)</sup>に連動し、新設や廃棄も含めたドラスティックな活用や、既存インフラの能力を使い切る(例：周辺環境も含めたデータ分析による危険箇所の事前改善など)。

未来社会では、3. 1. 2項での近未来社会の姿よりも様々な管理者同士での連携が必要になったり、国土の縮小とインフラの取捨選択というシビアな判断を迫られることになるため、技術開発のみならず制度の策定が重要になるであろう。

#### 4. 未来社会を支える三次元測位技術

安全・安心な未来社会には、高精度測位やセンサ、ロボット等の様々な技術が必要となる。これらのキーとなる技術の1つとして三次元測位技術について述べる。

##### 4.1 屋外での三次元測位技術—準天頂衛星システム

準天頂衛星システムは様々な利点があるが、①センチメートル級測位が可能、②衛星からの“放送型”であるため1つの配信元から多数のユーザーに配信可能という2点が特に重要である。①によってセンチメートル級の高精度な三次元位置情報を様々なデータに付加したり、高精度測位による屋外地図の作製が可能になり、また②によって来るべきIoT社会での多数の爆発的ユーザー増に対応可能となる(図2)。

宇宙基本計画(2015年1月9日、宇宙開発戦略本部)によれば、準天頂衛星システムは2023年度に7機体制になる予定であり、高精度測位社会実現への大きな進歩が期待できる。

##### 4.2 屋内での三次元測位技術

三次元センサを搭載したカメラやタブレットを用いて、様々な方向から物体を撮影することで物体全体の三次元モデルを構築する技術である(図3)。ビルや地下街の三次元モデルを簡単に構築することができる。

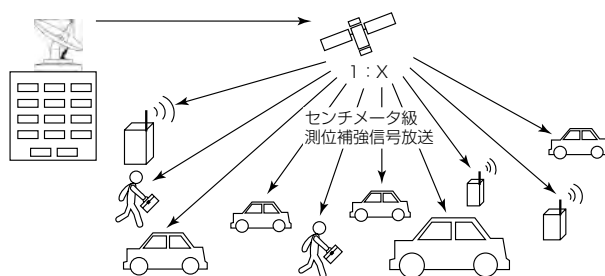


図2. 準天頂衛星システムの高精度測位

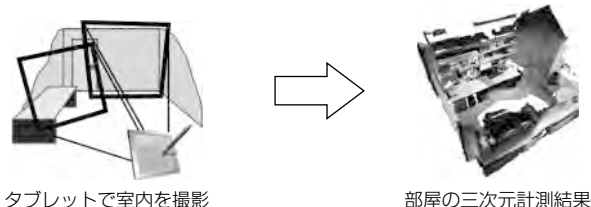


図3. 三次元モデル構築技術

## 5. む す び

社会インフラ維持管理の目的は安全・安心な社会の実現であり、未来社会では社会インフラから更に発展し、地形や交通流、天候なども含めた地域全体としての安全・安心を守るための姿を示した。このような未来社会の実現のためには、三次元情報+時間の四次元情報管理を基にして、センサ、ロボット、IT技術の更なる発展、高精度三次元測位による自然地形や建物内も含めた地図とIoT化の促進、これらを扱うビックデータ解析技術の発達があってこそ実現する社会であり、これらを支えることが当社の使命である。

## 参 考 文 献

- (1) 内閣府：平成25年版 高齢社会白書 第1章第1節1(2)
- (2) ヨルゲン・ランダース：2052—今後40年のグローバル予測—、日経BP社(2013)
- (3) 国土交通省：国土交通白書2014、第I部第1章第3節
- (4) 国土交通省：平成18年度国土交通白書、第II部第1章第2節(2006)
- (5) 内閣府政策統括官(经济社会システム担当)：日本の社会資本2012(2012)
- (6) 国土交通省：各府省庁のインフラ老朽化対策の状況、第1回インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議(2013)
- (7) 日経コンストラクション(編)：インフラ事故(2013)
- (8) 国土交通省：社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置(2013)
- (9) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画(2013)
- (10) 国土交通省：国土のグランドデザイン2050～対流促進型国土の形成～(2014)

[http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk3\\_000043.html](http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html)



# 未来の生産システム

古澤康一\*  
大谷治之\*

## Manufacturing Systems of Future

Koichi Furusawa, Haruyuki Otani

### 要 旨

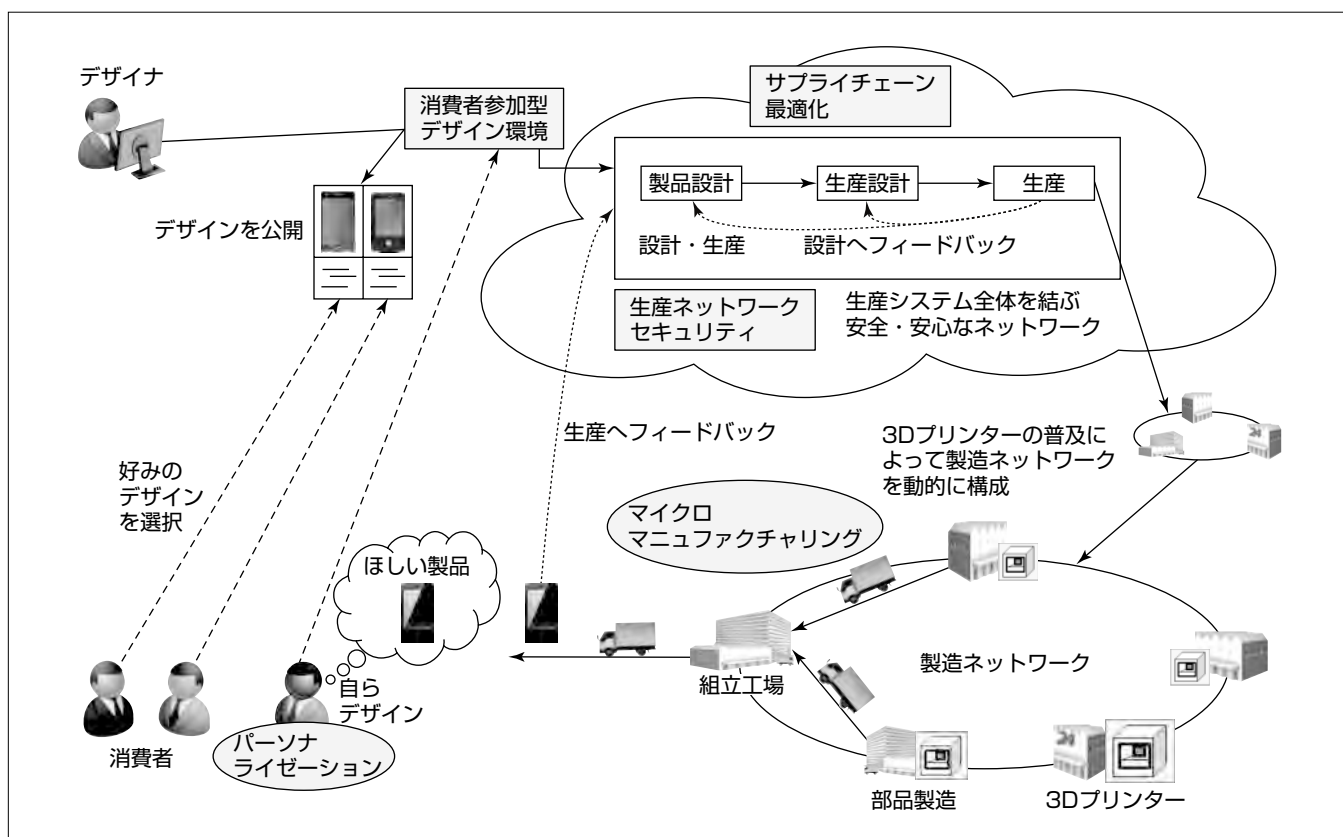
近年の製造業は、多様化する消費者ニーズに対応して、カスタマイズした製品の生産を行っている。先進国では、更に消費者ニーズの多様化が進み、消費者ごとの嗜好(しこう)に合せた製品を提供するパーソナライゼーションの時代を迎えている<sup>(1)</sup>。それに対応したコスト最適な生産を実現するため、多品種少量生産に有用な3Dプリンターが実用化されつつあり、3Dプリンターを備えた小さな近隣の工場で製品が作られるマイクロマニュファクチャリングが行われようとしている<sup>(2)</sup>。

こうした状況の中、三菱電機では、“e-F@ctory”というコンセプトを掲げ、生産現場の設備、品質、エネルギー使用量等の情報の見える化の実現によって顧客のトータルコスト削減、企業価値向上に貢献してきている<sup>(3)</sup>。欧州で

はドイツがIndustrie4.0(第4次産業革命)と呼ばれる国家プロジェクトを2011年から実施し、パーソナライゼーションに対応しようとしている。米国ではGE社が中心となって、IIC(The Industrial Internet Consortium)を立ち上げて、大量データの分析・活用サービスを提供する取組みを実施している。

未来の生産システムを実現するため、今後、消費者側の観点からは、消費者自ら製品のデザインを行える環境が求められる。生産者側の観点からは、マイクロマニュファクチャリングが普及したときに、それらの工場間で製品の物流(サプライチェーン)最適化が重要になると考えられる。

本稿では、未来の生産システムについて述べ、現状の取組みや今後必要となる取組みについて述べる。



### 未来の生産システムのイメージ

現在、製造メーカーが製品の企画・設計を行い、製品を生産しているが、未来は、製品のパーソナライゼーションが進み、クラウド上のコミュニティの中でバーチャルに生産が行える環境が構築され、個人のデザイナーや消費者自らが製品のデザインを行えるように、消費者参加型のデザイン環境が構築される。また、製造では、3Dプリンターを持つ小さな工場がネットワーク化され、物流も含めて生産全体で最適にモノが作られるようになる。

## 1. ま え が き

近年、製造業における消費者のニーズは多様化しており、それらのニーズにいかに対応していくかが重要になってきている。そうした動きに対して、欧米では、進歩の著しいITを活用した、国を挙げての取組みが盛んになってきている。

本稿ではそうした動向を踏まえて、未来の生産システムとその実現に向けた取組みについて述べる。

## 2. 未来の生産システム

世の中の動向から想定される未来のモノづくりと、それに対するあるべき生産システムについて述べる。

### 2.1 大量生産からパーソナライゼーションの時代へ

これまでの製造業の歴史を振り返ると、1900年代以前では、すべてが手作りで非常に労力をかけて製品を製造するのが一般的であった。生産性も低く、品質も不均質で流通も限られていた。1900年代に入ると産業革命によって生産は劇的に変化する。自動車生産におけるフォード生産方式のように、製造ラインが導入されて大量の製品を均質に低コストで生産できるようになった。これによって、多くの人が低価格で様々な製品を手に入れることができるようになった。2000年代に入ると、製品に求められるニーズは多様化し、生産では、マスカスタマイゼーションと呼ばれる方式で対応するようになってきている<sup>(1)</sup>。これは、製品及び生産設備をモジュール化し、それらを組み合わせることによってバリエーションを増やす生産方式である。これによって、ある程度カスタマイズした製品を低コストで生産可能となる。

今後は、市場のグローバル化によって地域に応じた製品のカスタマイズが必要になる。また、先進国では人が製品に対して求める多様性はますます進んでいく。そのため、未来の生産システムでは、図1に示すように、一人ひとりの嗜好(しこう)に合わせた製品をそれぞれ個別にこれまでと同様のコストで生産して、提供できるようになるパーソナライゼーションが求められるようになる<sup>(1)</sup>。更には、消費者自らがデザインした製品や、個人のデザイナーがデザインした製品を注文できるようになると予想される。そうした時代には、製品を個別に生産して、好みに合った製品を提供できるような消費者と生産者が連携できる生産システムが実現していると考えられる。

### 2.2 マイクロマニュファクチャリング

パーソナライゼーションの実現に向けて、3Dプリンターの実用化によって、現在大きな変革が起きようとしている。3Dプリンターでは、製品が複雑な形状であっても、そのデジタル化された設計図さえあれば、どこでも誰でもそのデータに基づいて同じものを均質に製造することができる。

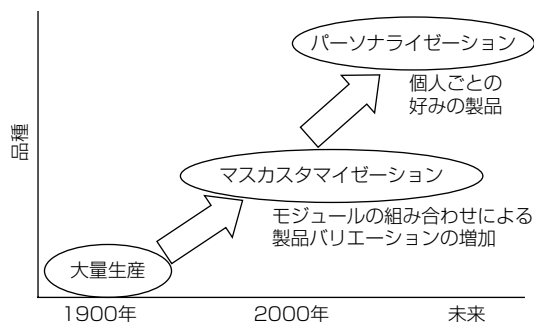


図1. 大量生産からパーソナライゼーションへ

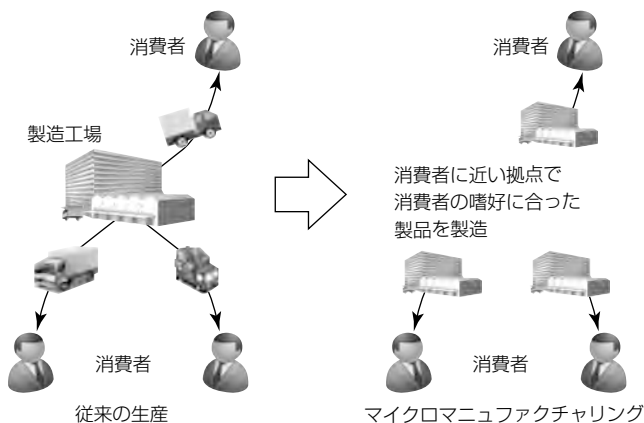


図2. 従来の生産とマイクロマニュファクチャリング

マイクロマニュファクチャリングは、図2に示すように、小規模な工場で3Dプリンターを活用し、消費者ニーズにあった少量の製品を短期間で製造するというものである。消費者に近い拠点で生産できるため、物流コストも低減することが可能となる。既に米国のローカルモーターズ社では、オークリッジ国立研究所と共同で、巨大な3Dプリンターによって自動車のボディのプリントを実現している<sup>(2)</sup>。現在もプリント時間の短縮や精度の向上に取り組んでおり、今後は量産できるようになっていくと思われる。

未来には、3Dプリンターで部品を製造する小さな工場が各地に配置され、それらがネットワーク化されて、最適なコストと納期で製品を作り上げる仕組みができていると想定される。そのような環境では、消費者が注文したら、その場所に応じた近隣の最適な工場で製品が製造され、すぐに消費者の手元に届くようになる。

## 3. 生産における技術動向

現在の製造業で取り組まれている生産に関わる国内、欧州及び米国の主な技術動向について述べる。

### 3.1 FA統合ソリューションe-F@ctory

生産現場では、生産性の向上のほか、生産コスト削減、省エネルギー等、多くの課題を抱えている。これらの課題を解決するためには、設備、品質、エネルギー使用量等、様々な情報の見える化が重要である。当社では、顧客の生産情報の見える化、エネルギーの見える化、安全の見える

化の実現によってコスト削減、企業価値向上を支援するFA統合ソリューションe-F@ctoryに取り組んできている<sup>(3)</sup>。

FA統合ソリューションe-F@ctoryでは、生産現場の生産実績、稼働実績、品質情報、エネルギー使用量等の生データをリアルタイムに収集し、それらのデータをITシステムにとって使いやすい情報に変換してITシステムと連携し、工場の見える化を実現している。e-F@ctoryの情報連携によって、生産情報が見える化して設備稼働率の向上、不良品の削減、生産計画の精度向上、サプライチェーンも含めた計画変更への迅速な対応を可能としている。また、エネルギーの見える化によって省エネルギー・エネルギー監視を推進し、製品情報の見える化によって製品の流通情報を把握するシステムを容易に構築することができる。

当社の今後のe-F@ctoryの取組みとして、先に述べた見える化に加えて、人にしか気づけない経験やノウハウを活用し、製品のライフサイクル全体にわたった改善に向けて、データ分析や生産・設計へのフィードバックを実現することが重要である。そのためのデータ収集・分析から生産現場へのフィードバックまでのPDCA (Plan, Do, Check, Action)を実現するプラットフォームを提供していく。また、リモート監視等の一部で行われているクラウド活用が、今後他の情報システムにも広まることが予想されるので、生産現場がクラウドとも連携して更なる利便性を提供していけるように取り組んでいく必要がある(図3)。

### 3.2 Industrie4.0

欧州では、ドイツがIndustrie4.0と呼ばれる国家プロジェクトを推進している。その中で、2章で述べたパーソナライゼーションに関連して、個人ごとに異なる注文に対し、短期間で製造・配送を実現するための技術開発が行われている。

取組みの1つとして、製品の品種に応じて生産設備が順応して柔軟に多品種少量生産を実現する適応型生産と呼ばれる技術がある<sup>(4)</sup>。適応型生産を実現するには、次に挙げるような柔軟性を持つ生産設備が求められる。

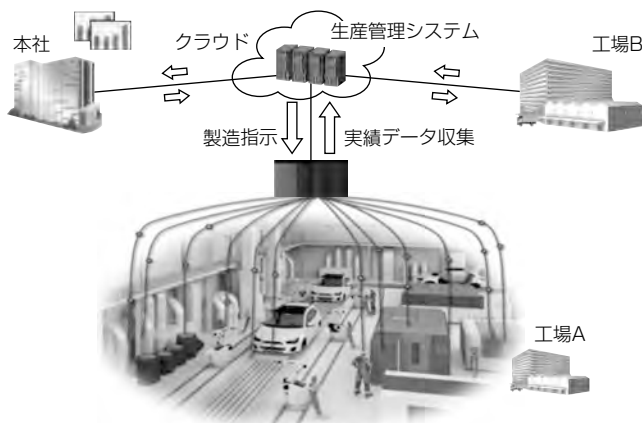


図3. e-F@ctoryの一形態

- (1) 同じ設備で多品種生産が可能なこと
- (2) 生産量を容易に変更可能なこと
- (3) 各設備(制御)の順序を入れ替え可能なこと
- (4) 生産品のカスタマイズが可能なこと

