

IoT 車両情報の社会応用
に関する基礎理論

2017年 3月

高原 勇

IoT 車両情報の社会応用 に関する基礎理論

高原 勇

システム情報工学研究科

筑波大学

2017年 3月

目次

序論	1
0.1 はじめに	2
0.2 社会背景と研究の目的	4
0.3 本論文の構成	7
第1章 豊田市低炭素実証実験データの分析	10
1.1 はじめに	11
1.1.1 IoT 車両情報とは	11
1.1.2 実証実験の概要と使用データ	13
1.2 実証実験データ分析と IoT 車両情報の有用性	15
1.2.1 利用実態とエネルギー消費量	15
1.2.2 電費・燃費の単回帰分析	18
1.3 IoT 車両情報の社会応用に向けたデータ分析例	19
1.3.1 中心極限定理による区間推定	19
1.3.2 自動車のエネルギー残量把握による被災時活用	20
1.4 おわりに	22
第2章 低燃費運転支援を実現する実測燃費の分析	24
2.1 はじめに	25
2.1.1 背景	25
2.1.2 目的	25
2.2 実測燃費データの基礎的な考察	26
2.2.1 対象とする使用データ	26
2.2.2 対象地域	27
2.2.3 月間燃費による解析	28
2.3 区間燃費による地域特性解析	31
2.3.1 降雨別の速度燃費曲線	31
2.3.2 外気温別の速度燃費曲線	33
2.4 速度燃費曲線の導出と低燃費運転支援	35
2.4.1 対象経路	35
2.4.2 経路別燃費の速度依存	35
2.4.3 気候条件による経路別燃費の速度依存	37
2.4.4 燃費の分布に関する経路特性	39
2.4.5 トリップ毎の平均燃費に関する経路特性	41
2.4.6 経路におけるユーザー依存の速度燃費曲線	43

2.4.7 経路におけるサンプル数依存の速度燃費曲線	45
2.5 おわりに	47
第3章 災害時レジリエンスとしての自動車のエネルギー機能の利活用	49
3.1 はじめに	50
3.1.1 社会背景	50
3.1.2 目的	50
3.1.3 対象とする使用データ	51
3.2 被災地域の退避避難に係る自動車の走行可能距離	52
3.2.1 待機と待避・避難との関係	52
3.2.2 稼働不可率と到達不可率	53
3.2.3 結果の解釈	55
3.3 IoT車両情報による自動車が保有するエネルギー保有量推定	57
3.3.1 孤立地域でのエネルギー自給	57
3.3.2 日別エネルギー残量と中心極限定理	57
3.3.3 結果の解釈	60
3.4 おわりに	63
第4章 燃料電池自動車の普及に向けたステーション配置	66
4.1 はじめに	67
4.1.1 社会背景	67
4.1.2 目的	68
4.1.3 新規性	69
4.2 燃料充填機会のための移動距離の分析	69
4.2.1 マンハッタンボロノイ図	69
4.2.2 給油のための総追加距離	71
4.2.3 均等配置での総追加距離	72
4.3 移動式サービスステーションとIoT車両情報の連携	73
4.3.1 総追加距離の下限値	73
4.3.2 総追加距離の上限値	74
4.3.3 給油間隔と巡回スケジュール	75
4.3.4 結果の解釈	78
4.4 おわりに	79
第5章 矩形都市移動時における太陽光逆光割合の導出による運転支援	82
5.1 はじめに	83
5.2 矩形都市におけるトリップの角度分布	84
5.2.1 確率密度関数	84
5.2.2 分布関数	87

5.3 進行方向別の総トリップ長の分布	87
5.3.1 直線型道路網での密度関数	87
5.3.2 直線型道路網での累積関数	88
5.3.4 格子型道路網での累積関数	91
5.4 逆光割合導出とIoT車両情報による運転支援	91
5.4.1 太陽の位置と逆光との関係	91
5.4.2 都市位置の影響	95
5.4.3 都市形態の影響	96
5.4.4 回転角度の影響	97
5.5 おわりに	99
第6章 走行速度に関するモニタリング選択問題	101
6.1 はじめに	102
6.2 制限速度規制を有する自動車の走行速度モデル	105
6.3 IoT車両情報のモニタリング選択問題（対象情報下）	107
6.3.1 部分モニタリングで実勢速度を選ぶドライバー	107
6.3.2 部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバー	110
6.4 IoT車両情報のモニタリング選択問題（非対象情報下）	112
6.5 おわりに	116
第7章 結論と今後の課題	119
7.1 結論	120
7.2 今後の課題	122
7.2.1 地域未来の社会基盤づくりへの応用	122
7.2.2 産学官連携とIoT車両情報の利活用	124
謝辞	128
論文リスト	130
付録	134
付録A 自動車保有数分析	135
付録B 燃料消費量分析	155
付録C 交通事故件数分析	158

序論

0.1 はじめに

天然資源の少ない日本において技術革新による経済・社会的課題の解決に寄せられる期待は大きい。なかでも自動運転は今後の技術革新の代表格である。その社会的な意義は、道路交通における安心・安全の確保である。

国内の交通事故死者数は2016年（10月末時点）で3,134人と前年同期に比べて減少しているが、65歳以上の高齢者による死者数と事故数は人口構成（26%）から比較するといずれも約2倍である。交通事故全体の約9割がドライバーの認知、判断ミスで占められる現状から、自動運転支援は交通安全・事故減少に求められている。

一方で、産業的な意義としては自動車産業界の競争力強化は言うまでもないが、本論文の主題であるIoT車両情報による社会応用を新たな意義として提唱している。自動車は従来の安全・安心・快適な移動や運転機能と社会的共通資本としての計測機能をもつ局面を迎えている。自動車を利用することが人の移動や運転の喜びに加えて、乗車していない人々や地域社会に役立つのである。そのデータの収集と利活用から新たな社会サービスの創出や未来の産業形成につながることは自動車の新たな役割と機能として再定義されるであろう。

本論文ではこれからの自動車のもつIoT車両情報について具体的な事例検証を進めつつ社会応用に向けての基礎理論を論じる。共有すべき協調領域の基盤システムの整備はもとより、未来の地域社会に根ざす知能化に向けた今後の取り組み方についても言及していく。自動運転の実現とともに自ずとIoT車両情報は生成されるが、その進展に伴いデータ量・種類・更新速度は増大していく。そのため社会応用の可能性を明示することは後続する研究や社会実装を進展させていくことにつながるのではないかと考えている。

IoT車両情報の効用は社会計測による情報化から知能化へと発展して、データ利活用による新たな社会サービス創出と未来の産業形成すら視野に入ってくる。自動運転の実現には認知・判断・操作というプロセスが必要となるが、代表的なIoT車両情報はまさにそのプロセスで生成される。自動車の搭載システムの稼働状態を示すモニタリングや燃料タンクや蓄電池のエネルギー残量など自動車には多種多様なデータがある。この多様なデータを広域から遠隔で即時に収集して、位置情報と時刻を紐づけた構造で収集・選択・保管・検索・共有されていく。これらの情報が循環して知能化につながる大きな特色である。極めて近い将来には情報化社会から知能化社会への対応を加速する実践的フィールドになると思われる。日々の自動運転情報が時刻と絶対位置とともにタ

グ付けされて次なる運転機会へと共有されていく。

自動運転の進展は IoT 車両情報の受益機会を提供者のみとせず道路交通の社会知・公益知として共有的利活用を可能とすることであろう。その範囲は渋滞状況計測や道路インフラ監視など道路交通の高精度な計測から地域のエネルギー需給の整合などの幅広い基盤情報となる。また被災時は退避・避難など誘導情報として利活用も期待できる。

例えば、雨が降れば運転者はワイパーを操作する。この操作情報が位置・時刻情報とタグ付けされていれば、その情報は高精度な即時的な天気情報となる。定点観測に自動車のような移動可能な変動点観測情報を加えることができる。狭域の気象観測の精度が向上することやゲリラ豪雨のような現場での減災に活用できる。また、ドライバーが急ブレーキを踏みこむ危険回避情報は個人の事故未然防止として記憶されていた。それらが道路交通情報として蓄積されれば、地域の危険地点を先読みした知能化運転につながることになる。このような知能化への積み重ねは事故減少だけでなく地域社会の行政コストを確実に軽減していくことにつながるであろう。知の好循環を地域で共有できるのである。

IoT 車両情報では広域かつ複数車両の時刻単位での走行速度の空間分布を観測することが可能である。従来の定点観測に加えて、変動的な観測点における即時的かつ連続性のある情報は道路交通情報を各段に高精度化する。その情報から即時に経路選択や運転計画を判断できる。位置情報と実測燃費の空間分布を観測することで経路・区間毎に気象条件も加えた形で知能化された低燃費運転支援を実現することが可能となる。同時に燃料タンクの残量情報は地域のエネルギー需給予測に有用となる。

ガソリンスタンドは国内で減少傾向にある。自治体単位で給油施設が 3 カ所より少ない給油過疎地域は全国ですでに約 270 カ所となっている。仮に、燃料タンクの残量が遠隔的に把握できれば給油施設への補給頻度の最適化やさらにはガソリンスタンドの配置見直しや今後増設する水素ステーションの最適配置などに活用できる。IoT 車両情報は道路交通や都市計画に始まり、人間中心のより豊かな地域未来を形成していくべきである。その実現には基盤技術の確立が重要となる。

自動運転がエネルギーバリューチェーンから地域包括ケア（保育・医療・介護など）に至る社会サービスに活用されると、サイバー空間では IoT 車両情報が蓄積される。公的認証システムや全球地球観測システムの準天頂衛星システムとの照合・タグ付けなどでデータ処理・分析・共有がなされる。データ共有にはインターフェースの共通化・ネットワーク・セキュリティ・運用管理などが当然必要となる。これらの基盤技術は人工

知能センターとの連携も必須となるであろう。

パーソナルデータの秘匿性担保や情報の対称性から起こり得ることとして、IoT 車両情報のモニタリング選択（公開，非公開選択）と最適報酬（インセンティブ）などに始まる社会制度の整備が必要である。2050 年を見据えた経済・社会課題の解決を目指すことで、長期的な視点や企業間においても協調領域が拡大して産学連携が進展して、オープンイノベーションが生まれる。これらの実現には社会受容性（アクセプタンス）が重要な鍵となる。

IoT 車両情報の社会応用は大いなる可能性に満ちている。日本には規範と知恵による優れた行動様式がある。道路交通にしても世界に誇れる運転行動と交通環境が存在する。現在の営みを映すデータの利活用に社会工学の視点を入れて、持続的な社会基盤づくりと未来産業形成への加速が必須である。

0.2 社会背景と研究の目的

自動車の技術革新としての自動運転の意義について前節で述べた。本節では IoT 車両情報に着眼した研究動機についてふれたうえで、社会背景と研究の目的について述べたい。自動車の燃費向上は環境とエネルギー制約の両面において極めて重要な課題である。さまざまな内燃機関の改善がなされ、ハイブリッド車両が実現して、さらには水素燃料電池自動車が開発された。一方で、それらの自動車のパワートレインの特性を外部環境や経路特性を見極めて、低燃費運転支援を実現することで実燃費を改善する意義と効果は大きい。安全性や燃費、さらには道路交通、インフラ監視、防災防犯などの広範な社会応用と新たな社会サービス創出の可能性を秘めた IoT 車両情報の有用性を明らかにしたいと考えたことが研究の目的である。

次に関連する社会背景と研究の目的について示したい。第 21 回気候変動枠組条約締結国会議（COP21/2015 年 11 月 30 日）において、長期的視野に立った抜本的な温室効果ガスの排出削減の必要性が論じられた。同会議で言及された「2°C 目標」の実現には、世界の GHG ガス排出量を 2050 年までに 240 億トンを抑えることが必要とされている。世界全体で現在 500 億トン程度排出されている温室効果ガスは増加傾向にあり、2050 年までに約 300 億トン程度の追加削減を求められている。日本は世界全体の二酸化炭素排出量の約 3.7%（2014 年時点）を排出しており、中国、米国、インド、ロシアについて世界で 5 番目に多く排出している。全締結国が排出削減計画の策定・実施・排出目録の作成などの義務を有することと先進国は途上国への資金、技術移転支援が追加義務とさ

れている。低炭素社会実行計画はこれまでも政府の対策の柱として位置付けられて方針や計画が閣議決定され、国連登録もなされている。第1の柱は国内事業活動からの排出抑制であり、第2の柱として運輸・自動車のライフサイクル全体でのCO₂排出量削減である。なかでも、乗用車の実走行の燃費改善が貢献期待として最も大きい。

他には貨物輸送の効率改善、貨物車の実走行燃費の改善がある。国際機関である「国際クリーン輸送評議会（ICCT）」は、「EUの乗用車からのCO₂排出：2015年における乗用車メーカーの実績」と題する報告書を発表した。欧州環境庁がEUの2015年における新車乗用車のCO₂排出に係る要約と分析を行ったところ、CO₂平均排出量は119.6g/kmで目標値を8%下回っている結果となった。一方で、国内の二酸化炭素排出量のうち、運輸部門からの排出量は約17%を占めており、自動車全体で運輸部門の85%超で、うち乗用車が運輸部門の約50%である。平成27年3月現在、自動車台数は8,067万台であり、台あたりの燃費改善はわずかであっても大きな効果をもたらすことになる。

日本が抜本的な排出削減に向けた革新的エネルギー・環境技術の開発で世界をリードしていくためにも2050年を見据えたイノベーションの実現を世界に先んじて進める必要がある。世界に目を転じれば、新興国はもとより、ニューワールドと呼ばれるアフリカなどでの自動車への需要は高まり、地球規模でのエネルギー制約や環境問題の顕在化が進行している。地球環境保全の観点からも、乗用車の燃費改善、低燃費運転支援の実現の意義は極めて大きい。

自動車産業界ではこの課題に対して、未来に向けたロードマップや方向性の提示を始めている。2015環境フォーラム[0-10]でトヨタ自動車株式会社は「2050年までに内燃機関のみによる新型車両の生産を限りなく減らす新車CO₂ゼロをステークホルダーとの連携・協力でチャレンジする」と宣言している。内燃機関によるガソリン、ディーゼルエンジン車両をプラグインハイブリッド車両や電気自動車、さらには燃料電池自動車などへの移行にチャレンジする。自動車のパワートレインの改善を図るとともに低燃費運転支援による実燃費の改善で排出量削減を図っていくことは重要である。自動運転とIoT車両情報の組み合わせによるCO₂排出量削減に向けた低燃費運転支援の効果は乗用車に留まらない。貨物車の実走行燃費の改善や輸送効率の改善にも波及できる。同時に日本が先導し得る技術であることも本研究の意義として加えたい。エネルギー制約に関する革新技術を個別に開発・実装するだけでなく、地域未来のエネルギーの生産・流通・消費状況をネットワークでつなぎデマンドレスポンスを含めて最適化していくことは将来のエネルギーシステムの統合化技術となるであろう。その時に本論文のIoT車両情

報がシステム全体を横断する重要な情報源として利活用されると考えている。

その社会応用はエネルギー・環境保全の視点から、都市計画や地域未来の社会基盤などへと拡大する。即時的に複数の地域にまたがる広域の情報掌握は、従来の時空間の常識を一変させ得る。

時空間制約の解放に向けた知能化循環が始まると研究領域は境界なく格段に広がり、社会応用に働きかける契機となるだけでなく多くの新たな課題を有することになる。そのサイクルは新たな技術革新、要素技術開発の要請を生み、精度追求が求められ、絶対位置精度、認知・判断時刻の短縮化、操作情報の時刻精度などのより高精度のIoT車両情報への要請となり、さらなる利活用のスパイラルアップを引き起こすであろう。そこで本研究では、IoT車両情報の成り立ちから社会応用について具体的に明示することで、今後のより多くの研究に資するように論じていく。

本研究の目的は、今後、社会実装されていく高度運転支援ならびに将来の自動運転システムの実現により生成収集され社会応用に利活用できるよう秘匿性を担保したIoT車両情報の社会応用に関する基礎理論である。前節で述べたエネルギー制約や環境保全に向けた低燃費運転支援、移動可能な分散電源としての被災時の減災活用など具体的な社会応用の明示は、今後の様々な研究動機となり得る。様々な社会課題をより広域で、自治体や国家視点での検討が可能となり、従来では解き得なかった視点での経済・社会的課題を解決する時代を迎えることとなる。都市計画から地域未来の存立基盤となる農業、保育、介護、防災、インフラ監視など産業形成の難易度が高い領域での幅広い社会応用が期待される。社会工学研究に大いなる利点と進展をもたらすことであろう。そのためにも産業界の持続的な研究開発投資は必要である。

イノベーションで世界をリードして、経済成長と社会課題の解決を両立に先導的な研究開発と産業形成を図ることこそが未来開拓に直結する。政府・大学・研究開発法人・自治体・産業界で長期公益的な視点で研究開発ビジョンを共有して、社会実装を見据えた現場を有する産学官連携体制を構築する。そして有用な研究成果は社会実装を前倒して事業化を促進する。このような取り組みを重ねていくことで、持続的な成長と地域未来の自律的な発展に貢献する。本研究の目的はその実現に向けた取り組みの一翼を担うことである。自動車を社会的共通資本として捉え直して、新たな技術革新である自動運転とIoT機能の社会浸透を拡げて、人間を中心とする豊かな持続的な社会基盤づくりに貢献することである。

