ITS スマートシティ・千葉県柏市における 道路交通からのCO₂排出量8%削減の実証実験

—地域市民に「気づき」を与え、環境に優しい交通行動を促すための仮想化空間の構築—

小野晋太郎
池内克史

Shintaro Ono 東京大学
Katsushi Ikeuchi 東京大学

1 はじめに

ITS (Intelligent Transport Systems) の目指すところは、移動・交通にまつわる情報通信技術を通じて住みやすい社会を構築すること、と言ってもよいでしょう。一般には「高度道路交通システム」と訳され、事故や渋滞、環境対策など主に道路交通における課題解決の仕組みとして考えられた ITS ですが、今日では道路・自動車に限らず、人～インフラ～移動体を情報通信で結び、安全・安心、環境・効率、快適・利便に資するシステムの総称と捉えられています。

このような概念や技術は、環境問題や少子化、地域活性化などの課題を抱える今後の都市整備においても活用が望まれています。また一方で、ITS の研究開発における様々な実験には、行政の協力が得られる実証フィールドが必要とされており、ここに相互の連携が見いだされています。

1.1 柏 ITS スマートシティ

都心の北東 30 km 圏に位置する千葉県柏市は、都心を中心とした放射状・環状の幹線道路・鉄道が交差する要衝であり、事故・渋滞や CO₂ の排出、高齢化や鉄道新線の開業に伴う都市構造の変化など、新たな課題が生じていました。

同市は内閣府から、2009 年 6 月に「ITS 実証実験モデル都市」、2011 年 12 月に「環境未来都市」構想のモデル都市として選定を受け、2010 年に設立された「柏 ITS 推進協議会」*1 を中心に、以下の理念に基づいて「柏 ITS スマートシティ」の街づくりを進めています (図 1)。

*1 柏市、千葉県、国土交通省、経済産業省、東大、千葉大など産官学 50 以上の団体が参画。

- ・カーボンフリー：低炭素で環境に優しい人・車・自然の共生
- ・ストレスフリー：便利で快適なモビリティの利用
- ・モードフリー：個人に適した移動手段選択

同市に柏キャンパスを有する東京大学では、柏 ITS 推進協議会の活動を主導し、以下のような様々な研究開発を進め、ITS 技術の社会実装による地域の交通課題解決を目指してきました。

- ・交通情報の利活用：プローブやシミュレーションによる交通状況の把握・集約、仮想化空間における地域の交通状況・CO₂ 排出状況の可視化・配信
- ・ICT による中心市街地活性化：中心駅における鉄道・バスのリアルタイム乗換情報提供、駐車場の利便性向上、観光・地域情報提供
- ・公共交通の再編検討と効果検証：タクシーより高効率・低コストなオンデマンドバス、ガソリン車・電気自動車・電動バイク・自転車などを統合的に利用できるマルチ交通シェアリング、省エネ型軌道交通 (エコライド)

図 1 柏 ITS スマートシティの目指す社会

- ・次世代車両の研究開発：キャパシタ蓄電とワイヤレス給電を用いた電気自動車、自動走行カート、一人乗り超小形モビリティ、自転車にも立ち乗り二輪車にもなるパーソナルモビリティ

1.2 四次元仮想化空間

デジタル地図などのように静的な都市空間構造をコンピュータに再現したものは、二次元あるいは三次元の「仮想化空間」と理解されます。筆者らの研究室でもアンコール遺跡などの大規模文化遺産や東日本大震災の被災状況のアーカイブ^{(1), (2)}を行っています。これらも静的な仮想化空間の一種と言えます。Web等を通じて自由な視点で参照すれば、離れた所から見えないものが見えるようになり、さながら千里眼や透視のような機能が実現できることになります。

この拡張として、四次元の仮想化空間⁽³⁾を考えるこ

図2 四次元仮想化空間のイメージ

とができます。すなわち、過去・将来の状況や、現在の動的現象（都市の活動）を再現することのできる仮想化空間です。過去に消失してしまった遺跡や三陸地方沿岸の街並みを仮想化空間で再現すれば、タイムマシンがなければできなかった体験も可能になるでしょう。あるいは、車の動きや大気の状態を都市の動的現象と捉えて再現すれば、多くの人に直感的な理解を与えることができます。図2に四次元仮想化空間のイメージを示します。

