



NIES RESEARCH BOOKLET

# 環境儀

NO. 70

September 2018

国立環境研究所の研究情報誌

## 和風スマートシティ づくりを目指して



国立研究開発法人

**国立環境研究所**

<http://www.nies.go.jp/>



IoTやビッグデータなどの最新技術を活用して、  
日本独自のスマートシティをデザインする  
新たな研究に取り組んでいます。







オフィスやレストラン、鉄道のような各種の都市サービスを提供しているシステムを、情報通信技術 (ICT) を活用して統合的にデザインするスマートシティ計画が世界各地で進んでいます。一方、PCやスマートフォンなどの身近なICT機器だけでなく、オフィスや家庭で利用されているあらゆる「モノ」がインターネットに接続してサービスを提供する技術 IoT (Internet of Things, モノのインターネット) が急速に発展しています。このIoTを活用して、家庭のエアコンや冷蔵庫などが省エネを考慮して自動的に制御されはじめています。将来は、自動運転による交通サービス (スマートモビリティ) が実現される可能性もあります。

今後、IoTが急速に広く普及すると、私たちの居住環境や交通はどのように変わるでしょうか。新たなIoTの時代に、安全で健康に楽しく生活できる都市を実現するため、どのようなまちづくりが必要になるでしょうか。

私たちの研究チームでは、日本独自の視点からスマートシティをデザインし、その実現に向けて、東京を対象としていろいろな研究を行っています。ここではその一部を紹介します。

## CONTENTS

### 和風スマートシティづくりを目指して

- Interview 研究者に聞く  
IoT 時代の和風スマートシティの  
実現を目指す ..... p4 ~ 9
- Summary  
IoT・ビッグデータ時代の  
都市システム・デザイン ..... p10 ~ 11
- 研究をめぐって  
都市システム・デザインに関する  
国際研究 ..... p12 ~ 13
- 国立環境研究所における  
「GCP/ 都市モデルに関する研究」  
のあゆみ ..... p14

## IoT時代の 和風スマートシティの 実現を目指す

多くの人が集まり、社会経済活動の盛んな都市は、地球温暖化の原因である二酸化炭素の排出量が多く、その削減が必要です。近年では、大気中の温室効果ガスを削減する「緩和策」だけでなく、当面避けることのできない地球温暖化による被害を回避・軽減する「適応策」も同時に進めることが求められています。

こうした地球温暖化対策の視点から都市構造を見直すことが差し迫った課題となっています。グローバルカーボンプロジェクト（GCP）つくば国際オフィス代表の山形与志樹さんは、情報通信技術（ICT）を活用して、都市を分析し、住みやすく環境負荷の少ないスマートシティの実現を目指して都市システム・デザインの研究に取り組んでいます。

### 土地利用が変わると 二酸化炭素量も変化する

Q：ご専門の研究分野は何ですか。

山形：システム科学です。システム科学とは数理的なモデルで自然科学から社会科学まで様々な分野の複雑なシステムの挙動を、コンピュータなどを使って分析しようとする学問分野です。その中で環境やエネルギー問題といった課題に関する研究に大学時代から取り組んでいます。

Q：国立環境研究所にはいつ入所されたのですか。

山形：1991年です。入所したときは、人工衛星の画像を使って都市化に伴う森林や湿原などの土地利用変化を調べていました。土地利用とは、土地の状態や利用の状況のことです。土地利用を調べると、その土地の将来の多様な利用方法の良し悪しを研究することができます。たとえば、森林を伐採する（土地利用が変わる）と、地球温暖化を進行させることになります。一方、1997年に採択された「京都議定書」では、森林

## コラム① モノのインターネット（IoT）とスマートシティ

生活の中のあらゆるものがインターネットに接続され、情報交換をすることで相互に制御する技術は「モノのインターネット（IoT）」と呼ばれています（図1）。IoTを活用することにより、生活の利便性を向上させる各種のサービスが可能となってきました。身近な例としては、自宅に近づいたことをスマートフォンが位置情報で検知して、家のエアコンやお風呂のスイッチを自動で入れることなどがすでに可能になりつつあります。

スマートシティとは、こうしたIoTを活用することで都市における生活基盤サービス（交通、電力、水道など）を効率的に管理・運営した、また環境に配慮した、持続可能な都市像を指します。また、電力輸送の需要・供給を考慮しながら最適化する送電システムであるスマートグリッドや、電気自動車を導入しCO<sub>2</sub>排出量ゼロを目指すゼロエミッションなどの取り組みを含む、都市における包括的な取り組み自体のことを指す場合もあります。

■ 図1 IoTのネットワーク

IoTによりスマートフォンやスマートウォッチのほか、街中にある車や気象センサー、家の鍵や体重計など様々なモノがインターネットにつながる。



今後、世界では都市への人口集中がより進むことが予測される状況にあって、ビッグデータ（コラム2参照）なども活用しながら、より効率的で環境問題に配慮した各種サービスやエネルギー管理が求められています。横浜市などでは、家庭内の電力消費をモニタリングして見える化するHEMS（Home Energy Management System）や電気自動車の大規模導入など、スマートシティ化に向けた実証実験が進められています。





山形 与志樹（やまがた よしき）  
地球環境研究センター、気候変動  
リスク評価研究室主席研究  
員、グローバルカーボンプロ  
ジェクト（GCP）つくば国際  
オフィス・代表

の再生がCO<sub>2</sub>を吸収し、地球温暖化の防止に寄与することが示され、各国の削減数値目標の達成に、森林のCO<sub>2</sub>の吸収や排出量をカウントできることになりました。その時、私はIPCC（気候変動に関する政府間パネル）での国際交渉の政府代表団にも参加していましたので、それ以来、土地利用の視点から気候変動の政策と科学に関わる研究に取り組むことになりました。特に最近はIPCCの「土地利用と気候変動」報告書の査読編集者、2021年に発行が予定されている第6次評価報告書の新しい「都市システム」の章の主執筆者になりましたので、それらに貢献できる研究に取り組んでいます。

## 東京都市圏の変化をモデル化する

Q：東京はどのように変化しましたか。

山形：私たちの分析によれば、1960年代に始まった高度経済成長期から1990年代初頭のバブル期のころまで、東京の土地利用は大きく変化しましたが、

2000年以降の20年近くはあまり変化していません。ただ、都心では近年住宅の高層化が進んで、地価が下がったため、再び人口が増え始めています。

Q：データはどこから集めてくるのですか。

山形：最近では、特に人工衛星や航空機からの高分解能のリモートセンシング手法が発展し、ビルや木の高さを正確に計測できるようになりました。この手法で首都圏すべてのビルや樹木の3次元構造を解析しています。また、カーナビでも利用されている地理情報を、東京大学空間情報科学研究センターと連携して、長年かけて収集しGIS（地理情報システム）を構築してきました。おそらく私たちの研究室には、東京都市圏に関する各種地理情報が日本で一番集まっていると思います。現在、最も力をいれて集めているのは、建築物の利用情報と交通量のデータです。

建築物ならビルか戸建ての家か、鉄筋か木造か、ビルなら、デパートなどの商業施設かオフィスなのかといった細かいデータを集め、お店に何人のお客さんが来店しているか、エネルギーがどれだけ使用されているかなどを推定しています。特に最近では、ビッグデータを活用して、実際に都市の中で起こりつつある現在の変化を把握する研究も開始しています。

Q：具体的にはどんな分析をするのですか。

山形：1970年代から40年間の人工衛星の画像から土地利用の変化を調べ、「土地利用—交通モデル」と言われているシミュレーション手法を開発しました。このモデルを使って、東京が将来どう変化するのか、またどのようなデザインが可能なのか、という将来の土地利用を研究してきました。近年では、コンパクト