0.3 本論文の構成

本論文は序論と第1章から第7章までの全7章と付録で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。序論では、未来社会をとりまく背景と研究目的ならびに本研究の全体構成について述べる。

第1章は「豊田市低炭素実証実験データの分析」としてIoT車両情報の社会計測機能とSociety5.0の実現に向けた取り組みについてである。研究主題であるIoT車両情報の背景と成り立ちを豊田市低炭素社会実証実験データの分析結果を紐解きながら、IoT車両情報の定義や社会応用の基礎的な事例からIoT車両情報を論じる。

第2章は「低燃費運転支援を実現する実測燃費解析」としてIoT車両情報による実測燃費の地域特性分析とその分析から将来の低燃費運転支援に有用な速度燃費曲線を導出する。次にカタログ燃費と実測燃費の地域差を明確にする。外部環境と経路特性による実測燃費の特性を明示するとともにIoT車両情報から得られる実用的な低燃費運転支援について論じる。

第3章は「災害時レジリエンスとしての自動車のエネルギー機能の利活用」としてIoT車両情報によるエネルギー保有量推定と被災時の避難退避における自動車利用の可能性について検討する。被災時に移動できる地理的範囲から被災想定地域外への到達不可能率を算出する。また、IoT車両情報の受発信が可能な車両と不可能な車両の混在期においても部分的な情報から全体推定を行う必要性と手法を検討する。

第4章は「燃料電池自動車普及に向けたステーション配置」として移動式サービスステーションによる需給整合とIoT車両情報の連携についてである。燃料充填機会のための移動距離分析から移動式サービスステーションの巡回手法を検討する。さらにIoT車両情報による給油頻度の見極めから需給整合の精度、利便性向上を図るエネルギーステーションの最適配置などについて論じる。

第5章は「太陽光逆光割合の導出による自動運転支援」として道路と太陽の相対位置関係から逆光となるトリップを抽出する空間モデルを提示した。今後の自動運転の導入で運転障害を引き起こす恐れがある逆光の発生条件を示した上で時空間的視点を踏まえた都市側の要因を明らかにした。あらかじめ自動運転を考慮した都市計画と智能化の必要性についても論じる。

第6章は「走行速度に関するモニタリング選択問題」としてIoT車両情報の完全モニタリングを選択するインセンティブの成立モデルの存在と成立性について検討する。社会受容性（アクセプタンス）が利活用の重要な鍵となる。IoT車両情報基盤の整備や

利活用実現に向けた社会制度の設計に重要な理論となる。

第7章は「結論と今後の課題」として主たる研究成果を結論として、学術的意義と社会的意義の観点で整理している。次に今後の課題として本研究で論じた理論と社会応用による地域未来の社会基盤づくりを出口とする本格的な産学連携と拠点形成の提言である。

ここでは筑波大学社会工学域での共同研究ならびに経済産業省・文部科学省合同の産学連携ガイドライン策定に係るワーキング委員活動などから得られた新たな産学連携のあり方を踏まえた進め方を含む提言を記している。

付録には本論文の研究に係る補足資料を付した。以上が本論文の構成である。本論文の構成を表 0-1 に示す。第1章及び第7章は寄稿論文として、第2章から第6章の内容は採択済み査読付き論文を基に構築している。

表 0-1 論文の構成

氏名	高原 勇			
題目	IoT車両情報と社会応用に関する基礎理論			
章	IoT車両情報	社会的意義	学術的意義	発表
1章	定義(遠隔, 即時, 広域) 位置、操作情報、燃費・電費	社会計測機能とエネルギー消費、保有情報	Society5.0ユースケースの理論補完	オペレーションズリサーチ (特集号寄稿2016vol.61)
2章	実測燃費、走行速度、気温、降水、走行経路	高度運転支援による実測燃費改善	速度－燃費曲線の理論化	環境共生
3章	燃料残量、蓄電池残量 絶対位置、走行経路	被災地での自動車からのエネルギー供給	燃料残量の推定精度保証	計画行政
4章	水素残量、燃料需要量 走行経路、走行距離	移動式水素ステーションの巡回スキームと最適配備	移動式施設の最適時空間配置(定置式の補完性)	計画行政
5章	逆光照射度、走行経路 絶対位置、時刻	自動運転の安全性向上 撮像支障場所の特定	運転時逆光となる場所・時間の数値化	GIS－理論と応用－
6章	走行速度、操作情報 セキュリティ	完全モニタリング、報償・罰金による速度規制の効果	非対称情報と速度規制に関する経済的解釈	応用地域学研究
7章	燃料需給、地域交通量 行動予測、包括ケア情報	地域未来の持続性を担保する社会基盤	地域内のシェアリングモデルの理論化	日本経済団体連合 (提言準備中)

参考文献

- [0-1] 一般社団法人 新エネルギー導入促進協議会(2015) : 「愛知県豊田市における「家庭・コミュニティ型」低炭素都市実証プロジェクトのマネジメント」, 『次世代エネルギー・社会システム実証事業成果報告』.
- [0-2] 尾池和夫(2015) : 『2038年南海トラフの巨大地震』. マニュアルハウス.
- [0-3] 科学技術イノベーション総合戦略(2016) : 閣議決定資料
- [0-4] 株式会社価値総合研究所 (2011) : 『平成22年度石油産業体制等調査研究(石油製品供給不安地域調査) 報告書』, 資源エネルギー庁委託調査事業.
- [0-5] 第5期科学技術基本計画(2016) : 閣議決定資料.
- [0-6] 東北大学災害科学国際研究所編著 (2013) : 『東日本大震災を分析する2-地震・津波のメカニズムと被害の実態-』. 明石書店.
- [0-7] 東北大学災害科学国際研究所編著 (2013) : 『東日本大震災を分析する2-震災と人間・まち・記録-』. 明石書店.
- [0-8] 東京大学教養学部統計学教室(1991) : 『統計学入門』, 東京大学出版会.
- [0-9] 中山久憲(2015) : 『住民主権型減災のまちづくり』. ミネルヴァ書房.
- [0-10] トヨタ自動車株式会社(2016) : トヨタ自動車WEBサイトtoyota.jp

第 1 章

豊田市低炭素実証実験データの分析

-IoT 車両情報の社会計測機能と Society5.0 の実現-

1.1 はじめに

1.1.1 IoT 車両情報とは

IoT 車両情報の社会応用への提言に至るさきがけ的な取り組みとして、2011 年から実施された経済産業省の次世代低炭素都市構築プロジェクトの豊田市実証実験でのサンプリングデータで具体的に説明する。IoT 車両情報の定義と理解のため、具体的な利活用の可能性を例示する。当時の実証実験では、新型トヨタプリウス PHV が豊田市東山・高橋地区の住民を対象に 63 台が試験提供された（[図 1-1](#)、[図 1-2](#) 参照）。提供車両から IoT 車両情報の骨格といえる走行情報・操作情報を約 5 年間にわたり、同一車種・同一地域でデータサンプリングを継続実施した。利用者のご理解とご協力を得て、無線通信でリアルタイムにサンプリングされたトリップデータの蓄積と解析が大きな特徴である。

このように自動車で収集される情報を遠隔から即時に広域の複数車両からサンプリングされた多種多様なデータならびにその分析により共有化・知能化された情報を IoT 車両情報として定義する。サンプリングが上書きされる頻度に応じて動的・準動的・準静的・静的なデータとして区分されて時刻と位置情報がタグ付けされる構造データである。実車走行時の稼働・周辺監視・照合・操作などに代表されるデータがサイバー空間で蓄積される。走行速度と位置情報を抽出し地図にプロットしたものが [図 1-3](#) となる。該当地域での交通流を動的に観測することができる。また、瞬間燃費量と位置情報を地図にプロットしたものが [図 1-4](#) となる。同様に該当地域でのエネルギー消費量を動的に観測、低燃費運転車両の抽出などに有用である。

2016 年熊本地震では、道路の通行可否情報を収集できた。車両の走行時には極めて多くの情報を得ることが可能であり、IoT 車両情報は今後さらなる発展と収斂が進み変貌していくものと思われる。Society5.0 で提唱されるシステム基盤技術のプラットフォームが進展し、その代表的なユースケースである自動運転が社会実装されると、本章の IoT 車両情報の収集・蓄積・分析・利活用ができる時代が到来する。本章では IoT 車両情報の基本的な定義と社会応用の事例を明示する。



図 1-1 実証実験に用いたプリウス PHV [1-16]



図 1-2 実証実験対象地域

様々な社会課題をより広範囲で精度よく観測することができるようになり、自治体や国家視点での社会課題への検討や対応のあり方に大きな影響を与える。同時に都市計画から地域再生さらにはインフラ監視や被災時の避難対応などの革新的な研究対象の創出につなげることが期待できる。

一方で、その利活用には社会制度としての整備と規定が当然必要となる。マイナンバー制度との連動等の社会的便益の拡大とサイバーセキュリティへの担保等、法制度の改正まで及ぶ課題も想起される（栗野ら、2016）。

自動車はこれまでの安全で快適な移動機能に加えて、移動という特長を活かした IoT 車両情報として変動点観測が可能な社会計測機能を持つことになる。地域や社会にとって重要な役割と機能を持つことになる。人々の暮らしをよりよくしていく大きな役割と可能性を秘めている。

1.1.2 実証実験の概要と使用データ

本実証実験では、2011年10月20日～2015年1月22日にわたり、同一車種、同一地域で継続実施した類を見ないデータがサンプリングされている。無線通信でリアルタイムにサンプリングされたトリップデータは走行累計距離 77 万 km 超、有効走行計測時間 33 万時間超に及んでいる。仮想的な IoT 車両情報と言えるデータ量である。トリップデータから、始動時刻、出発位置（緯度・経度）、経路、走行距離、走行速度、走行終了時刻、到着位置（緯度・経度）、消費ガソリン量、消費電力量、回生電力量、航続可能距離の全 11 項目のデータを抽出して IoT 車両情報として例示をしている。有効なトリップデータ数は 12 万件を超えている。

はじめに IoT 車両情報として、日々の自動車の利用実態の定性的な把握から試みる。位置、走行距離、走行時間等からみていくと、ある時刻の自動車の走行状況や駐車位置を時刻と緯度経度情報でプロットしたものが図 1-5 である。時刻毎に IoT でつながっている自動車の走行状況や位置情報の空間分布の観測が可能である。これは今後実装が検討される遠隔操作による自動運転と組み合わせれば、被災地での避難活動、または救援活動、さらには避難所への電源利用として応用が有効である。この地域では 1 回の運転距離が約 20km 以下の利用が多いことや、一日の利用時間は 60 分以下であること等の自動車の利用状況が把握可能である。実証結果や駐車所在情報と組み合わせることで、シェアリングカーシステムの地域内の潜在性評価につなげられる。また、同地域でのトリップ単位での走行速度と燃料消費の情報を組み合わせることで、渋滞とは異なる自由走行時の道路毎に低燃費となる推奨速度等の導出が可能となる。この件について内閣府エネルギー戦略協議会にて Depend on Energy 方式として制限速度の可変性や信号制御への利活用を提言している（内閣府エネルギー戦略協議会、2015）。

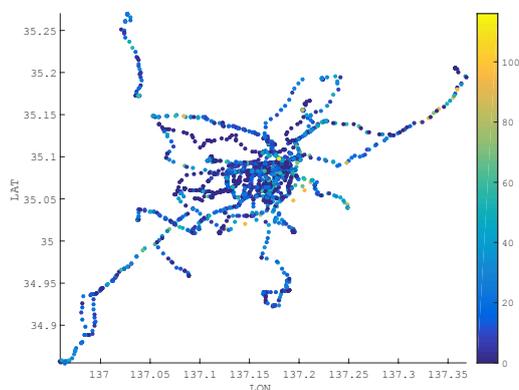


図 1-3 走行速度の空間分布

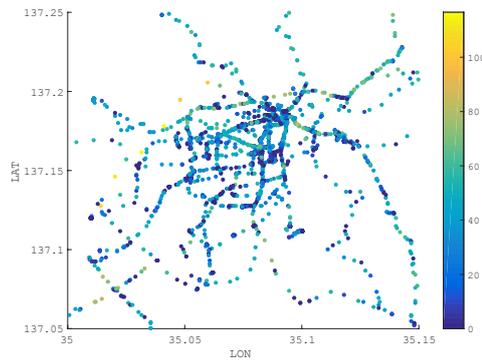


図 1-4 瞬間燃費の空間分布

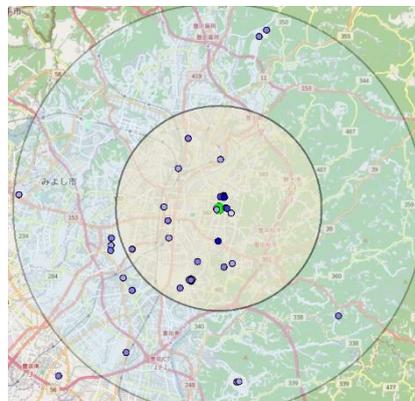


図 1-5 自動車の空間分布

実証実験でサンプリングされたデータを切り出して IoT 車両情報としての静的な分析と活用事例を例示する。一般的に冬季のエネルギー消費量が多くなることは知られているが、5年間に及ぶ実証期間通期での同一車両、同一時期取得のトリップデータにおける燃費・電費の変動を明らかにする。同時にこの実証地域での実測燃費・電費の予測式を導出する。また、走行終了時点の航続可能距離と燃費・電費の予測式で燃料タンク、蓄電池の残量の変動量の推移を分析する。個々の自動車の燃料残存の変動からエネルギー保有量、給油時期を見出した結果と推定式との整合を検証する。結果の安定性に関しては中心極限定理を用いて説明する。

2011年発災の東北地方太平洋沖地震により被災地でのエネルギー補給が大きな課題となった。そこで、本章では残量推定値から南海トラフ巨大地震による被災予測地域1都13県において、自動車が保有するエネルギー量を推定する。この分析から、動的なIoT車両情報としてリアルタイムで大量のデータを収集・分析ができる環境を想定し、IoT車両情報の機能と役割について、その利活用のあり方を明示している。

1.2 実証実験データ分析とIoT車両情報の有用性

1.2.1 利用実態とエネルギー消費量

本節では、大量のトリップデータを単純集計し可視化することで、本対象地域での交通行動の挙動を把握するとともに、データの確からしさを確認することでさらなる分析につなげる。以降、**図 1-6** から**図 1-11** までは全トリップ、つまり 126,638 個のデータのプロット図となる。

図 1-6 に走行時間と走行距離との関係を示す。原点を通る右上がり直線が等速度となる。図から、ほとんどのトリップが平均時速 100km 以内で移動し、また、トリップ長も 80km 以内に収まっていることが読み取れる。**図 1-7** に、横軸に計測日、縦軸に走行時間を示す。**図 1-8** では、縦軸のみ変更し走行距離を示す。この二つの分散図からは、ほとんどのトリップが 60 分以内、20km 以内であることが読み取れる。**図 1-9** では、横軸に平均速度、縦軸にエネルギー消費量を示す。この図から時速 50km を超えると、エネルギー消費量が増大することが分かる。**図 1-10** には、時間帯別のエネルギー消費量を示す。移動経路や日常性という観点でデータの質を保つために、全トリップから、通勤のトリップを抽出してエネルギー消費量を出発時刻別にプロットしている。往路として 13,236 トリップ、復路として 7,439 トリップを図化している。朝の通勤時にあたる往路のエネルギー消費量はばらつきも大きく、効率が悪いことが読み取れる。逆に瞬間燃費量と走行速度の IoT 車両情報から正確な渋滞状況をリアルタイムで知り得ることができれば経路選択の判断・誘導等がより精緻にできることになるであろう。経路選択は被災時では避難誘導などへと応用できる重要な情報である。

これらの情報は事後となってもさまざまな研究に活用できるが、広域かつ大量にデータサンプリングがなされ即時的に解析されていけば、時空間の情報掌握は大きな変貌を遂げて、社会課題の発見やその解決に大いなる可能性を持つことになる。