以降では主に筆者らが行った、仮想化空間上での交通状況・CO₂排出状況の可視化とCO₂排出削減の実証実験について紹介します。

2 地域民の「気づき」によるCO₂の排出削減

自動車交通からのCO₂排出は全体の約18%を占め、官民挙げてその削減に取り組まれています。これまでの施策は、エコカーの普及など、自動車・運転者を対象とし、自動車利用の利便性を高めることに主眼が置かれてきました。

これに対し、この研究では、運転者以外にも含めた地域市民全体を対象に、自動車の利用や混雑によるCO₂の排出などを実感できる情報を提供することで市民に「気づき」を与え、環境に優しい行動（経路や出発時刻の変更、低燃費走行、公共交通の利用など）をとるよう促します。更には、情報提供を通じて地域の交通・環境問題への意識を高めてもらうことで、節電やエコカーへの買い換えなど、移動と直接に関わりのないところでも環境に優しい行動を促します。

全体の概念図を図3に示します。近年では、路上や

図3 地域市民を含めた情報フィードバックループ

路側に設置されたセンサから交通状態を観測できるようになっており、これらを統合・補間して交通状況・CO₂排出状況を算出・可視化します。

3 「気づき」を与える仮想化空間

交通状況やCO₂排出に関する情報は、収集、統合、加工・配信の3段階を経て地域市民に提供されます。

3.1 収集：交通観測

3.1.1 路上・路側カメラの活用

通常は監視カメラとして用いられる路上・路側カメラの映像から、時空間 MRF と呼ばれる技術により車両の交通流をリアルタイムで継続的に観測します^{(4), (5)}。図4に動作例を示します。今回構築したシステムでは、車両1台ごとの識別・速度計測・2車種分類、5分当りの交通量、1分に1枚程度の静止画像を、後に述べるデータベースに自動的に蓄積可能としています。また、未設置箇所への展開も考慮して、IPカメラとWiMAX回線を活用した可搬形システムでも動作検証を行っています。

3.1.2 ナンバプレート調査機器の活用

道路上の主要箇所では、ナンバプレート調査用の機器も活用して、各地点で車両を識別し・照合します。これにより、交通量や旅行速度が、起点・終点のペア(OD)ごとに、時間帯別に把握することができます。今回のシステムにおいては、千葉県柏市内の国道6号・16号上の4箇所の双方向、計8台を設置し、起点・終点のペアごとの速度データを後に述べるデータベースに蓄積できるようにしました。

図4 既設カメラを活用した交通観測

図5 ライブシチュエーション型道路実況画像

3.1.3 ライブシチュエーション型道路実況画像の収集

一般市民が交通状況を分かりやすく把握するためには、より直接的に「見た目」の状況を実感できることが効果的と考えられます。そこで、地域内道路の「擬似実況画像」を配信します。今回のシステムでは、測量会社の計測車両に360°カメラとGPSを積載し、携帯通信回線を通じて毎秒1枚程度の全周囲画像をサーバに蓄積することができます。

地域内のあらゆる場所・時刻でそのような実況画像が参照できれば理想ですが、これは極めて高コストで非現実的です。そこで、あらかじめ様々な状況下(曜日・時間帯・交通量別など)で各地の全周囲画像を低頻度ながらも長期間にわたって収集しておき、必要に応じて、時間帯や交通量が最も近い状況の全周囲画像を提示する仕組みを構築しました。図5に概要を示します。

3.1.4 その他の入力情報

これら以外にも、車両感知器や光ビーコンから得られる地点交通量、プローブ情報^{*2}、ETCによる交通量、国土交通省のITSスポット、バスロケーション、信号制御データなどから、様々な条件における道路交通状況を収集します。