また、同じ生産設備で多品種生産に対応する場合、生産計画に合わせて各生産設備の制御を変更する必要がある。各生産設備のサイクルタイムは生産効率に直接影響を与える重要な要素となるので、変更される制御に合わせて動的に適切なサイクルタイムに調整する必要がある。製造に関わる情報をデジタル化したデジタルマニュファクチャリングを使ってサイクルタイムに関するシミュレーションを実施し、生産性能と生産時のエネルギー消費量のバランスを見て最適なサイクルタイムを決定する取組みが行われている<sup>(4)</sup>。

他の取組みとして、ロジスティクスで、リアルタイムに現在の状況を把握し、必要に応じてロジスティクスの再計画や各種作業の変更を行う適応型ロジスティクスと呼ばれる技術がある<sup>(5)</sup>。図4に示すように、Industrie4.0では、変化し、複雑化するロジスティクスの制御を集中管理型から分散管理型にする。分散管理型の制御では、各物流拠点は目的地以外の指示を外部から受け取ることなく、それぞれの拠点が互いに対話し、意思決定できる。これによって、ロジスティクスの制御処理が分散され、柔軟で効率の良い制御が可能となる。

### 3.3 IIC(The Industrial Internet Consortium)

米国では、あらゆるモノがインターネットにつながるIoT(Internet of Things)に関わる取組みが活発である。IoTの取組みに関連したコンソーシアムとして、IICが2014年3月にGE社やシスコシステムズ社を中心に設立された<sup>(6)</sup>。IICは、製造を始め、交通、電力・水、医療の各種業界を対象として、産業へのインターネット技術適用の加速やIoT適用によるイノベーション創出を目的としている。

IoTに関連したデータ活用の取組みは、GE社が進んでおり、ジェットエンジンの保全サービスの事例がある。ジェットエンジンにセンサを埋め込み、IoTによってセン

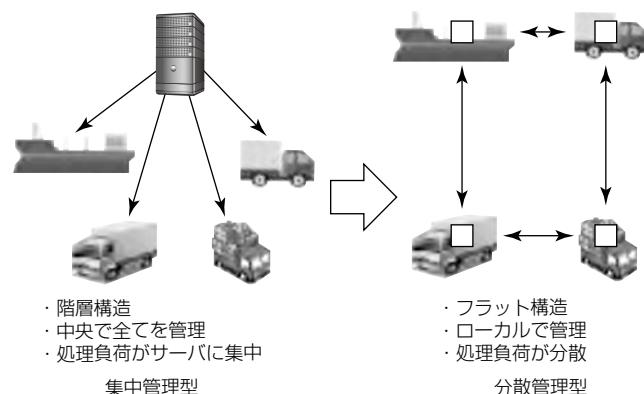


図4. 適応型ロジスティクス

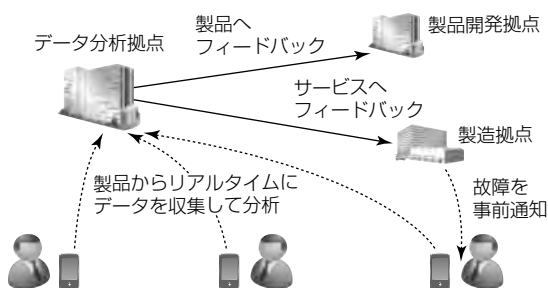


図5. IoT活用による生産へのフィードバック

サから得られる大量のデータを分析、監視することによって、エンジンの故障時期の予測を行う保全サービスを提供している。

これはジェットエンジンの例であるが、一般消費者の製品でも同様に製品からのデータに基づいて、製品を使っている人に故障する前に通知するサービスを提供することができる(図5)。また、製品の使用状況や使い方をデータとして分析し、消費者が使いやすい製品の開発やサービス提供等のニーズに合わせた対応もできるようになる。

#### 4. 未来の生産システムを実現するために

2章で述べた未来の生産システムを実現するために、今後必要となる取組みについて述べる。

##### 4.1 消費者参加型デザイン環境

未来の生産システムでは、パーソナライゼーションが進むため、消費者個人に合った製品を提供する必要がある。そのためには、消費者の嗜好に合った製品を簡単にデザインできる環境、又は、デザイナーが様々な製品をデザインし、それらの中から消費者が自分好みの製品を選んで簡単に注文できるような環境が重要になってくる。

先に述べた消費者参加型のデザイン環境をクラウド上で提供し、いつでも誰でも自分好みのデザインの製品を簡単に注文して手に入れられるようにするための環境の整備が今後の取組みとして重要になってくる。

##### 4.2 サプライチェーン最適化

製造の観点では、3Dプリンターの性能や精度が向上し、製品の生産に本格的に導入されてマイクロマニファクチャリングが進行し、消費者の近郊の各拠点での生産が可能になる。そうした環境で、製品の各部品の製造や部品の組立てを行える小さな工場群がネットワークで接続され、注文した消費者のロケーションに応じて、最適な物流コストで短時間に生産するためのサプライチェーンを動的に構成して製品の生産を行えるようにする必要がある。

最適なサプライチェーンを構築できるようにするためには、数多くの工場が相互にネットワークでつながり、共通のインタフェースで連携できる仕組み作りが重要になる。また、それらの共通のインタフェースの標準化も必要になる。

#### 4.3 安全・安心なネットワークセキュリティ

先に述べた消費者参加型のデザイン環境やサプライチェーン最適化の実現のためには、消費者を始め、生産に関わる各工場がネットワークにつながり、相互に情報を連携させる必要がある。その際、ネットワークのセキュリティを確保し、その安全性が保証されなければ、それらの環境の利用が促進されない。

利用者が安心してネットワークを介してクラウド上の環境にアクセスしたり、クラウド上にデータを格納・蓄積できるようにするために、ネットワークのセキュリティに対する取組みが重要である。今後、こうした環境の普及のためには、セキュアな通信を保証する技術、クラウド上のデータを守る暗号化技術、データに対して許可された人だけにアクセスを許すアクセス制御技術等に対する取組みが非常に重要になる。

#### 5. む す び

未来の生産システムと技術動向について述べ、未来の生産システムの実現に向けて必要となる技術について述べた。

今後、ますます多様化する消費者ニーズに対してモノづくりが大きく変わっていくと予想される。当社は、IT技術を活用して消費者ニーズに対応していくために、安心してクラウド上の情報システムに接続できる製品の研究・開発・製造を行い、e-F@ctoryで未来の生産システムを実現していく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems, Wiley Series in Systems Engineering and Management (2010)
- (2) Local Motors  
<http://www.localmotors.com>
- (3) 森田英昭：FA用コントローラの技術革新と適用分野拡大、三菱電機技報, 88, No. 9, 508～513 (2014)
- (4) Lepratti, R., et al.: Dynamic cycle times for adaptive manufacturing control in automotive flow shops, 2013 XXIV International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT) (2013)
- (5) Gath, M., et al.: Agent-Based Dispatching in Groupage Traffic, 2013 IEEE Workshop on Computational Intelligence In Production And Logistics Systems(CIPLS) (2013)
- (6) The Industrial Internet Consortium  
<http://www.industrialinternetconsortium.org>



# スマート化技術で進化する未来のビル

三浦健次郎\* 神田準史郎†  
鈴木直彦\*\* 小林信博†  
澤 良次\*\*\*

## Smart Technologies for Future Buildings

Kenjiro Miura, Naohiko Suzuki, Yoshitsugu Sawa, Junshiro Kanda, Nobuhiro Kobayashi

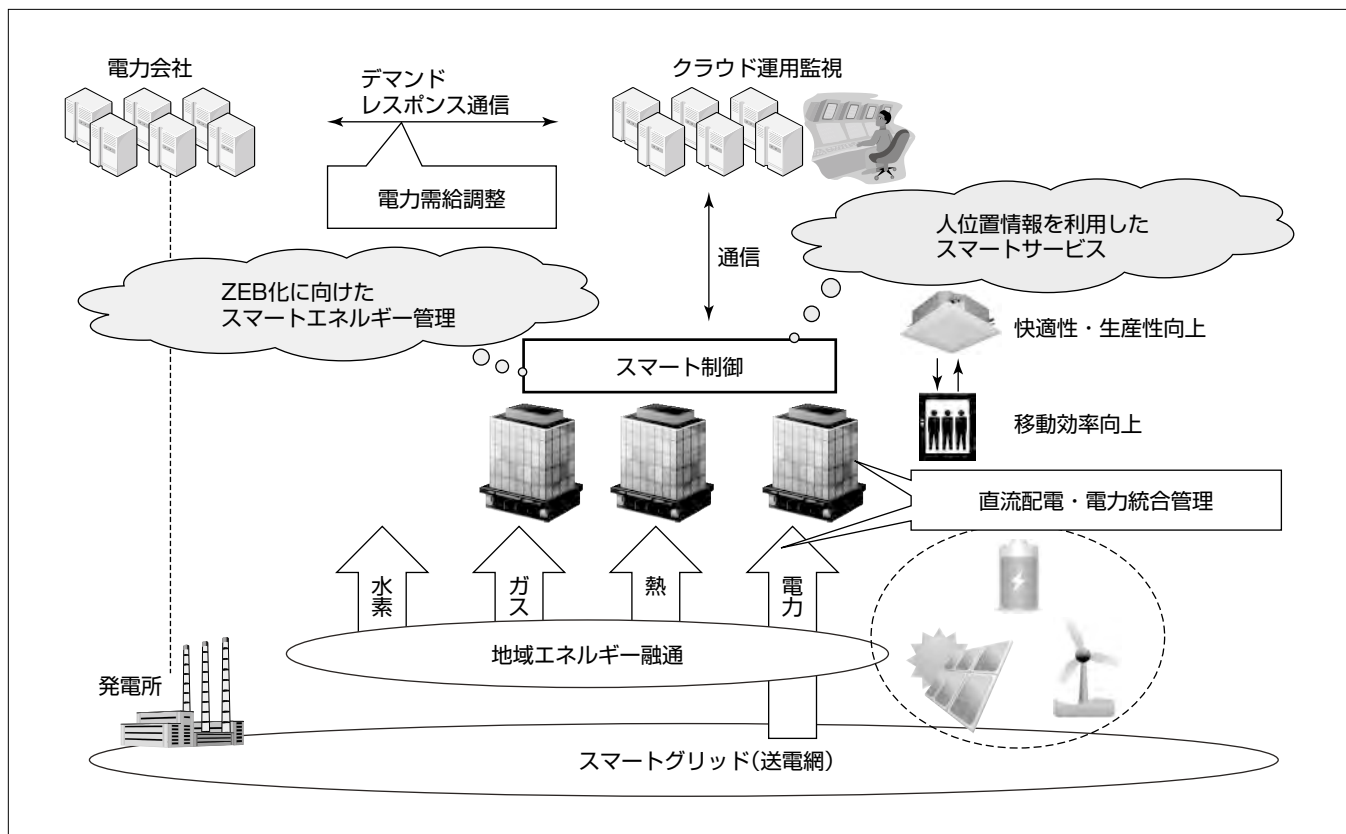
### 要 旨

今後、世界的な人口増大と都市への集中が進み、2050年には世界人口91億人の約7割が都市に住むと予想されている。都市への人口集中によってビルの高層化が進むため、ビルのエネルギー使用量や環境負荷(CO<sub>2</sub>)の低減が課題となる。このため、未来のビルでは、ZEB(Zero Energy/Emission Building)を目標に、エネルギー使用量や環境負荷を低減する技術が重要になる。具体的には、スマートグリッド技術や、交流・直流のハイブリッド管理技術、さらに、未利用熱(排熱等)、コジェネレーションシステム(ガス等)、燃料電池(水素)等のエネルギーを総合的に管理・融通する技術が鍵になる。エネルギー管理のスマート化技術でビルのエネルギー使用量や環境負荷を減らし、再生可能エネルギーを利用したエネルギーの地産地消化を進めていくことが重要と考える。

また、未来のビルを利用者視点で考えてみると、屋内の人位置情報を利用したスマートなサービスの実現が鍵になる。入退室管理システムの人位置情報や、スマート端末の位置情報などを統合管理し、セキュリティ・防災対策や、人位置に応じた設備制御によって快適性・生産性を向上させる技術が求められると予想する。また、ビル内のナビゲーション実現や人位置情報とエレベーターの連携によってビル内移動や保守の効率化が実現される。

三菱電機は、スマートグリッドなどのエネルギー管理のスマート化技術及び人位置情報を利用したビル内環境の快適性、移動の効率性等を向上させるスマート設備制御の研究開発を進めていく。

本稿では、スマート化技術で進化する未来のビルを30年程度のオーダーで検討した内容を述べる。



### 未来のビルのスマート制御

世界的な人口増大と都市への集中が進み、2050年には世界人口91億人の約7割が都市に住むようになる。ビルの高層化が進むため、ビル全体ではエネルギー使用量や環境負荷(CO<sub>2</sub>)低減、ビル利用者向けには位置情報応用サービスの実現が重要になる。当社は、スマートグリッドなどのエネルギー管理のスマート化技術及び人位置情報を利用したビル内環境の快適性、移動の効率性等を向上させるスマート設備制御の研究開発を進めていく。



## 1. ま え が き

インターネットを中心とした情報通信技術の進展はめざましい。スマートフォンとクラウドの連携で、いつでもどこでも必要な情報を手に入れられる時代が実現した。これは約30年前の1980年代半ばに実施された通信自由化の果実と言える。

今後30年、先進国、新興国とも都市への人口集中が続き2050年には約7割の人口が都市に住むようになる<sup>(1)</sup>。これに伴いビルの高層化が進むため、情報通信技術を活用したビルのエネルギー管理のスマート化が重要になる。

また、未来社会ではスマートフォンの進化型の端末(スマート端末)で、ビル内の自分の位置をシステムに知らせることによって、快適性・利便性を向上させるサービスが実現されるであろう。

本稿では、ビルのエネルギー管理のスマート化技術を中心に、ビル利用者の快適性、利便性や安全・安心を実現するスマート化技術についても展望する。

## 2. 将来のビル管理システムの概要

将来のビル管理システムの概念を図1に示す。ビルのデータ分析や運用計画を立案する機能は、クラウド上の機能として実現されるようになる。例えば、エネルギー管理の最適化を行う場合、天気予報などを利用して大量のデータを様々な観点で蓄積・分析することが容易だからである。

ビル管理システムはクラウドとの接続が前提になり、ビル側には運用計画を実行する制御機能と簡易なゲートウェイ機能を持つ機器を配置して管理・制御する。運用管理者のいない中小ビルでスマート制御を行う場合、特にこのようなシステム構成が適切である。

また、運用計画と実績の誤差を小さくするために、運用シミュレーション機能も重視されるようになっていく。BIM(Building Information Model)を利用して、ビルの構

造や設備のモデル化を行い、空調や照明の運用シミュレーションによって計画を立案することが一般的になるだろう。

## 3. ビルエネルギー管理のスマート化技術

### 3.1 ZEBを目標にした技術開発の進展

今後30年はZEBを目標に、ビルのエネルギー使用量やコスト、CO<sub>2</sub>等の環境負荷を低減するスマート化技術の研究開発が進んでいく。電力系統との需給調整自動化、空調・照明等の動的制御によるピーク電力平準化や省エネルギー技術の進化、さらに、太陽光発電等による創エネルギー、蓄電池・給湯器等による蓄エネルギーを連携・統合管理するビル管理システムの開発が進む。

### 3.2 デマンドレスポンスへの対応とピーク電力平準化

政府の電力システム改革の工程表では2016年に小売完全自由化、2020年に発送電分離が予定されている。今後、電力需給の逼迫(ひっばく)度合いに応じ、系統側から節電要請がなされ、電気料金は需給の逼迫度合いに応じて変動することが想定される。このため、電力需給調整技術が重要であり、デマンドレスポンス通信の標準化、空調等のピーク電力抑制技術の研究開発が進んでいる。

電力需給調整を行うデマンドレスポンス通信は、国内ではOpenADR2.0b(Open Automated Demand Response)プロトコルを標準に位置付け、技術開発やピーク時間帯の節電実証実験が進められている。マルチベンダーの相互接続性実証試験は早稲田大学の新宿EMS(Energy Management System)実証センター<sup>(2)</sup>を中立的な機関として進められている。

当社は、OpenADR2.0b認証を取得したDRAS(Demand Response Automation Server)の他社相互接続性を新宿EMS実証センターで実証済みである。実証実験では、電力需給逼迫時の節電(ピークシフト、ピークカット)ユースケースの評価等を行っている。将来、太陽光発電や風力発電などの不安定電源が増加した際は、電力系統の安定化のためのプロトコルとして拡張されることも視野に入れ、今後も研究開発を進める。