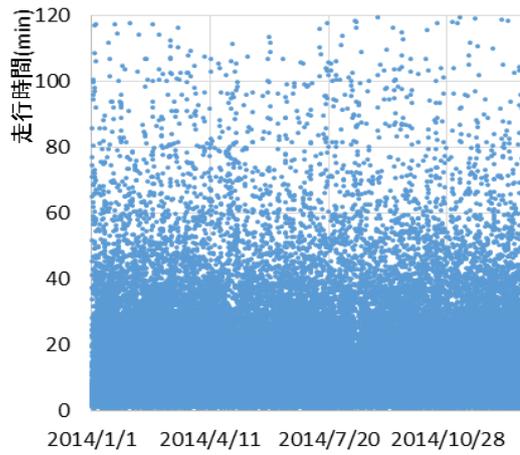


図 1-6 走行時間と走行距離（トリップ単位）

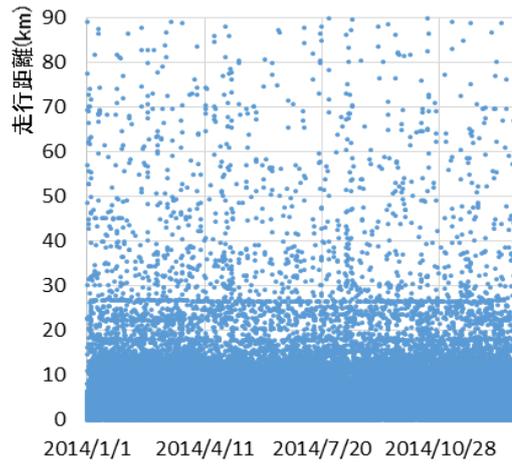


図 1-7 走行時間（日単位）

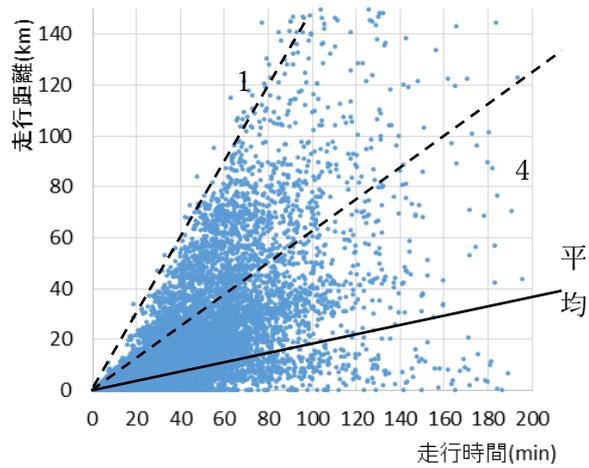


図 1-8 走行距離（日単位）

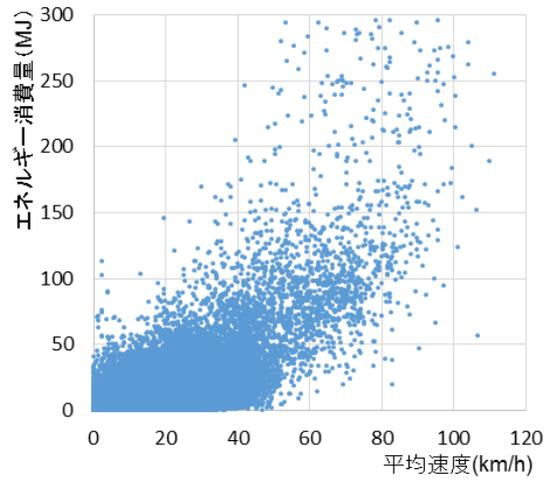


図 1-9 平均速度とエネルギー消費量

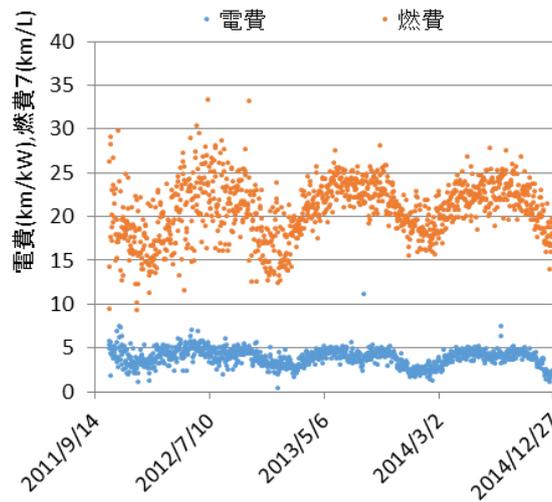


図 1-10 通勤時間帯のエネルギー消費量

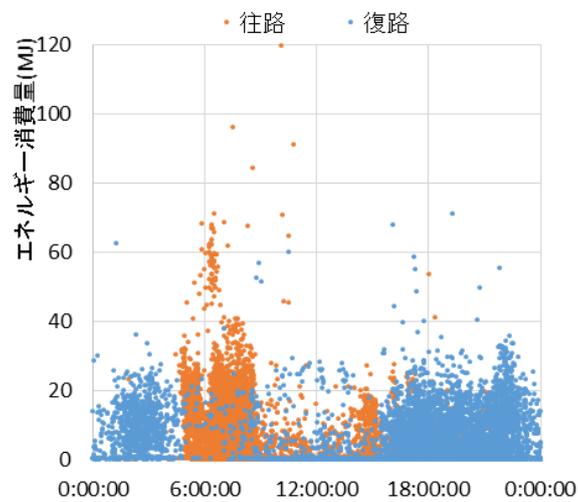


図 1-11 電費・燃費の時系列変化（日単位）

1.2.2 電費・燃費の単回帰分析

燃料消費量に着眼して、地域での実測燃費と実測電費を時系列で表示すると、**図 1-11** のようになる。全トリップを日単位で集計しグラフの上部のプロットが燃費、下部のプロットが電費を表す。この図から、両プロットともに逆 U 字型の繰り返しであり明らかに季節変動の影響があることが見て取れる。

この結果を踏まえ、横軸に豊田市の外気温、縦軸に燃費・電費をプロットすると、**図 1-12** のようになる。これらプロットに単回帰分析を適用すると、燃費では $R^2=0.41$ 、電費では $R^2=0.31$ の次の回帰直線が得られた。

$$Y = 17.25 + 0.236 * T,$$

$$Z = 2.93 + 0.064 * T.$$

説明変数 T は豊田市温度（単位は摂氏）、被説明変数 Y は燃費（単位は km/l ）及び Z は電費（単位は km/kW ）である。燃費は摂氏 0 度で $17.25km/l$ であり外気温上昇とともに燃費が伸びる。また、電費も摂氏 0 度で $2.93km/kW$ であり外気温上昇とともに電費も向上する。サンプル数の大きさを鑑みると必ずしも精度が高くなく、一本の直線だけでは説明力は弱い。しかし、道路環境等の要因を除外せずとも、外気温が実測燃費に大きな影響を与えることが確認できる。この地域での実質的な燃料消費量をリアルタイムで把握することの有用性、さらには、経路別等に精査を重ねれば、重回帰式の精度向上が見込まれ、気候の予測から地域でのエネルギー消費量を予測するなど地域のエネルギー需給予測等の可能性を示唆している。

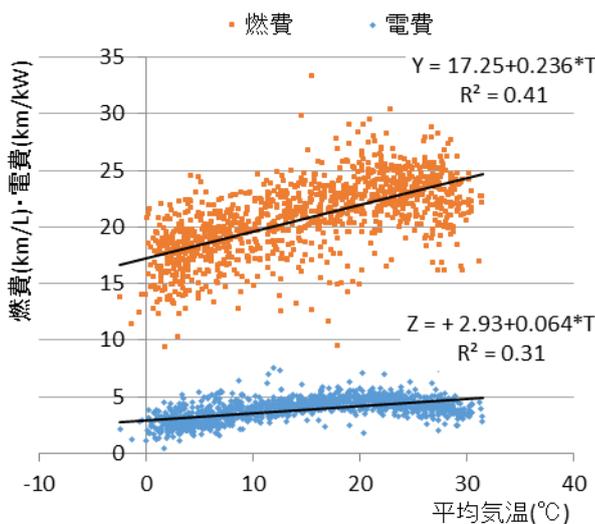


図 1-12 外気温と燃費・電費の関係（日単位）

1.3 IoT 車両情報の社会応用に向けたデータ分析例

1.3.1 中心極限定理による区間推定

自動車ガソリン残量について考察する。2011年10月20日～2015年1月22日のデータから、6台のプリウスの燃料タンクのモニタリング情報を時系列に抽出すると、**図 1-13** のようになる。横軸が時間、縦軸がガソリンタンク残量を表す。給油すると関数は上昇し、燃料を消費すると下に向かう。全ての自動車（サンプル数 60）で計算すると、日別の平均は $\hat{\mu} = 30485$ 、分散は $\hat{\sigma}^2 = 4801249$ となった。平均 μ を実線にて、 $\hat{\sigma}^2$ を用いた 1 シグマ範囲を点線にて **図 1-14** に示す。これは台当たり $\hat{\mu} = 508.3\text{MJ}$ となり、ガソリンの保有量に換算すれば約 15L/台である。換算はガソリン燃焼熱量から 34.6MJ/L として算出している。**図 1-14** より、日別変動が少なく、ガソリン残量が時間軸に対し比較的安定していることが確認できる。

この安定性を中心極限定理を用いて説明する。 n 台の自動車を保有する地域を考える。 x_i を自動車 i のガソリン残量を表す確率変数、 $f_i(x_i)$ をその確率分布とする。もし $f_i(x_i)$ が同一、 x_i が互いに独立だとすると、 $f(x)$ をそれら共通の確率分布とし平均を μ 、分散を σ^2 と定義すると、中心極限定理から、 $\sum_{i=1}^n X_i/n$ は平均 μ 、分散を σ^2/n の正規分布に従う。従って、ある時点において一台の自動車が保有する平均ガソリン量も正規分布に従うと言える。**図 1-14** データでは、サンプル数が 60 と比較的多い。そして、**図 1-13** に示す 6 本の関数形状が各車両のエネルギー残存量の時系列変化を示している。また、給油タイミングも自動車毎に独立だと考えられる。

以上から、中心極限定理が適用可能であり、車両が保有するガソリン量が精度付き区間として推定できる。具体的には、各車両のガソリン量は 1 シグマ範囲には 68%、2 シグマ範囲には 95%、3 シグマ範囲には 99.7% の割合で含まれる。

このように、平均値による点推定に加え、自動車ガソリン残量が区間推定で可能となる。これは地域のガソリンステーションへの需給予測につながることや将来の水素ステーションの整備計画でエネルギー需要量の予測や最適配置などに有用である。IoT 車両情報が自動車の機能改善に利活用されるだけでなく、都市計画などにつながる社会計測機能を持つことを明示している。

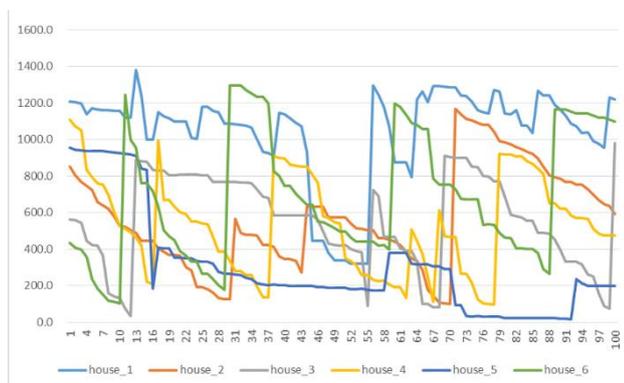


図 1-13 各車両のエネルギー残存量の時系列変化

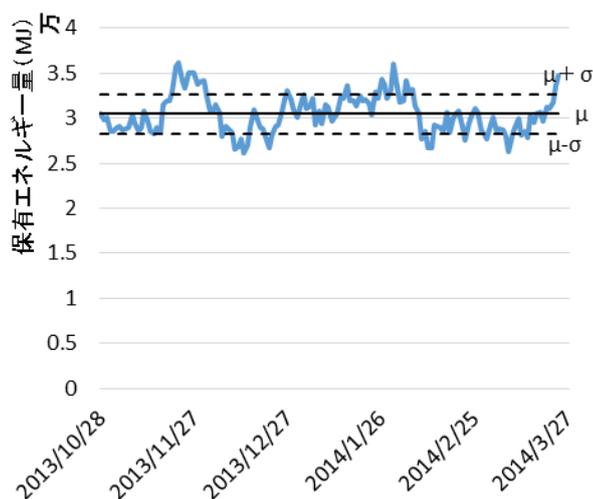


図 1-14 地域の総残エネルギー量 (MJ)

1.3.2 自動車のエネルギー残量把握による被災時活用

自動車の保有エネルギーの利用の在り方として、水素による燃料電池車両やプラグインハイブリッド車による移動分散電源機能が注目されている（高原ら，2016）．燃料電池車では 60kw/台，プラグインハイブリッド車においても 40kw/台といわれる蓄電池を有している（図 1-15 参照）．移動できる分散電源体と考えれば車両の位置情報とエネルギー保有量という IoT 車両情報に新たな社会応用の可能性に注目できる．すなわち，地域における移動できる電力保有量の確保の可能性である．直ちに想起できるのが震災の多い我が国での被災地での初動電源確保である．南海トラフ巨大地震への具体の備えは我が国の防災・減災政策の大きな柱である．そこで，この政策への応用を試みる．

図 1-16 は、南海トラフ地震が発生したと想定したときに甚大な被害を生じると予測されている 1 都 13 県である。被災時に、自動車がどの程度のエネルギーを保有するのかを推定する。多くの方々との情報共有を狙い、算出の際には次のような仮定を設定する。まず、平成 27 年度の登録自動車がすべて、本章の PHV 相当であるとする。次に、被災時でも同数の自動車及び住民数が存在するとする。

その結果、自動車が保有するエネルギー量を図示すると図 1-16 のようになる。愛知県の 17.7 億 MJ が突出しており、次に東京都の 16.6 億 MJ となっている。人口では東京都が愛知県より多いが、自動車保有数が逆に小さいのでこのような結果となった。自動車保有数に比例するため東海エリアでは保有量は高く、一方で、和歌山、徳島、高知、大分、宮崎等の地方部では値が小さく、最小は高知県となっている。安政南海地震により、和歌山や高知が甚大な被害を受けたが、総量で見ると、保有量は小さい。

防災対策は行政や専門家だけでは無く市民との協働が不可欠であり、そのためにも単純な形での情報共有が必要である。ここでの試算は、現時点でのデータを利用し、人口減少、自動車所有率減等の将来値は含まないなど仮定を含む分析である。一方で IoT 車両情報の受発信が可能な車両が増えてリアルタイムでその把握が可能になればエネルギー残量の把握や地域予測の精度は向上して実用水準となるであろう。



図 1-15 プリウスPHVの蓄電池機能

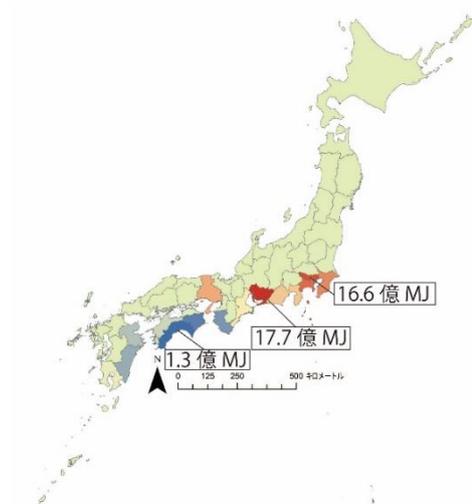


図 1-16 総エネルギー保有量

1.4 おわりに

本章では、IoT 車両情報の定義をした上で、豊田市実証実験でサンプリングデータを IoT 車両情報と見立てながら社会応用の可能性について論じてきた。第 5 期科学技術基本計画の第 2 章「未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組」で重要な施策として Society5.0 の実現がある。重要なユースケースとして挙げられた自動運転がもたらす IoT 車両情報としての数多くの社会応用についてご理解いただけたと思う。以上から、IoT 車両情報の有用性とこれからのクルマのもつ社会的共通資本としての発展性を示すことができた。

IoT 車両情報は自動車の技術革新に伴い、データ量と更新速度と種類が増大する。その利活用については社会課題の解決など公益的な用途としての協調領域と産業界の競争領域がある。本章ではその定義と社会応用について、データ利活用を実例で明示した。次章以降は特定の IoT 車両情報に着眼した具体的な社会応用と基礎理論を順に論じる。

参考文献

- [1-1] 平成 28 年内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム研究開発計画 (2016) .
- [1-2] 鶴原吉郎・仲森智博 (2014) : 『自動運転ーライフスタイルから電気自動車まですべてを変える破壊的イノベーションー』 . 日経 BP 社.
- [1-3] 保坂明夫, 青木啓二, 津川定之 (2015) : 『自動運転ーシステム構成と要素技術ー . 森北出版』 .
- [1-4] 内閣府第 5 期科学技術基本計画 (2016) .
- [1-5] 内閣府システム基盤技術検討会 (2016) : 第 3 回議事配布資料.
- [1-6] 内閣府エネルギー戦略協議会 (2015) : 第 10 回議事録.
- [1-7] 内閣府科学技術イノベーション総合戦略 2016(2016).
- [1-8] 桑津浩太郎 (2015) : 『2030 年の IoT』 . 東洋経済新報社.
- [1-9] 小林純一 (2016) : 『勝者の IoT 戦略』 . 日経 BP マーケティング.
- [1-10] 桃田健史 (2016) : 『IoT で激変する車ー自動車業界に押し寄せるモビリティ革命ー』 . 洋泉社.
- [1-11] 一般社団法人 新エネルギー導入促進協議会(2015) : 「愛知県豊田市における「家庭・コミュニティ型」低炭素都市実証プロジェクトのマネジメント」, 『次世代エネルギー・社会システム実証事業成果報告』 .
- [1-12] 高原勇, 大澤義明 (2016) : 「自動車に残るエネルギー量の推定と被災地域への応用」 . 『日本計画行政学会』 , 39 (4) , 53 – 60.
- [1-13] 高原勇, 赤澤邦夫, 大澤義明 (2016) : 「時空間アクセスから見た移動式サービスステーションの効果」 . 『日本計画行政学会』 , 39 (4) , 45 -52.
- [1-14] 高原勇, 大澤義明, 湊信乃介 (2016) : 「矩形都市移動時における太陽光逆光割合」 . 『GISー理論と応用』 , 24 (2) , 105 - 114.
- [1-15] 栗野盛光, 高原勇 (2016) : 「走行情報に関するモニタリング選択問題」 . 『応用地域学研究』 , 20, 25 - 35.
- [1-16] トヨタ自動車株式会社 (2016) : トヨタ自動車 WEB サイト toyota.jp