また、時刻表、事故データ、気象データ、ODセンサスデータなどの統計的情報も、後述のナウキャストシミュレーションに対する補足的な入力情報として利用されます。

3.2 統合：時空間融合交通情報基盤

3.2.1 ナウキャスト交通シミュレーション

ここまでで得られるデータは断片的なもので、時間的にも空間的にも不連続・部分的です。データの種類によって密度や頻度もまちまちです。これらのデータから補間処理により地域内の各地点・時刻における完全な交通状況を推計します^{(6), (7)}。これをナウキャストシミュレーションと呼びます。

一般道の交差点以外の区間(単路部)では、区間前後の交通データ、信号制御データ、プローブデータから、区間内の全車両の軌跡を補間モデルにより推定します。図6に補間のイメージを示します。

より広い区域に関しては、基本となる再現ケース(ベースシミュレーション)を構築しておき、交通量や旅行速度が実測値と整合するようにシミュレーションのパラメータを校正し、推計します。

今回構築したシステムでは、柏市及び周辺7市を対象範囲とし、15分周期で算出します。

*2 ある区間を実際に走行した車両から得られる速度や旅行時間などのデータ。

図6 ナウキャストシミュレーションによる車両軌跡の補間推計結果の例

図7 生活活動情報のコンテンツ一覧

3.2.2 CO₂ 排出量の推定

CO₂ の排出量は、ナウキャストシミュレーションにより推定した道路区間ごとの交通量に、CO₂ 排出係数原単位 (EF) 及び区間距離を掛けることで求めます。排出係数原単位とは、1 台の自動車が走行距離 1 km 当り (大型車の場合は走行距離 1 km・車重 1 t 当り) に排出する CO₂ の重量 (g/km, g/(km・t)) を表す値で、以下の式 (1)⁽⁸⁾ で算出します。

$$EF = a/v + bv + cv^2 + d \quad (1)$$

v はその道路区間の平均旅行速度で、ナウキャストシ

ミュレーションで推定されます。 a, b, c, d は、文献 (8) に示される回帰係数で、それぞれ車種 (小型・大型) により異なる値をとります。

3.3 加工・配信：市民向け生活活動情報システム

加工・配信段階では、一般市民が地域の交通状況・CO₂ 排出状況などを分かりやすく可視化した情報 (生活活動情報) を生成し、Web やスマートフォン等を通じて広く情報配信します。

3.3.1 生活活動情報の生成と配信

図 7 に、今回構築したシステムにおいて提供されるコンテンツの一覧を示します。メッシュ別・道路別・地域全体の CO₂ 排出状況 (図 7 ②～④)、排出量の履歴と目標値の差 (同⑥)、更に、3.1.3 のライブシチュエーション型道路実況とコンピュータグラフィックスによる CO₂ 排出状況を組み合わせて可視化した仮想イメージ (同⑤) などが、広く地域市民全体を対象として Web 上で提供されます⁽⁹⁾。

また、個人の移動に直接関係するコンテンツとして、エコルート (CO₂ 排出の少ない経路) 等の検索や、ある時間内に到達できる範囲 (同⑦、⑧)、運転中のエコドライブ診断、ほかの経路や交通手段を選択した場合の削減効果 (同⑨～⑪) が、スマートフォンアプリを通じて提供されます。

更に、後述の社会実験への参加者向けには、CO₂ 排出抑制への貢献度とランキング、ポイントの獲得情報も提供されます (同⑫～⑭)。

3.3.2 複合現実感技術による現場型提示システム

図 7 ⑤の仮想イメージを更に発展させたシステムとして、実風景に CO₂ の排出状況を提示する仕組みも提供されます。これは、現場において大形モニターやタブレット等の表示装置を適当な方向に向けるとその方向の CO₂ の排出状況を複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術により重畳表示するものです (図 8)。

今回は地域市民への常時サービス提供は行いませんでしたが、2013 年 10 月の東京大学柏キャンパス公開に合わせて、柏の葉地区の国道 16 号においてサービス提供を行いました。

図8 複合現実感技術による現場型コンテンツ

4 千葉県柏市における社会実験

このような生活活動情報の提供により、交通行動がどれだけ変容し、CO₂の排出が削減されるのか、評価する社会実験を行いました。実験計画の詳細は文献(10)に示します。

