

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02269

研究課題名（和文）ARI構築に向けたエネルギー統合型道路の計画デザイン研究

研究課題名（英文）A Study on Designing of Energy Integrated Road toward ARI

研究代表者

屋井 鉄雄（Yai, Tetsuo）

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：10182289

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：技術イノベーションを通じて道路インフラの各種要素や機能が再構成されたARI（拡張型道路インフラ）として、エネルギー要素を最大限活用する新たな道路システムを構想した上で、道路、モビリティ、エネルギーの各々に着目して、各々が適切に共進化するための技術的かつ社会的な条件を学術的に明らかにすることを目的に研究を推進した。特に一般道路に着目し、その要素を分解した上で道路機能を総合的に再構築することを目指し、今後の道路インフラ・空間に新たな価値を与える方法を検討し、その過程で現れる道路インフラ、エネルギー、モビリティ、人間の各課題を横断的に研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
一般道路におけるエネルギー統合型道路モビリティの分析シミュレータ、歩行者空間におけるエンベロープ分析シミュレータ、高齢ドライバーの運転挙動分析のためのドライビングシミュレータシステムなどを構築して研究を行い新たな学術的成果を挙げるとともに、ARIを構成する各要素の最新の研究開発動向を体系的に整理し、メンタルエンベロープという空間利用時の新たな理論提案に基づいて今後の公共空間利用のありかたを提案したことなどに特に社会的意義が認められる。

研究成果の概要（英文）：The research first envisioned a new road system that maximizes the use of energy elements as the ARI (Augmented Road Infrastructure) in which the various elements and functions of road infrastructure are reconfigured through technological innovation. The research then focused on roads, mobility, and energy, with the goal of clarifying the technological and social conditions for the appropriate co-evolution of each. In particular, we focused on general roads and aimed to comprehensively reconstruct road functions by deconstructing their elements. In order to examine ways to give new value to road infrastructure and space in the future, we conducted cross-sectional research on road infrastructure, energy, mobility, and human issues that emerge in the process.

研究分野：土木計画学

キーワード：エネルギー統合型道路 拡張道路インフラストラクチャ メンタルエンベロープ理論 自動運転公共交通システム 次世代モビリティ 歩行者空間シミュレータ 交通安全 ドライビングシミュレータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動運転技術を中心とする次世代モビリティ研究は、土木計画・交通工学分野でも進展がめざましい。しかし我が国の研究の多くは、高速道路や過疎地のように管理が容易な空間のモビリティを対象としている。近年、未来の道路空間等のコンセプト提案が多いものの、人々が生活する場に存在する「一般の道路インフラ」そのものを対象に、道路インフラが次世代モビリティとの共創を通じて革新的に変化する条件を探究した学術研究は見当たらない。この点に着目する理由は以下のとおりである。

1)我が国の都市人口集中地区内の緊急輸送道路(延長約2.5万キロ)に限っても、無電柱化率は未だ2割に過ぎないなど都市内道路空間の高質化は遅れており、未来技術と次世代モビリティによる劇的な変化を想定した道路インフラの技術開発研究は殆ど見られない。

2)次世代モビリティ研究が劇的に進展し、電力安定化にEVバッテリーを活用する研究等も進む状況で、一般道路インフラとエネルギーの連携・統合技術イノベーションを構想すべきと考えますが、その社会的効果・影響に着目した総合的視座の研究は非常に少ない。

3)我が国の道路管理は様々な主体に別れ、一般道路インフラの革新的な将来像を俯瞰する仕組みや計画フレームが構築されておらず、学術的知見も殆ど無い。高齢社会の進む中、世界に先駆けて、一般道路インフラの再形成技術を確立する緊急性は高いと考えられる。

2. 研究の目的

技術イノベーションを通じて道路インフラの各種要素・機能が再構成された拡張型道路インフラ(ARI)の将来像を構想し、特にその中でエネルギー要素を最大限活用する新たな道路システムにおいて、道路、モビリティ、エネルギーの各々に着目し、各々が適切に共進化するための技術的・社会的条件を学術的に明らかにする。