第 2 章

低燃費運転支援を実現する実測燃費の分析

—IoT 車両情報による地域特性分析と速度燃費曲線—

2.1 はじめに

2.1.1 背景

地球温暖化対策として低炭素社会実現に向けて運輸部門を中心に、より抜本的な取り組みが求められている。都市計画においては土地利用の再編や公共施設の集約化により自動車交通量の削減を促すコンパクトシティ政策が提案されている。このような環境負荷の小さい都市構造への転換は本質的ではあるが、長い時間と膨大な費用を要する。

自動車の二酸化炭素排出量は日本全体の約 15% を占めている。平成 27 年 3 月現在自動車台数は 8,067 万台であり（国土交通省自動車局, 2015）、各車両での燃費改善はわずかであっても大きな効果をもたらす。実測燃費は、自動車特性、道路特性（路面状況、交通量、混雑度、信号機、土地利用）、さらには気象特性や運転技術からなるドライバー特性の影響を受ける。そのため、実際の走行パターンに近い測定法 JC08 モード燃費とは実測燃費との乖離が発生する。

特に我が国では、四季が明確であり、同じ場所でも年間を通して比較すると気温差も大きく、降水量の差異も顕著である。日本列島は、地理的に南北に長いという特徴を有している。そのため、北海道では冬には氷点下まで外気温が下がり、沖縄県では冬でも温暖である。紀伊半島のように雨が多い一帯もあれば、瀬戸内海沿岸地域のように一年中雨の少ないところもある。実燃費はこのような地域固有の季節間変動という地域特性を踏まえる必要がある。

自動運転の技術開発の背景の一つに、低燃費走行が実現できるという大きな期待がある（保坂ら, 2015）。車両走行時の様々なデータを IoT でサンプリングした情報は、IoT 車両情報と呼ばれる（科学技術イノベーション総合戦略 2016）。この膨大な情報を活用することで、外部環境や経路状況に応じて、走行速度・経路・出発時刻などを選択し低燃費運転を可能とする。従来困難であったドライバー特性を明らかにした実測燃費を改善することも可能となる。

以上から、我が国において低炭素都市の実現のためには、実測燃費データから地域特性やドライバーと特性の影響を探る意義は大きい。

2.1.2 目的

本章の目的は、主に外部環境として気象条件（降雨有無・気温）に着目して、豊田市実証実験データで速度帯別と外部環境（気象）が実測燃費に与える影響を分析する。実測燃費として精度確保のために区間燃費を定義し、平均値、標準偏差、分布の裾の重さ、

さらには、二酸化炭素排出量の指標を用いて考察する。

本章には少なくとも二つの大きな特徴を有する。第一に自動車の機能として移動の速達性に着目し、速度燃費曲線を計算する。つまり、移動効率性を表す走行速度ごとに、実測燃費の分布を求める。

第二の特徴として、豊田市実証実験（新エネルギー導入促進協議会，2015）で得られた実測燃費データを用いる。その意義として、①実測燃費、速度の1分刻みデータセット（両者の関係が検討可能）、②同一車種（車種の影響を排除）、③同一地域（外気温や道路網整備水準など地域特性の影響を極力除去）、④長期間（季節変動やドライバー特性の影響が抽出可能）、がある。このように、同一環境を保証しつつ一方で多様なデータを分析できるというメリットがある。

第三に、今後期待されるIoT車両情報データの有用性である。例えば、実測燃費の計測と観測は道路インフラの監視・メンテナンスに貢献できる。

実測燃費に関する既存研究は多数ある。特に、エコドライブやセーフティドライブの教示などドライバー教育に関する研究がある（浪崎ら，2013）、（松本ら，2011）。

自動車燃料消費調査（呉，2015）を用い広い地域で長期間にわたるデータを踏まえた分析もある。しかしながら、実測燃費を用いて、外気温や降雨といった外部環境と実測燃費との関係について論じた研究は無い。速度帯別に実測燃費を求め、その分布形状から低燃費運転支援を自動運転で再現する効果は大きい。

2.2 実測燃費データの基礎的な考察

2.2.1 対象とする使用データ

豊田市実証データでは、2011年10月から2015年1月までの期間において、61ユーザーに対して、リチウム電池、鉛電池、V2H型のハイブリッド車が割当てられ、車載器を通してトリップ毎のデータがとられた。時間精度としては、各トリップにおける1分毎の定周期データである。本章では、日付、時刻、位置情報がタグ付けされた走行速度、走行距離、航続可能距離、燃料消費量、EV走行可能距離などのIoT車両情報が対象データである。

豊田市実証データを用いた研究として、自動車が保有するエネルギー残量に着目し、被災時にどの程度行動可能なのかを分析した研究がある（高原ら，2016）。

2.2.2 対象地域

豊田市実証データに関して、以下の点に基づきデータを整理した。まず、高速道路走行などの遠距離走行を除外し膨大なデータを集約化するために、本章では、**図 2-1** に示す経度の範囲を[137.124539, 137.191102], 緯度の範囲を[35.047210, 35.122392]で切り取った領域内の移動データのみを対象とする。この領域は、豊田市の中心部に位置しており、面積は約 7,578 ヘクタールに相当する。

次に、全データをある程度平均化して可視化するために、各ユーザーのトリップデータを一ヶ月毎に分割する。そして、月別に整理したデータに関して、①走行速度、②走行距離を燃料消費量で割ることで実測燃費をそれぞれ算出する。特に、速度を 5km/h 毎の速度域を区切り、各速度域での速度と対応する実測燃費を計算する。

図 2-1 に検討領域における、あるユーザーの 1 ヶ月分の走行履歴を 1 分刻みでプロットした結果を示す。豊田市駅やトヨタ自動車工場などを含め、幾つかの経路を頻回に走行していることがわかる。このほか、ユーザーによっては異なる経路を走行する様子も観測することができた。これは、ユーザー毎に頻回に利用する経路選択が異なっていることを意味する。

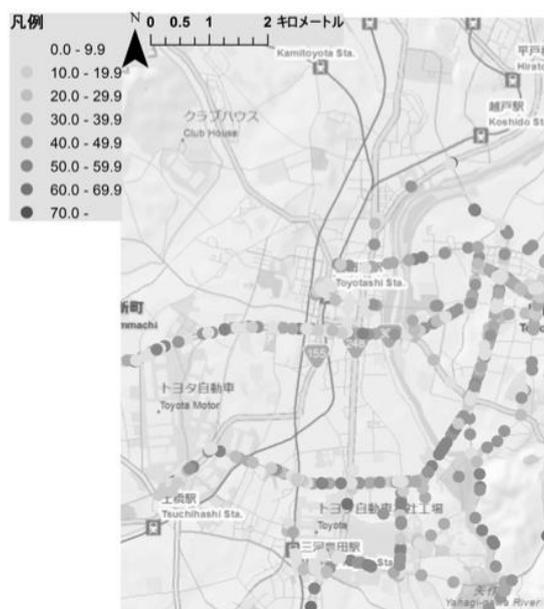


図 2-1 速度による走行履歴 (2014 年 9 月)

2.2.3 月間燃費による解析

実測燃費として①月間燃費と②区間燃費（3分間）を考える。前者は、1ユーザーの1ヶ月の積算走行距離を積算燃料消費量で割ったものである。移動経路全体や1日を通しての燃費の差を体感できる。後者は、1ユーザーのある瞬間の走行速度に対して、その前3分間における移動距離を燃料消費量で割ったものである。短い区間時間で観測されるのでアクセル操作の影響を読み取れる。

全ての計算では、電気モードのみでの走行時間を除いた。実測燃費計算では、電気モードのみで走行している状態のうち燃料消費量がゼロの時間は除いており、走行速度の算出に関しては、走行速度がゼロでない全時刻を対象としている。平均時速が60km以下へ限定した結果、データ総数は971,518件となった。

図2-2は月間燃費の季節間変動を表す。破線で外気温の平均を示す。横軸が2011年10月からの月数、縦軸左が実測燃費値である。縦軸右が気温を表す。この図から、外気温の影響も含めた季節間の周期性が読み取れる。特に、燃費では気候条件の影響が大きいことが明らかである。

図2-3は月間燃費に対する速度の影響を示す。横軸が瞬間速度で時速30km以上が占める割合を表す。この割合が高いと言うことはそれぞれの巡航走行を意味する。この図から右上がり傾向が読み取れ安定した速度による走行が実測燃費を改善することが分かる。

図2-2及び図2-3で示した月間燃費の分析結果から、気候や速度の影響が大きいことが理解できる。そこで、3分区間燃費というより詳細なデータを利用して、速度帯別に気候の影響を分析する。また燃費に加え、二酸化炭素排出量の増減についても計算する。

天候の影響を見るために、区間燃費と走行速度との関係を散布図によりプロットすると、図2-4から図2-9のようになる。①降雨有無別及び②外気温別（0から10度、10度から20度、20度から30度）の場合分けから、合計6枚の散布図を示す。そして、5km/h毎に速度域を区切った結果について、メディアンをつないだ曲線（以下、速度燃費曲線）により実測燃費の速度による依存性を議論する。天候データに関しては気象庁のホームページから入手した。図2-4から図2-9までが示すように、降雨や外気温の区間燃費への影響は明らかである。

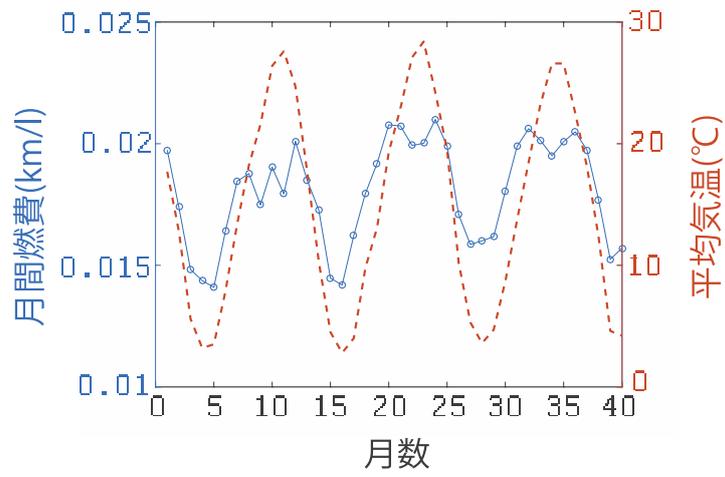


図 2-2 季節と月間燃費

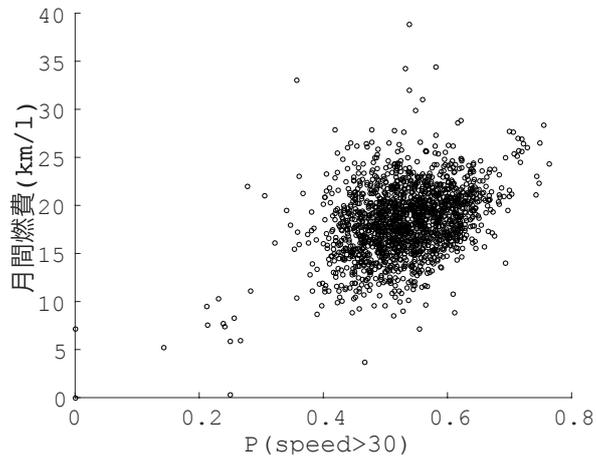


図 2-3 速度と月間燃費

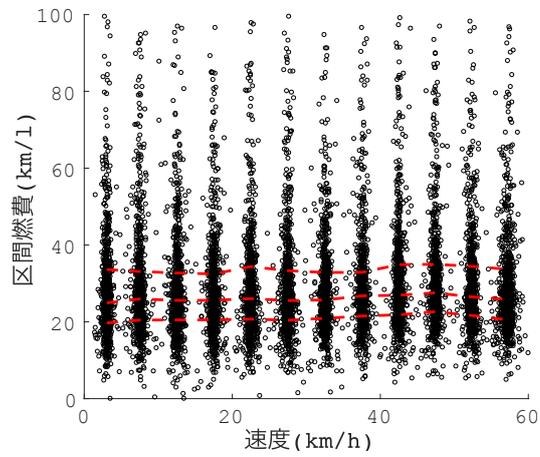


図 2-4 外気温 0~10 度帯, 降雨なし

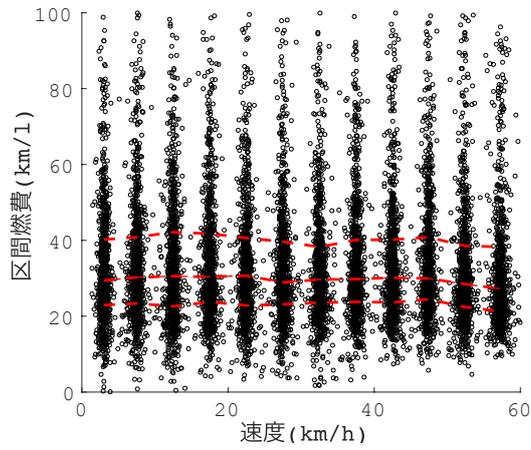


図 2-5 外気温 10~20 度帯, 降雨なし

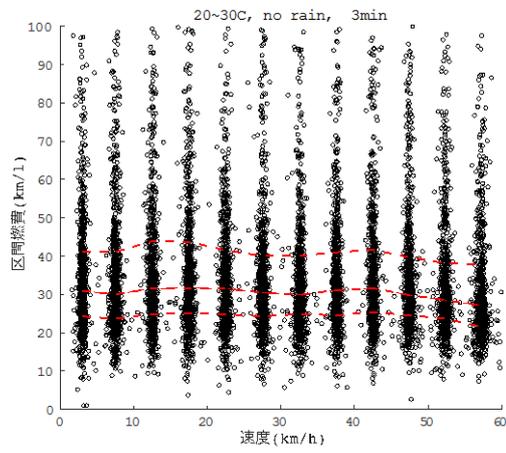


図 2-6 外気温 20~30 度帯, 降雨なし

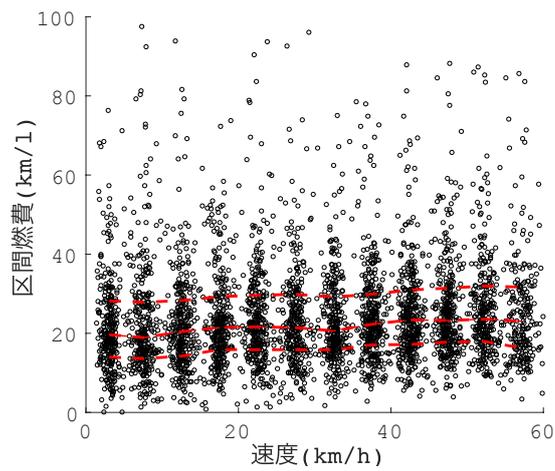


図 2-7 外気温 0~10 度帯, 降雨あり

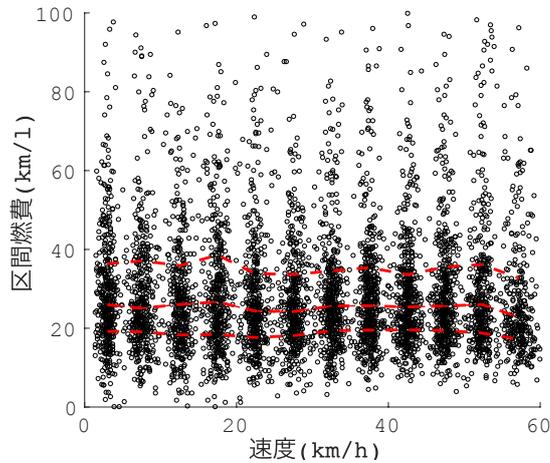


図 2-8 外気温 10～20 度帯, 降雨あり

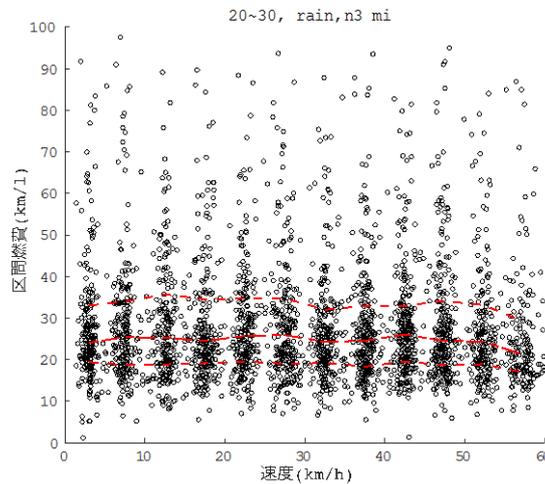


図 2-9 外気温 20～30 度帯, 降雨あり

2.3 区間燃費による地域特性解析

2.3.1 降雨別の速度燃費曲線

まず、降雨別による速度燃費曲線の変化を調べる。図 2-10 は、速度域 0～60km/h に対して、5km/h 毎の速度帯域に分け、各速度帯域での平均速度に対する 25%タイル（第 1 四分位点）、メディアン（中央値、50%タイル）、75%タイル（第 3 四分位点）をプロットした結果である。メディアンをつなぐ破線は降雨なしの結果、鎖線は降雨ありの結果である。外気温の影響を除外するために、外気温 10～20 度のデータを用いた。