## コラム② ビッグデータ

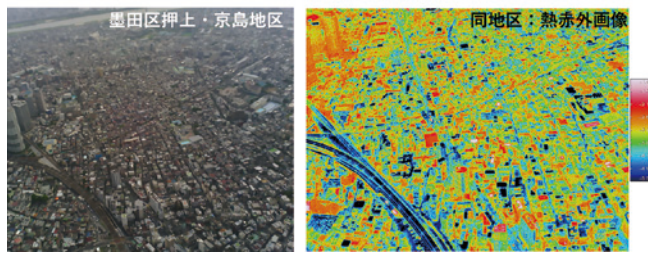
情報通信技術の進展に加えて、TwitterやFacebookなどのSNSや、各種センサー（GPSやカメラを用いた屋外屋内での人の移動、図2）、電子商取引（Amazon、Suicaなどのカード）、地図情報検索機能（Googleのカーナビなど）の普及により、多種多様かつ高解像度（場所、時間）の大容量のデータが蓄積されつつあり、「ビッグデータ」と呼ばれています。個人情報やプライバシーを保護しながら、これらの膨大なビッグデータを活用して社会に役立つ新しいサービスを開発することが、重要な研究課題となっています。



■ 図2 スマートフォンから取得した東京都23区における通勤時間帯（午前9時台）のGPSデータの分布  
白くなっている箇所はGPSの密度が高い場所を表す。鉄道路線上にデータが集中していることがわかる。

### 東京スカイツリーから24時間熱画像観測を実施

- ✓熱波が市街地に及ぼす影響の把握
- ✓屋内外の熱ストレスの見える化
- ✓歩行者や在宅高齢に熱中症警戒情報を提供



■ 図3 暑熱リスク対策のためのモニタリング

広範囲における暑熱環境をリアルタイムに評価するには、高所からの観測が有効です。航空機や衛星ではリアルタイムの観測が難しいため、研究チームでは、日本気象協会と協力し、東京スカイツリー展望台に熱赤外カメラを設置して墨田区押上・京島地区を24時間撮影し、熱画像の時間変化情報を取得しました。この情報と航空機から観測したより詳細な熱観測情報を組み合わせることで、墨田区押上・京島地区の周辺を含めた24時間の地表面温度の推定と、室内外の暑熱リスクの評価に取り組んでいます。

シティという概念が一般にも言われるようになってきました。これは、都市の中心部に様々な都市機能を集中させた都市形態のことをいいます。コンパクト化すると車での移動を少なくできるメリットがあるか、あるいはコンパクト化しなくても電気自動車や再生可能エネルギーなどの新技術を導入するとCO<sub>2</sub>の排出量がどのくらい減らせるのか、など土地利用シナリオを用いて分析してきました。車は主要なCO<sub>2</sub>排出源ですから、建築物の利用と交通量のデータを組み合わせると、東京からのCO<sub>2</sub>排出の要因を分析でき、将来の低炭素都市の設計に役立てることができそうです。

**Q**：そのような研究成果は、行政などにも生かされているのですか。

**山形**：過去には東京都市圏全体についての都市モデル分析手法を使って、圏央道やつくばエクスプレスの開通などが土地利用変化に与える影響を調べ、計画の参考にされたこともありましたが、広域的なまちづくりへの応用はなかなか難しいのです。それは、一部六県の東京都市圏をまとめて管轄する、関東州のような行政組織がないことが関係しています。

### ビッグデータを活用したまちづくり

**Q**：なるほど難しい問題ですね。

**山形**：そこで、最近は具体的な都市計画に貢献できるような小さいスケールの都市を研究しています。都市圏全体を対象としたマクロな分析ではなく、ミクロな分析により、まず街を変えていくという発想です。たとえば、墨田区のまちづくりについて、建築物と交通に関するシミュレーションを使って、都市のシステム・デザインを議論しています。区レベルのような小さい計画のほうがより具体的で、実現性が高いのです。

**Q**：都市を分析するのは難しいのですか。

**山形**：これまでの分析モデルは主に国の統計データによるものです。これは、東京都市圏などの広域を対象にしており、市町村のような小さい行政区分の分析に必要なデータはありませんでした。しかし、いまはIoT技術が進歩し、たとえば、カーナビなどから交通

に関する詳細で、しかも大量のデータ（ビッグデータ）が手に入ります。ビッグデータの時代になって、小さなスケールの分析ではデータが集めにくいという問題が解決に向かい、研究のテーマやニーズも変化しつつあります。

**Q**：ビッグデータからどんなモデルができるのですか。

**山形**：どんな情報で人々の行動がどう変わるかという、行動変容を研究しており、特に、省エネ行動と交通行動に注目しています。たとえば、人は、エネルギーの使用量の情報が見えると不必要な電気代を節約しようとし、渋滞がわかればそれを回避する経路を選ぼうとします。こうした行動変化によって、エネルギーを節約でき、結果としてCO<sub>2</sub>排出を減らせます。これ以外にも、ビッグデータの使い道にはいろいろな可能性があります。

**Q**：熱中症予防アプリも開発していますね。

**山形**：熱中症の予防には、リアルタイムの情報が重要です。いくら気温が35℃だと言われても、実際には道路や公園では地表面温度はかなり違います（図3）。そこで、NTTドコモと連携して、利用者がいる場所の地表の温度がリアルタイムでわかるアプリを開発し、公開しました（現在は休止中）。たとえば、お母さんがその情報を見て、グラウンドで遊んでいるお子さんを気温の低い芝生に移動させることができれば、熱中症を防ぐことができます。

**Q**：温暖化の適応策ですか。

**山形**：たしかにこのような行動は適応策といえますね。遠い将来ではなく、現実に関起きている問題に取り組むことも重要だと思います。夜間の熱中症対策に向けて、日本気象協会などと協力して東京スカイツリーから24時間、赤外線による熱画像観測実験を実施しました。その結果、墨田区にある木造高密度地域では、住宅の屋根や壁の温度は夜になっても予想以上に高いままであることがわかりました。このような地域にはクーラーを使わない高齢者が多く、危険な状態であることがわかります。さらには、2020年東



京オリンピック・パラリンピック時の危険性も指摘されています。温暖化が進行すれば、今年の夏のような高温が続くことは避けられません。熱中症対策に必要な行動をすべての人にとってもらうために、効果的なナビゲーターを開発する研究の提案を、共同研究者と検討しています。

Q：データが一目でわかるのはいいですね。

山形：そうですね。百聞は一見にしかずということでしょうか。たとえば、CO<sub>2</sub>の排出量をマッピングし、可視化すると、目に見えないCO<sub>2</sub>がどこで大量に発生しているかが具体的にわかるので、住民のCO<sub>2</sub>に対する意識が高まります。また、熱画像で室内や室外の気温変化をリアルタイムで可視化すると、どこで熱中症対策をすればよいのかが一目でわかります。

Q：墨田区以外でも研究していますか。

山形：これまでは、墨田区のほか埼玉県のパオパオ駅周辺で研究してきましたが、これからは品川駅周辺にもテストサイトを設定して、研究を始める予定です。品川駅周辺は、かつての東海道の宿場町として興味深いまちづくりが進んでいますが、一方で、JRの新駅やリニアモーターカーの始発駅ができるなど、東京の中でも特に大きな湾岸地域開発が進みつつあります。そこで、現状の詳細なデータをもとに、将来の環境変化を分析して、CO<sub>2</sub>排出量をできるだけ少なくし、かつ快適な都市にするためのデザインを検討し始めました。