その際、ARIと人々との関係性の変化を、技術導入の影響と人々の価値観変化等に着目して分析し、人間と調和するエネルギー統合型道路の計画デザインとしてあるべき姿を明確化する。特に、従来から研究対象として見過されてきた一般道路に着目し、要素分解した上で道路機能を総合的に再構築し、今後の道路インフラ・空間に斬新な価値を与え、その過程で現れる道路インフラ、エネルギー、モビリティ、人間の各課題を横断的に研究する。以上の点に本研究の目的と大きな独創性がある。

3. 研究の方法

(1)道路空間におけるARIの技術提案と社会の受容性検討

今後の中長期的な道路空間活用を促進するため、ARIの概念構築を行いその構成要素を複合的に活用する開発目標と、開発すべきコア技術を検討する。防災・安全・環境・快適・景観・高齢者対応等への効果を、機能・性能・コスト・効果・利用者評価等の観点から、内外の技術動向調査を踏まえ総合的に把握することを試みる。なお、日本の都市部で回遊性に優れた歩行空間は未だ少なく、若者世代の外出行動は経年的に減少し、長期的悪影響も懸念される。そのため、ARIが歩行環境の魅力を下げず、「歩きたくなる」、「外出したくなる」空間を形成できる条件を検討するため、将来のARIの空間イメージを被験者に提示し、被験者のARIに対する受容意識を分析し、要素・機能の統合に対する評価構造を検討し、ARI上の「歩きやすさ」や移動のしやすさを考察する。

(2)車道空間におけるエネルギー統合型道路モビリティシステムの提案

一般道路を走行する未来のモビリティシステムが既に多数構想されているが、エネルギーシステム(発電、配電、蓄電、充電、給電等)との親和性が高く、道路インフラを統合的にデザインしたシステム提案は十分ではない。そこで道路内エネルギー網の活用効果をモビリティシステムと同時に検証可能な統合道路環境・エネルギーシミュレータを開発する。その上、無線給電と小型バッテリーとの組合せ等、道路と自動運転公共交通にエネルギーインフラを結合したシステムを提案し、車両サイズ、給電の区間・方法を設計変数としてNW最適化とシミュレーションから基本的条件での最適計画デザインの大枠を明確にする。それによって、道路と自動運転公共交通にエネルギーインフラを結合したシステムの評価を試みる。

また、一般車両との混在で自動運転が性能を発現できない可能性が指摘されているが、自動運転を無条件で優先することに社会の理解が得にくい状況も十分想定される。その際、自動運転者の意図的挙動、高齢運転者等の意図的でない挙動などが、自動運転を含む公共交通の性能低下を誘発する可能性を指摘できる。特に、高齢者が自動運転機能付き車両運転中に自ら手動に切り替えた場合でも自動運転の時間次第で覚醒水準低下が生じ事故リスク等が増す可能性や、高齢ドライバーが複数の連続インシデントへ直面し当初の認識を欠落させるリスクの可能性等に着目して、これらを独自の視点で分析する。そのため、現有のDriving Simulator(DS)改修してVR空間上での被験者の挙動・生理・脳波データと意識データ等を取付可能なシステムに更新した上で、被験者走行実験を行い、上記の仮説検証を進めて実験・分析結果を取りまとめ、過年度に検討した公共モビリティシステムの計画デザインへの反映を試みる。

(3) 歩道・混在空間におけるエンベロップ理論とARIの影響分析

歩道や歩車混在の道路空間に低速の自動型移動体が将来投入された状況を考え、低速自動移動体を含む様々な主体間での通行の優先順位や移動上の制約条件、あるいは空間配分の原則等を理論的に検討する。そのためエンベロップの概念を独自に展開し、移動体側のフィジカルエンベロップ（PE）と人間の持つメンタルエンベロップ（ME:不安に感じる広さや強さ等。個性、経験、マナー・慣習、物理的エンベロップ等の影響によって個々に定まる範囲）の2つの存在を新たに定義し、それらの相互関係等を考慮した空間利用概念を構築し、優先関係や空間配分の基準づくりの基礎を構築する。