また、実際に要請された節電を実行するには、各ビルの節電余力を事前に推定し、節電要請時間帯の電力需要を確実に下げる技術が必要になる。電力の需給逼迫は、夏期(又は冬期)の空調使用による需要増が大きな要因である。当社は、翌日の天気予報等から予測したフロアごと、ビルごとの空調熱負荷を基に、空調ゾーンごとに一時的に停止する時間を少しずつずらすことで、ビルやビル群全体で空調の電力需要を平準化し、節電余力を向上・推定する研究を行っている。ZEBを実現する技術の確立をめざし、空調を中心とした省エネルギー関連技術、太陽光発電等の創エネルギー、蓄電池・給湯器を利用した蓄エネルギーとの連携制御技術の開発を今後も進めていく。

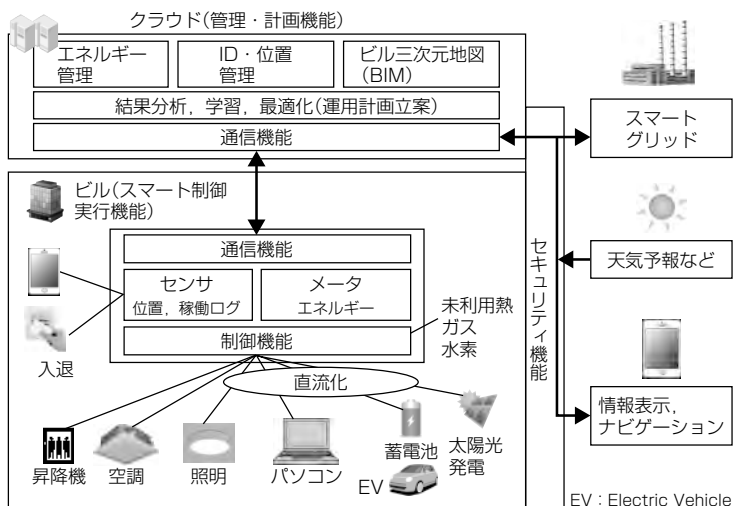


図1. 将来のビル管理システム概念

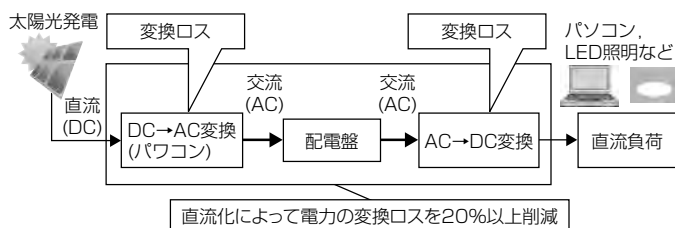


図2. 直流化によるエネルギー利用効率の向上

### 3.3 直流・交流を統合したエネルギー管理

ZEB実現には、電力の需給調整力を向上させるのみでなく、創エネルギー、蓄エネルギー、電力負荷(空調、照明などの設備)間の電力変換ロスを減らし、スマートにエネルギーを利用する技術も必要となる。

図2に示すように、太陽光発電で生じる電気は直流(DC)であり、大型の風力発電も同様に直流である。現在のビル設備は交流(AC)電源を前提としているため、太陽光発電システムではパワーコンディショナ(パワコン)で交流に変換している。

しかし、ビル内の設備機器はLED照明やパソコンなど、直流で動作可能な機器も多くなっている。ZEB実現に向け、直流動作可能な設備には直流で配電し、AC/DC変換ロスを減らしていくことも重要である。一般に、AC/DC変換で約10%の変換ロスが生じるため、将来ビル内の電源の直流化を進めることで20%以上の電力を削減することが可能であると考えられる。また、直流コンセントが普及すればACアダプタが不要となり、コンセント周りがすっきりするなど、利用者のメリットも大きい。

当面、サーバ室などの直流機器が集中したエリアを中心に直流化が進むであろう。これに合わせて、ビル全体で交流系統と直流系統を統合的にエネルギー管理し、全体の電力使用量を削減する研究を進める。

### 3.4 電力以外のエネルギーの利用技術

電気エネルギー(電力)のスマート制御のみではZEB化が困難なビルも多いだろう。このため、将来は、排熱、地熱などの未利用熱を利用したエネルギー管理によるZEB化も想定し研究開発を進めていく。地域冷暖房や、ガスなどのコージェネレーションシステムによるエネルギー効率向上、燃料電池(水素)の利用についてもビルの統合エネルギー管理の観点で検討していく。

## 4. ビル利用者に向けたスマート化技術

### 4.1 セキュリティ応用システムのスマート化

将来のセキュリティシステムは、ハンズフリー認証が普及し、利用者のスマート端末との連携や屋内位置管理システムとの統合が進み、ビル内の人位置が今より詳細に管理できるようになるであろう。位置情報はセキュリティシステムや災害時の安否確認などでの活用の他に、空調・照明のパーソナル制御、目的場所へのナビゲーションなど利用

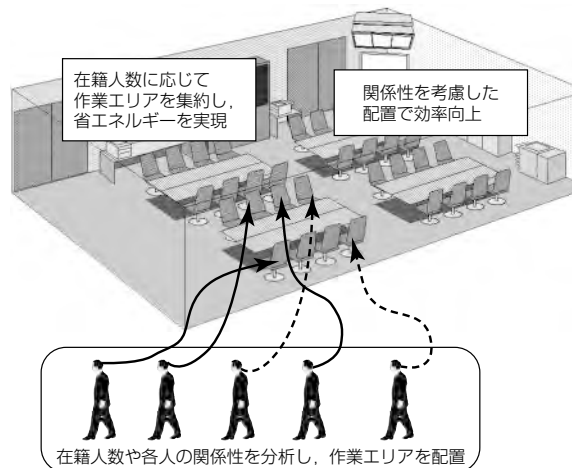


図3. 位置情報を利用した最適座席配置の例

者の快適性、利便性向上に役立つ。

現在のハンズフリー入退室管理システムは、出入口に認証装置を設け、通過する際に、個人を無線認証することでセキュリティを担保するシステムである。ハンズフリーで鍵となる技術は、個人が確実に出入口に存在することを確認する無線測位技術である。現在の製品では、専用のセミアクティブタグを用いて、無線通信エリアを出入口に限定することで無線測位を実現している。

しかし、屋内無線測位技術としては、無線LANや屋内GPS(Global Positioning System)送信機を用いたIMES(Indoor Messaging System)方式の測位技術など様々な方式が開発されており、今後は、各方式を連携・統合することで位置の高精度化やインフラコストの低下が進むと予想される。インフラコストの低下が進むと、ビル内全域に導入が可能となり、ビル内の人の位置を完全に把握できるようになり、セキュリティ用途だけでなく、省エネルギーと個人の快適性を両立できる空調や照明等のビル設備のパーソナル制御へとつなげることが可能となる。

更に一歩進んで、オフィスビルではオフィス内で作業場所が自由に変更できるフリーアドレスを併用することで、その日の在籍人数と各人の関係性に応じて、最適な配置に誘導し、作業エリアの集約による省エネルギーとコミュニケーション向上による作業効率の改善が実現可能となる(図3)。また、商業ビル等では、顧客の行動履歴や顧客の登録情報等から、好みにあった店舗へ誘導するコンシェルジュ機能のようなことも実現可能となるだろう。

### 4.2 エレベーター制御・保守のスマート化

#### 4.2.1 エレベーター制御のスマート化

先に述べたように、世界的な都市への人口集中によって、中東、アフリカなどの新興国を中心に1,000m級の高層ビルが出現し、1つのビルが街となる。高層化が進むと、ビル内移動の利便性向上や効率化が必須となる。このため未来のビルでは、エレベーター制御によるビル内交通の効率化、スマート化が重要になる(図4)。

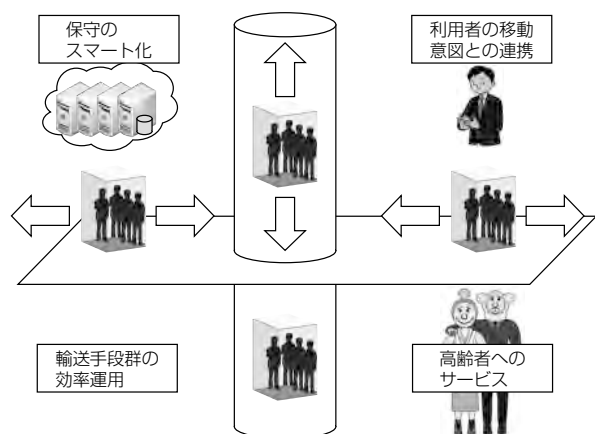


図4. エレベーターのスマート化

第1のスマート化は、利用者の移動意図との連携である。未来のビルでは、移動意図から移動開始位置と目的地点を把握し、開始位置まで輸送手段が迎えにいく形になるだろう。この際、利用者のエージェントとなるスマート端末と利用者の位置を把握する屋内測位技術が基本技術となる。ビル管理システムでは、利用者の行動パターンを学習し、移動意図を把握するエージェントソフトウェアを搭載したスマート端末との連携によって、利用者の移動意図を即座に読み取り、エレベーター等の配車制御を行う。

第2のスマート化は、利用者の移動意図情報を活用した輸送手段群の効率的運用である。従来のエレベーターは縦方向移動+時間の二次元空間で最適な運行解を探索していた。未来の輸送手段では自由な移動に対応するため、縦方向移動+横方向移動+時間の三次元空間で運行解を探索する。複雑な問題空間における最適化技術も重要なキー技術となる。

第3のスマート化は、高齢者に対する様々なサービスの実現である。30年後には日本・中国などでは超高齢化社会が到来している。高齢者にとってはマンションなどにおけるビル内輸送手段は生活に欠かせないものである。輸送手段に乗降車しようとしている高齢者・身障者に対し、自動で乗降車動作をアシストする機能が求められる。センシングを含むロボティクス技術も輸送手段のスマート化の重要な技術となってくる。

#### 4.2.2 エレベーター保守のスマート化

ビル内輸送手段としてエレベーターの重要性が増すことで、エレベーターのサービス停止時間がゼロとなることが望まれる。現在はエレベーターを維持管理するために、定期的な点検・保守を行っているが、これが自動的に行われ、人間による保守不要の機構に変わっていく。ここで重要になるのが、大量のセンサデータをリアルタイムに処理して故障予兆を検出する技術と、オイル補充などの軽微な問題修正を自動的に実行する技術と考える。前者はビッグデータ解析に代表される技術であり、後者はロボティクス技術を活用したものになる。点検を行うアルゴリズムや各種診断機能はクラウドサーバに配置され、性能向上や、機能追加を容易にできるようになる。また、新素材の採用による

メンテナンスフリー化も考えられる。

### 5. ビルネットワークのセキュリティ

未来のビルシステムでは、スマート端末を始めとする情報通信システムとの連携によってビルサービスが提供される。今後、ビル内ネットワークのオープン化の流れが加速する。これはビル設備のネットワークにITシステムと同等のサイバーセキュリティ対策が求められることを意味する。

近年、ビル管理の標準プロトコル“BACnet (A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks)<sup>(注1)</sup>/IP (Internet Protocol)”で利用するUDP (User Datagram Protocol) ポートに対する不審な通信が検知され注意喚起がなされている。重要インフラや産業プラントの制御システムにおけるセキュリティ向上のための取り組みとして、“技術研究組合 制御システムセキュリティセンター (CSSC)” は、研究開発や検証、人材育成と啓蒙(けいもう)、国際標準化活動などをおこなっている。

将来は、ビルシステムを構成する機器及びシステムが、それぞれセキュリティの国際基準に基づく認証を取得するとともに、脆弱(ぜいじゃく)性が発見された機器やサブシステム内の機能モジュールを遠隔からアップデートする仕組みが必要になっていくと考える。

(注1) BACnetは、米国冷暖房空調工業会の登録商標である。

### 6. む す び

30年前の通信の自由化によって、ビルの通信インフラとしてイーサネット<sup>(注2)</sup>や光回線、無線LAN等が普及し、ビル管理システムもIP通信ベースの管理システムに進化した。

今後30年は電力システムの改革が進むと考えられ、当社はスマートグリッドのインフラ整備、ビル内外の直流化の進展とAC/DC統合エネルギー管理、熱を含めたエネルギー融通など、エネルギー管理のスマート化技術の研究開発を進める。また、ビル内の位置情報を応用し利用者の快適性、利便性、安全・安心を実現する技術の研究開発も進め、ビルオーナーや利用者のメリット向上とともに、循環型社会の構築に貢献していく。

(注2) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

### 参 考 文 献

- (1) 渡邊 宏：スマートコミュニティの現状と将来展望，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2011)  
<http://www.purekyo.or.jp/pdf/NEDO111117.pdf>
- (2) 林 泰弘：早稲田大学 EMS新宿実証センター，早稲田大学大学院 先進グリッド技術研究所 (2012)  
<http://www.hayashilab.sci.waseda.ac.jp/RIANT/WEMS.pdf>

# スマートホームの未来と技術

三木智子\*  
高砂英之\*\*  
矢野裕信\*\*\*

*Future of Smart Home and Technologies*

*Satoko Miki, Hideyuki Takasago, Hirotoshi Yano*

## 要 旨

人が幸福かつ持続的に成長できる未来社会における家の姿について考察し、想定された家をスマートホームと定義し、これを実現するための技術について述べる。

家には、太古から現代、未来でも、そこに住む人が願う、安心、安全、快適さ、楽しさ、便利さ、豊かさという普遍的な課題がある。これまで、人はその解決方法として、行動様式や規範のみ、又はモノの機能のみによって解決を試みてきた。しかし、未来では、家にあるセンサをネットワークに接続してデータを収集し、住む人の状態、所作を理解してさり気なく先回りしてやさしく制御するスマートホームによって解決が図られる。

三菱電機では、未来のスマートホームに向けて、複数の家電機器をつないで、エネルギーをトータルマネジメントするHEMS(Home Energy Management System)、そして、スマートフォンなどにつながって家事をサポートするスマート家電を開発、製品化している。さらに、未来に向けて、ネットワーク連携のための情報転送時間を削減する制御方式、家に関わるデータ量の増大に対応するプラットフォームの構築、空調機へのサーモパイル搭載などセンサの社会実装についての研究開発を実施中である。

当社は未来のスマートホーム、人が幸福に生活・成長できる家の実現に技術で貢献する所存である。



## 未来の家

日本に古くから伝わる家の中のそれぞれの神に代わる、様々なスマート家電の連携によって人が幸福に生活・成長できる未来の家をイメージしている。家にあるセンサをつなげてデータを集め、住む人の状態・所作を理解し、さり気なく先回りしてやさしく制御する。すなわち、知らぬ間に居住まいを正す制御システムを実現する。

## 1. ま え が き

1980年代にアメリカで提唱された住宅の概念であるスマートハウスは、家電や設備機器を情報化配線等で接続し最適制御を行うことで、生活者のニーズに応じた様々なサービスを提供するものである<sup>(1)</sup>。では、スマートホームとはなんだろうか。本稿では、ハウス＝“家という建造物及びシステム”とは異なるホーム＝“ハウスに暮らす人、家族”としてスマートホームを考える。

2章では、太古から現代までの家と家族のあり様とそこにあるものが2050年を想定した未来にどのようにつながっていくのか、いくべきなのかについて述べる。そして、3章、4章では現代から未来に向けて当社がなすべき技術開発の課題を示す。

## 2. 家の歴史と未来

### 2.1 太古～現代

日本の家では、神を祀(まつ)って家や家の中を守護してもらうという信仰によって家の安心と安全を得て快適な生活を営もうとしてきた。また、神話には三種の神器として鏡、勾玉(まがたま)、劔が宝物として登場する。戦後、3種類の耐久消費財を三種の神器としてなぞらえてきた。それらは、これまでできなかったことができ、生活に楽しさや時間、豊かさを生む宝物であったからである。人知の及ばない災難から神の守護によって安心を得るところから、モノを持って便利さ、豊かさに憧れる時代へと変わる中で暮らしてきた。

### 2.2 未 来

今から35年後の2050年頃の家と家族を考えてみたい。建造物としての家は様変わりしているかもしれない。低炭素住宅が普及し、断熱性や遮蔽性が高く空調機のエネルギー消費量を抑えることが可能な省エネルギー住宅になる。建築素材や外観、間取りも現代とは異なってくるであろう。また、家にあるモノも変化する。映像が空間に浮かび上がり、番組、映画、ニュース、そして家の中のあらゆる情報も表示する。しかし、家に住む人が家と家族に望むことは変わるだろうか。太古からの願いは、安心、安全、快適さ、楽しさ、便利さ、豊かさである。“きもちいい”と感ずることは、その時、その場所で、少しずつ違うから、家族のことを分かってくれて、明日も笑顔にしてくれる家は明日への元気を作る。負担を減らしてゆとりある時間を作る。ふれあいを楽しむ環境をつくる。自然を生かした暮らしをつくる。家族と家の快適さをつくる。これらが、人が人として暮らしていく普遍的な願いではないだろうか。とするならば、家は古くからも今も未来も同じであり、家を守る神が住まい、宝物を抱く家族の住む場所である。

未来では我々は何に神をみるのか。太古から家に宿る神

は、その場所とそこに住まう人の所作をみて、それに値する守りを与える。例えば、台所で火を粗末に扱うことで火事につながるが、ここに神がいると思えばこそその気遣いで守り守られている。すなわち、知らぬ間に居住まいを正されている。それがここである神である。未来の神は家にあるセンサをつなげてデータを集め、住む人の状態・所作を理解し、さり気なく先回りしてやさしく制御する。その神(センサ神)が持つ三種の神器は、自律、分散、協調である。八百万(やおよろず)のセンサ神が、自ら、それぞれの機能を守護することで家全体を守り、幸福にする。

現代にも、姿を変えた神がいる。いろいろな機器をつないで、エネルギーをトータルマネジメントするHEMS、そして、スマートフォンなどにつながって家事をサポートしてくれるスマート家電である。