この図より、第一にどの速度帯域でも降雨により燃費が悪くなることがわかる。特に、多くの車速が占める 10km/h から 50km/h の速度帯ではその傾向が顕著となる。多降

雨地域である高知県や和歌山県など太平洋側，秋田県や新潟県など日本海側では，降雨により実燃費が悪化すると推定できる。

表 2-1 に，降雨，外気温が速度及び実測燃費に与える影響を示す．平均値には 1 シグマの値，それぞれの標本数も示す．全サンプル数の降雨割合は 7.7 であった．表 2-1 から，降雨により実測燃費は平均で 41.2km/l から 33.2km/l へ低下し，その差は 8.0km/l にも及ぶ．さらに，二酸化炭素排出量も，69.9g/km から 56.4g/km へ大きく削減できる．ちなみに，車速は 29.9km/h から 29.6km/h へと 0.3km/h しか落ちないことも読み取れる．

降雨による燃費悪化の原因として，物理的視点からは路面の摩擦抵抗が大きくなることが考えられる．一方で，降雨により徒歩や自転車から自動車へ交通手段がシフトし自動車交通発生・集中度が増え渋滞が発生し（松本ら，2013），また自転車との接触事故回避など慎重に運転することで走行時間が増加し（鈴木ら，2013），渋滞が発生する．渋滞により，ブレーキやアクセル操作の繰り返し，アイドリング，さらには精神的作用による運転の乱れなどが実測燃費の悪化の要因と考えられる．第二に，25%タイヤと 75%タイヤなどタイヤ間の幅が広く，ユーザー特性の差異が大きいと解釈できる．特に，低速帯での差異は顕著である．このことから，運転特性による燃費の改善の余地が大きいことが読み取れる．自動運転の導入によりアクセル，ブレーキ，ハンドルなどが機械制御されると低燃費走行の再現性が実現する．可能となる．実測燃費のバラツキが大きいことを具体的な数値や分布で明示することができた．本章の自動運転と IoT 車両情報による低燃費運転支援の導入効果が大きいと期待できる．

降雨なし時の速度に対する実測燃費の曲線は，PHV に関する特性を表出している．つまり，加速域（0～20km/h）で緩やかに曲線が上昇し，中速域（30～50km/h）で急な傾きで上昇し，その後高速域（50km/h～）で燃費曲線が反転する．

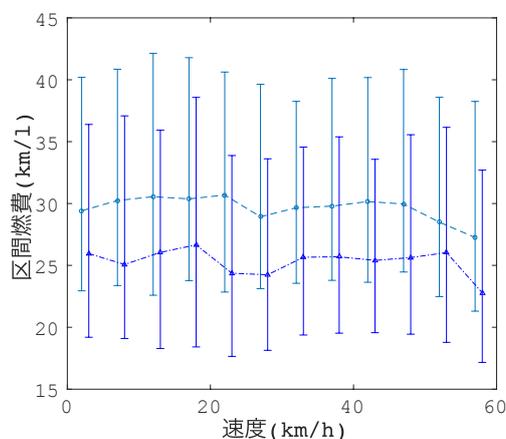


図 2-10 天候別の速度燃費曲線

2.3.2 外気温別の速度燃費曲線

気温による実測3分間燃費の変化を調べる。図 2-11 に、降雨無しでの気温帯別の速度燃費曲線を3本示す。

図 2-11 から、第一に、平温帯（10～20 度，20～30 度）と比較して鎖線で示している低温帯（0～10 度）は、実測燃費が全体で悪くなる上に、速度変化への依存性が高くなる。つまり、コールドスタートと呼ばれる低温時始動からの低温時走行では速度制御が実測燃費向上に効いてくる。他方で、点線で示している平温帯（20～30 度）では実測燃費の速度依存性が比較的フラットになる。つまり、低速域からの速度変化に対して実測燃費の変化は鈍感となり、中高速域での加減速の大きさと頻度が重要となる。

表 2-1 外気温が速度及び実測燃費に与える影響を示している。ここで、全データにおける気温帯のデータ数の割合は、降雨なしの条件のもと以下の通りである。0～10 度が 27.4%，10～20 度が 27.4%，20～30 度が 34.9%であり、ほぼ3分割された。表 2-1 から、平温帯（20～30 度）と比較すると、低温帯（0～10 度）では実測燃費ではリットル当たり 7.8km だけ悪化することが読み取れる。さらに、二酸化炭素排出量も、56.2g/km から 65.0g/km へ大きく増加する。

外気温に対してのこのような敏感な反応の原因として、外気温のエンジン燃焼効率への影響が大きいことが考えられる。そのため、特に冬場の低温時走行は適切な速度制御を促すことで実測燃費を向上できることが示唆される。

第二に、マイル間の幅から、平温帯（10～20 度，20～30 度）でドライバー特性の差異が大きいことが分かる。従って、自動運転導入の効果に関しては、北海道や東北などの寒冷地域より九州や四国など温暖地域の方が大きいと言えよう。

第三に、実測燃費に対し外気温や降雨など天候の影響が大きいことが分かった。自動運転による低燃費運転支援の導入の際には、外部環境に柔軟に対応するために寒冷地仕様などそれぞれの地域特性を反映する地域型 OS（オペレーティングシステム）が有効である。

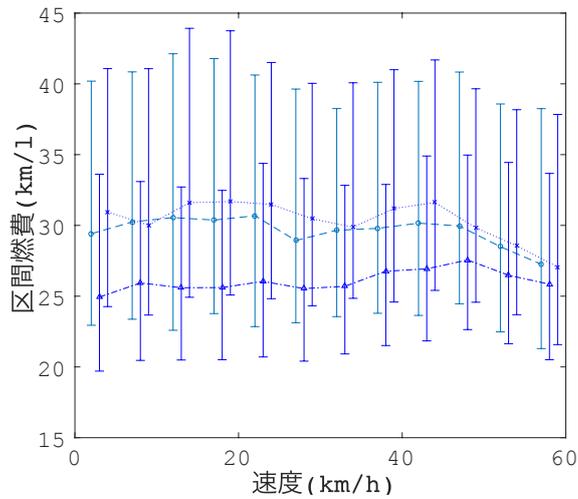


図 2-11 降雨なしの速度燃費曲線

表 2-1 天候と平均速度・平均燃費・平均二酸化炭素排出量・標本数

外気温		0~10 度	0~10 度	10~20 度	10~20 度	20~30 度	20~30 度	全温度帯	全温度帯
		(平均)	標準偏差	(平均)	標準偏差	(平均)	標準偏差	(平均)	標準偏差
降雨 なし	速度 (km/h)	30.8	3.6	30.2	4	29.7	3.2	29.9	2.6
	燃費 (km/l)	35.9	20.8	42.5	25	43.6	23.5	41.2	231.7
	CO2 (g/km)	64.7		54.6		53.3		56.4	
	標本数	246111		245401		312725		896578	
降雨 あり	速度 (km/h)	29.7	5.6	29.6	4.8	29.6	5.1	29.6	4.5
	燃費 (km/l)	28.4	17.9	34.9	20.5	36.4	23.3	33.2	19.8
	CO2 (g/km)	81.8		66.517		63.8		69.9	
	標本数	18545		33596		22240		74940	
降雨別 なし	速度 (km/h)	30.8	3.6	30.1	3.9	29.6	3.2	29.8	2.7
	燃費 (km/l)	35.7	20.5	41.7	23.9	43.5	23.5	41.3	21.8
	CO2 (g/km)	65.0		55.7		53.4		56.2	
	標本数	264656		278997		334965		971518	

2.4 速度燃費曲線の導出と低燃費運転支援

2.4.1 対象経路

本節では，豊田市実証実験データにおける経路特性を検証する．**図 2-12** は本章で対象とした経路である．それぞれの特徴について説明する．まず，図の赤いマーカーの経路は国道 153 号線である．この経路は，片側 2 車線通行で路肩はなく，東名道と東海環状道間のバイパス経路となっている．次に，青いマーカーの経路は国道 246 号線である．片側 3 車線通行でかつ路肩もある．中心市街地では信号が多い．また，通勤や物流に使われており，交通量が多い．緑色のマーカーの経路は，矢作川沿いの抜け道である．片側 1 車線通行で，信号が少ない．そして，黄緑色のマーカーの経路は，南側から実証実験のユーザーが住む住宅地へ向けて迂回路である．片側 2 車線通行で路肩があり，郊外の住宅地内の経路である．最後に水色のマーカーの経路は，矢作川を渡る経路（以下，橋ルートと呼ぶ）である．片側 1 車線で路肩があり，今回の豊田市実証実験のユーザーに関して，交通量が非常に多い．以下では，これらの経路に関して，燃費の観点から特性解析を行う．

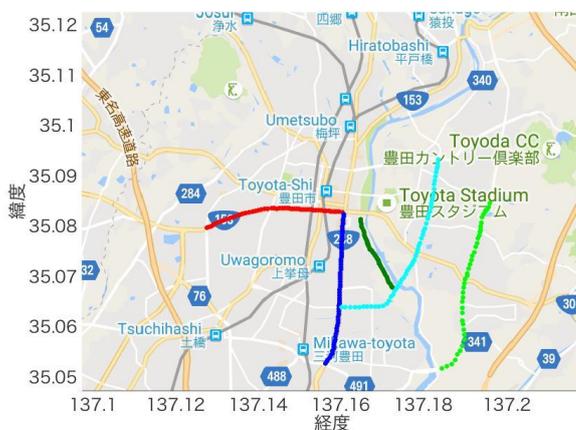


図 2-12 対象経路

2.4.2 経路別燃費の速度依存

まず，経路ごとの速度と月間燃費の関係をプロットした結果を**図 2-13** に示す．各図ともに横軸が速度 40km/h 以上で走行した時間の割合である．また，縦軸は，月間燃費を表す．各点は，1 ユーザーの 1 月分の平均である．緑色の点で**図 2-12** の領域全体に関する結果を示し，赤色の点で各経路における月間平均を表す．ここでは，交通量の多い橋ルートを除く，国道 153 号線，248 号線，川沿い経路，東迂回路について比較する．

経路ごとに詳しく観察すると、国道 153 号線と 248 号線については、概ね平均と重なって分布している。このことは、これらの経路の走行が全体への影響が大きいと解釈できる。一方で、東迂回路と川沿い経路に関しては、走行速度が比較的速いということが読み取れる。さらに、川沿いにおいては、燃費のばらつきも大きいことがわかる。これらの経路では、比較的自由走行の時間が長いと解釈できる。そして、東迂回路に対して、川沿いでは信号が少ないため停止回数が減ることから燃費が良いユーザーも観察されるということと解釈できる。

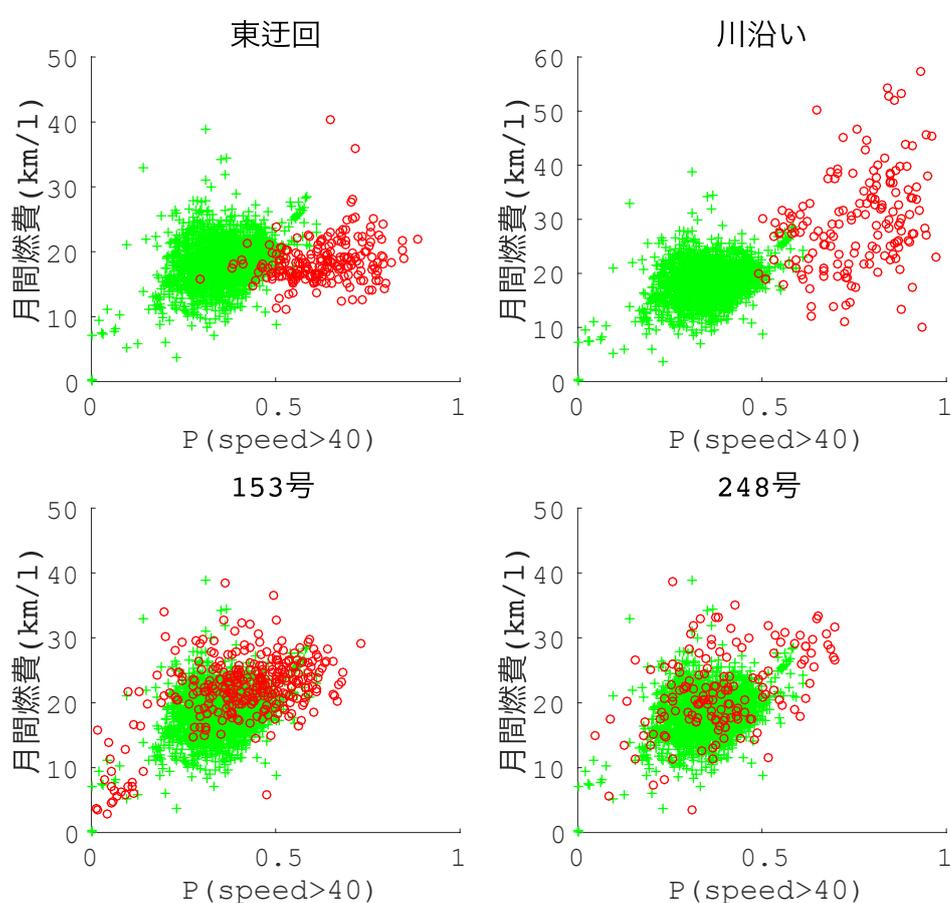


図 2-13 経路ごとの速度と月間燃費の関係

次に、図 2-10、2-11 と同様に速度帯別における燃費のばらつきの特徴を対象経路ごとに調べる。気候条件としては、10~20 度の降雨なしとした。図 2-14 に結果を示す。各色が図 2-12 の経路に対応している。つまり、赤が 153 号線、青が 248 号線、緑が川沿い経路である。153 号線、248 号線はともに領域全体と類似した特性を示している。この結果は、図 2-13 と同様である。この両経路では、153 号線が全体として良い燃費を

示している。これは、交通量の関係から、153号線の方が248号線よりも自由走行時間が長くとれるということと解釈できる。一方で、川沿い経路では、速度帯ごとに燃費に大きな変動がみられる。これは、川沿い経路には信号がなく道幅も狭いことから、対向車との行き違いにおいて加減速が多くなることが原因と予測することができる。

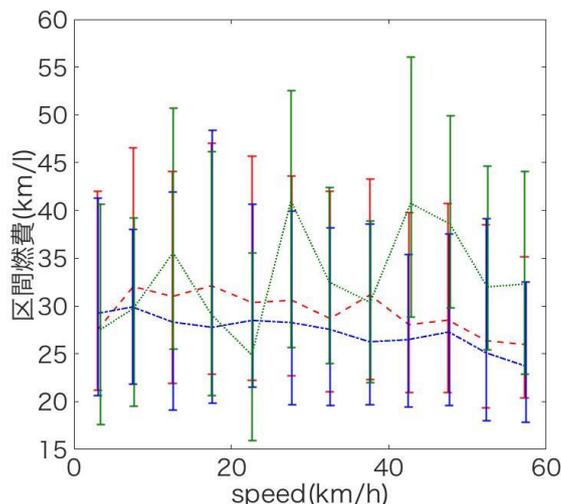


図 2-14 経路別燃費の速度依存性

2.4.3 気候条件による経路別燃費の速度依存

図 2-15～図 2-18 に、降雨の有無、外気温別による経路別の燃費速度曲線を示す。図 2-15, 図 2-16 は降雨の有無別の結果を示している。いずれの結果に関しても降雨有りの場合、全体的に燃費が悪くなる点は図 2-10 と同様である。しかしながら、降雨有りの時の燃費が、降雨無しの時とほとんど変わらない速度域が存在していることがわかる。さらに、その速度域が経路によって異なることも観察できる。つまり、153号線では、30km/h 強あたりで、橋ルートでは、20km/h 弱あたりである。この特徴は、何かしらの経路の特性を反映している可能性がある。ただし、注意すべき点としては、降雨のある場合のデータ数は、降雨無しの場合に比べて少ないので、燃費のばらつきの大きさは否めない。この点に関しては、153号線のデータ数が橋ルートのそれに比べて少ないことに注意したい。実際に、データ数を見ると、153号線の降雨無しの場合の各速度帯域の分布のデータ数は平均 250 個で、降雨有りの場合は平均 56 個である。一方、橋ルートに関しては、降雨無しで平均 474 個、降雨有りで平均 142 個である。

次に、図 2-17, 図 2-18 は、外気温別の燃費速度曲線である。2.3.2 節で観察された通り、低温帯では燃費が悪くなることが分かる。153号線においては、全体的に燃費が低下する傾向が見られ、速度依存性に関しては大きな変化は見られない。一方、図 2-18 に