その上で、道路のARI化の進展に伴い自動運転公共交通や低速自動移動体が普及した状況で、物理的エンベロップ次第で歩行者、低速モビリティ等の危険意識や順応行動等が有意に変化する可能性を想定し、メンタルとフィジカルの両者のエンベロップの効果影響を分析可能なシミュレータを作成し、仮想空間上に物理的エンベロップを発生させ、また複数の移動体を登場させる環境下で通行実験を繰り返すことで、上記の課題をはじめとするエンベロップに関わる行動・心理仮説の検証を行い、歩道・混在空間の利用ルールと計画のありかたとして考察する。以上の成果を踏まえて、未来の道路空間上に展開される自動運転車両や新たなモビリティが歩行者等と共存するための条件を整理する。

4. 研究成果

(1) エネルギー活用によるARIと技術動向を踏まえた将来展望

今後の中長期的な道路空間活用を促進するため、ARIの概念構築を行いその構成要素を複合的に活用する開発目標と、開発すべきコア技術を明らかにするため、防災・安全・環境・快適・景観・高齢者対応等への効果を、機能・性能・コスト・量産効果・利用者評価等の観点から、内外の技術動向調査を踏まえて総合的に把握し、結果をレポートにまとめた*。なお、エネルギー統合型ARIの現時点での構成要素・機能には、道路上の太陽光・風力・圧電などの発電システム、蓄電池による災害時の信号や街灯への電力供給、EV等への給電、照明機器の複合化による移動体への追従照明・変圧器の内蔵・発電機器付加、歩道や車道の暑さ対策、街路樹育成改善や洪水管理、道路メンテナンス機器・車両の電動化等を想定した。

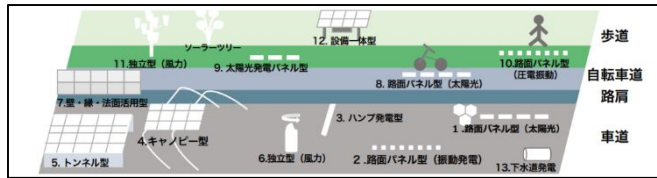


図-1 ARIの構成要素の例（道路上の発電形態）

* 増井玲子, 屋井鉄雄(2021), 道路空間の利活用に資する新技術の開発動向調査, 拡張型道路インフラARIの構築に向けて, 東京工業大学屋井研究室研究レポート

(2) 統合道路環境・エネルギーシミュレータの開発

一般道路を走行する未来のモビリティシステムが既に多数構想されているが、エネルギーシステム（発電、配電、蓄電、充電、給電等）との親和性が高く、道路インフラを統合的にデザインしたシステム提案は十分ではないことから、道路内エネルギー網の活用効果をモビリティシステムと同時に検証可能な統合道路環境・エネルギーシミュレータの開発を進めた。一般EV保有世帯の交通行動と売買電とを同時に考慮したモデルシステムを内包することで、グリッド側と世帯や公共交通側といった複数主体を考慮したシミュレーション分析を実施した。その際、無線給電と小型バッテリーとの組合せ等、道路と自動運転公共交通にエネルギーインフラを結合したシステムを提案し、車両サイズ、給電の区間・方法等を設計変数として比較検討を実施した結果、都心部に形成された電力グリッド企業に対してEV通勤者が電力を売買可能な未来の状況においては、通勤者の選択行動が当該企業の成立性や自動運転公共交通の収益性に及ぼす影響があることを分析して評価することができた。

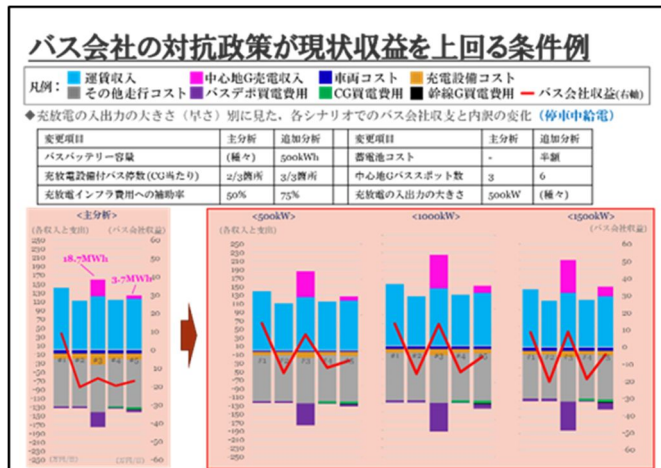


図-2 エネルギー統合型シミュレータの分析結果例

(3) 自動運転車両との潜在コンフリクトの分析

自動運転システムと一般車両とのコンフリクトが公共交通サービスに及ぼす影響を理解するため、特に高齢ドライバーを対象にアンケート調査を実施して、手動運転者の意図的挙動、高齢運転者等の意図的でない挙動でも公共交通の妨害や性能低下を誘発する可能性について、仮