4.1 実験手法

千葉県柏市と周辺7市を対象地域として以下の実験を行いました。評価の対象とする交通行動変容の種別は、X:公共交通利用への転換^{*3}、Y:エコルートの選択、Z:エコドライブの実施、の3種類としました。

〔調査1: パーソンプローブ調査〕

対象地域に居住し、車を運転する機会のある被験者131名を募り、2013年9月1日～12月6日の移動履歴を調査しました。実験用のスマートフォンアプリにより移動時の目的地・移動方法・目的等と、GPS機能で計測した移動経路を送信してもらいました。

期間中、9月はシステムによる生活活動情報の提供はなし(すなわち普段の移動履歴を調査するのみ)、10月以降は情報提供あり、更に11月以降は実験への参加^{*4}と自身のCO₂削減量に応じて、奨励金に相当するポイント(インセンティブ)が得られる仕組みとしました。レートは、被験者を2群に分け、高・低2種類(0.1円/g, 0.05円/g)を設定しました。なお、実験への参加そのものに対する基本謝礼ポイントは、これとは別に

^{*3} 事前調査により、普段から公共交通を利用する移動は除外。

^{*4} データ送信、マイページへのログイン、エコルートの選択。

全員に付与しました。

この移動履歴から、行動変容の実行頻度 f が以下のとおりに変容種別X, Y, Zごとに求められます。

$$f = \text{行動変容の実行回数} / \text{全移動回数}$$

〔調査1': 交通行動変容の意向と受容性の調査〕

調査1の被験者に対し、実験期間前に交通行動変容X, Y, Zの意向があるか、期間後に実際に変容があったかを尋ねました。

更に、このような取組みの受け入れやすさを考慮するため、基本謝礼ポイントがない場合や、情報提供サービスが改善された場合に実験参加の意向があるか、期間終了後でも生活活動情報の提供があれば行動変容を続けるか、を尋ねました。

〔調査2: 交通行動変容の意向調査(大規模)〕

これとは別に、対象地域に居住し、運転機会のある1,193人を対象にWebアンケートを行い、生活活動情報の提供を受ければ交通行動変容X, Y, Zの意向があるかを種別ごとに尋ねました。

4.1.1 交通行動変容割合とCO₂排出削減率の算出

変容割合は、意向の有無、実際の変容の有無、実行頻度を考慮して以下のように算出します。

$$R(X) = r(X) r(x'|x) f_{x'|x} + r(\bar{X}) r(x'|\bar{x}) f_{x'|\bar{x}} \quad (2)$$

ここで $r(X)$ は調査2でXの意向ありと答えた人の割合、 $r(x'|x)$ は調査1'でXの意向ありと答えた人のうち実際に変容したと答えた人の割合、 $f_{x'|x}$ はそれに対応する被験者らの実行頻度です。 $\bar{X}$, $\bar{x}$, $\bar{x}'$ は否定(変容意向なし、実際の変容なし)の回答を表します。ちょうど、条件付確率と似た形式になっています。Y, Zについても同様に変容割合 $R(Y)$, $R(Z)$ が求められます。

CO₂排出削減率は、 $R(X)$, $R(Y)$, $R(Z)$ の割合で交通行動変容が生じたと仮定した条件下で交通シミュレーションを行い、式(1)から求めました。

このほか、生活活動情報の提供により環境意識が高まり、節電など交通以外の個別対策にも波及する効果が考えられます。これについても同様の方法により調査1'・2を行う際に実施状況や関心の有無を尋ねて変容割合を求め、排出原単位からCO₂排出削減率に換算して加算しました。

4.2 実験結果

4.2.1 交通行動の変容割合

交通行動の変容割合を表1上段に示します。種別は高い順にエコドライブ実施>エコルート選択>公共交通転換であり、インセンティブによらず同順位でした。ま

表 1 交通行動の変容割合（上段）と継続意向（下段）

	情報提供のみ (インセンティブなし)	情報提供+ インセンティブ (低)	情報提供+ インセンティブ (高)
X: 公共交通への 転換 $R(X)$	3.10%	5.10%	5.00%
Y: エコルートの 選択 $R(Y)$	3.50%	5.40%	7.40%
Z: エコドライブ の実施 $R(Z)$	9.20%	11.10%	20.60%