## 3. 三菱スマートハウスソリューション“ENEDIA”とスマート家電

当社は、暮らしに関わる企業として、各家庭でのエネルギーマネジメントに目を向けている。地球規模のエネルギー問題も、毎日の暮らしの中から変えていけるとの思いである。無理なく、快適に、暮らしのエネルギーを有効活用する、当社のスマートハウスソリューションENEDIAは、“つくる”“ためる”“かしこく使う”で次に述べるように暮らしを豊かにする<sup>(2)</sup>。

(1) 再生可能エネルギーを活用しながら、これまでの生活スタイルを変えない暮らし方

昼間、太陽光発電システムで暮らしの電気をまかないながら、余った電気を電気自動車(EV)の蓄電池に充電して、自動車の走行用、家庭用使用する。充電はHEMSのファミリーカレンダーとの連携によって、外出予定時刻の8時間前に、自動的に開始される。

(2) 万が一の時でも、普段と変わることなく電気が使える暮らし方

太陽光発電システムとEVの蓄電池の連携によって、昼間に太陽光で発電した電気を蓄電池に蓄電し、停電時に蓄電池からの電気を使用することで暮らしの電気を同時利用最大約6,000Wまで確保可能である。

(3) より快適に、便利に、省エネルギーに、電気を効率よく使う暮らし方

HEMSを活用し、空調や給湯に換気システムを連動させて居室の排熱を行うことで冷房運転時間を少なくするなど、エネルギーの節約を快適さや便利さを損なうことなく行う(図1)。

生活の豊かさを向上させるスマート家電としては、例えば、掃除で消費したカロリーと掃除面積がスマートフォンで確認できる掃除機を提供している。家事でも面倒と思われる割合の高い掃除をエクササイズ感覚で楽しむことができる(図2)。



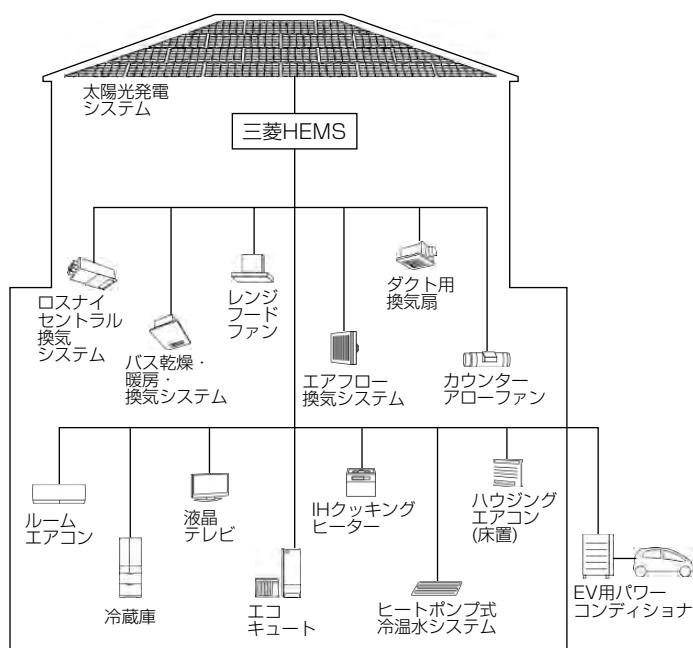


図1. 三菱HEMS



図2. スマートフォンのアプリケーション「カロナビ」

#### 4. これからのスマート化技術

これからの家は、2. 2節で述べたとおり、センサを含む機器が自律・分散・協調したシステムを備えることになる。それに必要な技術であるネットワーク、プラットフォーム、センシングについてそれらの課題と解決策について述べる。

##### 4.1 ネットワーク

機器を分散連携協調動作させるために、機器をネットワークでつなぐが、2020年に世界のセンサ数は1兆個となり、そのデータ量は5年間で24倍に増加すると言われている<sup>(3)</sup>。

ところが、これらのデータの送受信には、データが膨大になるにつれ転送遅延や通信費用増大という問題が生じる。

そこで、通信の応答性が良く、通信量を削減可能な通信プロトコル技術の構築が課題である。通信応答性を向上させるためには、必要な時に必要な量を送信可能であることが求められる。センサなど定周期で少量のデータを送る多数の機器が、機器側のタイミングとデータ量で送信でき、それを受信側で取得できるための方式が望まれている。また、受信側からの命令が多数の機器に同時に複数の経路を通して通達できる方式の開発が必要である。

さらに、このプロトコルはあらゆるものをつなぐためのものであるからオープンである必要がある。また、プロトコルがグローバルに唯一にはならず、異種ネットワークが共通利用できる高速なゲートウェイの開発が必要となる。

当社は、将来、機器のデータを収集して制御するコントローラが宅内で複数存在する環境が増加すると予想している。そこで、各コントローラが応答性を高めてデータを取り交わすために、コントローラの位置を動的に変更することで情報転送時間を削減する宅内機器制御方式について検討をしている<sup>(4)</sup>。

##### 4.2 プラットフォーム

スマートホームのシステム及びソフトウェアのプラットフォームでも、データ量の増大は問題となる。各機器から送出されるデータは、例えば、部屋にある3個の機器から毎秒5バイト、1軒に4部屋、これが1,000万軒としても1日50テラバイトにもなり、集中的に処理することが困難になる。

これを解決するために、家の中又はその周辺での自律・分散・協調の技術開発が課題である。家の安心・安全のための危険予知・危険回避サポートは、ネットワークレイテンシー(遅延時間)が少なく、家というローカライズされた中でアクチュエータの近傍で重要なデータを抽出、判断する仕組みが重要である(図3)。

この課題の解決によって、データ処理を家の中で行えば、コスト低減、プライバシー保護、レイテンシー改善が可能となる。過度な集中によるストレージ・通信のコストを低減する。データではなく分析アルゴリズムを流通させることで個人単位のデータを1か所に蓄えることなく、個人・組織のほしい情報を得ることができるようになる。

##### 4.3 センシング

家や人のコンテキストを理解し、それに基づいて機器を制御して、快適さや便利さを提供することが求められている。そのために、家や人の状態を人に意識させることなく(アンコンシャス)測ることがセンシングの課題となる。センサをアンコンシャスロボットとしてとらえた研究は2000年頃から進められてきており、低消費電力、小型、通信機能を持ったセンサデバイスが製品として多く発売されてきて

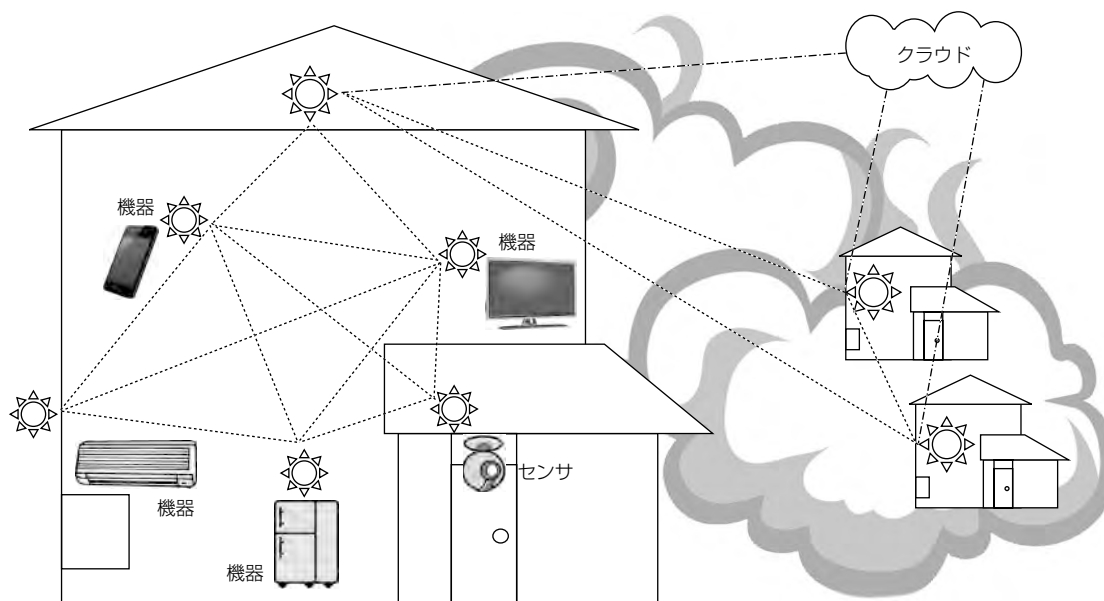


図3. スマートホームのプラットフォーム

いる。当社も、宅内のエアコンに多素子サーモパイルセンサを用いて自動的に使用環境に合わせて省エネルギー性と快適さを両立させる空調を実現している<sup>(5)</sup>。

つまり、センシングの課題は、社会実装して家族のための技術にする段階へと移ってきている。すなわち、測定デバイスでデータを取得する問題から、取得したデータを使ってどのようなサービスを実現していくかの問題へと移行してきている。人の快適さや便利さを実現する家と家族にかかわるサービスを、社会的問題又は要求として分析し、先に述べたネットワークやプラットフォームを使って解決していくサービス主導の設計技術の開発が重要である。

## 5. む す び

未来の家族が住む安心、安全、快適さ、楽しさ、便利さ、豊かさを持つスマートホームについて、その定義と現状、課題、解決方法について述べた。

スマートホームは、アンコンシャスなセンサが統合されて1つ又は複数の新たなセンサとなって家の機器をアクチュエートすることで、家族が気持ちよく暮らせるものである。

そのための技術として、ネットワークでの連携、プラットフォームの構築、センサの社会実装が必要になる。

我々が住まう未来のスマートホームが当社の技術でしあわせなものになっていくよう研究開発を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) Gross, M. D.: Smart House and Home Automation Technologies, University of Washington (1998)  
<http://depts.washington.edu/dmgftp/publications/pdfs/smarthouse98-mdg.pdf>
- (2) 西尾俊介, ほか: HEMS対応三菱通信ゲートウェイ, 三菱電機技報, **88**, No.6, 337~342 (2014)
- (3) Cisco Visual Networking Index: 全世界のモバイルトラフィックの予測, 2014~2019年アップデート (2013)  
[http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/white_paper_c11-520862.html)
- (4) 高田佳典, ほか: マルチコントローラ環境における宅内機器制御方式の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **114**, No.478, 295~299 (2015)
- (5) 渡邊信太郎, ほか: 省エネルギーと快適性を両立させるルームエアコン霧ヶ峰“人感ムーブアイ”, 三菱電機技報, **87**, No. 6, 333~336 (2013)

# 未来の小規模コミュニティ向けIT基盤

西村達夫\* 中井敦子\*\*  
 塩井川幸保\* 松浦遼太\*\*\*  
 芳賀悠一\*

## Concept of Future IT Platform for Small Community

Tatsuo Nishimura, Yukiyasu Shioigawa, Yuichi Haga, Atsuko Nakai, Ryota Matsuura

### 要 旨

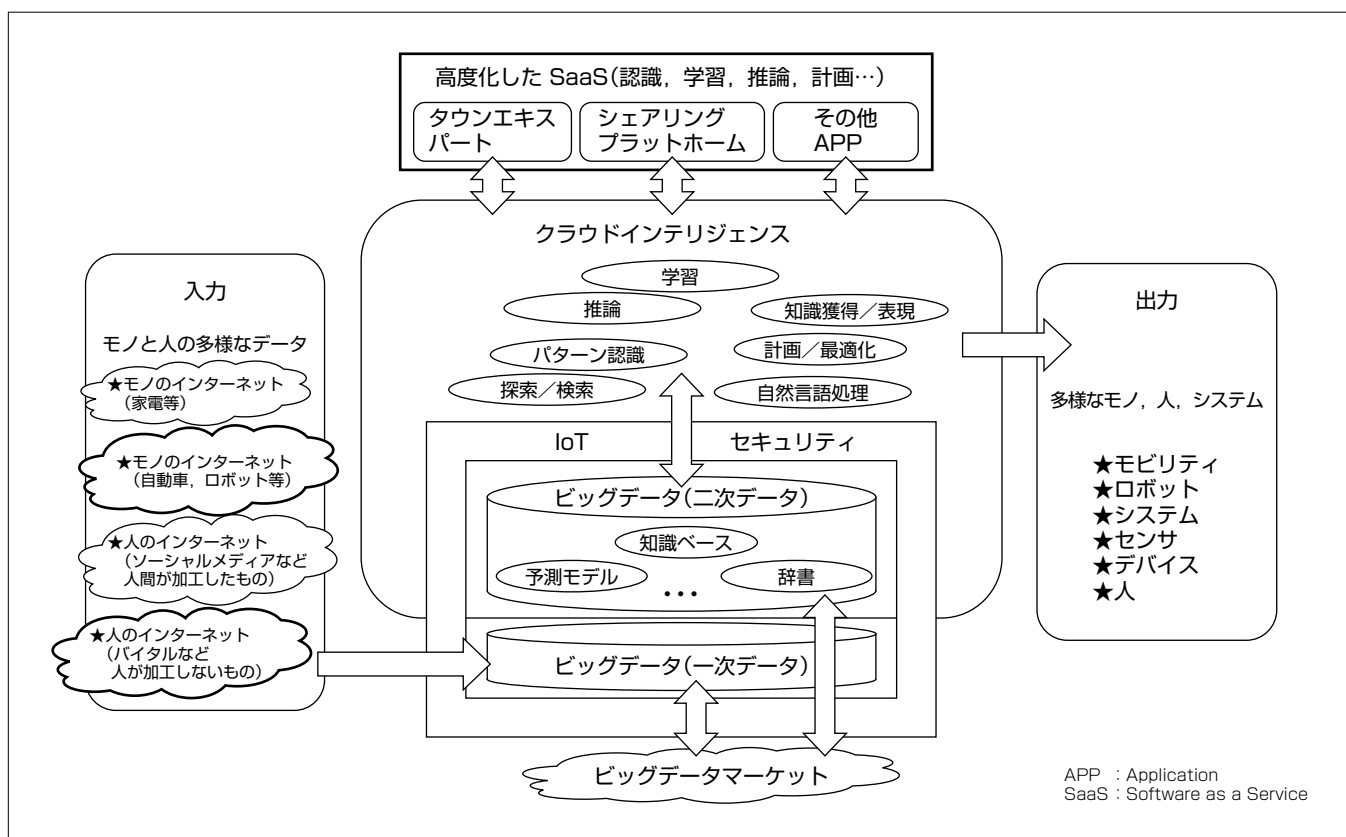
高齢化や単独世帯化が進む中でのコミュニティを考える上で良いモデルとなるマンションなどの集合住宅を中心に、未来社会で必要とされるIT基盤を考察する。

電力やガス自由化、高齢化等の社会面の変革と水素などによる分散電源化、自動運転やロボットの普及などの技術面での進歩を想定し、本稿では未来の小規模コミュニティ向けソリューションとして次の2つを挙げる。

(1) コミュニティ全体で使用するエネルギーを総合管理(調達、使用、CO<sub>2</sub>排出抑制)する“タウンエキスパート”

(2) コミュニティ内の家電や労働の融通によってCO<sub>2</sub>削減や老人介護(助け合い)を支援する“シェアリングプラットフォーム”

これらの未来のソリューションの核となるスマート化技術としてビッグデータを基に予測や最適化を行うエンジンである“クラウドインテリジェンス(仮称)”について、そのコンセプトを述べ、その実現に向けた課題と解決に向けた取組みについて述べる。



### 未来の小規模コミュニティに向けたIT基盤のイメージ

IoT (Internet of Things)、ビッグデータを処理する基盤の上にビッグデータを基にパターン認識や学習、最適化を行うエンジンとしての“クラウドインテリジェンス”層があり、この機能を使ってアプリケーションが高度な処理を実現し、IoTを通じてモノや人、システムをスマートに管理する。

## 1. ま え が き

マンションなどの集合住宅を中心とした1,000戸程度の小規模コミュニティ(以下“タウン”という。)を想定し、未来社会で必要とされるIT基盤を考察する。

2章で、現在三菱電機で提供しているタウン向けクラウドサービスを簡単に述べ、次に2025～2035年の未来社会でCO<sub>2</sub>排出抑制や高齢化等の課題に対応するソリューションを考える。

3章では未来のソリューションの核となる技術である“クラウドインテリジェンス(仮称)”のコンセプトを述べ、IoT、ビッグデータなど現在の各技術を将来のIT基盤につなげていくための課題と解決に向けた取組みについて述べる。

## 2. 未来社会のタウン向けクラウドサービス

図1は当社が現在提供しているタウン向けクラウドサービスの全体構成である。タウンの各構成要素のエネルギーを総合的に管理するために、タウン全体の管理機能と各マンションの管理機能を持つ。

各EMSの共通IT基盤である“三菱スマート制御クラウドサービスDIAPLANET”の構造と機能を図2に示す。IoTやビッグデータの分析、認証セキュリティ基盤等を部品化して提供しており、複数機器を高度に制御するEMS等の