東京大学などと協働してワークショップも開催しました。IoT時代の技術を活用しつつも、日本独自の過去と将来を調和させるような「和風スマートシティ」のデザインを目指したいと考えています。

## 都市が変われば、世界も変わる

Q：国際的な連携も進めているそうですね。

山形：私が代表をつとめているグローバルカーボンプロジェクト(GCP)国際オフィスを通して、国際的な連携を進めています。GCPは、様々な研究分野を含めて国際的に進められている研究プログラムFuture Earthのコアプロジェクトで、世界中に関連研究者のネットワークが広がっています。近年は途上国での都市化が加速しており、世界中の人々が都市に集まりつつあります。都市における温暖化対策なしには、グローバルな持続可能性は実現できません。

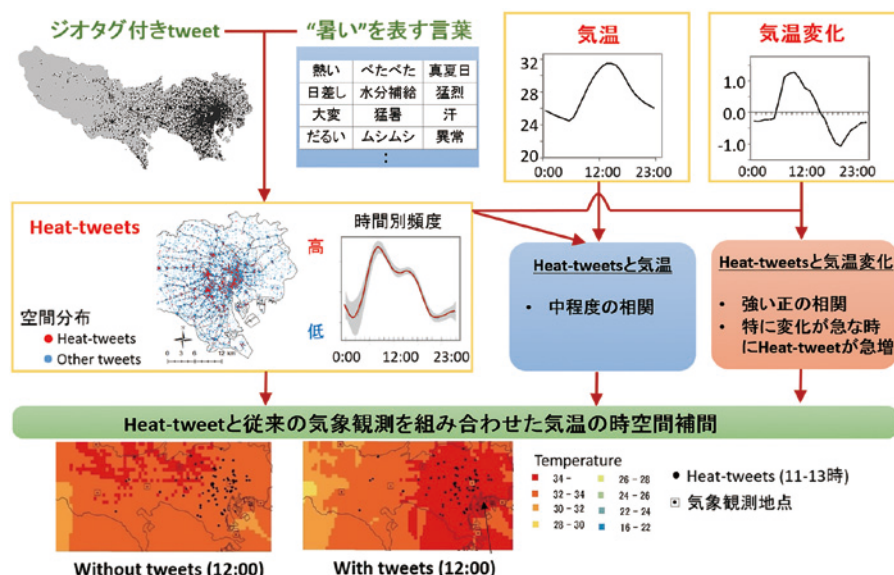
Q：アジアの国々も地球温暖化対策を進めた都市づくりをしているのでしょうか。

山形：はい。いまや中国でも、石炭火力から急速に方向転換し、再生可能エネルギーの導入を積極的に推進し、その発電量は世界一になっています。アジアの国々では、物やサービス、場所などを、多くの人と共有して利用する「シェアリングエコノミー」が進んでおり、むしろ、東京が新たな動きから取り残されている感がぬぐえません。しかし、アジアの研究者と話してみると、東京の現状がアジアの都市のモデルとして魅力的であるとともに、東京の今後の行方が注目されていることを感じています。

Q：日本では、東京以外の場所はどのようにでしょうか。

山形：大阪、名古屋、福岡、札幌などの大都市以外の地方都市において、人口の減少が深刻です。地方が持続不可能な形で衰退しないように、バランスよく発展、あるいは縮小することが喫緊の課題です。地球温暖化で農業なども影響を受け始めており、課題が山積し

■ 図4 ジオタグ(位置情報)付きツイートを活用した熱波状況の推定  
「暑い」や「ムシムシ」といった暑さに関連したツイートをするタイミングは、気温自体よりも気温上昇にかなり高い相関関係があることが明らかになりました。これらの結果から、暑さに関連したツイートのような、SNSから取得可能なビッグデータが観測場所が非常に限られている気温観測情報を空間的に補間し、さらには人間の心理・生理的な暑熱リスク自体をより正確に補足できる可能性があることが明らかになり、暑熱リスク対策への応用を検討しています。





■ 図5 国内外の多様なステークホルダーの参加による都市システム・デザインスタジオ

国内外の研究者、実務家、大学院生が参加して、建築デザイン、交通、エネルギーなどテーマ別のグループに分かれ、現状の3Dの都市モデルをベースとして将来の都市デザインシナリオを構築し、シナリオ別の環境評価シミュレーションを実施して持続可能な都市システム・デザインを提案します。

ています。そこで、地方では「ジオデザイン」という東京都とは全く異なるアプローチで、地域に密着した研究に取り組んでいます。これはWell-being（健康、幸福、豊かさ）に注目して、地元の市民や政策担当者、研究者が協働して将来の土地利用を考えるというものです。この研究では、北海道、長野、山梨などをテストサイトにしています。また、都市と地方の人の往来連携を強化することも重要な課題と考えられ、地方に関わりのある「関係人口」という新たなアイデアも議論され始めました。

## 都市システムをデザインする

Q：都市づくりに重要なものは何でしょうか。

山形：都市を変えるためには、新しいコンセプトのデザインが重要です。日本では、都市の土地が細分化され、都市のいたるところに小さい古いビルが乱立しています。このような土地利用は景観や居住環境に問題があるだけでなく、エネルギー効率や安全性にも問題があります。土地所有者が協力して、街区レベルでよ

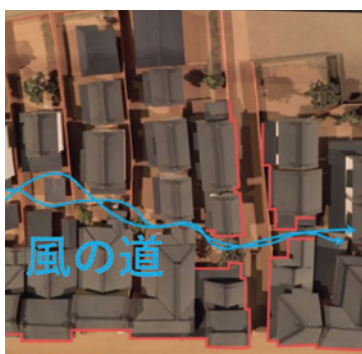
りよいデザインに合意することができれば、経済的にも価値が出ますし、環境負荷も大幅に低減できる可能性があります。さらに、地域全体でまちづくりを進めれば、日本人が本来持っている美意識に合った美しい街並みを再構築できます。そのためには、建築物だけでなく交通や人の動きなども考慮した持続可能で魅力的なデザインを提示し、合意形成を図らなければなりません。都市システムをデザインするという視点での研究を進めていきたいと考えています。

Q：海外では都市デザインは進んでいるのですか。

山形：たしかにいくつかの先進的な事例が出てきつつあります。たとえば、スペインでは、EUの支援を受けて「スマートサンタンデルプロジェクト」でIoTプラットフォームを導入した都市システムがデザインされました。最新のICT手法を活用して都市デザインをシミュレーションする研究が注目され、Googleなどもカナダのトロントでのプロジェクトを開始しています。今後のスマートシティでは、自動運転車などのスマートモビリティと、シェアリングエコノミーとを組み合わせた都市デザインがますます重要になるでしょう。都市デザインにIoTを組み合わせた研究で国際的に有名な米国のジョージア工科大学とも連携して、日本でも先進的なプロジェクトを提案したいです。