	情報提供のみ (インセンティブなし)
X: 公共交通への 転換 b_x	83.00%
Y: エコルートの 選択 b_y	91.00%
Z: エコドライブ の実施 b_z	95.00%

↑ 交通行動の
変容割合← 実験終了後の
継続意向割合

た高いインセンティブの場合は変容割合が約 2 倍に増加しましたが、公共交通転換については 1.6 倍にとどまりました。

4.2.2 基本ケースにおける CO₂ 排出削減率の推定結果
ここまでの手法による基本的な推定（ケース①）の結果を図 9 の①に示します。謝礼の有無にかかわらず、10%以上の削減効果が見込まれ、削減目標の 8%に到達していることが分かります。

4.2.3 謝礼バイアスと継続性を考慮した推定結果

調査 1' の受容性に関する調査の結果を表 2 及び表 1 下段に示します。表 2 から、 $a_2 = 30\%$ は、基本謝礼ポイントがない場合でも参加意向があることが分かります。これを予測ケース②とします。また、回答 7. は全てスマートフォンアプリの操作性が向上すれば参加するとの意見でした。したがって $a_3 = 45\%$ は、基本謝礼がなくても今後のサービス向上がある場合に参加意向があることが分かります。これを予測ケース③とします。

これらに更に、表 1 下段に示す継続意向割合 b を掛けた $R_2 = a_2 b R$ 、 $R_3 = a_3 b R$ を、予測ケース②、③における行動変容割合とし、改めて交通シミュレーションにより CO₂ 排出削減率を推定しました。

その結果を図 9 の②、③に示します。インセンティブを与えることにより、おおむね 8% の削減目標を達成できる可能性があることが分かります。

4.2.4 費用対効果の評価

本システムにより直接的に得られる便益としては、CO₂ 削減そのもの、渋滞緩和による走行時間の短縮、走行燃料の節約が挙げられます。これらはそれぞれ、

図 9 推定された CO₂ 排出削減率と費用対効果 (B/C)

表 2 今後の実験参加に関する意向調査結果

1. 今回と同様のポイントがもらえるなら参加する	52%
2. 今回以上のポイントがもらえるなら参加する	3%
3. 今回よりも役に立つ情報提供があるなら参加する	6%
4. 今回と同様の情報提供があるなら参加する	18%
5. ポイントや情報提供がなくても社会貢献などの趣旨に賛同できれば参加する	12%
6. 参加したくない	0%
7. その他	9%

CO₂ 排出削減 1 t 当りの便益、時間の評価原単位、CO₂ 排出 1 g 当りのガソリン（普通車）または軽油（大形車）価格により貨幣換算が可能です。

一方、生活活動情報を提供するための費用としては、システム開発費、維持費、インセンティブ費、更に予測ケース③では追加開発費が挙げられます。

これらの比から算出した費用対効果 (B/C) を合わせて図 9 に示します。インセンティブを付与せず、提供サービスのレベルを据え置く場合でも、削減目標には達しないながら、非常に大きな費用対効果（約 47）が得られました。また、追加投資により削減目標を達成させる場合は、高いインセンティブを与えるよりも、サービスレベルの向上に投資した方が、社会的な価値が高くなることも分かります。

5 おわりに

本稿では、千葉県柏市における「ITS スマートシティ」の取組みの一環として、仮想化空間を通じて地域の交通状況を可視化し、交通行動変容を促すことで道路交通からの CO₂ 排出削減を目指す仕組みについて紹介し、その効果を確認しました。

交通シミュレーションと情報収集・配信の連携により、一般市民を対象とした交通施策の定量的・合理的な効果予測が可能となります。今後は、災害時の交通状況把握や効率的な避難指示、2国間排出権取引制度における戦略策定などへの活用も考えられます。また、システムの基幹部分が全てクラウド上で実現されるため、他地域への水平展開も推進しやすく、今後も交通量の増加が続くアジア諸国を含む海外へも国際的な展開が期待できます。