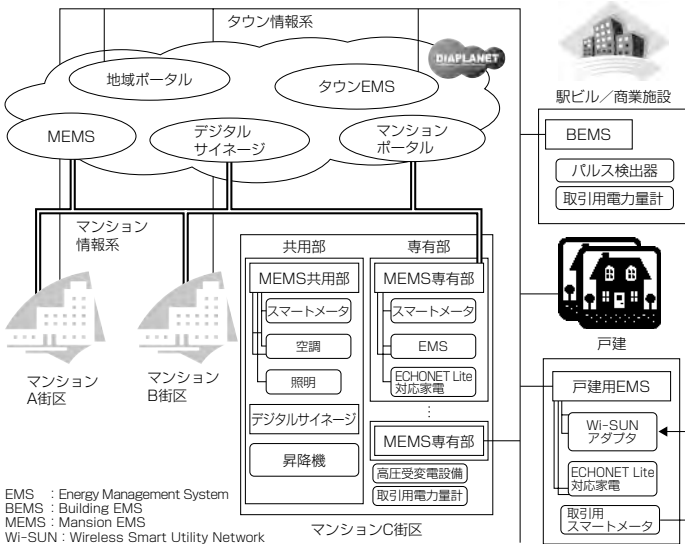


図1. 現在のタウン向けクラウドサービス

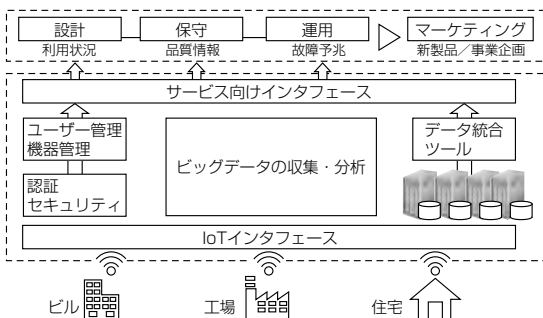


図2. DIAPLANETの構造と機能

各種ソリューションを、クラウドサービスとして容易に展開できる特長を持っている。

### 2.1 未来社会(2025～2035年)の社会・技術面の想定

#### 2.1.1 社会面の想定

(1) 電力、ガス自由化(2018～2020年頃)

(2) 高齢化進展(2030年～)

2030年には65歳以上高齢化率31.9%。単独世帯が約4割<sup>(1)</sup>。財政上、行政サービスには限界があり、地域包括支援ケアのようにコミュニティ内での自助傾向が増大する。

(3) CO<sub>2</sub>削減コスト負担増(環境税)(2035年～)

COP(国連気候変動枠組条約締約国会議)による温室効果ガスの排出削減国際目標(2050年までに2009年比80%削減)達成のため、環境税導入やエネルギー価格への転嫁が進む。

#### 2.1.2 技術面の想定

(1) IoTやビッグデータの進化(2025年頃)

ウェアラブル端末をIoTで接続、人間のバイタルデータから体調や感情の推定も可能となっている。また匿名化など個人情報に配慮しつつ、ビッグデータを流通させるマーケットが確立している。

(2) 水素、EV、FCV等での分散電源化(2035年～)

2030年にEV(Electric Vehicle)+FCV(Fuel Cell Vehicle)が新車の30%になる<sup>(2)</sup>。マンションでは燃料電池で熱と電力のコジェネレーションが普及している。

(3) モビリティやロボティクスの進化(2035年～)

自動車の自動運転は2035年には普及している<sup>(3)</sup>。簡単な見守りや介護に使えるロボットも普及価格帯に入る。

### 2.2 未来社会のソリューションイメージ

未来社会で提供できるようになるソリューションイメージをエネルギー、コミュニティ、安全・安心の観点で分類して次に例を示す。これらのソリューションによって、表1で示した現在のタウン向けクラウドサービスがどのように進化するかを表2に示す。

#### 2.2.1 未来のエネルギーソリューション(図3)

(1) 未来型MEMS

将来のMEMSは分散電源を活用し、電気だけでなくガスや熱を含めた総合的なエネルギーを最適化する。

個人の体調や快適性を考慮し、エネルギーコスト低減やCO<sub>2</sub>排出削減、デマンドレスポンス対応のため各戸の家電をソフトに制御する“おもてなし制御”を装備する。

表1. タウン向けクラウドサービスの機能

タウン全体管理	タウンEMS	タウン内のBEMS, HEMS, 戸建用EMSを統合管理してタウン全体のエネルギー見える化
	地域ポータル	商業施設のタイムセール情報や行政情報等のポータル
マンション管理	MEMS	専有部と共有部を合わせたマンション全体のエネルギー管理
	デジタルサイネージ	節電実績の表示、節電要請表示
	マンションポータル	掲示板や集合所予約など

表2. タウン向けクラウドサービスの機能の進化形態

区分	現状	未来	未来の想定
タウン 全体管理	タウンEMS	AI(Artificial Intelligence)を搭載したタウンエキスパート(2.2.1項(2))に進化	2.1.1項(1), (3)
	地域ポータル	ウェアラブルデバイスに対応	2.1.2項(1)
	なし	シェアリングマネジメントシステムやシェアリングプラットフォーム(2.2.2項(1), (2))で車や家電を融通	2.1.1項(2), (3) 2.1.2項(3)
マンション 管理	MEMS	分散電源や人間の体調を考慮した未来型MEMS(2.1.1項(1), (3), 2.1.2項(1), (2))に進化	2.1.1項(1), (3) 2.1.2項(1), (2)
	デジタルサイネージ	ウェアラブルデバイスに情報を配信するタウンAR(Augmented Reality)に進化	2.1.2項(1)
	マンションポータル	ウェアラブルデバイスに対応	2.1.2項(1)

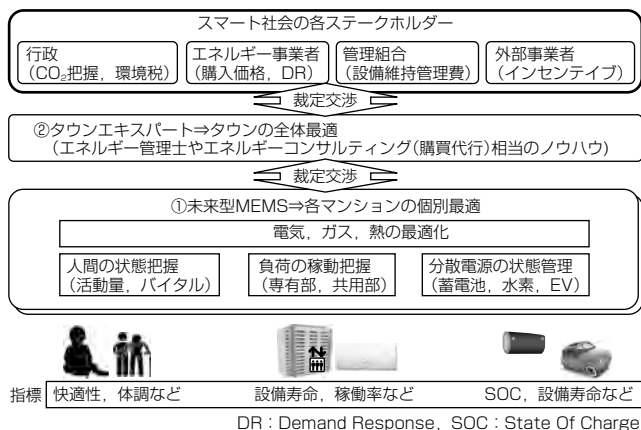


図3. 未来のエネルギーソリューション

## (2) タウンエキスパート

自由化によってエネルギー調達先の選択肢は広がるが、CO<sub>2</sub>削減とエネルギーコストのように、複雑な条件をタウン全体で最適化し、行政やエネルギー事業者と交渉する必要がある。これに対応するためのエネルギー管理士やPPS(Power Producer and Supplier)事業者などのようなノウハウをAI(人工知能)化しタウン全体の最適化を図る。

### 2.2.2 未来のコミュニティソリューション (図4)

単独世帯の増加、CO<sub>2</sub>削減の観点や老人介護の観点から家電や労働の融通(助け合い)ニーズが高まると考える。

#### (1) シェアリングマネジメントシステム

マンション内の自動運転車や共用家電、ロボットなどをIoTを使って管理し、マンション内の融通を実現する。

#### (2) シェアリングプラットフォーム

融通を受けたい人と融通する人の要求レベル、融通できる時間等を考慮し、地域レベルの融通を最適化するためにマンション内で融通しきれない分は、さらに外部事業者や他コミュニティ、行政サービスとシステム連携して解決する。

### 2.2.3 未来の安全・安心を実現するソリューション

未来型MEMSは災害時にはLCP(Life Continuity Performance)を意識し、共有部では分散電源やEVを活用したエレベーターの長期間運転を実現し、専有部では個々の世帯の



図4. 未来のコミュニティソリューション

設定ポリシー(老人や乳幼児がいる家庭では空調を最優先など)と被災時の個人の体調を考慮して最適な制御を行う。また平常時は未来型MEMSが把握している人間の健康状態情報を活用して、老人の見守り・遠隔介護や子育て支援が実現できる。

## 3. 実現のためのスマート化技術

### 3.1 クラウドインテリジェンスのコンセプト

未来のソリューションに共通する本質的な技術は、ビッグデータを基にした高度なAI(人工知能)機能によってパターン認識、学習、最適化などを行い、IoTを通じてデバイスやシステム(未来型MEMSやシェアリングマネジメント)に結果を反映することにある。この実現のため、パターン認識などのAIメソッドをフレームワーク化してSaaSに提供する仕組みを本稿では“クラウドインテリジェンス”と呼び次の特長を持つ(図5)。

#### (1) ビッグデータ 二次データの生成、再利用性

辞書、知識ベース、予測モデルなどビッグデータから二次データを自動生成し、再利用することで効率化を図る。

#### (2) 目的別に豊富なAIメソッドを用意

例えば予測が必要なケースでは、予測対象のデータの性質や求められる出力に応じて、最適なメソッドの選択ができ、精度やコストの評価や評価に応じたメソッド入替え等ができる。

#### (3) ポストクラウドコンピューティングへの対応

本稿では2025年以降は集中志向のクラウドから、分散志向のポストクラウドへの移行が始まると想定している(図6)。これに対応し、予測などのメソッドはSaaSからはデバイス側、データセンター側のどこで実行しているかをあまり意識せず透過的に使えるようにする必要がある。

#### (4) ビッグデータマーケットへの対応

自分のシステムが管理するビッグデータだけでは問題解決に不足する場合には、他事業者などが登録しているビッグデータマーケットにアクセスしデータの検索やセキュアなデータ交換ができる。



図5 クラウドインテリジェンスのコンセプト

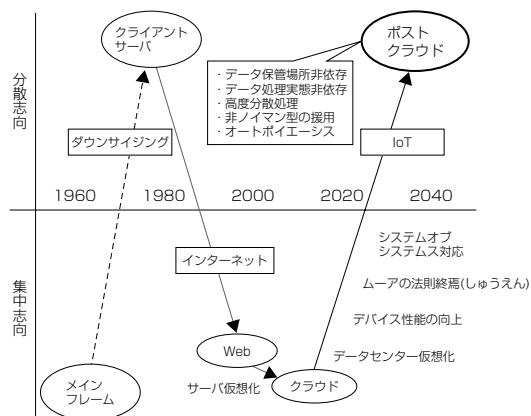


図6. コンピューティングモデルの変遷予測

### 3.2 クラウドインテリジェンス実現への課題

クラウドインテリジェンスにいたる過程で、IoT、ビッグデータの各既存技術の課題と解決に向けた取組みを述べる。

### 3.2.1 IoTの課題

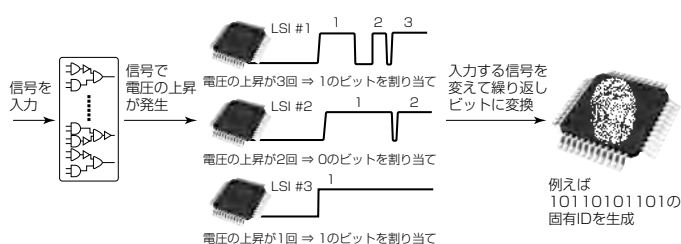
IoTの課題の1つとして、今後増加が予測されているIoTデバイスへのサイバー攻撃がある。

当社では課題解決のセキュリティ技術として“LSI指紋技術”を開発した。その原理は個々のLSI回路の素子が持つ内部の固有の信号遅延パターンに着目し、指紋のような固有IDを遅延パターンから生成する点にある(図7)。固有IDは、回路を動かした時にしか現れないため、たとえLSIを分解して内部を解析しても固有IDは得られない。安全性が高く、IoTデバイスの機器認証に活用が期待される。

### 3.2.2 ビッグデータの課題

現在ビッグデータのスケラブルな処理技術はオープンソースの分散処理フレームワークであるHadoop<sup>(注1)</sup>を始め多数の選択肢がある。

今後重要となってくるのはビッグデータの中の個人情報やプライバシーの保護の仕組みであり、この課題を解決する技術として当社では“秘匿検索基盤ソフトウェア”を開発した。従来は暗号化された個人情報をクラウド内でいったん復号しないと検索ができなかったため、平文の個人情報の流出リスクがあったが、この技術によってクラウド内で



### 図 7. LSI指紋の原理

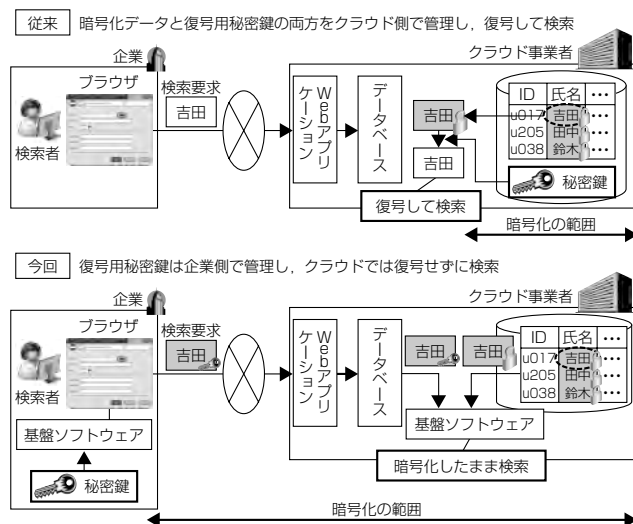


図 8. 秘匿検索の仕組み

は復号せずに検索できるようになるため、個人情報の流出  
リスクを最小化できる(図8)。

(注1) Hadoopは、Apache Software Foundationの登録商標である。

#### 4. む す び

マンションなどを含む小規模コミュニティのIT基盤の未来について述べたが、この特集号で考察されているモビリティや各種EMS、電力供給システム等においても、それぞれの目的に応じたIT基盤が発達していくはずである。これら各システムが相互に連携することで、全体として未来社会を形成していくと考えている。

冒頭で述べたタウンEMSはそのゴールに向けての第1歩に過ぎないが、最終的な未来社会のイメージをしっかりと見据えて今後も技術開発に取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) 国土交通省 国土審議会政策部会長期展望委員会：国土の長期展望中間とりまとめ（2011）  
[http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kokudo03\\_sg-000030.html](http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kokudo03_sg-000030.html)
- (2) 経済産業省 製造産業局 自動車課：自動車産業戦略2014（2014）  
<http://www.meti.go.jp/press/2014/11/20141117003/20141117003-A.pdf>
- (3) 生活総研 ONLINE：未来年表（技術2030年）  
<http://seikatsusoken.jp/futuretimeline/>

# スマート社会を支える 先進最適化技術

ジョセフ・カツツ\*

ダニエル・ニコフスキー\*

キーラン・パーソンズ\*

マシュー・ブランド\*

猪又憲治\*

*Advanced Optimization Technology for Smart Society*

*Joseph Katz, Daniel Nikovski, Kieran Parsons, Matthew Brand, Kenji Inomata*

## 要 旨

アインシュタインは“世界は私たちの考えに基づいて作り上げられたものでできており、私たちの考え方を変えなければ世界は変わらない”という有名な言葉を残している。将来、スマート社会を実現するためには、今日の私たちが直面する問題を解決・改善する新しい考え方である先進技術の適用が不可欠である。最適化アルゴリズムはそのような重要な技術の1つである。それは単に使い勝手の良いインフラを実現するものではなく、私たち人間がより暮らしやすく、より良い人間社会を実現する力がある。私たちは

その信念の下、最適化技術の開発を追求している。

1つ目は、電力系統の最適化である。グローバル最適化をどのように成し遂げるのかを数学的アプローチで解き明かす。2つ目は、環境の変化に強い最適経路選択である。3つ目は、通信の強化である。高次元変調という概念を導入して更なる通信品質の改善を図る。最後は、非常に大規模なシステムにおける最適化であり、計算量をいかに減らし、実用上有効な解をいかに導くかを示す。



## 我々が考える技術と社会のシンボル

数学を駆使したアプローチによってスマート社会を底辺で支え、私たち人間がより暮らしやすく、より良い成果を残せるものへと変える。最適化は私たちの暮らしを本質的に変える力がある。

## 1. Introduction

Future pervasive connectivity among people and machines —referred to by acronyms such as Internet of Things (IoT), Machine to Machine (M2M), and Vehicle to X (V2X)—is inevitable. Such connectivity will be the bedrock of the smart society, but by itself will not suffice to achieve its many promises, including efficient resource utilization and increased safety and security.

Albert Einstein famously said that the world we have created is a product of our thinking, and it cannot be changed without changing our thinking. The future smart society will need to apply advanced technologies in order to solve or significantly improve the issues facing our world today. Optimization algorithms are one important kind of such technologies that will help translate the connectivity infrastructure into improved outcomes for humans. In this article we describe examples of such algorithms for finding global optimum for power flow (Section 2), achieving robust optimal routing in changing environments (Section 3), enhancing communication throughput of optical fiber links through the use of high-dimensional modulation (Section 4), and achieving practical solutions for very large systems that would otherwise require huge computational resources (Section 5).

## 2. Globally Optimal Power Flow

We seek to find the optimal operating point for a large electrical network, such that demand at every node of the network is satisfied, and the cost of generated electricity is minimized, subject to voltage and capacity constraints of the power line generators. It is one of the main decision problems in everyday operation of most transmission and distribution systems, and its optimal solution can have a huge economic and societal benefit, especially in situations where demand may outstrip supply.