Q：将来どんな街をつくりたいですか。

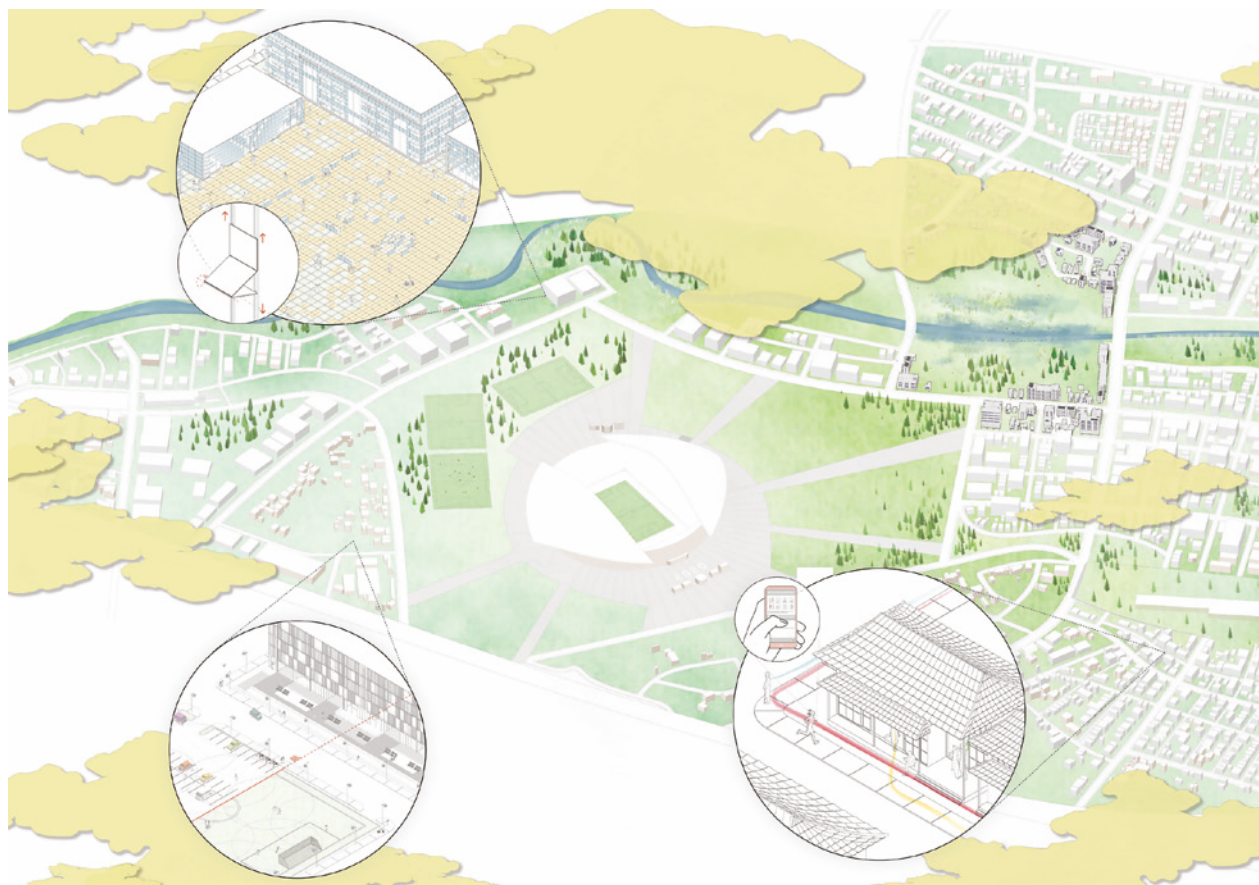
山形：今、私が新たな構想として温めているのは「和風スマートシティ」です。日本でスマートシティというと、ICT技術を駆使した環境エネルギー性能の高いまちづくりというイメージですが、それに加えて、本来の日本らしい「和風」の景観や人々のつながりを維持あるいは再生させる視点を大切にしたいと思います。海外から日本にいらした方に魅力的に見える「まち」はこのような場所ではないでしょうか。幸い、東京近辺にも昔ながらの地域のよさが多く残されています。IoTを活用して、お年寄りや海外からの観光客も含めたすべての人々が、このような和風スマートシティに滞在し、歩いて楽しく過ごせるようになればと願っています。たとえば、川越、北品川、谷根千地区（谷



■ 図6 和風スマートシティのコンセプトに基づく商店街の提案

現在の駅から埼玉スタジアム（さいたま市浦和区）に続く駅上の空間に、川越などの昔ながらの和風景観を再生しつつ、各種IoT技術を活用して暑熱リスクなどをコントロールして快適に歩くことができる「通り」のデザインを作成します。





■ 図7 和風スマートシティデザインの全体像

浦和美園駅から埼玉スタジアムまでの導線には、図6で示したような和風な景観で各種IoT技術を生かした快適に移動可能な空間や、その周辺には緑地と建築物を混在させた空間のデザインを盛り込んだ提案がなされました。

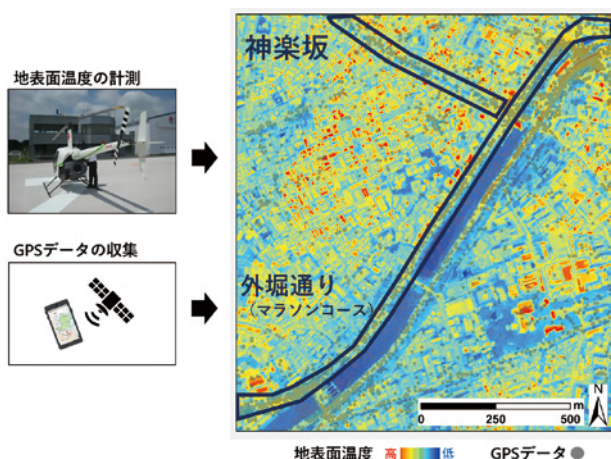
中・根津・千駄木)の通りは、そのような場所として若い人たちの注目を集めています。このような多様な人々で賑わう「通り」が、和風スマートシティの核になると思います。IoTを活用して、さらに快適かつ持続可能な「通り」をデザインできるかが、今後の大きなチャレンジだと考えています。

## コラム③ 東京オリンピック・パラリンピック時における熱中症対策

2020年東京オリンピック・パラリンピックは、酷暑の中で行われることが予想されており、アスリートのみならず、観客を含めた熱中症対策が差し迫った課題になっています。研究チームでは、地球温暖化適応策として、航空機による高解像度の地表面温度観測を共同研究者と実施しました。これにスマートフォンから取得されたGPSデータを重ね合わせて(図8)、暑熱リスクを考慮した人の歩行環境(Walkability)の評価研究に取り組んでいます。

■ 図8 2020年東京オリンピックのマラソンコースにおける2016年8月5日11時~13時半の地表面温度と同日同時刻のGPSデータ(東京都新宿区神楽坂付近)

東京オリンピックのマラソンコースの一部でもある外堀通りや、飲食店や商店が集中する神楽坂にGPSデータが多く分布しています。街路樹が多い外堀通りですが、実際には地表面温度は高く、オリンピックに向けて早急な暑熱リスク対策が必要であることがわかります。また、多くの人が歩く神楽坂の通りにおける歩行者の行動を観測して、暑熱リスクをコントロールすることで、暑熱リスク対策と経済活動の活性化の両立に向けた検討を共同研究者と進めています。



## IoT・ビッグデータ時代の都市システム・デザイン

生活の中にある、ありとあらゆるモノがインターネットにつながったIoT時代に、都市環境はどのような変革に迫られ、またどのようなことが実現できるでしょうか。快適性や省エネ性を併せ持つスマートな都市システムの実現に向けて、これまで私たちが進めてきた研究プロジェクトとともに紹介します。