謝辞 本内容は、総務省戦略的情報通信研究開発制度(SCOPE)「市民の交通行動変容を促進する持続可能な生活交通情報フィードバックシステムの研究開発」の委託に基づき、筆者を含む次の9機関の皆様による共同研究として実施されました。大口敬、上條俊介、大石岳史、小出公平(東京大学)、桑原雅夫(東北大学)、堀口良太、花房比佐友、飯島護久((株)アイ・トランスポート・ラボ)、吉村方男、亀田佳靖、森一夫(アジア航測株式会社)、田中淳、松沼毅、後藤秀典((株)オリエンタルコンサルタンツ)、長谷川雅人、須田昌仁((株)国際情報ネット)、佐々木卓、萬沙織((株)長大)、市川博一、光安皓、田村勇二、大島大輔、山下浩行(パシフィックコンサルタンツ株式会社)、佐々木政秀(柏市)。

■ 文献

- (1) 3次元デジタルアーカイブ, 池内克史, 大石岳史(編), 東京大学出版会, 東京, 2010.
- (2) 小野晋太郎, 大石岳史, 影沢政隆, 池内克史, 櫻田 健, 岡谷貴之, 出口光一郎, “全方位映像による東日本大震災の被災記録と仮想臨場体感システム,” 第10回 ITS シンポジウム, Nov. 2012.
- (3) K. Ikeuchi, M. Sakauchi, M. Kagesawa, H. Kawasaki, T. Takahashi, M. Murao, and S. Ono, “Constructing virtual cities with real activities,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E85-D, no.11, pp.1734-1744, Nov. 2002.
- (4) 松沼 毅, 田中 淳, 後藤秀典, 上條俊介, “既設カメラの画像センサ化と実フィールドへの展開,” 第11回 ITS シンポジウム, Dec. 2012.
- (5) T. Matsunuma, H. Goto, A. Tanaka, and S. Kamijo, “Development and field-testing of an image sensor system with existing cameras,” 20th World Congress on ITS, Oct. 2013.
- (6) 花房比佐友, 小林正人, 小出勝亮, 堀口良太, 大口 敬, “市街地道路交通を対象としたナウキャストシミュレーションシステムの構築,” 第11回 ITS シンポジウム, Dec. 2012.
- (7) H. Hanabusa, M. Kobayashi, K. Koide, R. Horiguchi, and T. Oguchi, “Development of the nowcast traffic simulation system for road traffic in urban areas,” 20th World Congress on ITS, Tokyo, Oct. 2013.
- (8) 大城 温, “自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数,” 土木技術資料, vol.43, no.11, pp.50-55, Nov. 2001.
- (9) 飯島護久, 堀口良太, 小宮粹史, 小出勝亮, 小林正人, “市民向け生活交通情報配信システムの開発,” 第11回 ITS シンポジウム, Dec. 2012.
- (10) 光安 皓, 市川博一, 田村勇二, 大島大輔, 山下浩行, 長谷川雅人, 須田昌人, 花房比佐友, 飯島護久, 小野晋太郎, 大口 敬, 池内克史, “環境に配慮した効率的な交通行動への変容を促す生活活動情報フィードバックシステムの実証実験,” 第12回 ITS シンポジウム, Dec. 2014.

小野晋太郎 (正員)

2006 東大大学院了, 博士(情報理工学)。現在, 東大生産技術研究所特任准教授。車載センシング, 時空間映像解析, 運転シミュレータなど, 特に ITS における画像及びビジョン技術, 機械・交通分野との融合研究に従事。IEEE, 電気学会各会員。

池内克史 (正員:フェロー)

1978 東大大学院了, 工博。MIT, 電総研, CMU, 東大を経てマイクロソフトアジア研究所首席研究員。人間の視覚機能, 明るさ解析, 観察学習ロボット, 文化財のデジタル保存, ITS などの研究に従事。本会業績賞, 大川賞, 紫綬褒章等各受賞。IEEE, 情報処理学会, ロボット学会フェロー。