Whereas direct current optimal power flow (OPF) is a convex optimization problem, in many cases the alternating current OPF problem is non-convex. Most of the widely used non-linear optimization algorithms are not guaranteed to find the true global optimum, but are rather likely to converge to one of the many local minima. Recent experimental studies demonstrated that local solutions could be more expensive by over 120%, resulting in major waste for electrical utilities. This led to active research in advanced methods for finding the true global optimum. Many of these methods are based on the branch-and-bound algorithm that operates on the principle of subdividing the range of decision variables, such as the voltages of generators, into sub-intervals, and eliminating some of these sub-intervals if it can be shown that the best possible solution in them is no better than a known solution in another intervals (Fig. 1). One effective way to show this is if a lower bound on the cost

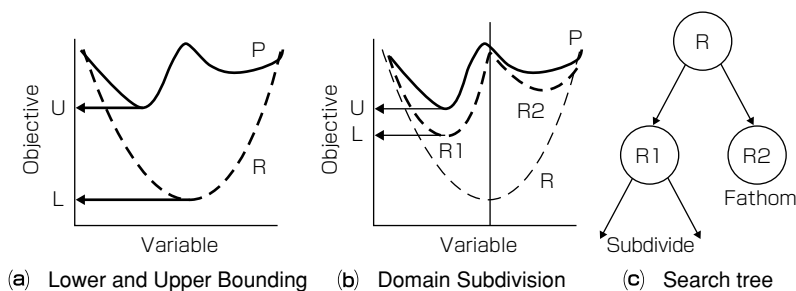


Fig. 1 Power flow optimization method

over such an interval can be computed; the tighter the bound, the more efficiently the algorithm can eliminate large regions without sub-dividing them further.

Although existing branch-and-bound algorithms have been effective in finding global OPF minima in small problems, they have not been able to scale up to the large problems many actual customers have, which include hundreds of network nodes and decision variables. The main reason for this is that the lower bounds computed by these algorithms have been quite loose, and the algorithm ends up exploring the entire decision space. Recently, we have proposed two novel methods for computing very tight lower bounds, one based on Lagrangian Relaxation (LR), and another one based on Semi-Definite Programming (SDP). We have demonstrated<sup>(1)</sup> that networks with hundreds of nodes, such as the IEEE118 benchmark with 118 nodes can be solved in less than 4 seconds on a modern PC, and are working towards solving networks with thousands of nodes.

## 3. Robust Dynamic Routing

For several years, researchers at Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL) have studied routing problems in shared networks, for example, routing cars through roadway traffic, routing data packets in ad-hoc wireless networks, and routing passengers in people-moving systems such as elevators and public transportation. The goal is to find a minimum-cost route for an individual and/or a maximum flow for a population.

Classical algorithms can be used when one assumes that each link of a network has a fixed cost or delay. In the real world, however, link costs are unknown or uncertain. Traffic makes it impossible to precisely predict travel times, so the cost for any sequence of routing decisions must be described with probability distributions. We focus on this case.

Generally, it is necessary to balance two criteria to select a route: expected performance and reliability. Expected performance is calculated by integrating a utility function over all possible costs according to their probabilities. For example, the utility of a data packet may decrease exponentially as delivery time increases. Reliability is usually defined as a limit on the probability of catastrophically expensive outcomes, for example, arriving at an airport after one's plane has departed. It is possible to have very good expected performance and

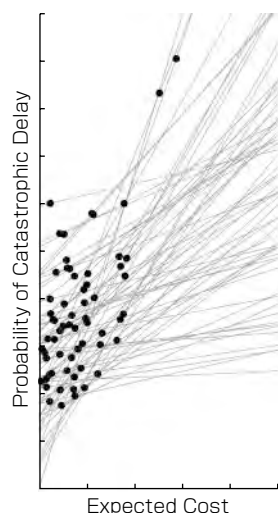


Fig. 2 Expected cost of a route vs. probability of catastrophic delay (see Ref. 2)

extremely poor reliability, and vice versa.

We have developed methods to optimize logistically useful combinations and constraints on these criteria. In many cases, it can be proven that the amount of computation needed to find the exact optimal path, or even calculate the exact value of single path, can grow exponentially with the size of the network. For those cases, we have developed fast and efficient approximation algorithms that optimize lower bounds on performance and reliability, so that, for example, it is possible to quickly identify a commuting route to work that offers a 99% probability of avoiding traffic delays, and is within a few seconds of being the fastest-on-average route with such a guarantee (see Fig. 2). These methods also provide routing policies — real-time decision-making algorithms — that optimally respond to current and predicted changes in traffic. This has also motivated work on predicting reliability from historical data plus occasional new measurements.

#### 4. High-Dimensional Modulation for Optical Fiber Communication

Supporting the smart society requires a huge transfer of information and content. Cisco predicts that annual global IP traffic will reach  $10^{21}$  bytes in 2016, and will continue to grow at more than 20% annually. Much of this traffic travels on long-distance terrestrial and trans-oceanic fiber optic links. Since optical fibers are very expensive to install on land or sea, maximizing the capacity of the fiber is a key requirement to support the growth in network traffic.

For many years, fiber capacity was improved by increasing the signal rate of each channel, but going beyond 10Gbps per channel proved too challenging due to optical impairments of chromatic and polarization mode dispersion. This limit was overcome using coherent optical systems, which allowed multi-level modulation formats to be used over all four physical dimensions,

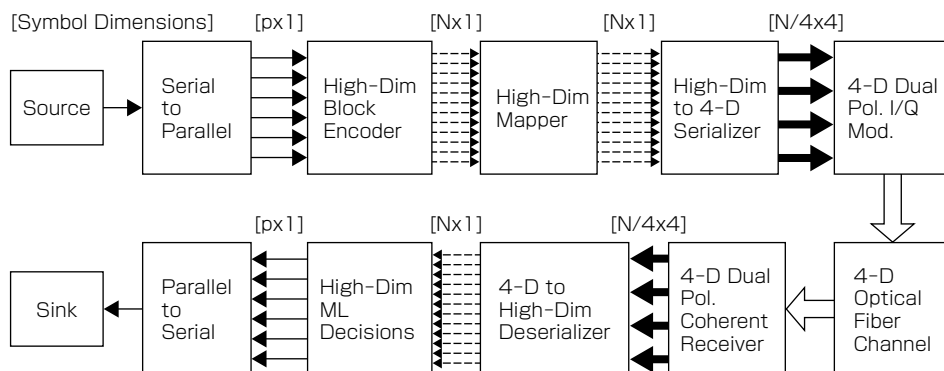


Fig. 3 Block diagram of HDM transceiver

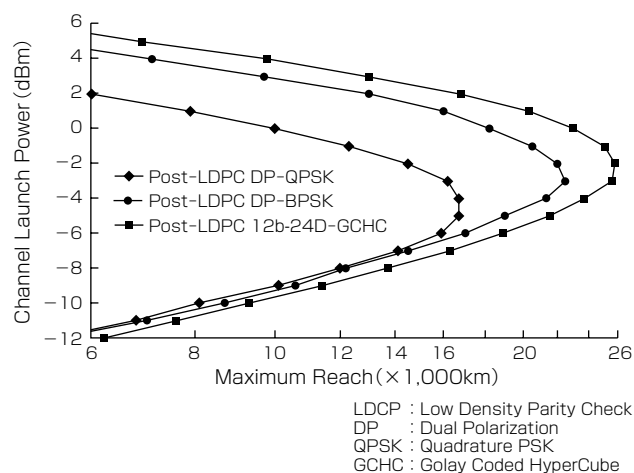


Fig. 4 Lab experiment of transmission distances for various modulation schemes

In-phase and Quadrature (IQ) over X and Y polarizations), with sophisticated digital signal processing (DSP) algorithms to reduce impairments. This has allowed 100Gbps commercial systems to be deployed, with 200 and 400Gbps in trials. However, these new higher rates come with a penalty of lower reach between expensive regenerators due to noise and fiber nonlinearity.

Recently, optimized four dimensional modulation formats have been developed, which provide some gain<sup>(6)</sup>. MERL is at the forefront of research into the use of high dimensional modulation (HDM) formats (>4D) and codes which offer even higher levels of performance. By increasing the dimensionality of the signal space it is possible to more efficiently pack the signal constellation and so improve the tolerance to noise and nonlinearity.

Fig. 3 shows a simplified transceiver block diagram using HDM. In many cases, only the encoder/mapper and soft detector need to be modified, allowing the majority of the coherent transceiver design to be reused. If needed, the error correction code can be optimized for the exact HDM format characteristics to further improve performance.

Fig. 4 shows the result of laboratory experiments using a recirculating optical fiber loop using Corning SMF-28 Ultra Low Loss fiber<sup>(7)</sup>. It can be seen that the HDM method (using 24 dimensions to encode 12 bits)

provides a 15% increase compared with the state-of-the-art dual-polarization binary phase shift keying (DP-BPSK) method while providing the same capacity, allowing a transmission distance of more than 25,000km (not including additional system margin).

High-dimensional modulation formats will enable significant increases in transmission distance of fiber-optic links, or allow higher capacity for the same distance, thus supporting the rapid growth in global traffic demands.

## 5. Making Algorithms Run Faster

As the world continues to automate, an increasingly large part of the value proposition of machines and services comes from software, particularly optimization methods from data mining, machine learning, and control theory. Unfortunately, these optimization methods scale very poorly: a problem that takes  $N$  bits to describe may require solution times on the order of  $N^3$ ,  $N^6$ , or even  $2^N$ . Problems sizes are growing rapidly but CPUs stopped getting faster roughly 10 years ago, which, for example, is why most of the functionality and value of a smart-phone actually resides in massive compute centers thousands of kilometers away. Of course, for many products the computation cannot be performed remotely by a supercomputing cluster, so it is necessary to develop approximation algorithms that produce near-optimal solutions in linear or linear-log time.

This has been a major focus at MERL since its founding. We give two examples here. One of MERL's most widely used technologies is an accelerated approximation algorithm for computing the thin singular value decomposition (SVD), which factors a data matrix into smaller matrices with many useful properties. Typically SVD reveals that most of the variation in the data can be explained with a small number of degrees of freedom, called its rank. Therefore it is widely used in data compression, data mining, and system identification. In current applications the data matrix may have a million rows and billions of columns. Since SVD is fundamentally an  $N^3$  optimization, some approximation is needed to enable real-time computation. We developed a linear-time approximation algorithm that can deliver an exact factorization if the data is indeed low-rank. The algorithm is widely used in the research community, in some Mitsubishi Electric Corp. (MELCO) products, and, via licensing, in industries where MELCO does not participate in the market.

Data is usually corrupted with Gaussian noise, consequently many optimization problems involve fitting a parameterized model by minimizing a "soft" squared-

error term subject to some "hard" constraints. If these constraints can be written as linear equations, the optimization problem is called a quadratic program (QP). QPs are the core of industrially significant technologies including model-predictive control, support-vector prediction machines, and financial portfolio optimization. We have developed a very fast parallel approximation algorithm that solves a significant class of QPs in linear time. The algorithm is unusually fast and simple, enabling the use of advanced control and optimization technologies in new settings where compute power is limited, notable, optimal control of fast-moving machinery.

## 6. Conclusion

This paper presented several examples highlighting the potential of smart algorithms to help realize the promise of the future smart society.

## References

- (1) Gopalakrishnan, A., et al. : Global optimization of optimal power flow using a branch & bound algorithm, Proc. Allerton Conf. Comm., Control & Computing (2012)
- (2) Brand M., et al. : Routing with probabilistic delay guarantees in wireless ad-hoc networks, IEEE GLOBECOM 2008 (2008)
- (3) Nishiuma, N., et al. : Travel Time Prediction using Singular Value Decomposition, J. Soc. Instr. & Control Engrs Jpn (2008)
- (4) Nikolova E., et al. : Stochastic Shortest Paths via Quasi-Convex Maximization, Proc. European Symp. Algorithms (ESA) (2006)
- (5) Nikolova, E., et al. : Optimal Route Planning under Uncertainty, ICAPS 2006 (2006)
- (6) Agrell E., et al. : Power-efficient modulation formats in coherent transmission systems, IEEE J. Light-wave Tech., **27**, 5115~5126 (2009)
- (7) Millar, D.S., et al. : High-dimensional modulation for coherent optical communications systems, Optics Express, **22**, No. 7, 8798~8812 (2014)
- (8) Brand, M. : Fast Low-Rank Modifications of the Thin Singular Value Decomposition, Linear Algebra and Its Applications, **415**, No. 1, 20~30 (2006)
- (9) Brand, M., et al. : Parallel Quadratic Programming for Image Processing, IEEE Int'l Conf. Image Processing (ICIP), 2261~2264 (2011)
- (10) Di Cairano S., et al. : Projection-free Parallel Quadratic Programming for Linear Model Predictive Control, Int'l J. Control (2013)



# スマート社会に向けた通信技術の役割

ダヴィッド・モティエ\*  
ロイック・ブルネル\*  
尾崎圭介\*\*

*The Key Role of Communication Technologies for Smart Society*

*David Mottier, Loïc Brunel, Keisuke Ozaki*

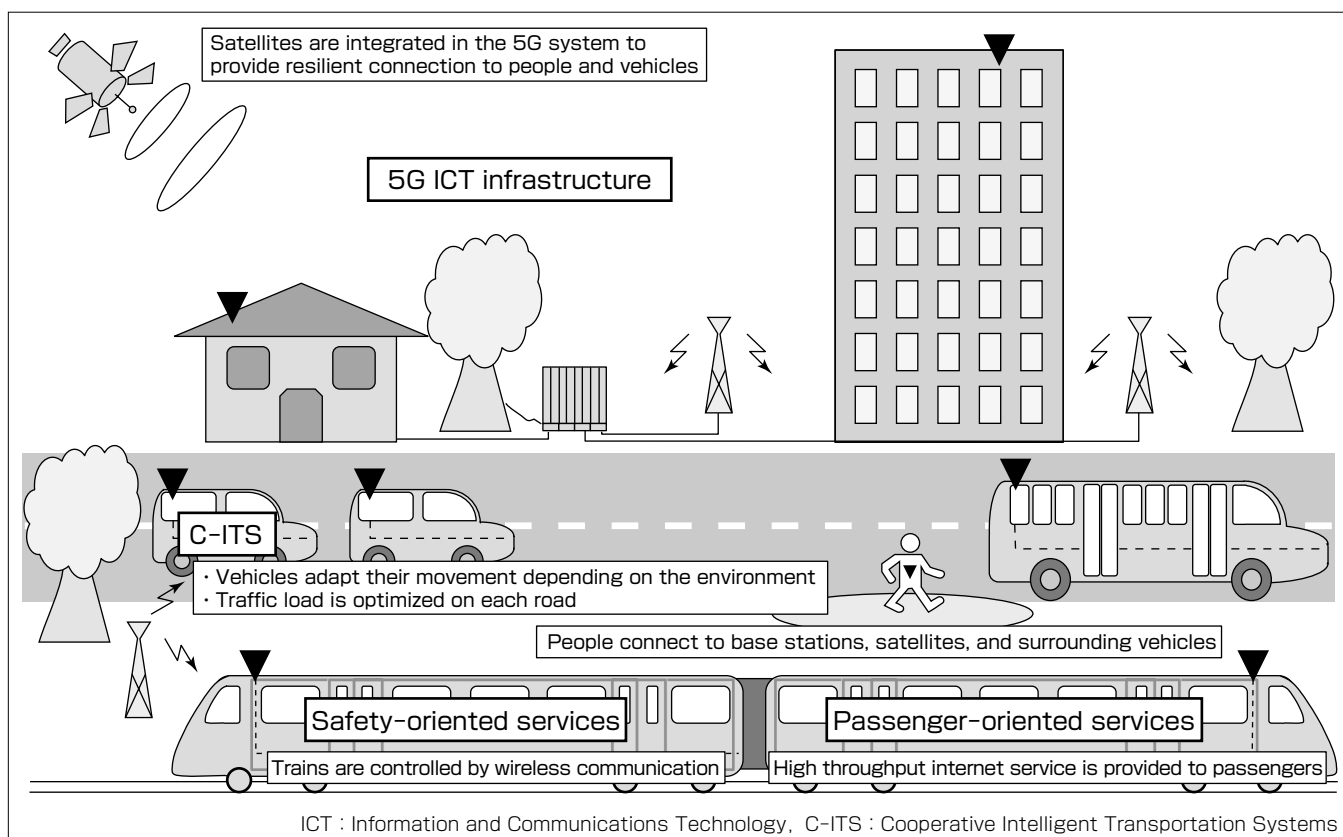
## 要 旨

都市部への人口集中が著しい欧州では、様々な課題が生じてきており、人々の生活の質を向上させるための、よりスマートな通信を実現する技術、及びサービスが必要とされている。欧州委員会は、列車や車等の交通システムへの通信技術の利用を進めることで、人々にとってより安全でより快適な社会の実現を目指している。

一方、交通システムでは通信技術を用いたサービスを提供する場合、その要求条件は、アプリケーションごとに異なっており、それらに柔軟に対応できる通信技術が必要である。さらに、現行の通信技術では性能が限られており、通信技術を活用した将来の交通システムに向け、更なる性

能向上が必要である。特に、列車による高速移動環境下での通信性能の向上や、リアルタイムな通信の実現は、非常に重要な課題である。

また、5Gと呼ばれる次世代移动通信技術が世界各国で注目されているが、欧州では、携帯電話のみならず、交通システムのような事業者向けのシステムに対しても、非常に有望な技術として注目されている。特に、5Gではより高密度に基地局が配置されるようになり、それらの基地局がスマートに協調することで、ネットワークに負荷をかけることなくユーザーの高速移動にも対応可能である。



## 交通システムに通信技術を活用するスマート社会

列車や車等の交通システムへ通信技術を活用することで、人々にとってより安全でより快適な社会を実現するための、多様なサービスを提供していくことが可能となる。

## 1. Smart Communities in Europe

Urbanization is a worldwide trend and a major evolution in Europe. Indeed, the average population density in Europe is in the order of 120 citizens per square kilometer, which is quite low but 75% of European citizens live in urban areas. By 2020, they will be around 80% in cities. In some countries, the ratio will reach 90%. This tendency, which has a direct impact on the quality of life of European citizens, strongly encourages the members of the European Union to take initiatives towards a smarter society.