示す川沿い経路に関しては、50%マイルでみると速度ごとの燃費の変動が低温帯において小さくなっていることがわかる。

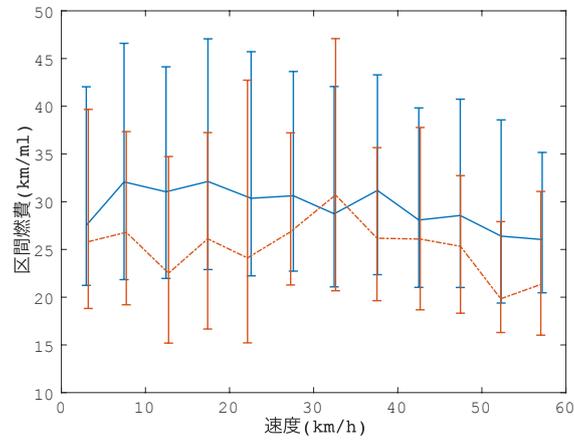


図 2-15 国道 153 号線の燃費速度曲線 (10~20 度)
降雨有り (オレンジ) 降雨なし (青)

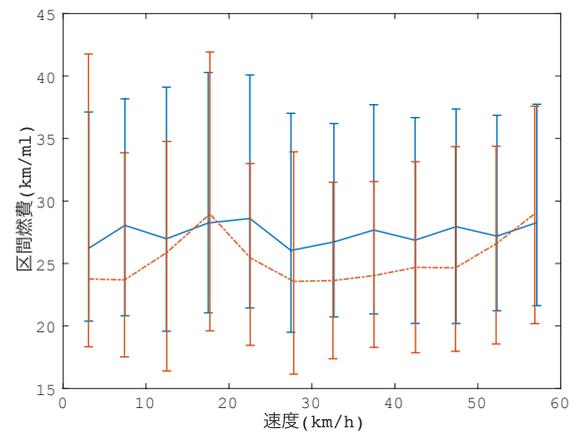


図 2-16 橋ルートでの燃費速度曲線 (10~20 度)
降雨有り (オレンジ) 降雨なし (青)

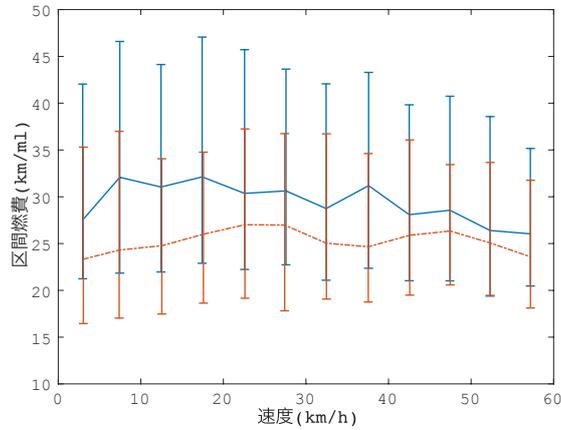


図 2-17 国道 153 号線の燃費速度曲線（降雨なし）
0～10 度（オレンジ） 10～20 度（青）

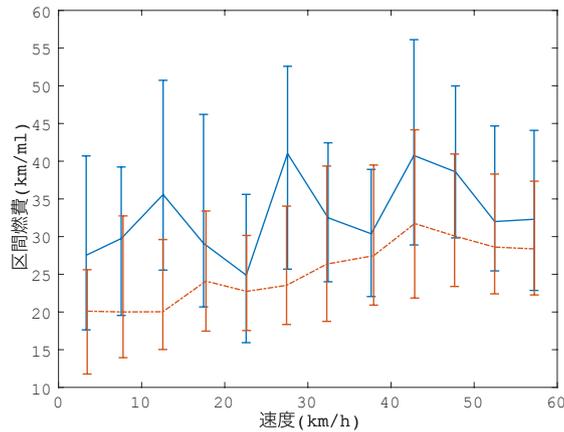


図 2-18 川沿い経路の燃費速度曲線（降雨なし）
0～10 度（オレンジ） 10～20 度（青）

2.4.4 燃費の分布に関する経路特性

本節では、各速度帯域の燃費の分布に注目する。図 2-19, 図 2-20 に経路毎に、ユーザー毎の 3 分区間燃費の月別平均をプロットした結果を示す。153 号線、248 号線ともに各速度域の燃費の分布が燃費値の大きい方に向けて裾が長いようにみとれる。実際、各図 (b) に 40km/h～45km/h の燃費値の分布をヒストグラムで表示した結果を示してある。ここで、図 2-19 (b) で示す 153 号線の分布に関して、対数正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad 0 < x < \infty$$

によって近似した結果を赤線で示している。近似には最尤法を用いた。

推定されたパラメータは,

$$\mu = -3.52, \sigma = 0.48$$

である. このように対数正規分布で近似することによって, 分布の最頻値 $e^{\mu-\sigma^2}$ を推定することが可能となる. 推定した最頻値を速度毎にプロットした結果を経路毎に図 2-21 に示す. 平温降雨無しの条件で, 経路毎に最も走行の多い燃費値が異なることがわかる. つまり, 153 号線の最頻値は概ね 248 号線よりも大きいことがわかる.

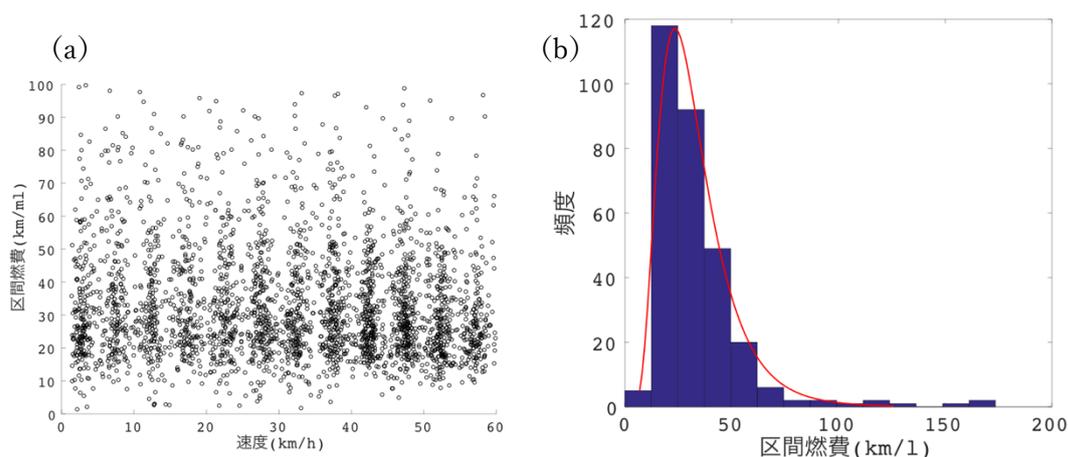


図 2-19 国道 153 号線の速度毎の燃費分布 (外気温 10~20 度, 降雨なし)
 (a) 5 キロ毎の燃費分布, (b) 40km/h~45km/h の燃費値の分布

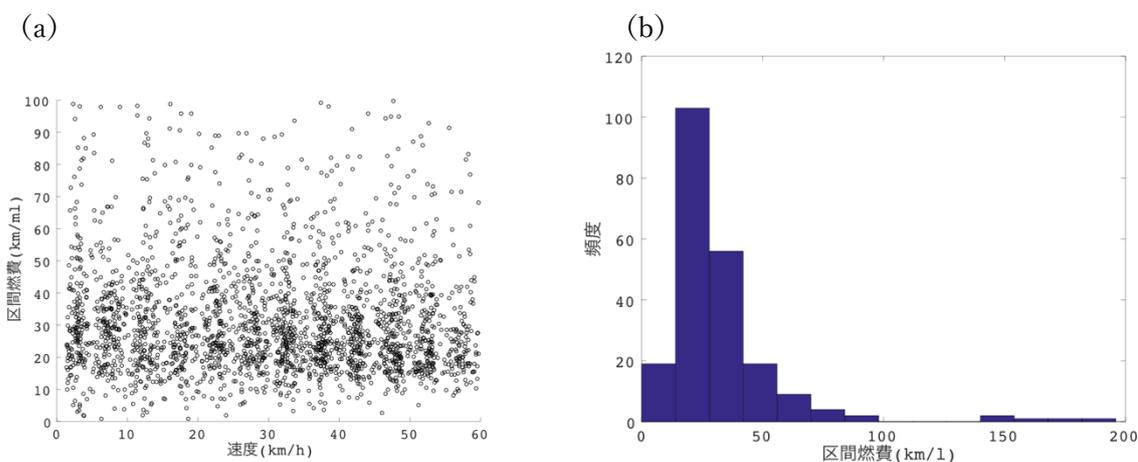


図 2-20 国道 248 号線の燃費分布 (外気温 10~20 度, 降雨なし)
 (a) 5 キロ毎の燃費分布, (b) 40km/h~45km/h の燃費値の分布

さらに詳細に観察すると, 時速 20km/h 以上では, 燃費の最頻値が大きくなるような速度域が存在していることがわかる. 153 号線に関しては, 40km/h 前後で燃費値が最大となっており, 一方, 248 号線では, 20km/h~50km/h で燃費値が相対的に大きく, 50km/h 以上で最頻値が下がっている. さらに, 推定した関数から $X = (\text{中央値} - \text{最頻値})$ を計算した結果を図 2-22 に示す. この X の値が大きくなると, 最頻値以下の割合が小さくな

ることが簡単な計算によりわかる。このことは、最頻値以下の割合を 50% へ向けて改善することの改善代が、(中央値-最頻値) で表せることを意味する。したがって、**図 2-22** より言えることは、速度が 30km/h 以上の高速域に比べると、30km/h 以下の低速域において、改善代が大きいのということである。これは、153 号線、248 号線ともに見られる傾向である。つまり、**図 2-21** の結果と合わせると、最頻値を中央値に揃えるように走行を改善すると、153 号線の方が燃費をよりよくすることができると考察できる。

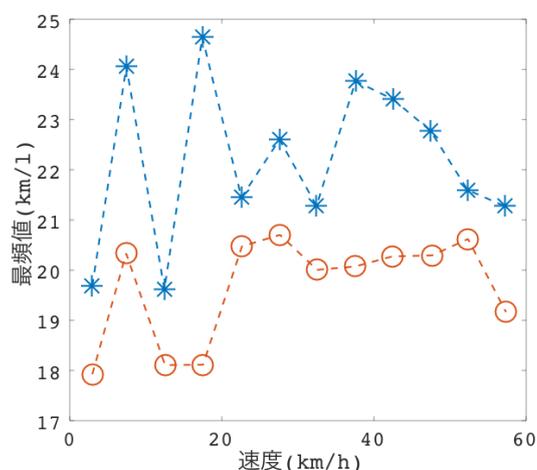


図 2-21 速度帯ごとの燃費分布の推定最頻値 (10~20 度, 降雨なし)
国道 153 号線 (青), 248 号線 (オレンジ)

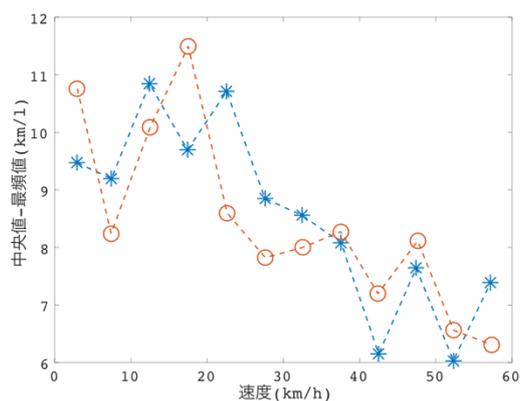


図 2-22 速度帯ごとの燃費分布の (中央値-最頻値) (10~20 度, 降雨なし)
国道 153 号線 (青), 248 号線 (オレンジ)

2.4.5 トリップ毎の平均燃費に関する経路特性

本節では、燃費として、トリップ毎の平均燃費を考える。同時に、燃費に対する速度もトリップの平均速度とする。図 2-23 は、平均速度に対する平均燃費をユーザーごと

に月別で平均してプロットした結果である。平均燃費が 40km/l 未満のみを検証している。また、散布図の中の赤い点と青い点は、それぞれ平均速度を 5km/h ごとに区切った領域の燃費の分布に関する 50%タイル、25%タイルである。これらの代表値に注目して経路ごとの違いを観察すると、ともに代表値が飽和する速度域が存在していることがわかる。153 号線の方が 20km/h~25km/h で飽和しているのに対して、248 号線は 30km/h あたりに飽和する速度域が存在している。この結果は、トリップ単位で検証しても経路ごとに燃費に最適な速度域が存在する可能性を示唆している。

図 2-24 は、図 2-23 同様のプロットを月毎に平均化せず、全ての該当するトリップをプロットした結果である。散布図に関して、25% (赤) , 50% (シアン) , 75% (緑) タイルを示している。図 2-23 よりも経路間の違いが顕著であることが読み取れる。

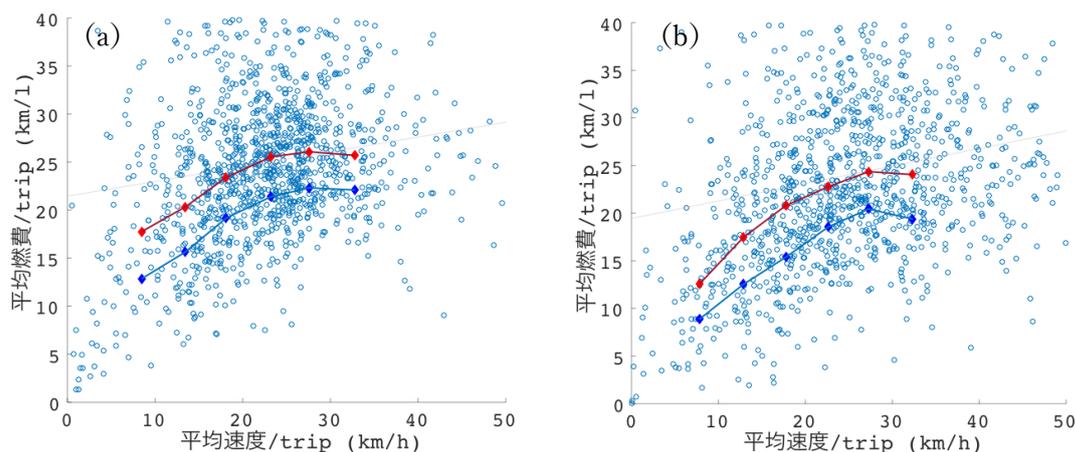


図 2-23 トリップ毎の平均速度と平均燃費の分布 (降雨なし)

(a) 国道 153 号線, (b) 248 号線

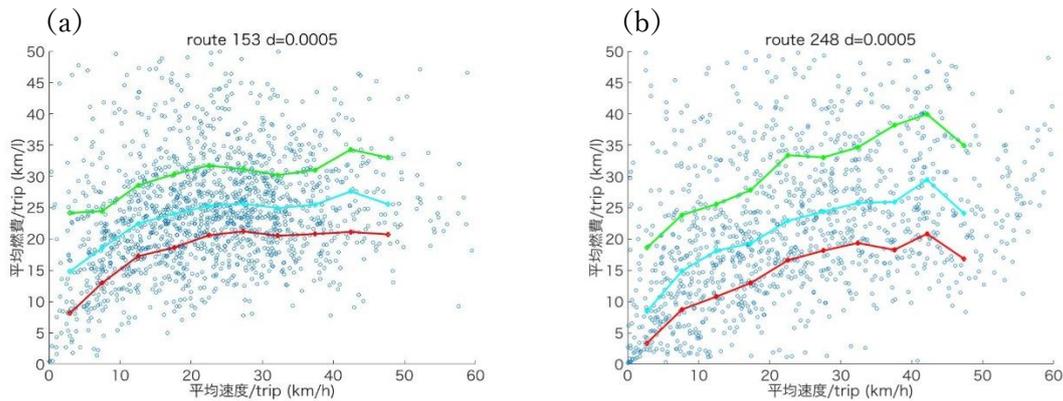


図 2-24 トリップ毎の平均速度と平均燃費の分布（降雨なし，10～20 度）
 (a) 国道 153 号線，(b) 248 号線

2.4.6 経路におけるユーザー依存の速度燃費曲線

本節では，前節で検討した，ある経路区間におけるトリップ単位での平均燃費を平均速度の関数とみなした時のユーザー特性の影響を考察する．本節の目的は，経路区間ごとにユーザーに対して推奨速度を提示するために，経路特性とユーザー特性を豊田市実証実験データから抽出し，より低燃費な運転支援を目指すための理論的考察を与えることである．まず，燃費に関しては，これまで検討してきた通り，①速度特性，②気候特性，③経路特性に加え，④ユーザー特性が関係することが知られている．そこで，これらの関係を以下のように定式化する．

$$v_{t,p} = f(c_{t,p}, r_{t,p}, u_{t,p})$$

これは，ある時刻 t における，ある地点 p での推奨速度 $v_{t,p}$ を，気候変数 $c_{t,p}$ ，道路車両変数 $r_{t,p}$ ，ユーザー変数 $u_{t,p}$ の関数として表す式である．ここで注意すべき点は，各変数は独立変数ではなく，互いに依存することもあり得る．例えば，道路車両変数 $r_{t,p}$ は，時刻地点の気候変数 $c_{t,p}$ に依存する．ここでは，従属関係を陽には記述せず，上記のように表現する．さらに，推奨速度 $v_{t,p}$ は，低燃費の意味で推奨される速度であるから，関数 f は，燃費も含めて議論されるべきである．つまり，速度 v と燃費 C の間に燃費速度曲線の関係式

$$C = g(v)$$

が存在するとして，求めるべき $v_{t,p}$ は，

$$v_{t,p} = \operatorname{argmax} g(v)$$

である．また，時刻 t ，地点 p の最適燃費を $C_{t,p}$ とすると， g の逆関数を用いて，

$$v_{t,p} = g^{-1}(C_{t,p})$$

とも書けるので、 g と f の関係は、

$$g^{-1}(C_{t,p}) = f(c_{t,p}, r_{t,p}, u_{t,p})$$

である。

本節における考察では、 argmax は考えず、燃費速度曲線の関数を検討する。まず、推奨速度における燃費は

$$C_{t,p} = g(f(c_{t,p}, r_{t,p}, u_{t,p}))$$

である。ここで、議論をより簡単化するために、地点 p をある経路の区間 I で置きかえる。さらに、気候変数 $c_{t,p}$ は固定し、また道路車両変数 $r_{t,p}$ は、ユーザー変数 $u_{t,p}$ の従属変数として考える。つまり、 $r_{t,p} = h(u_{t,p})$ のようにかけるとする。最後に、時刻 t は、時間帯つまり交通量のパラメータとして考えると、固定することが可能である。