### 建築物・道路単位のCO<sub>2</sub>マッピング

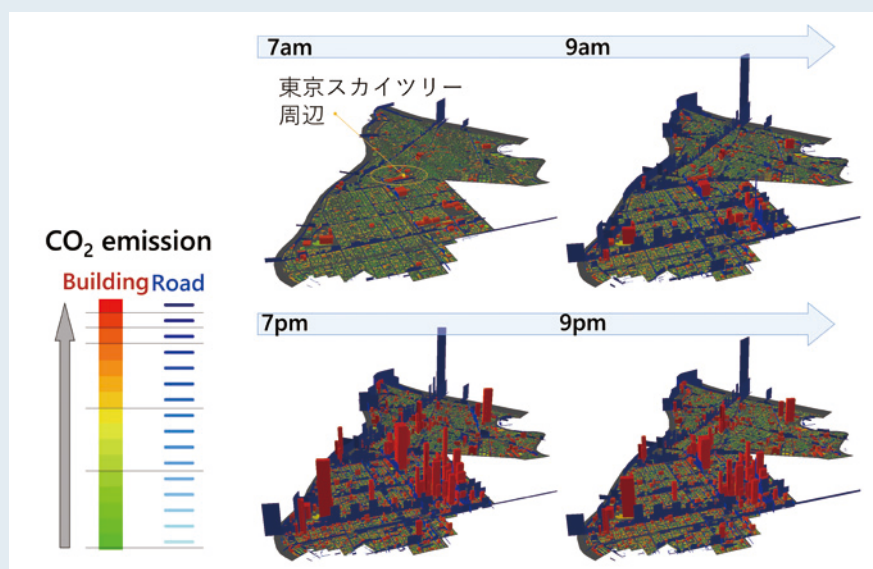
地球温暖化が進行する中、都市・地域単位でのCO<sub>2</sub>排出量の管理に関心が高まっています。2015年に採択された気候変動に関する国際的枠組み「パリ協定」では、温室効果ガスの削減目標が提示され、また世界中の228の都市が2020年までに計454ギガトン/年のCO<sub>2</sub>の削減を誓約するなど、国より詳細な単位でのCO<sub>2</sub>の管理・削減に向けた動きが加速しています。私たちの研究では、モバイルデバイスによって収集したGPSデータや、病院やオフィスなどの建築物用途別に推計されたエネルギー消費量原単位などを用いながら、地理情報システムの上で統合解析し、CO<sub>2</sub>排出量の時空間変動について3次元でのマッピングを試みました(図9)。

CO<sub>2</sub>マッピングを行うことで、各排出源の相対的な影響力の把握、効果的な政策の立案、政策の効果検証、ホットスポットや想定外の大きな排出(例えば、事故渋滞に伴う排出)の早期発見などが可能になります。マッピングにあたり、建築物と道路に関する基礎情報、活動量、排出原単位を収集しました(図10)。建築物・道路別、時間別といった時空間的解像度の高

いデータを収集することで、CO<sub>2</sub>排出量の時空間変動を推計することが期待できます。幸い近年では、建築物・道路別の基礎属性情報、自動車の位置情報、モバイルGPSデータといった詳細レベルの建築物・交通関連データが入手可能です。こうしたビッグデータを活動量とみなすことで、時間的・空間的に詳細な排出量の推計に役立てます。

また、排出原単位に関しても、延べ床面積別・用途別の原単位のような、建築物・道路のマイクロな属性を考慮するのに役立つ情報が公開されています。いつ・どの建築物や道路がどれだけCO<sub>2</sub>を排出しているかを地図上でわかりやすく可視化したことで、国や市区町村といった政策担当者のスケールではなく、市民が把握できるスケールでのCO<sub>2</sub>排出量削減行動を喚起し、促すような結果が得られました。

こうしたIoTによる省エネ化は、ゆくゆくはパリ協定の目標実現の切り札として期待されています。今後は、墨田区周辺部におけるCO<sub>2</sub>排出量や風向による影響の考慮も検討し、東京スカイツリーでのCO<sub>2</sub>濃度観測との関連も解析する予定です。



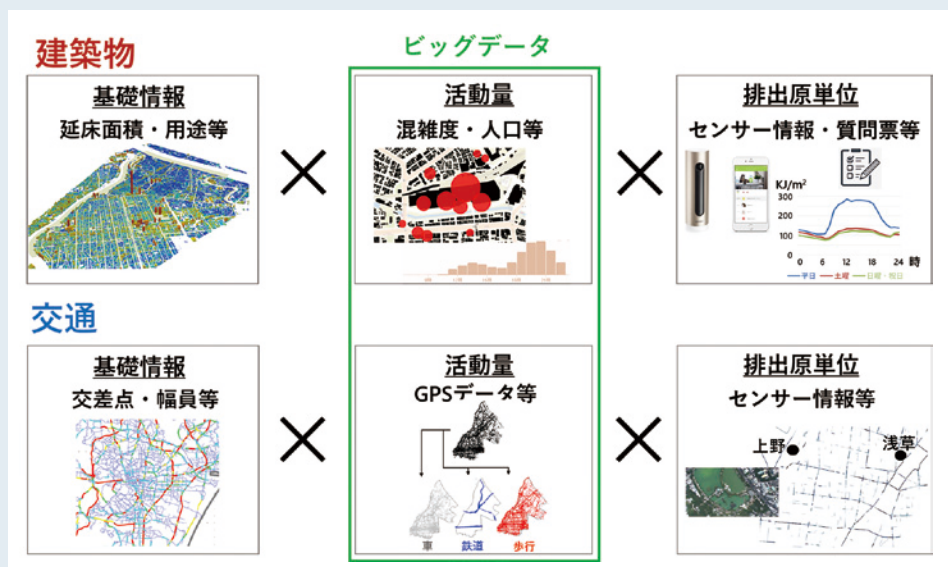
■ 図9 CO<sub>2</sub>排出量推計に必要なGISデータ

各建築物、道路ごとの時間別CO<sub>2</sub>排出量の大小を色と高さで表しています。通勤・通学の時間帯である午前7時台では建築物より道路のCO<sub>2</sub>排出量が大きいですが、出勤・登校後の9時台では転じて建築物からの排出が大きくなることがわかります。20時台では繁華街(特に錦糸町駅周辺)で排出量が大きくなっています。



■ 図10 時間別建築物・道路別のCO<sub>2</sub>排出量推計

建築物、交通それぞれについて、基礎情報、活動量、排出原単位を掛け合わせることで時間別CO<sub>2</sub>排出量を推計しています。ビッグデータが得られるようになったことで、個別の建築物・道路単位での活動量を把握することができるようになってきています。研究チームでは、ウェブ上の口コミサイトや地図アプリで公開されている店舗の平均的な混雑度や待ち時間をプログラミング言語を用いて自動収集したり、スマートフォンから取得するGPSデータの軌跡から交通手段を機械学習手法を用いて分類したりすることで、詳細な単位ごとの活動量を推計しています。



## 航空機観測・タワー観測・ツイッター情報を活用した熱波モニタリング

熱中症の死者数は国内外で近年急増しており、熱波対策が急務となっています。研究では、時々刻々と変化する熱波状況を詳細にモニタリングするための試みとして、(a) 東京スカイツリーからの熱画像観測、および(b) 航空機からの熱画像観測を融合した熱波状況の推定を試みました。(a)は24時間の観測ですが、斜方観測であり正確な緯度経度は把握できません。一方、(b)は鉛直観測であり正確な緯度経度が把握可能ですが、観測は1時点のみしかできません。(a)と(b)を組み合わせ、24時間の空間詳細な地表面温度を把握することを試みました。結果、午前急激な地表面温度の上昇や午後の緩やかな温度低下、道路、屋根、壁面の温度変化パターンの違いといった、地表面温度の時空間変化パターンを24時間にわたって推計することに成功しました(図3)。

こうした観測に基づく解析のほかに、ハザード(気温、気温上昇など)、曝露(人の空間分布状況など)、脆弱性(人々の状態)といった各種の熱波リスク状況をリアルタイムに把握する上で、twitterを対象にして情報を収集した位置情報(ジオタグ)付きツイートを収集し、解析しました(図4)。