説を設定するための基礎的な調査分析を行った。その上で、高齢運転者等の意図的でない挙動でも公共交通を含む他の交通の妨害や性能低下を誘発する可能性を検討するため、高齢者が自動運転機能付き車両運転中に自ら手動に切り替えただけでも自動運転の時間次第で覚醒水準低下が生じ事故リスク等が増す可能性や、高齢ドライバーが複数の連続インシデントへ直面し当初の認識を欠落させるリスクの可能性等に着目し、現有の Driving Simulator (DS) 改修して VR 空間上での被験者の挙動・生理・脳波データと意識データ等を取得可能なシステムを構築した上で、走行実験を約 30 名の被験者に対して行った。その結果、高齢者のオーバーライド時に自動運転の継続時間次第で覚醒水準低下が生じ事故リスク等が増す可能性や、高齢ドライバーが複数の連続インシデントに直面し当初の認識を欠落させるリスクの可能性等について、仮説検証を進めて基礎的な知見を得ることができた。



図-3 ドライビングシミュレータによる実験風景

(4)メンタルエンベロープ理論の構築

歩道や歩車混在の道路空間に低速の自動型移動体が将来投入されたとき、一層の混乱が予想されるわが国の状況を踏まえ、低速自動移動体を含む様々な主体間での通行の優先順位や移動上の制約条件、あるいは空間配分の原則等を理論的に検討しておくことが重要である。そこで L. Floridi* のエンベロープ理論を独自に展開し、移動体側のフィジカルエンベロープ (PE) と人間の持つメンタルエンベロープ (ME) の 2 つの存在を新たに定義し、それらの相互関係等を考慮した空間利用概念を構築し、優先関係や空間配分の基準づくりの基礎を構築した。

その上で、新たに提案したエンベロープ概念の受容可能性を確認するため、アンケート調査を

実施して基礎的な分析を行い、歩行者が他の移動者や移動物体に対して距離を保ちたい意識を自分側と相手側の 2 つの概念で分類整理して考察を加えた。

従来の PE として横断防止柵やガードレール等が典型であるが、ME という新しい概念で既存の安全距離等を包含し、移動上の弱者への配慮ルール等を体系的に考察して提案し、理論研究を通して構造化した ME を構成要素に分解し、先の意識調査データを用い構造方程式モデリング等による分析で理論の補強を図った。

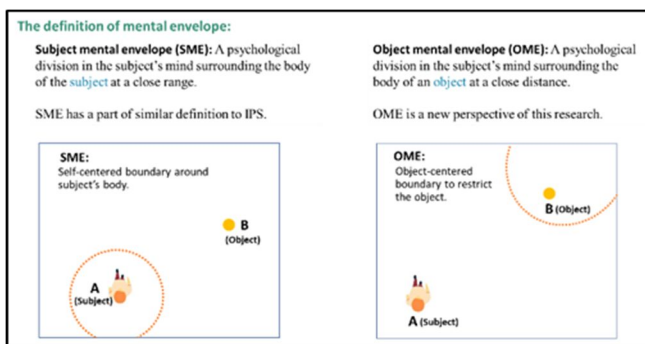


図-4 2種類のメンタルエンベロープの考え方

(5)歩道・混在空間のエンベロープシミュレータの構築と仮説検証

道路の ARI 化の進展に伴い自動運転公共交通や低速自動移動体が普及した状況では、物理的エンベロープ次第で歩行者、低速モビリティ等の危険意識や順応行動等が有意に変化する可能性が想定される。例えば、移動弱者に配慮した物理的隔離の強化が却って弱者の危険認識を低下させ、無意識に行動範囲を狭め、非常時の適応性を減退させる可能性や、歩行支援機能の普及が自力で歩き続ける意欲や行為を減退させる可能性等も想定される。