これらの仮定により、燃費のユーザー変数に関する関数は、

$$C_I(u_I) = g(v(u_I))$$

と書くこととする。この関数の解釈は、区間 I においてユーザー特有の燃費速度曲線が存在することを意味する。図 2-23 では、平均燃費の中央値を代表値として、速度燃費曲線として捉えると、これは複数ユーザーの平均的な燃費曲線であることがわかる。この平均燃費曲線は、上式の u_I に関して平均化したもので、平均的ユーザーのパラメータを U と表現するならば、平均燃費曲線は、

$$C_I(U) = g(v(U))$$

と表現可能である。つまり、一人のユーザーごとに同様な曲線がかかる。そこで、図 2-25(a)に気候条件を 10-20 度帯降雨なしと固定した結果を図 2-24 と同様に示す。水色の曲線が平均ユーザーの（中央値による）速度燃費曲線である。一方、赤い点で表されたものが、比較的燃費の良い 5 ユーザーの平均燃費と速度の分布である。これらの赤い点の分布から $C_I(u_I)$ を推定することで、優良ユーザーの 153 号線の区間での燃費曲線が求まるはずである。図 2-25(a)の結果では、注目したユーザーの曲線は、平均ユーザーよりも燃費の良いものとなると予想される。そこで仮に、速度と燃費の関数 g が 2 次関数で近似できるとする。すると、図 2-25(a)の分布を近似した曲線が図 2-25(b)である。図 2-25(a)の中央値（水色）と図 2-25(b)の近似した 2 次曲線（青色）は目で見る限り類似している。横軸を x 、縦軸を y とした場合、この曲線は、 $y = -0.0092x^2 + 0.6513x + 15.2327$ である。一方、優良ユーザーの走行を近似した曲線 $y = -0.0251x^2 + 1.4587x + 9.7115$ は、平均速度でおよそ 10~40km/h において全体の平均的な走行よりも良い燃費曲線となる。しかしながら、ここで 2 次の多項式として得られた近似速度燃費曲線は、あくま

で目安である。したがって、優良ユーザーの低速と高速域における燃費の低下に関しては、何も結論づけることはできない。これらの近似は、選択したユーザーが燃費の良い運転をしたことを視覚的に把握しやすくするためである。この近似関数系をどのように選択するかは、低燃費運転支援に向けて重要な選択であり今後の研究課題とする。

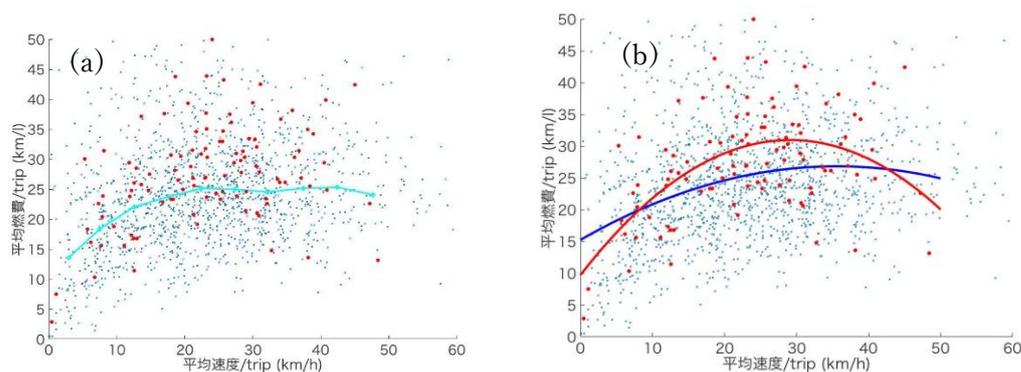


図 2-25 153 号線におけるトリップ毎の平均速度と平均燃費の分布とある 5 ユーザーの平均走行データ (赤点) (a) 2 次多項式による近似曲線 (b) (降雨なし, 10~20°C)

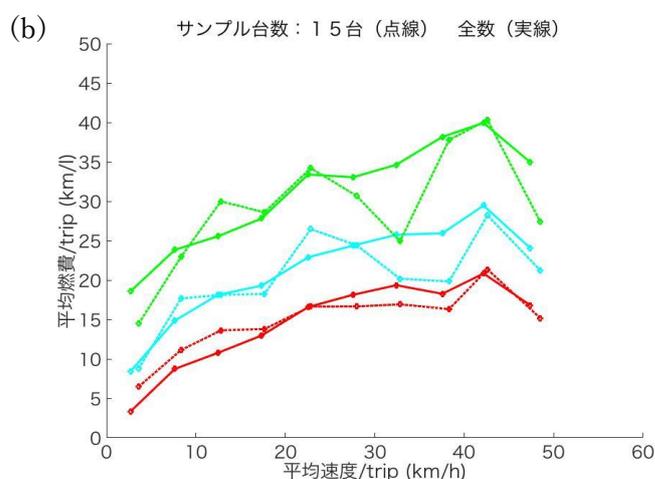
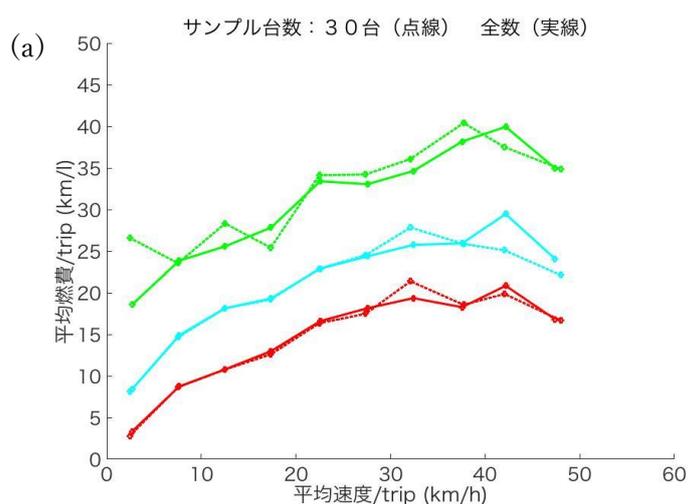
2.4.7 経路におけるサンプル数依存の速度燃費曲線

本節では、2.4.5, 2.4.6 節で検討した、ある経路区間におけるトリップ単位での平均燃費を平均速度の関数とみなした時のユーザーサンプル数に関する平均燃費曲線との乖離を考察する。これは、経路区間ごとにユーザー数が限定的である場合に、いかに平均的ユーザーの燃費曲線を推定することができるか、所謂、IoT 車両情報の“サンプリング定理”を検討するものである。豊田市実証実験データでは、61 台の車両情報を計測している。これまでの速度燃費曲線の解析では、主にこの全数 61 台を使って解析を進めた。

ここで、例えば図 2-24 における代表値を結んだ曲線が 61 台のうち最低何台のサンプリングでよく推定することができるかを検討することが、本節の課題である。そこで、図 2-26(a)(b)に 61 台のうち、それぞれ 30 台、15 台のランダムサンプリングによって、代表値の速度燃費曲線を計算した結果を示す。比較のため、それぞれの図に実線で全数の結果を、点線でサンプリングによる結果を示している。これらの図を見る限り、サンプリング数が少なくなると推定が悪くなるということが予想される。ただし、これらはランダムサンプリング 1 回の結果であるため、サンプル台数に対して、どの程度推定が悪くなるかを、10 回のランダム試行による燃費の推定値と実際の値の平均二乗誤差で検討した結果が、図 2-26(c)である。サンプル台数が増加するにしたがって、推定精度が

良くなっていることが分かる．この結果が定性的に示唆することは、サンプル台数が全数のおよそ半数に減るあたりから予測精度が急に悪くなるということである．

ここで、例えば推定誤差の閾値をある値で切って、その値以下であれば、十分に全数の結果を推定することができる決めれば、IoT 車両情報の“サンプリング定理”を提案することが可能になる．つまり、ある経路を通行するクルマに対して、どの程度の粗さでIoT 車両情報を計測すれば、妥当な速度燃費曲線を抽出することができるかを、定量的に示すことである．しかしながら、これには実際の交通量や経路特性など、より多くの要因を加味しなくてはならないことは言うまでもない．本章では、豊田市のある決められた領域における走行車両の全数を 61 台と仮定した場合の仮想的な状況における速度燃費曲線のサンプル数の依存性について基礎的な考察と課題提示をする．



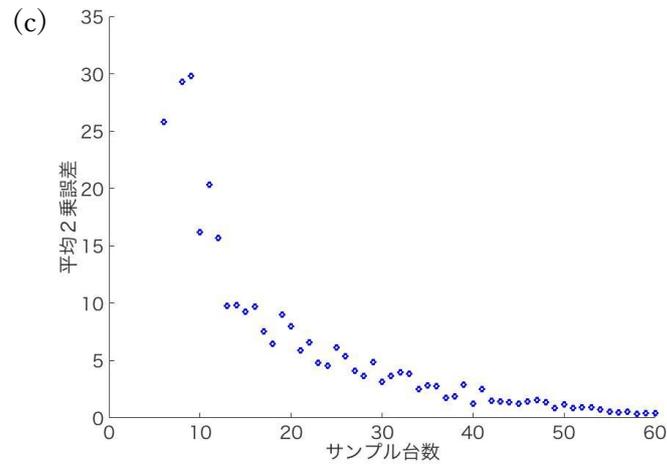


図 2-26 248 号線における全数のトリップ毎の速度燃費曲線と
ランダムサンプリングによる推定曲線との比較.

((a) 30 台, (b) 15 台) (c) サンプル台数による推定誤差. (降雨なし, 10~20°C)

2.5 おわりに

本章では, 地域特性や車両特性が保証された豊田市実証データを解析した.

第一に, 暖かく雨が降らない地域ほど実測燃費が良いことなど外部環境に実測燃費は変動することを数値で示した. また, 季節間や地域間での実測燃費の差があることを明確にした.

第二に, 高い外気温で降雨の場合には実測燃費のバラツキが多いことを明示することで, IoT 車両情報による低燃費運転支援の有用性を明らかにした. 自動運転導入と併せた低燃費運転支援では実用燃費の改善が期待できるが, 特に温暖多降雨地域ではその改善余地と優先度が大きいことを示した.

最後に, 低炭素都市の実現のためには, IoT 車両情報として得られる実測燃費で分析する意義が大きいことも示した. 優れた運転のデータ開示にはインセンティブが与えられる地域では安全・安心な運転と低燃費運転が進展するのではないだろうか. CO₂排出量の削減に運輸・自動車の貢献は小さくはない. 新たな技術革新と社会制度の導入による環境保全への社会基盤づくりが必要である.

参考文献

- [2-1] 吳明暢, 兵藤哲朗 (2015) : 「自動車燃料消費量調査を用いたガソリン車および軽油車の燃費決定要因に関する分析」. 『土木学会論文集 D3』, 71 (2) , 44 -56.
- [2-2] 国土交通省自動車局監修 (2015) : 『市町村別自動車保有車両数』. 自動車検査登録情報協会.
- [2-3] 新エネルギー導入促進協議会 (2015) 『愛知県豊田市における「家庭・コミュニティ型」低炭素都市実証プロジェクトのマネジメント』, 次世代エネルギー・社会システム実証事業成果報告.
- [2-4] 鈴木邦夫, 森本励, 高山純一, 片岸将広, 松矢裕一郎 (2013) : 「利用者評価からみた自転車通行空間の幅員と自動車走行速度の関係に関する考察」. 『土木学会論文集 D3』, 69 (5) , I_197 - I_204.
- [2-5] 高原勇, 大澤義明 (2016) : 「自動車に残るエネルギー量の推定と被災地域への応用」. 『日本計画行政学会』, 39 (4) , 53 - 60.
- [2-6] 浪崎隆裕, 三輪富生, 森川高行, 山本俊行 (2013) : 「エコドライブ実施意識の差異を考慮したエコドライブ促進システムの効果分析」. 『土木学会論文集 D3』, 69 (5) , I_461- I_469.
- [2-7] 保坂明夫・青木啓二・津川定之 (2015) : 『自動運転—システム構成と要素技術—』. 森北出版.
- [2-8] 松本修一, 戸澤毅, 平岡敏洋, 山邊茂之, 川嶋弘尚 (2011) : 「エコドライブ走行が追従車両に与える影響に関する基礎的研究」. 『土木学会論文集 D3』, 67 (5) , I_1023 - I_1028.
- [2-9] 松本修一, 川嶋弘尚 (2013) : 「前方車両情報が車群の燃費低減に与える影響に関する基礎的研究」. 『土木学会論文集 D3』, 69 (5) , I_433 - I_440.

第3章

災害時レジリエンスとしての自動車の エネルギー機能の利活用

-IoT 車両情報による自動車に残るエネルギー量推定と
避難退避の高度化-

3.1 はじめに

3.1.1 社会背景

地震、津波、台風、洪水、火山噴火、斜面崩壊、大雪など我が国は世界有数の自然災害大国である。とりわけ南海トラフ巨大地震や首都直下地震をはじめとする大地震への備えは我が国の防災・減災政策の大きな柱である（藤井，2013）。食料や飲料水の備蓄には多くの自治体も取り組んできたが，2011年発災の東日本大震災から得た大きな教訓として，非常時における電気・ガス・石油などエネルギー確保が指摘されている（経済産業省，2012）。

被災地ではガソリン確保も大きな課題となった（岩坂ら，2012），（奥村ら，2013），（赤松ら，2013）。大規模災害では鉄道などの公共交通は利用できないことが予想され，自動車が被災直後の有用な移動手段となる。特に，高齢者，幼児，入院患者など災害弱者さらには負傷者の搬送には自動車を利用するしかない。しかし，被災後しばらくの期間，ガソリンスタンドは休業せざるを得なくなり，警察や消防等の緊急車両へ優先的に燃料が供給されるため個人への給油や給電は困難になる。

また，停電を前提に電源確保できる体制の構築が求められている（藤井，2013）。携帯電話，スマートフォン，インターネットといった情報技術への依存度は，東日本大震災時よりさらに高まっているが，これら通信機能の停止による情報伝達不全は災害支援活動の停滞をより深刻化させる。そして停電による信号機の消灯は避難渋滞に拍車をかける。想定されている南海トラフ巨大地震被災地域は太平洋を中心に広域であり，広範囲での救援・支援は長期化する恐れがある（高島，2014）。

3.1.2 目的

被災時において，自動車は本来の移動体としての機能に加えて倒壊の危険から回避でき，エアコンもあり寒さや暑さをしのげることから，大地震直後の余震時の避難場所として役立つ。また，ラジオやテレビを通して情報収集の手段としても自動車は被災時に威力を発揮する（佐々木ら，2014）。さらに，これからの自動車は社会的共通資本として新たな役割を求められている。特に，プラグインハイブリッド自動車（PHV）はモーター駆動とエンジン駆動を利用することで，電力をプラグインで自動車に充電して貯める（充電），運ぶ（移動），使う（給電），作る（ブレーキ回生で発電）機能を持っており，被災時での電源供給機能が期待されている。しかし，これまでの既存研究を概観すると，日常稼働している自動車が被災時にどの程度走行できるのか，どの程度エネルギーを蓄えているのかを含め，自動車保有のエネルギー残量を主題とした研究は見つからない。そこで本章では，豊

田市実証実験においてサンプリングされたエネルギー残量データを用いる。

本章の目的は、自動車搭載センサーで計測されたIoT車両情報を利用して、被災地域において自動車に残るエネルギー量を推定し、今後拡大が見込まれるIoT車両情報の有用性を示すことにある。住民から受け入れられる実効性のある避難計画には、非常時でしか使わない特別なものではなく、日常生活で慣れ親しんでいるインフラの活用が必要である。その点からも、本章では自動車に着眼する。

最初に、航続可能距離データ（残されたガソリンや電気で走行できる距離）から、被災時に各車両安全性や燃費、さらには道路交通、インフラ監視、防災防犯などの広範な社会応用と新たな社会サービス創出の可能性を秘めたIoT車両情報の有用性を明らかにしたいと考えたことである。