研究では、ツイートの熱波モニタリングへの有用性検証の第一歩として、「暑い」の類語を含むツイートである“heat-tweet”と気温との関係性を分析しました。それにより、気温とheat-tweet頻度との相関はそれほど強くないが、気温変化とheat-tweet頻度との相関は強いこと、気温が急激に上昇した場合にheat-tweetが急増することなど、いくつかの興味深い結果が得られました。現在は、熱波モニタリングの

結果と、人の位置情報(GPS)データを組み合わせて、熱中症などの熱波リスクを低減する都市システム・デザインづくりに共同研究者と取り組んでいます。

## 都市デザイン・スタジオ

GCPつくば国際オフィスでは、上記のような研究成果を踏まえて教育・アウトリーチ活動として、定期的に国際ワークショップおよび設計スタジオを開催しています。2004年に同オフィスが開設されて以来、その数は20以上にのぼります(一例は15ページを参照)。これらのイベントには、科学者、政策立案者、若手研究者、学生、地域住民が参加し、スマートかつ持続可能でレジリエントな(回復力のある)都市イニシアティブの発展と推進のためのコ・デザイン(協働で研究活動を設計すること)を行っています。

たとえば、2017年3月には、2020年の東京オリンピックの開催地のひとつである埼玉県さいたま市(浦和美園)でスマートシティをデザインする設計スタジオを実施しました(図5, 6, 7, 11)。このスタジオはジョージア工科大学および東京大学と共同で実施され、都市設計とモデリング、都市分析、IoT、スマートビルディング、スマートモビリティ(移動)、グリーンファイナンスの分野の専門家と地域の政策担当者や企業が参加しました。参加者は、スマートで環境に配慮したパイロットシナリオの作成に重点的に取り組み、スマートシティが日本でどのように設計され、評価され、資金調達が行われているかを検討し、この結果を地元自治体と共有する、といった一連のデザインプロセスを体験しました。2018年3月にも、東京都墨田区京島にて同様のスタジオを実施し、別の国際ワークショップ「IoT時代における環境にやさしいスマートシティを目指して」とも連携して開催しました。

# 都市システム・デザインに関する国際研究

高度な情報基盤の整備と都市への人口集中が進む中で、IoT や人工知能を活用した都市システム・デザインへの期待が高まっています。スマートフォンやIoT センサーから得られるビッグデータの活用によって、省エネ化・効率化した都市システムを実現する取り組みを推進しています。

## 世界では

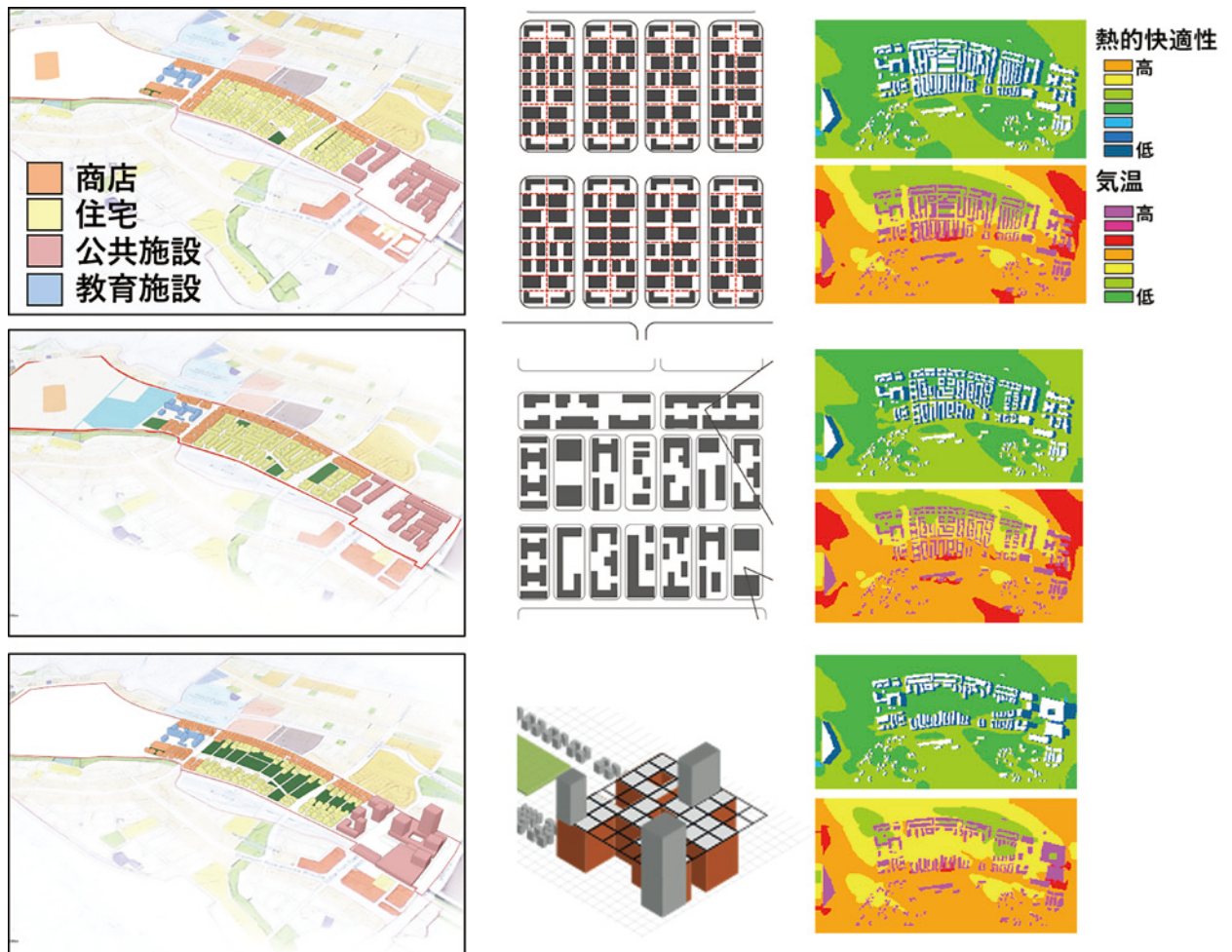
IoT 機器の普及が進む中でどのように都市システムをデザインしていくのか、また、最先端のICTやビッグデータの活用が都市システムに対してどのような影響を及ぼし得るのかについて、高度化する情報基盤の開発と並行して検討されています。

国連経済社会局が2018年に発表した「World Urbanization Prospects」では、都市に暮らす人の世界人口に対する割合が1950年には30%であったのが、100年後の2050年には68%と全体の3分の

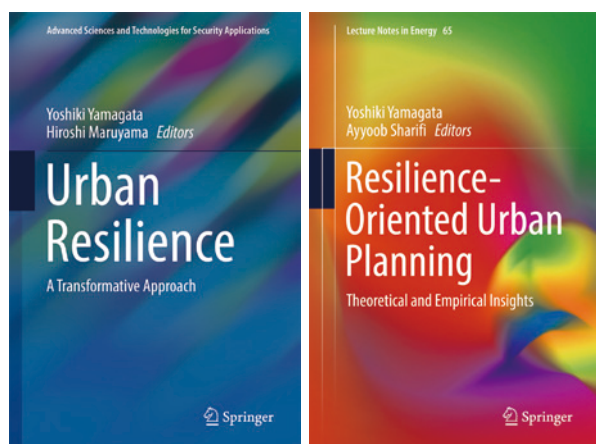
2を超えると予測しています。都市人口の増加とともに都市インフラの限界も指摘されており、渋滞の増加などが懸念されています。人口増に対応しながら、災害に対する回復力があり、持続可能で、環境にやさしく、市民の健康と幸福感を増進させる都市システムをデザインするために、IoTや人工知能技術の活用への期待が高まっています。具体的なスマートシティへのIoT応用事例としては、スペインのバルセロナが挙げられます。街中の駐車場にはIoTセンサーが取り付けられ、インターネットを介してその稼働状況がドライ