そこで、過年度のエンベロープ理論の成果を踏まえて、メンタルとフィジカルの両者のエンベロープの効果影響を分析可能な移動シミュレータを作成し、仮想空間上に物理的エンベロープを発生させ、また複数の移動体を登場させる環境下で通行実験を繰り返すことで、上記の課題をはじめとするエンベロープに関わる行動・心理仮説の検証を行い、歩道・混在空間の利用と計画のありかたとして基礎的な知見を得た。

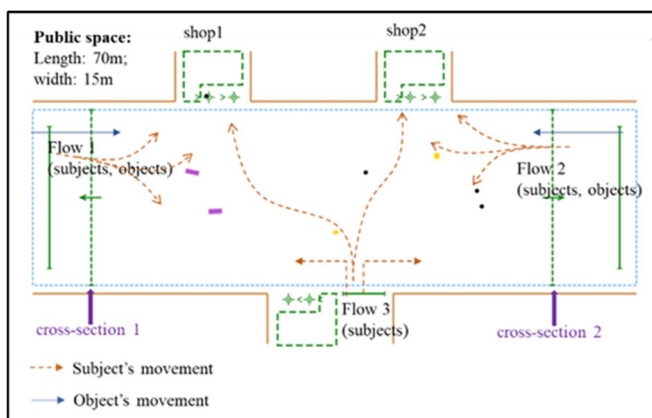


図-5 エンベロープシミュレータの分析空間

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Lubing Zou, Tetsuo Yai	4. 巻 Vol. 8
2. 論文標題 A proposal of envelope theorem on the mixed traffic of pedestrians and various mobilities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asian Transport Studies	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eastsj.2021.100050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Lubing Zou, Tetsuo Yai	4. 巻 Vol. 85
2. 論文標題 Exploration of mental envelope determinants when pedestrians interact with various mobilities on mixed streets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour	6. 最初と最後の頁 24-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trf.2022.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 川島真之介, 宮崎優, 屋井 鉄雄	4. 巻 Vol. 77
2. 論文標題 EV世帯と公共電動モビリティとの電力売買を考慮した競合シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_871-I_882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 馬渡真吾, 金子雄一郎, 福田大輔	4. 巻 Vol. 7, No. 6
2. 論文標題 地方部における自動運転車両を活用した交通サービス導入の賛否意識に関する研究: 実験参加の影響と地域間の相違に着目した分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.7.6_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 城間裕也, 福田大輔	4. 巻 Vol. 76, No. 5
2. 論文標題 電気自動車充電施設の配置がドライバーの経路・車種選択に及ぼす影響の評価モデル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 847-858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.76.5_1_847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡邊大樹, 平田輝満	4. 巻 Vol.65
2. 論文標題 ウォークブル道路のための路面サイン変更による歩行者及び自動車の挙動変化に関する分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Veng Kheang Phun, Pharinet Pheng, Reiko Masui, Hironori Kato, Tetsuo Yai	4. 巻 Vol. 6
2. 論文標題 Impact of ride-hailing apps on traditional LAMAT services in Asian developing cities: The Phnom Penh Case	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asian Transport Studies	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eastsj.2020.100006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Azarel Chamorro-Obra, Daisuke Fukuda	4. 巻 Vol. 6
2. 論文標題 Impacts of an economic incentive for intercity peer-to-peer ride-sharing in sparsely populated areas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asian Transport Studies	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eastsj.2020.100008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 城間裕也, 福田大輔	4. 巻 Vol. 76, No. 5
2. 論文標題 電気自動車充電施設の配置がドライバーの経路・車種選択に及ぼす影響の評価モデル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 847-858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpm.76.5_1_847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田淵景子, 福田大輔	4. 巻 Vol. 55, No. 3
2. 論文標題 再帰ロジック型交通行動モデルを用いたサブスクリプション型MaaSの評価に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 都市計画論文集	6. 最初と最後の頁 666-673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11361/journalcpj.55.666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福田 大輔 (FUKUDA DAISUKE) (70334539)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
研究分担者	平田 輝満 (HIRATA TERUMITSU) (80450766)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授 (12101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------