In July 2012, the European Commission launched a strategic partnership between industry and European cities for smart communities, which integrates the Information and Communication Technologies (ICT), Transport and Energy sectors<sup>(1)</sup>. The major goal of this partnership is to realize tomorrow's urban systems and infrastructures by developing innovative solutions in order to solve the major environmental, societal and health challenges facing European cities today. Reducing traffic congestion, air pollution and energy costs are priority items.

Thus, this R&D initiative will define efficient urban mobility schemes, open data management, innovative business models and appropriate regulation to allow taking benefit from the needed integration of the communication, transport and energy networks. Thus, a significant improvement of European citizens' quality of life is expected together with an increased competitiveness of the European industry and a large contribution to meet the EU 20/20/20 energy and climate targets<sup>(2)</sup>.

In this context, this paper focuses on the smarter integration of ICT infrastructures in transportation systems as shown in the figure of the front page. First, we introduce the specification of future ICT-based services that are newly requested by stakeholders of the transportation sector. This is addressed in section 2 together with an illustration of the performance limitations met when using state-of-the-art, so called 4G, ICT technologies. Then, we present in section 3 the recent initiative from the ICT sector to design the next generation, so called 5G, convergent radio access network technologies, architecture and standard capable to offer not only consumer but also professional services with stringent requirements. Finally, we will make conclusions in section 4.

## 2. ICT needs in transportation systems

There is a growing demand for ICT in transportation systems. On one hand, public transportation operators, especially railway operators, want to deploy an increasing range of heterogeneous communication-based services from the safety-critical ones (e.g. train control) to the passenger-oriented applications (e.g. onboard internet access).

On the other hand, public authorities would like to increase the safety level of individual vehicles and

reduce traffic congestion by traffic management.

### 2.1 ICT for railway applications

As shown in Fig.1, the various ICT-based railway applications result in very different ICT requirements.

ICT-based train control is a key technology to accompany urbanization. It allows reducing the inter-train distance, thus increasing the train line density. Train control does not require much throughput from the ICT infrastructure but needs high reliability. To increase the passengers' safety, there is a growing interest for platform and onboard closed-circuit TVs (CCTVs) with real-time transmission to police departments. This safety-related service may have a significant impact on the throughput requirements. Onboard Internet access for passengers needs high throughput but service reliability can be relaxed.

Offering this large range of services is very challenging with existing technologies. Therefore, we have optimized the way different services are using the radio resource, prioritizing the safety-critical services while not impacting too much the throughput and latency of other services<sup>(3)</sup>.

Besides, the radio spectrum dedicated for railway operators is very limited. In Europe, only 8MHz of radio spectrum have been allocated to railway operators, which are using a railway-specific 2G technology (GSM-R : Global System for Mobile communications-Railway). This obliges railway operators to envisage using also non-dedicated radio spectrum. In this context, we have evaluated the interference between a train equipped with an onboard femto base station and surrounding three-sectored macro base stations of a public cellular network using the same radio spectrum through computer simulations<sup>(4)</sup>.

Moreover, trains are operated in adverse environments for radio propagation. For instance, the mobility of existing trains can reach 350km/h (500km/h with future trains), which directly reduces the achievable transmission throughput. We have evaluated the impact of

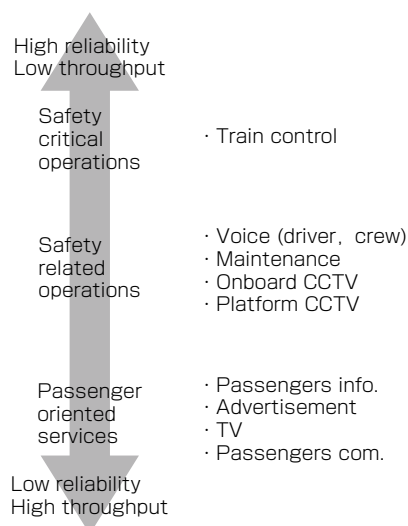


Fig. 1 Requirements of ICT-based railway services

mobility on the achievable throughput of a 4G technology with the parameters in Table 1, Fig. 2 confirms the strong throughput loss resulting from train high mobility.

From the above analysis, it is clear that up-to-date ICT with better integration needs to emerge in order to fully satisfy the railway transportation sector.

## 2. 2 ICT for individual vehicle applications

Today, autonomous vehicle safety is increased gradually, mainly for high-end cars, thanks to advanced driving assistance services using embedded radars, cameras or sensors. In the future, cooperative safety among vehicles is expected thanks to Cooperative Intelligent Transportation Systems(C-ITS). With car-to-car or car-to-infrastructure communications, it will be possible not only to adapt in real-time each car movement depending on its environment but also to optimize the traffic load on the road infrastructure so as to make sure each driver arrives in a minimum time to its destination.

Although a dedicated radio spectrum has been reserved in the 5 GHz band for C-ITS applications, the

economic viability of deploying a dedicated ICT infrastructure along every road is still unclear. Using an already deployed cellular infrastructure may offer a realistic alternative.

In Fig.3, C-ITS target applications are presented together with their real-time requirements. With requirements of transmission latency lower than 50ms, active safety is hardly achievable by using a 4G technology. Such extremely low latencies can be achieved with a dedicated IEEE 802.11p short range communication system. However, the cost of the deployment of such a system hinders the development of C-ITS.

In order to take benefits from public deployments and economies of scale brought by 4G ICT, a next-generation, called 5G, ICT must be designed satisfying not only consumer requirements but also professional requirements.

## 3. Next Generation ICT Infrastructure for Smarter Communities

In order to satisfy throughput and latency requirements for consumer and professional use, the 5G ICT has to support spectrum bandwidth at least five times larger than state-of-the-art 4G ICT. Due to spectrum scarcity, 5G ICT will make the best use of existing radio technologies and rely on the design of new radio technologies in less crowded bands above 6GHz.

Fig.4 depicts the concept for 5G ICT currently developed in European Union(EU). The 4G radio technology should be updated in order to cope with frequency bands as high as 30GHz and a completely new radio technology should be developed for millimeter wave bands above 30GHz. In addition to these new technologies, existing 4G, WiFi and satellite components will be integrated in 5G ICT. Optical and satellite backhaul will provide base stations with efficient connection to the core network whatever their location.

Challenges for 5G are numerous. For consumer services, it should avoid the data crunch expected for 2020, considering the current progress of data communication on public networks. For professional services, it should offer robustness to mobility and short transmission delays. Energy and operation/maintenance efficiency is also a main concern. Finally, resilience, for instance to natural disasters, should also be addressed. Table 2 lists the main challenges as defined by the 5G Private Public Partnership(5G-PPP) in EU.

Table 1 Evaluated parameters for a train-to-railroad transmission

Radio parameters	Value
Carrier Frequency	800MHz
Bandwidth	4 MHz
Antenna configuration	1 × 1, 1 × 2
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM
Turbo code rate	1/10, 3/10, 5/10, 3/4, 5/6
Speed	0, 350, 500km/h
Number of trains	4 trains per cell

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying  
QAM : Quadrature Amplitude Modulation

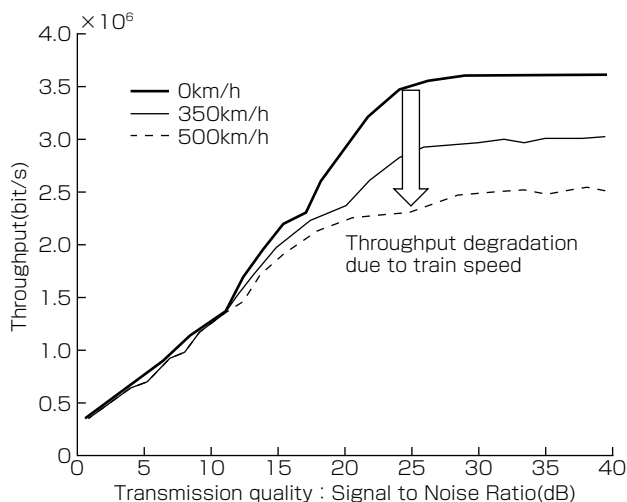


Fig. 2 Impact of train mobility on ICT throughput

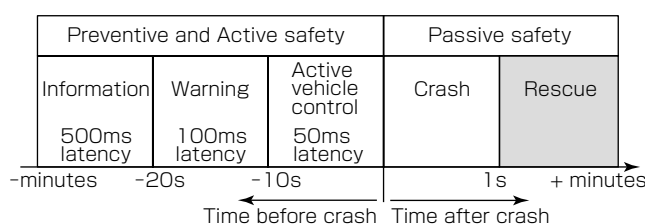


Fig. 3 C-ITS target applications

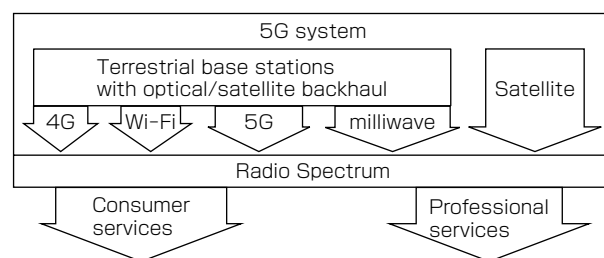


Fig. 4 5G system vision

Table 2 Key Performance Indicators for 5G ICT

	Challenges	Purposes
Main key performance challenges	1000x total throughput 10x user throughput	Solution to the data crunch, immersive experience
	~1ms service level latency	Delay-sensitive applications like C-ITS, tactile internet
	~90% energy consumption	Reduction of the 4.5% part of ICT in global energy consumption
Main key System challenges	Quality of service	Improved Quality of Experience (QoE) for differentiated services
	Manageability	Reduction of manual management
	Hardening	Intrinsic robustness to attacks or natural disasters
	Flexibility	Seamless mobility across networks
	Evolution	Transparent migration and future development

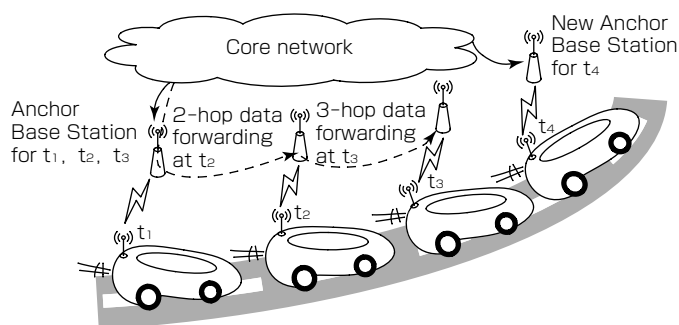


Fig. 5 Optimized anchor selection for high mobility

In order to offer the expected high throughput to the users, the 5G network infrastructure integrates many very-low-range cells, i.e. small cells, implying strong cooperation between base stations. However, the smaller the cells, the more difficult the network management of a moving vehicle.

A key issue in mobility is the selection of the anchor base station receiving user data from the core network and forwarding it to the base station actually serving data to the user. As shown in Fig. 5, we have developed

solutions to efficiently select the anchor base station in order to avoid too frequent anchor changes due to mobility, which may lead to connection loss, and data forwarding with too many hops, which saturates the network links between base stations.

Besides, the cooperation between base stations involves frequent signaling between cooperating cells and put a strong burden on the core network. In this case, signaling methods which achieve efficient cooperation are needed<sup>(5)</sup> while maintaining reasonable burden on the core network<sup>(6)</sup>.

#### 4. Conclusion

In this paper, we have presented the European trends on Smart Communities with a focus on the integration of the transportation and ICT sectors. Whereas 4G ICT technology shows performance limitations, the promising 5G set of technologies will allow new professional- and consumer-oriented applications to improve safety and comfort in transportation.

#### References

- (1) Smart Cities and Communities  
[http://ec.europa.eu/eip/smartcities/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/eip/smartcities/index_en.htm)
- (2) The 2020 Climate and Energy Package  
<http://ec.europa.eu/clima/policies/package/>
- (3) Gresset, N., et al.: A QoS-Based Multi-user Scheduler Applied to Railway Radio-Communications, Nets4trains Conference (2013)
- (4) Guillet, J., et al.: Downlink Femto-Macro ICIC with Blind Long-Term Power Setting, IEEE PIMRC Conference, 212~216 (2011)
- (5) Li, Q., et al.: Joint Precoding over a Master-slave Coordination Link, IEEE ICASSP Conference (2014)
- (6) Li, Q., et al.: A Cooperative Channel Estimation Approach for Coordinated Multipoint Transmission Networks, submitted to the IEEE ICC Conference (2015)

# スマートコミュニティ／シティの国際標準化

中根和彦\* 山本正純†  
 上野幾朗\*\*  
 小倉博行\*\*\*

*International Standardization for Smart Communities/Cities*

*Kazuhiko Nakane, Ikuro Ueno, Hiroyuki Ogura, Masazumi Yamamoto*

## 要 旨

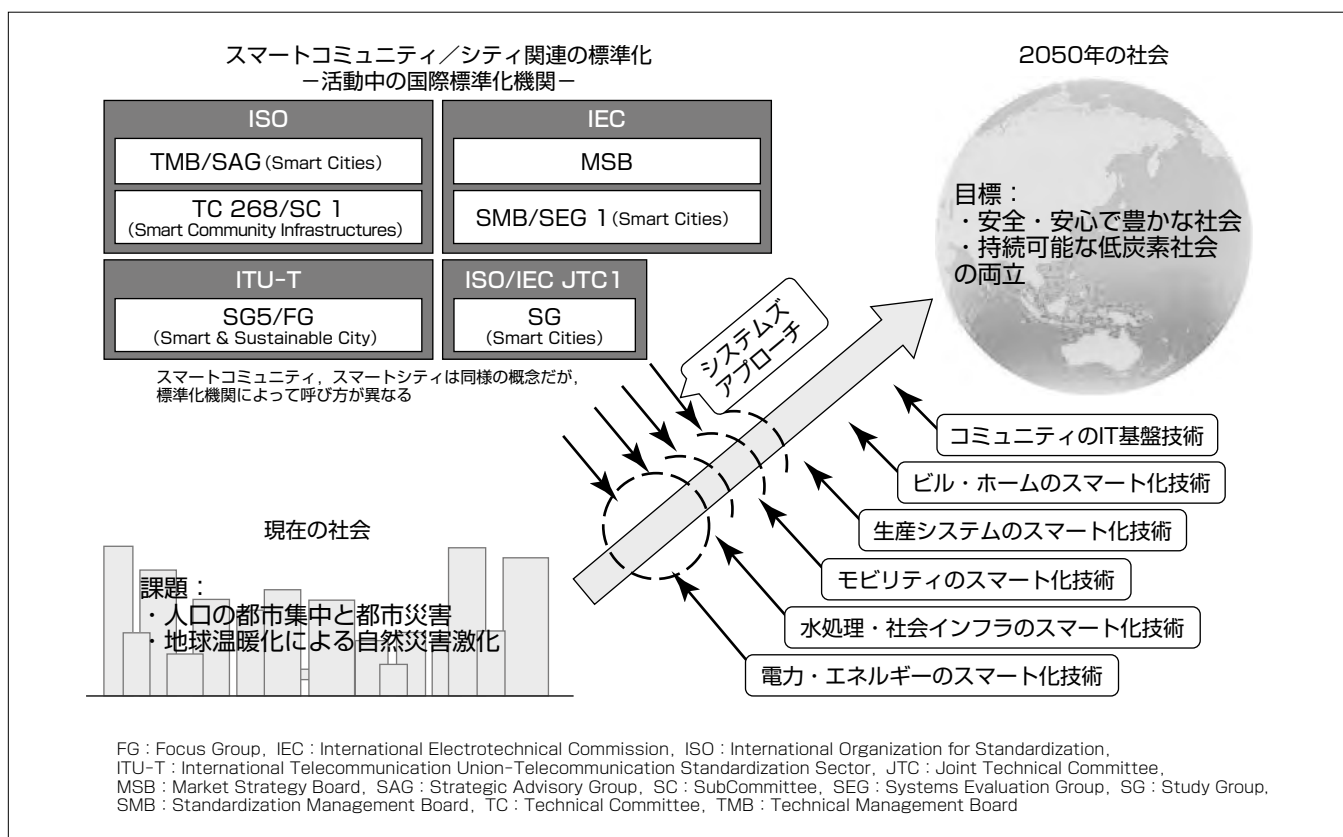
未来社会を人類が豊かにかつ持続的に成長できる社会とするには、人口の都市集中による環境汚染など都市過密化に伴う様々な社会問題や都市災害と、気候変動に伴う自然災害激化に対応する必要がある。人類が自然と共生し、物質循環とネットゼロエネルギー化を行うスマートな循環型社会の実現に寄与する国際標準化の動向について述べる。

スマートコミュニティやスマートシティ（以下“スマートコミュニティ／シティ”という。）は、未来社会への入り口となる構想である。代表的な国際標準化機関は、それぞれの専門性をベースにその標準化に対する基礎的な検討に着手し、今後の標準化方針を提示する等の成果を出しつつある。

国際標準化機構（ISO）は、スマートコミュニティ関連標準を策定する専門委員会（TC）と分科委員会（SC）を設置し、

技術報告書（TR）と技術仕様書（TS）を既に発行している。国際電気標準会議（IEC）は、技術と市場の動向を把握する市場戦略評議会（MSB）がスマートシティに関する白書を発行したほか、システム標準を策定するシステム委員会（SyC）の設立を目指してシステム評価グループ（SEG）が活動している。また、国際電気通信連合・電気通信標準化部門（ITU-T）や、情報技術の国際標準化を担うISO・IECの合同専門委員会（ISO/IEC JTC 1）も専門組織を設置して検討を進めている。