■ 図 11 スタジオで作成された都市デザインとシミュレーションの例

景観の観点以外にも、商店や住宅の配置、建築物の高さや構造によって快適性や気温の分布が異なるため、環境・エネルギーの観点からも複数のデザインを検討・作成し、シミュレーションソフトを用いてそのパフォーマンスを評価しました。







■ 図12 都市システム・デザインに関する書籍

書籍では、低炭素であり災害や経済不況などの主要な脅威に対して回復力があるスマートシティの実現に向けて、都市のシステムや経営・管理、土地利用といった研究の理論と実証的知見をまとめています。

バーのもつスマートフォンなどにリアルタイムに提供されていたり、ごみ箱の裏につけたセンサーからごみの量や腐敗度が通知されて効率的な収集経路を選択したりするといったことに活用されています。また、環境、交通、防災といった分野間での円滑なデータ活用やサービス連携を目的として、「FIWARE（ファイウェア、Future Internet-WARE）」というスマートシティのIoTによる計測情報を一括管理して、GISや各種解析ソフトウェアを統合して都市の各種オペレーションに活用する、オープンソースのIoTプラットフォーム（スマートシティOS）の開発が進んでいます。

## 日本では

このFIWAREを活用した国内事例としては、高松市などで観光と防災の分野で開発が始まっています。具体的に、観光分野では、国内外の観光客が利用するレンタサイクルにGPSを取り付け、利用されたルートや立ち寄りスポットを国籍などの属性別に分析し、潜在的な観光スポットの発掘や観光ガイドの配置の効率化に活用されています。また、防災分野では、災害対策として水路や護岸に水位センサーや潮位センサーを設置し、その情報を市役所でリアルタイムにモニタリングすることで、市民への周知手順を効率化し早期対応に活用されています。

実際、日本ではこうしたIoTプラットフォームの活用を加速させる高度な情報基盤が世界に先駆けて整備されつつあります。誤差がセンチメートル単位の測位衛星サービスである準天頂衛星システム「みちびき（日本版GPS）」の運用が2018年に始まり、さらに、20秒間に10GBを超える高速通信や1ミリ秒以下の

低遅延の通信環境を実現する次世代移动通信システム（5G）の事業化が2020年に始まろうとしています。みちびきによる高精度の位置情報に基づいた情報提供や、5Gによるリアルタイムなエンド・ツー・エンドの相互通信が可能になり、個人に応じた情報フィードバックの利用がより進むことが見込まれています。また、人々の状況をリアルタイムに集めることで効率的な都市システムの構築が期待されています。

現在世界最大のメガシティである東京都市圏では、こうしたシステムやサービスを活用して、低炭素かつ水害や熱波などの気候変動リスクに対してレジリエントな都市をどのように構築してゆくかについて、世界の目が向けられています。

## 国立環境研究所では

国立環境研究所に設置されているGCPつくば国際オフィスでは、「都市と地域における炭素管理（Urban and Regional Carbon Management: URCM）」イニシアティブを国際的に推進しています。この一環として私たちはスマートで持続可能な都市に関する研究に取り組んでいます。

主な研究活動として、スマートシティ・プロジェクト（例：ICT、IoT、ビッグデータ）が低炭素かつ様々な災害などに対してレジリエントなコミュニティをつくることにどのように貢献し得るかを、環境分野の研究者だけでなく都市デザインを専門とする研究者と共に検討しています。たとえば、スマートウォッチやバイタルセンサーなどのモバイルデバイスから得られたビッグデータを、平常時とともに花火大会やマラソンなど交通が規制される非日常時についても収集・分析し、様々なシナリオ下での移動パターンを理解することを目指しています。この分析により、都市の歩きやすさの改善や、気候変動の緩和と適応に貢献するだけでなく、市民の健康と幸福感を増進させる低炭素な交通システムの普及を目指しています。

また、都市のCO<sub>2</sub>排出量をマッピングする研究をFuture EarthやWUDAPTなどの国際組織と連携しながら進めています。この研究では、GPSやモバイルデバイスから得られる位置情報のビッグデータを活動量として利用し、建築物と交通に由来するCO<sub>2</sub>排出量を推計しています。

この研究の成果を用いて、環境にやさしく市民の幸福感が増す都市システム・デザインや政策提言を目指しています。いくつかの研究成果は、書籍にまとめられています（図12）。

# 国立環境研究所における 「GCP／都市モデルに関する研究」のあゆみ

国立環境研究所では、グローバルカーボンプロジェクト（GCP）に関する研究を行っています。  
ここでは、その中から、都市モデルに関するものについて、そのあゆみを紹介します。

| 年度        | 課題名                                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| 2007～2011 | 統合システム解析による空間詳細な排出・土地利用変化シナリオの開発 <sup>*1</sup>            |
| 2008～2010 | 低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究 <sup>*2</sup>                   |
| 2010～2014 | 高解像度気候変動シナリオを用いた大都市圏の風水害脆弱性評価に基づく適応に関する研究 <sup>*3</sup>   |
| 2011～2015 | 地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究 <sup>*4</sup>                      |
| 2012～2016 | 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略 <sup>*2</sup>                |
| 2015      | アジア太平洋の都市における気候変動の緩和と適応のための統合されたレジリエンスな都市計画 <sup>*5</sup> |
| 2016～2018 | 水害リスク情報提供サービス設計手法の開発 <sup>*6</sup>                        |
| 2017～2019 | 地球温暖化対策のための地表面温度の時空間解析の高度化 <sup>*6</sup>                  |

\*1 環境省地球環境研究総合推進費

\*2 環境省環境研究総合推進費

\*3 文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム

\*4 所内重点プログラム

\*5 アジア太平洋地球変動研究ネットワーク (APN) 助成金

\*6 文部科学省 (日本学術振興会) 科学研究費補助金

グローバルカーボンプロジェクト (GCP) つくば国際オフィス  
<http://www.cger.nies.go.jp/gcp/>

山形与志樹  
<https://yamagatay.jimdo.com/>

本号で紹介した研究は、以下の機関、スタッフにより実施されました (所属は当時、敬称略、順不同)。

〈研究担当者〉

国立環境研究所：山形 与志樹、瀬谷 創、ハス 巴干、中道 久美子、村上 大輔、Ayyoob SHARIFI、松井 加奈絵、吉田 崇紘、Yihan WU、Dararat KHAMCHIANGTA、尾島優雅子

アジア工科大学：Shobhakar DHAKAL

ジョージア工科大学：Perry YANG、Robert BINDER、Soowon CHANG、Michael TOBEY

東京大学：村山顕人



# GCP／都市モデルに関する国際会議開催

| 年度   | 会議名(開催地)                                                                                   |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2010 | 都市のエネルギーと炭素モデリングに関する国際ワークショップ(オーストリア)                                                      |
| 2011 | 都市における水・エネルギー・炭素の関連(東京)                                                                    |
| 2012 | 気候変動対策に適した都市発展—都市の評価フレームワークの構築に向けて(タイ)                                                     |
| 2013 | 持続可能な発展のためのグリーンエネルギーに関する国際会議・ユーティリティエキシビジョンにおけるセッション(タイ)                                   |
| 2014 | リスク適応シナリオ：創成的対話アプローチ(沖縄)                                                                   |
| 2014 | 国連・豊田市共催「持続可能な都市に関するハイレベルシンポジウム～人と環境と技術の融合～」におけるGCPワークショップ(豊田)                             |
| 2015 | 都市レジリエンス評価のための指標とツールに関する国際ワークショップ(東京)                                                      |
| 2016 | グローバルな都市炭素マッピングに関するGCP-WUDAPT国際ワークショップ：Future EarthのKnowledge Action Networksへの貢献に向けて(スイス) |
| 2016 | 第1回都市インテリジェンスに関するGCPワークショップ—気候変動に対するレジリエントな都市発展に向けた経済モデリングと気候変動リスクモデリングのインターフェイスの検討(つくば)   |
| 2016 | 都市持続性評価の実務と研究に関するワークショップ(東京)                                                               |
| 2016 | 東京スマートシティスタジオ2017ワークショップ(東京、つくば、さいたま)                                                      |
| 2016 | 東京スマートシティシンポジウム(東京)                                                                        |
| 2017 | 東京スマートシティスタジオ2018ワークショップ(東京、つくば)                                                           |
| 2017 | IoT時代における環境にやさしいスマートシティを目指して(東京)                                                           |
| 2018 | 気候変動の緩和のための都市ソリューションの体系化・高度化(ドイツ)                                                          |

## 環 境 儀 No.70

—国立環境研究所の研究情報誌—

2018年9月28日発行

編 集 国立環境研究所編集分科会

(担当 WG: 広兼克憲、山形与志樹、江守正多、石垣智基、石濱史子、岩崎一弘)

発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp

編集協力 有限会社サイテック・コミュニケーションズ

印刷製本 株式会社イセブ

無断転載を禁じます

## 「環境儀」既刊の紹介

|                           |                                                |                           |                                                     |
|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>No.24</b><br>2007年 4月  | 21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究                   | <b>No.47</b><br>2013年 1月  | 化学物質の形から毒性を予測する—計算化学によるアプローチ                        |
| <b>No.25</b><br>2007年 7月  | 環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして                          | <b>No.48</b><br>2013年 4月  | 環境スペシメンバンキング—環境の今を封じ込め未来に伝えるボタンリレー                  |
| <b>No.26</b><br>2007年 10月 | 成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測                 | <b>No.49</b><br>2013年 7月  | 東日本大震災—環境研究者はいかに取り組むか                               |
| <b>No.27</b><br>2008年 1月  | アレルギー性疾患への環境化学物質の影響                            | <b>No.50</b><br>2013年 10月 | 環境多媒体モデル—大気・水・土壌をめぐる有害化学物質の可視化                      |
| <b>No.28</b><br>2008年 4月  | 森の息づかいを測る—森林生態系のCO <sub>2</sub> フラックス観測研究      | <b>No.51</b><br>2014年 1月  | 旅客機を使って大気を測る—国際線で世界をカバー                             |
| <b>No.29</b><br>2008年 7月  | ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して           | <b>No.52</b><br>2014年 4月  | アオコの有毒物質を探る—構造解析と分析法の開発                             |
| <b>No.30</b><br>2008年 10月 | 河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す              | <b>No.53</b><br>2014年 6月  | サンゴ礁の過去・現在・未来—環境変化との関わりから保全へ                        |
| <b>No.31</b><br>2009年 1月  | 有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB処理の一翼を担う分析研究                 | <b>No.54</b><br>2014年 9月  | 環境と人々の健康との関わりを探る—環境疫学                               |
| <b>No.32</b><br>2009年 4月  | 熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測                 | <b>No.55</b><br>2014年 12月 | 未来につながる都市であるために—資源とエネルギーを有効利用するしくみ                  |
| <b>No.33</b><br>2009年 7月  | 越境大気汚染の日本への影響—光化学オキシダント増加の謎                    | <b>No.56</b><br>2015年 3月  | 大気環境中の化学物質の健康リスク評価—実験研究を環境行政につなげる                   |
| <b>No.34</b><br>2010年 3月  | セーリング型洋上風力発電システム構想—海を旅するウィンドファーム               | <b>No.57</b><br>2015年 6月  | 使用済み電気製品の国際資源循環—日本とアジアで目指すE-wasteの適正管理              |
| <b>No.35</b><br>2010年 1月  | 環境負荷を低減する産業・生活排水の処理システム—低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化—  | <b>No.58</b><br>2015年 9月  | 被災地の環境再生をめざして—放射性物質による環境汚染からの回復研究                   |
| <b>No.36</b><br>2010年 4月  | 日本低炭素社会シナリオ研究—2050年温室効果ガス70%削減への道筋             | <b>No.59</b><br>2015年 12月 | 未来に続く健康を守るために—環境化学物質の継世代影響とエピジェネティクス                |
| <b>No.37</b><br>2010年 7月  | 科学の目で見える生物多様性—空の目とミクロの目                        | <b>No.60</b><br>2016年 3月  | 災害からの復興が未来の環境創造につながるまちづくりを目指して—福島発の社会システムイノベーション    |
| <b>No.38</b><br>2010年 10月 | バイオアッセイによって環境をはかる—持続可能な生態系を目指して                | <b>No.61</b><br>2016年 6月  | 「適応」で拓く新時代!—気候変動による影響に備える                           |
| <b>No.39</b><br>2011年 1月  | 「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質—フェリーを利用してそれらの因果関係を探る        | <b>No.62</b><br>2016年 9月  | 地球環境100年モニタリング—波照間と落石岬での大気質監視                       |
| <b>No.40</b><br>2011年 3月  | VOCと地球環境—大気中揮発性有機化合物の実態解明を目指して                 | <b>No.63</b><br>2016年 12月 | 「世界の屋根」から地球温暖化を探る—青海・チベット草原の炭素収支                    |
| <b>No.41</b><br>2011年 7月  | 宇宙から地球の息吹を探る—炭素循環の解明を目指して                      | <b>No.64</b><br>2017年 3月  | PM <sub>2.5</sub> の観測とシミュレーション—天気予報のように信頼できる予測を目指して |
| <b>No.42</b><br>2011年 10月 | 環境研究 for Asia/in Asia/with Asia—持続可能なアジアに向けて   | <b>No.65</b><br>2017年 6月  | 化学物質の正確なヒト健康への影響評価を目指して—新しい発達神経毒性試験法の開発             |
| <b>No.43</b><br>2012年 1月  | 藻類の系統保存—微細藻類と絶滅が危惧される藻類                        | <b>No.66</b><br>2017年 9月  | 土壌は温暖化を加速するのか?—アジアの森林土壌が握る膨大な炭素の将来                  |
| <b>No.44</b><br>2012年 4月  | 試験管内生命で環境汚染を視る—環境毒性の <i>in vitro</i> バイオアッセイ   | <b>No.67</b><br>2017年 12月 | 遺伝子から植物のストレスにせまる—オゾンに対する植物の応答機構の解明                  |
| <b>No.45</b><br>2012年 7月  | 干潟の生き物のはたらきを探る—浅海域の環境変動が生物に及ぼす影響               | <b>No.68</b><br>2018年 3月  | スモッグの正体を追いかける—VOCからエアロゾルまで                          |
| <b>No.46</b><br>2012年 10月 | ナノ粒子・ナノマテリアルの生体への影響—分子サイズにまで小さくなった超微小粒子と生体との反応 | <b>No.69</b><br>2018年 6月  | 宇宙と地上から温室効果ガスを捉える—太陽光による高精度観測への挑戦                   |

●環境儀のバックナンバーは、国立環境研究所のホームページでご覧になれます。  
<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

### 「環境儀」



地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、『環境儀』という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。『環境儀』に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一  
 (環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字 N.I.E.S で構成されています。N= 波(大気と水)、I= 木(生命)、E.S で構成される○で地球(世界)を表現しています。ロゴマーク全体が風を切った左側に進むようにする動きは、研究所の運動性・進歩・向上・発展を表現しています。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。