本稿では、スマートコミュニティ／シティ関連の国際標準化機関の活動の経緯、取組みテーマと現在までの進捗・成果、及び、今後の標準化の動きを述べる。



## スマート社会実現に向けた課題解決に貢献する国際標準化活動

“低炭素社会”と“安全・安心で豊かな社会”を両立させる循環型社会を実現するためのスマート化が始まっている。都市のように複雑で大規模なシステムの標準策定には、全体アーキテクチャを構築して構成部分が連携するように標準化を進める“システムズアプローチ”が効果的である。各標準化機関が、“スマート化技術”の相互運用性確保や“スマートコミュニティ／シティ”の構築・評価に使われるシステム標準を目指して開発を始めている。



## 1. ま え が き

都市への人口集中が進んでおり、1950年に30%であった都市部の人口は、2014年に54%となり、2050年には66%を超すと予測されている<sup>(1)</sup>。こうした未来の都市は次のような課題を抱える。1つは都市への人口集中による、エネルギー・食料・水の供給、下水・廃棄物の処理、交通渋滞、空気や水の汚染等の公害、健康・安全・安心の確保、セキュリティ・プライバシー・治安等様々な問題への対応であり、もう1つは気候変動に伴い激化する自然災害への備えとしての防災・減災・復旧対策の強化である。

大都市が抱えるこれらの課題の解決を目指す新たな街づくりとして、スマートコミュニティやスマートシティの構築が始まっている。スマートコミュニティ、スマートシティは同様の概念だが、標準化機関によって呼び方が異なる。スマートコミュニティ／シティ構築には、多くのステークホルダーが存在し、様々な技術が用いられるため、相互運用性を確保する標準化が必須である。また、ここに利用されるスマート化技術は多岐にわたるが、各々の技術・製品分野における新たな国際標準が求められることに加え、安全・安心で豊かな生活と、資源節約や環境保護という相反する条件を両立させながら目標を達成する必要がある。そのため、社会システム全体を俯瞰(ふかん)する視点から大きな枠組みの国際標準の導入が求められる。

都市のように複雑で大規模なシステムを対象として標準化を進めるには、望ましい全体アーキテクチャを構築し、不足部分の標準化を行うトップダウン的なシステムズアプローチが効果的である。主要な国際標準化機関はこの観点から、スマートコミュニティを構築・評価する技術、スマート化する社会インフラシステムやアプリケーションの各分野を連携させる技術等の検討に取り組み始めている。

また、これらの国際標準化には、スマート化するインフラ関連の世界交易の促進に資するという事業推進の観点もある。日本が主導して標準化を進めることができれば、我が国の有効な国際貢献となる。

## 2. スマートコミュニティ／シティに関する国際標準化活動の概要

表1に、関連する国際標準化機関の活動状況を示す。

ISOは、スマートコミュニティ関連の委員会を設置し、社会制度を含むサステナブルな都市開発運用標準、都市の構成要素のうち都市インフラに焦点を当てた評価指標、フレームワーク等の標準化活動を行っている。

IECは、スマートシティに関連する電気技術分野の標準化を検討しており、SEGを設置して標準化の必要性を検討し、システム標準化を推進する組織としてSyCの設立に向けた活動などを行っている。

表1. スマートコミュニティ／シティ分野の国際標準化活動

標準化機関	委員会など	議長国
ISO	TC 268 Sustainable Development in Communities(2012年2月～)	フランス
	TC 268/SC 1 Smart Community Infrastructures(2012年2月～)	日本
	TMB/SAG on Smart Cities(2014年2月～)	イギリス
IEC	MSB Project: Microgrids for disaster preparedness and recovery(2012年6月～2014年3月)	日本
	Project: Smart Cities(2013年5月～2014年11月)	フランス
	SMB/SEG-Smart Cities(2013年6月～)	日本、ドイツ、中国
ISO/IEC JTC 1	SG on Smart Cities(2013年11月～)	中国
ITU-T	SG5 FG on Smart and Sustainable Cities(2013年5月～)	スペイン

情報技術の国際標準化を担うISO/IEC JTC 1は、スマートシティの研究グループ(SG)を立ち上げ、ISO/IEC JTC 1が標準化すべき領域を検討している。また、ビッグデータとIoT(Internet of Things:モノのインターネット)の標準を開発する作業グループ(WG)も設置された。

ITU-Tは、環境と気候変動の研究グループSG5でスマートサステナブルシティ(SSC)に関するフォーカスグループ(FG)を設置し、SSCにおける情報通信技術の役割とロードマップ、SSCのためのインフラ、SSCの重要業績評価指標(KPI)と評価手法、及び、他機関との連携と戦略の4点を検討している。

次に、早期にスマートコミュニティ標準化を開始し、既に成果を上げているISO、及び白書作成を含めて標準化への着手を検討中のIECの状況について、筆者らが参画する標準化活動を中心に述べる。

## 3. ISOにおけるスマートコミュニティ国際標準化活動

### 3.1 スマートコミュニティ標準化の動き

#### (1) 専門委員会と分科委員会

ISOは、専門委員会TC 268と分科委員会SC 1を他の標準化機関に先駆けて2012年2月に設立し、スマートコミュニティの標準化活動を始めた。日本は、このISO/TC 268/SC 1で議長と幹事を務め、スマートコミュニティのインフラに関する標準化を先導している。

#### (2) 戦略諮問グループ

また、ISOでは2014年2月にスマートコミュニティに関する戦略諮問グループ(SAG)を、技術管理評議会(TMB)の下に立ち上げた。ISOの取組み分野の特定、他の標準化機関との連携等を検討して2015年9月までに報告書をまとめ、スマートコミュニティ分野でのISOの役割を明確化する。図1にスマートコミュニティに関わるTMB/SAG、TC 268/SC 1等の組織構成を示す。

### 3.2 TC 268/SC 1標準化活動の状況と成果

この節では、筆者らが国際エキスパートとして参画するTC 268/SC 1の状況、成果について述べる。TC 268/SC 1では、都市をインフラ、施設、サービスのレイヤからなる3層モデルとして捉え、施設(住居、病院等)やサービス(教育、ヘルスケア等)の基盤となる都市のインフラ(エネ

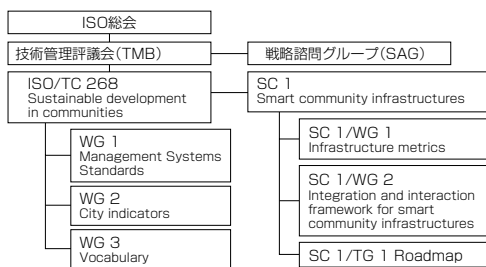


図1. ISO/TMB/SAG, TC 268/SC 1の組織構成

ルギー、水処理、交通、廃棄物処理、通信等)に注目している。都市インフラは、施設、サービスと比較し社会制度や文化への依存度が小さく、その特徴を技術的な面から客観的に捉えやすいので、標準化対象として適していると考えられるためである。現在、TC 268/SC 1では次の2つのWGを設置し、スマート都市インフラに関する標準化を行っている。

#### (1) TC 268/SC 1/WG 1

WG 1は、スマートコミュニティを実現する都市インフラを適切に評価するための評価指標の標準化を進めている。政府、自治体、投資家などのインフラ調達側のニーズをベンダー、コンサルタントなどの提供側が理解し、都市インフラが同一基準で評価できるようにしてその国際交易の促進を目指す。既に、インフラ評価指標の標準化の基本コンセプトと既存の指標の調査結果を技術報告書TR 37150<sup>(2)</sup>として2014年2月に発行し、さらに普及促進のためのパンフレット<sup>(3)</sup>を公開した。

続いて、都市インフラに適切な評価指標を決定するための原則と要件を規定した技術仕様書TS 37151<sup>(4)</sup>を発行した。そこでは、評価指標決定のため次の原則を掲げている。

- (a) 評価指標が満たすべき性質(インフラ開発の諸段階に適用可能、多様なコミュニティに適用可能など)を考慮すること
- (b) 都市課題とインフラ性能の関連性を捉えること

また、インフラ評価指標を決定する手順として表2に示すステップ①～④を踏まえることを定めている。

- ①住民・都市管理者・環境の3視点を含むインフラ評価に必要な視点を認識
- ②各視点における重要なニーズを特定
- ③各ニーズに対応するインフラ性能を把握
- ④インフラ性能の評価指標として対象と測定法を特定

これらのステップによって、調達側ニーズと提供されるインフラ性能の関係が明確になり世界市場での交易促進が期待できる。今後、技術報告書TS 37151に従い、交通分野など個別のインフラを対象とした議論を進め、各インフラ分野での評価指標の標準化を推進する。

#### (2) TC 268/SC 1/WG 2

WG 2は、スマートコミュニティにおける都市インフラの開発・運用・維持のためのフレームワーク(仕組み、手順等)を標準化する<sup>(5)</sup>。2013年7月にSC 1/AHG(Ad Hoc Group)を

表2. TS 37151の評価指標決定ステップ

ステップ① (視点の認識)	ステップ② (ニーズの特定)	ステップ③ (インフラ性能の把握)	ステップ④ (評価指標の特定)
住民	可用性 (アベイラビリティ)	利用可能時間	...
	安全性	物理的な安全性	...
	...	...	...
都市管理者	運用効率	相互運用性	...
	経済効率	設備規模の適切さ	...
	回復力	ライフサイクルコスト	...
	...	投資効率	...
環境	資源の有効活用	堅牢(けんろう)性	...
	気候変動抑制	...	...
	公害防止	エネルギー利用効率	...
	...	温室効果ガス(GHG)排出量	...
		汚染物質排出量	...
		...	...

設置しフレームワーク標準化の必要性を検討してきた。2014年7月にWG 2への昇格が承認され、複数インフラ間の連携のためのフレームワークを対象に標準化を推進している。AHGの活動成果は技術報告書TR 37152として発行予定である。

## 4. IECにおけるスマートシティ国際標準化活動

### 4.1 スマートシティ標準化の体制

#### (1) 標準管理評議会とシステムズアプローチ

IECは従来、標準管理評議会(SMB)の下に、個別技術や機器ごとにTCを置いて標準を策定してきたが、システムズアプローチの必要性に鑑み、単一のTCで扱えない幅広い技術分野にわたるシステム標準の策定に取り組むSyCをSMBの下に設立する手続きと枠組みを新設した(図2)<sup>(6)</sup>。

SyCの必要性は、SEGを設置して判断される。また、システムリソースグループ(SRG)が、システムレベルの検討作業に用いる最適なツールなどの共有を推進する。

#### (2) 市場戦略評議会と白書

IECは、技術と市場の動向を市場戦略評議会(MSB)で調査・把握し、将来の標準の必要性等を白書にまとめて勧告している。スマートシティに関しては、図2に示す2件の白書<sup>(7)(8)</sup>が2014年に発行された。

### 4.2 標準化活動の状況と成果

#### (1) システム評価グループ

先に述べたシステム評価グループ(SEG)のうち、スマートシティに関するシステム評価グループSEG 1(SEG-Smart Cities)が、日本を議長、ドイツと中国を共同議長として2013年6月に設置された。SEG 1は、スマートシティに関するSyC設立の前段階として、SyCの作業範囲、参加者などを検討しSMBに勧告する。SEG 1では各国から提案された市場ニーズに基づくWGを複数設置して検討を進めている。

日本からは、大規模災害対策に関する白書<sup>(8)</sup>で提言したコンセプト：電気継続計画とシステム(Electricity Continuity Plans & Systems: ECP & ECS)を基にした都市機能継続性(City Service Continuity)のWGを提案し、標準化課題の検討を進めている。これは、電力供給の継続性を

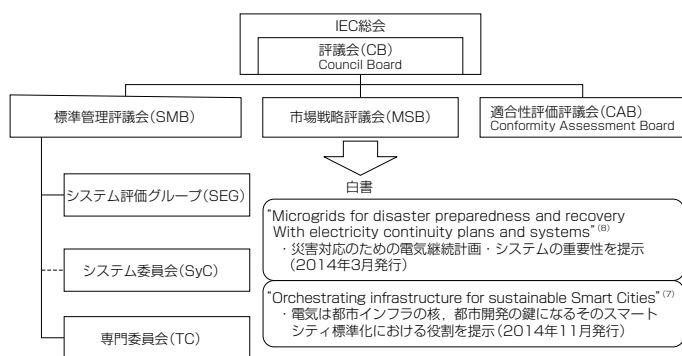


図2. IECの組織構成(スマートシティ関連)

ECSの階層構造		ECPによる経時対応(例)					
区分	ECP & ECSの階層	防災準備・投資	災害発生	緊急対策	安全復旧	復興・見直し	
想定事態・計画・行動層	災害形態・レベル想定 防災計画・BCP・法制 防災対策の市場普及	災害予測 防災計画 導入促進	監視 予想	緊急対策 応急処置 避難	節電 優先配電	改善	
上位3層と 下位3層の 接合層	・ECPのレベル分け ・ECSのクラス付け	ECPによる 対応レベル判断 ECSによる 対応クラス設定		情報収集 ECP発動		ECP・ECS 見直し	
設備・機器 部品層	ECS対応電機設備 ECS対応電気機器・部品 ECS要素技術	開発 設置	訓練 点検	ECS発動 優先配電	電気機器 安全復帰	改良・ 開発	

BCP : Business Continuity Planning

図3. ECS & ECPの具体例

核にして都市機能継続性の実現を図るものである。図3に白書<sup>(8)</sup>を基に加筆したECS & ECPの具体例を示す。災害に対し必要となる対応課題をECPで例示する時系列に沿って挙げ、それらをECSで区分する階層に振り分けた。課題ごとに標準化や指針化等の必要性を検討する。

## (2) システム委員会

SEG 1の勧告がSMBの検討を経て各国投票で承認された後、スマートシティのシステム委員会(SyC)が設立される。このSyCは、都市の一体化・相互交流・効率性の向上のための電気技術分野における標準策定を推進する。標準の必要性を把握して課題を設定し、自ら標準を開発するとともに、既存の各委員会SyC/TC/SCや他の標準化機関に勧告を出したり、共同作業を行うこともある。

なお現在IECでは、SyCがスマートエネルギーと自立生活支援(Active Assisted Living : AAL)の分野でそれぞれ設立され活動を始めている。

## 5. む す び

国際標準化機関によるスマートコミュニティ／シティの標準化動向について述べた。今後これらをベースにスマートコミュニティ／シティに関する標準が整備されていく。安全・安心で豊かな社会、持続可能な低炭素社会の実現に向けて、今後さらに具体的な貢献ができるよう努めたい。そこに三菱電機が蓄積してきた「平常時・異常時のエネルギー確保と需給制御技術」<sup>(9)</sup>、「低炭素かつ効率的なエネルギーマネジメントシステム技術」<sup>(10)</sup>、「安全・安心を支える社会インフラシステム技術」<sup>(11)</sup>等のスマート化技術を

活用することができれば幸いである。

さらに2050年の未来を思い描き、この特集号に述べられているような様々なスマート化技術を生かして地球レベルのスマート化を支える国際標準化を進め、持続可能な地球環境と経済成長が両立するスマートな循環型社会の実現を目指したい。

## 参 考 文 献

- (1) United Nations : World Urbanization Prospects, The 2014 Revision, Highlights (2014)  
<http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>
- (2) ISO/TR 37150 : Smart community infrastructures- Review of existing activities relevant to metrics (2014)  
[http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=62564](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=62564)
- (3) ISO Briefing Note : Smart community infrastructures Lessons learned (2014)  
[http://www.iso.org/iso/executive\\_summary\\_iso\\_37150.pdf](http://www.iso.org/iso/executive_summary_iso_37150.pdf)
- (4) ISO/TS 37151 : Smart community infrastructures- Principles and requirements for performance metrics (2015)  
[http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=61057](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=61057)
- (5) 石原嘉一 : TC268/SC1/WG2の紹介 (2014)  
[http://www.is-inotek.or.jp/archive/03\\_Ishihara\\_TC268SC1WG2.pdf](http://www.is-inotek.or.jp/archive/03_Ishihara_TC268SC1WG2.pdf)
- (6) IEC活動推進会議(IEC-APC) : IEC事業概要 (2014)  
[http://www.iecapc.jp/documents/gaiyou/2014\\_gaiyou\\_ippan.pdf](http://www.iecapc.jp/documents/gaiyou/2014_gaiyou_ippan.pdf)
- (7) IEC White Paper : Orchestrating infrastructure for sustainable Smart Cities (2014)  
<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-smartcities-LR-en.pdf>
- (8) IEC White Paper : Microgrids for disaster preparedness and recovery- With electricity continuity plans and systems (2014)  
[http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iec\\_WP\\_microgrids\\_for\\_disaster\\_2014-LR-en.pdf](http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iec_WP_microgrids_for_disaster_2014-LR-en.pdf)
- (9) 松崎 正, ほか : スマートグリッド・スマートコミュニティの取り組み, 三菱電機技報, **86**, No. 2, 100~104 (2012)
- (10) 鈴木浪平 : スマートコミュニティの取組み, 三菱電機技報, **88**, No. 9, 606~611 (2014)
- (11) 福岡秀樹, ほか : 社会インフラを支えるシステム技術, 三菱電機技報, **89**, No. 2, 96~100 (2015)