が活動できる日数や行動圏を特定する。南海トラフ地震などを想定し中京圏において、給油所が被災し燃料補給が途絶えるなどして給油できない前提で、待機、待避、避難行動の可能性を定量的に検討する。第二に、被災地への補給ルートが遮断された孤立地域では、独力でエネルギーを確保する必要がある。地域ごとに自動車に残されたエネルギー量を電力量で表現する。その際に、地域の自動車保有率や人口データからその多寡を比較分析する。

3.1.3 対象とする使用データ

本章では、2013/11/21～2014/11/23、合計368日でPHV延べ60台計測されたデータを用いる：表3-1に示すような各車ごとに1日の最初の起動時データのみ使用した。自動車を利用しない日を除外しておりサンプル数は17,872件となった。

本章ではサンプリングした航続可能距離を特性データとしてガソリン量や電力量へ置換する。換算値に同地域での実測燃費の平均代用値として1リットルあたり20kmと固定して算出する。エネルギー残量の増減は図3-1のようになる。横軸が時間、縦軸がガソリン残量を表しており、4本の時系列パターン分布をである。給油すると関数は上昇し、走行などにより燃料を消費すると下降する。

表 3-1 車両別，月別エネルギー残量データ

個車	2013/11/21	2013/11/22	...	2014/11/23
1	—	—	...	—
2	—	—	...	—
⋮	⋮	⋮	...	⋮
⋮	⋮	⋮	...	⋮
60	—	—	...	—

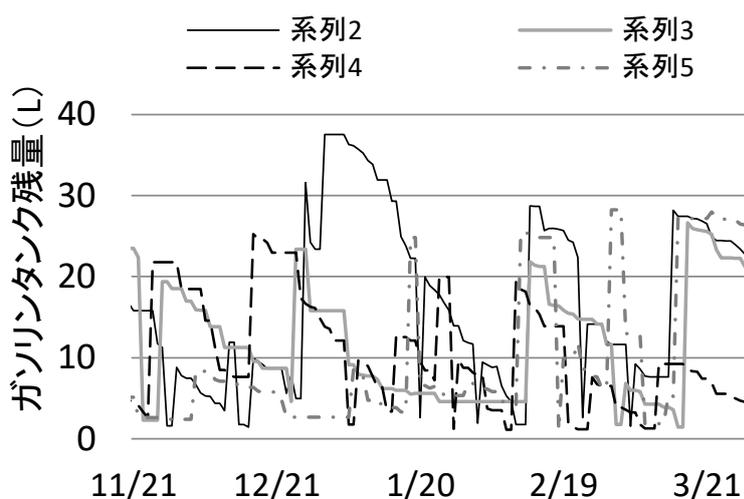


図 3-1 4 台のエネルギー残量の時系列変化

3.2 被災地域の退避避難に係る自動車の走行可能距離

3.2.1 待機と待避・避難との関係

被災直後には，被災地にとどまり復旧支援活動に専念しつつ，あるタイミングで避難所へ移動し，さらには被災地から脱出することも必要となる．被災時には公共交通の稼働率が低下し最悪の場合には遮断されてしまう．そのため，乳幼児，子供，妊婦，高齢者，障害者など自力で避難できない災害弱者は自動車による支援行動が必要である．南海トラフ地震の被災が想定されている沿岸地域の多くでは，少子高齢化が顕著に進んでおり自動車利用は不可欠である．

自動車避難の既存研究では避難ルートの確保，交通渋滞の影響に関するものが多く，自動車に残る燃料利用に着目した研究はない．そこで待機しエネルギーを消費しながら，あるタイミングで遠隔地などへ待避・避難を行う状況を考える．自動車の残エネルギーにより避難直後からどの程度「待機」できるのか，一定期間後にどこまで「待避・避難」できるのかを検討する．

3.2.2 稼働不可率と到達不可率

ここでは次の仮定を設定し分析を進める：

- (a-1) 被災後の走行距離は平時と同一である.
- (a-2) 燃費は平時と同一である.

当然、地震など自然災害では交通網の寸断による迂回、交通集中による渋滞に加え、会社や商店の休業、鉄道や道路等の輸送・流通網の支障なども相まって、平時と交通行動は異なる。従って、仮定 (a-2) は大胆であるかも知れない。しかし、以下の二つの理由からこの仮定を設定する。

第一に、混乱を極めている被災直後での燃料消費量データは存在しない。第二に、シンプルな仮定ほどイメージしやすく、結果の解釈や政策の展開へ有用な情報となる。言い換えれば、パラメータを増やすと共通理解が得られにくくなる。

震災など自然災害は不測の事態であり予測できない。恣意性を排除し季節変動を考慮するために、2014年5月から11月までの各月1日のデータを用いる。つまり表3-1のデータ行列の列方向の分布、7サンプルを用いる。

調査日2014/10/01の60台について横軸に走行可能日数 n 、縦軸に航続可能距離 r をプロットすると図3-2が得られる。燃料残量ゼロは原点に対応する。走行可能日数は、各車両ごとに走行距離が異なることに留意して航続可能距離を一日あたり平均走行距離（走行距離を日数368日で除算）で割ることで求まる。つまり、各車両のエネルギー残量を何日で消費し尽くすのかを計算する。このように、横軸は待機できる日数、縦軸は待避・避難できる距離を表している。各車両に対応する直線の傾き r/n は自動車稼働率に対応する。

ここまで、燃料残量ゼロまで行動できるとしてきた（燃料残量ゼロレベルと呼ぶ）。しかし、ガソリンが満タンに近い状況と燃料警告灯が点灯した状況とでは心理的に雲泥の差がある。給油タイミングを過ぎてしまうと、待避・避難行動ならびにその判断に影響を及ぼすと考えられる。そこで、平時に給油するタイミングでの残量を原点とし、同様の分析を進める（給油時残量レベルと呼ぶ）。同実証実験データでは給油日を特定できる。表3-1のデータ表の各行の分布にて、エネルギーが上昇に転じる年月日とその日となる。そこで、当日の残された残量から、給油日の残量平均値に到達する航続可能距離 r と日数 n を計算すると、図3-3のようになる。図3-2の各自動車のプロットがそれぞれの給油実績に応じて原点方向へシフトするわけであり、図3-3では第一象限外にプロットが発生することもある。

これまで待機と待避・避難を独立に扱い、残エネルギーをすべて待機あるいは待避・避

難へ当てた分析であった。しかし被災直後では避難ルート確保など待機期間が設けられ、その後待避・避難行動へ移るのが一般的である。待機日数が多くなるにつれてエネルギー残量が減り、航続可能距離が短くなる。この場合、**図3-4**のようにプロットごとに、プロットから原点を結ぶ直線上を1日ずつ原点へ向かい同じ長さで移動する。

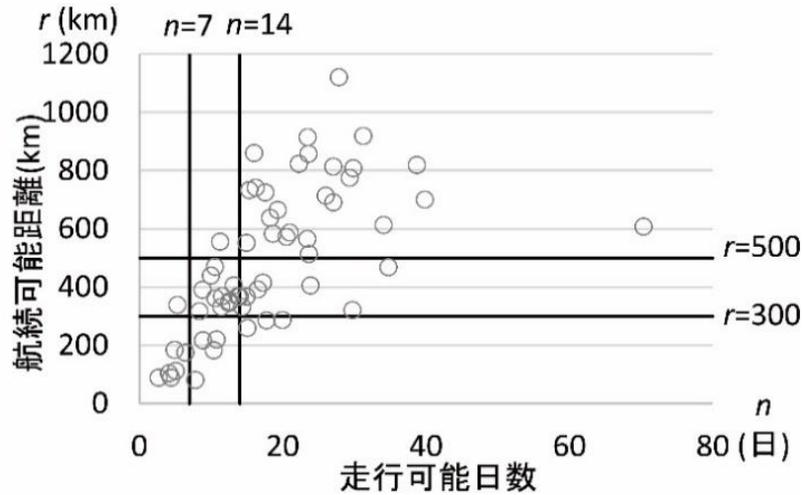


図 3-2 走行可能日数・距離（燃料残量ゼロレベル）

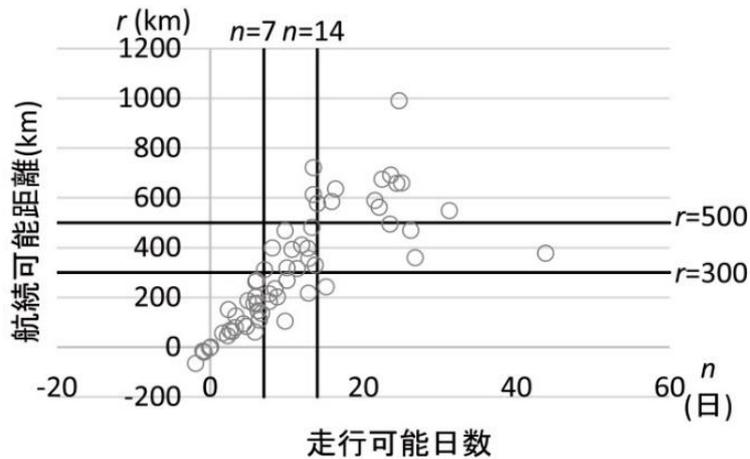


図 3-3 走行可能日数・距離（給油時残量レベル）

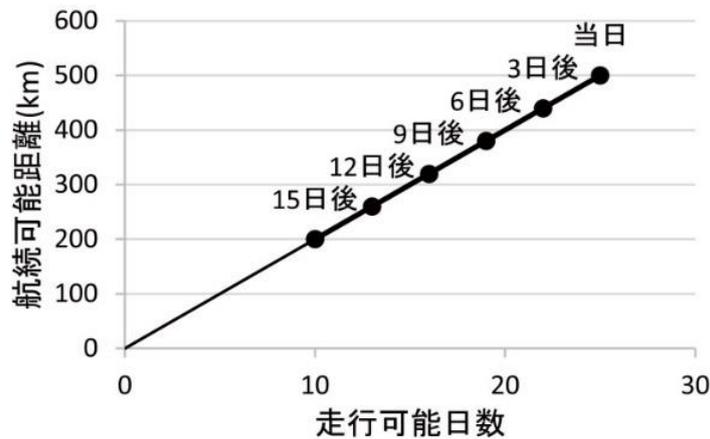


図 3-4 待機日数を踏まえての走行可能日数・距離

3.2.3 結果の解釈

第一に、図3-2及び図3-3において、7日及び14日に対応する値を縦軸と平行に引く。図3-2ではこれらの平行線の左側に位置する自動車は、待避・避難せずに待機し平時の活動を行うと7日以内（14日以内）で燃料残量がゼロとなる。図3-2から7日後で12%の7台、14日後で38%の23台が燃料残量ゼロとなる。図3-3から、7日後で40%の24台、14日後で75%の45台が給油タイミングを過ぎてしまうことが読み取れる。東日本大震災では首都圏においてガソリンパニックが1～2週間続いたので、ここでの数値はそれと整合する。愛知県では約500万台の自動車が登録されており燃料残量ゼロ比率12%及び38%をこの台数に単純にかけると60万台、190万台となる。第一次近似値ではあるが、7日後、14日後に膨大な数の自動車が自走できなくなる。

第二に南海トラフ地震では北陸甲信地域での被害は少ないと想定されている。そこで、豊田市からそれら地域への広域避難を考える。福井市、甲府市、金沢市、富山市、長野市までの道路距離はそれぞれ200km, 250km, 260km, 270kmである。図3-2及び図3-3において、300km, 500kmに対応する値を横軸と平行に引く。これらの平行線の下側に位置する自動車は300km, 500km圏外に脱出できないことを意味する。図3-2から被災直後に距離300kmの場所へ待避・避難できない割合は22%（13台）となる。また、給油時残量レベルに到達できない割合は53%（32台）になることが理解できる。このような広域避難では、日本を横断するため勾配などの地形条件、避難渋滞、交通事故や積雪の可能性による燃費の悪化を考えると、これらは楽観的数値であり被災直後でも広域避難が厳しいことが読み取れる。

第三に、2014/10/01の他の6サンプルについて同様な分析を行った。得られた結果を表3-2及び表3-3に比率で示す。2014/10/01及び2014/11/01のサンプル数は60、それ以外は59である。2014/10/01とほぼ同様な結果が得られており、500km超の広域避難はかなり厳しい

ことが再確認できる。

最後に、2014/10/01のデータに対し、待機日数を変化させて到達不可率を計算した。300km圏外と500km圏外へ脱出できない到着不可率を、燃料残量ゼロレベルと給油時残量レベルで分け4本の関数をグラフ化すると、図3-5のようになる。図3-5から、待機が続くにつれて、待避・避難できない自動車が増えていく様子が読み取れる。最も上側に位置する500km圏外と給油時残量レベルとの組み合わせでは1週間後に全てが到達不可となる。最も下側にある300km圏外と給油残量ゼロレベルとの組み合わせでは2週間経過した時点でも20%以上は稼働するが、中間に位置する残り二つの組み合わせでは2週間後ほぼすべてが到着不可となる。

表 3-2 稼働不可率

待機日数	燃料残量ゼロレベル		給油時残量レベル	
	7日	14日	7日	14日
2014/05/01	0.14	0.34	0.42	0.58
2014/06/01	0.14	0.42	0.41	0.68
2014/07/01	0.10	0.36	0.29	0.59
2014/08/01	0.20	0.32	0.36	0.56
2014/09/01	0.19	0.41	0.34	0.71
2014/10/01	0.12	0.38	0.40	0.75
2014/11/01	0.13	0.47	0.47	0.67
平均	0.14	0.39	0.38	0.65

表 3-3 到達不可率

待機日数	燃料残量ゼロレベル		給油時残量レベル	
	300km	500km	300km	500km
2014/05/01	0.20	0.56	0.54	0.88
2014/06/01	0.24	0.64	0.53	0.81
2014/07/01	0.15	0.47	0.46	0.69
2014/08/01	0.29	0.42	0.46	0.68
2014/09/01	0.25	0.64	0.66	0.76
2014/10/01	0.22	0.55	0.53	0.78
2014/11/01	0.25	0.65	0.63	0.83
平均	0.23	0.56	0.54	0.78

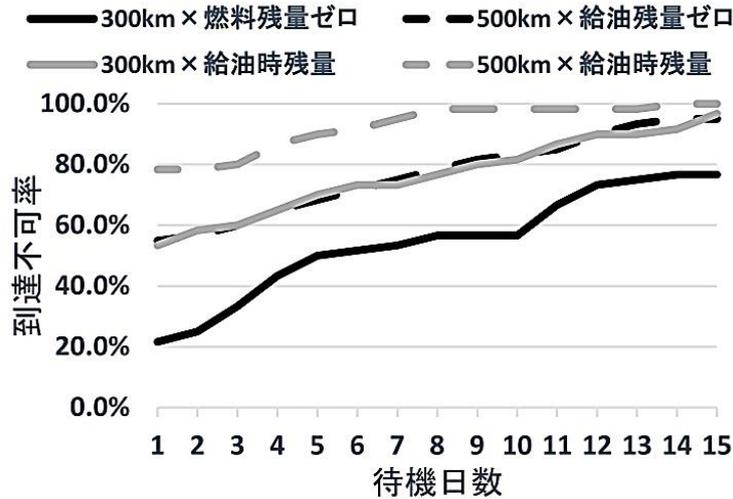


図 3-5 待機日数と到達不可率

3.3 IoT 車両情報による自動車保有するエネルギー保有量推定

3.3.1 孤立地域でのエネルギー自給

陸路ルートが遮断され、港湾が使用不可となることで外部からのアクセスできず、地域が孤立する可能性がある(上田ら, 2006)。とりわけ、南海トラフ地震や首都直下地震では、孤立地域が広範囲で多数発生することが予想され、ヘリコプターなどによる支援が困難となり、気候条件も相まって孤立が長期化する地域も発生する。沿岸部や半島では高齢者が多く、孤立への心理的負担も大きい(湯崎ら, 2013)。

近年給油所の閉鎖が相次いでおり、孤立地域でのエネルギー供給源は限られている(盆子原ら, 2014)。震災復旧を進め心理的負担を軽減するためにも、非常時に自動車が提供できるエネルギーへの期待は高い(経済産業省, 2012), (日刊工業新聞社, 2014)。しかし、被災時に燃料タンクが満タンである保証は無い。そこで自動車に残されているエネルギー残量が地域ごとにどの程度存在するのかを求める。

3.3.2 日別エネルギー残量と中心極限定理

図3-1では航続可能距離をガソリン量に変換した3.3節では単位標記がメガジュール(MJ)の熱量へガソリン燃焼熱量から34.76MJ/lとして置換する。結果を表3-4に示す。ガソリンの保有量では約24.7l/台であったが、熱量換算すると一台当たり858.9MJとなる。表3-4に示すように、エネルギー残量の平均に関しては平日と休日との差はほとんど無いが、休日での標準偏差は小さくなっている。

図3-6は熱量で表現された368個からなるエネルギー残量の日別平均値のヒストグラムである。表3-1の列和の平均値を一つのデータとして級数毎に積み上げた。全体の総数を基準化し、離散型確率密度関数で表現する。モーメント法(東京大学教養学部統計教室, 1991)によりパラメータ推定でした正規分布を実線で示す。このヒストグラムから、第一に、エネルギー残量実測値の平均値の分布が正規分布に近いこと、第二に、この平均値のバラツキが小さいことが読み取れる。

実測分布が正規分布に従っているかをカイ二乗適合度検定(伏見ら, 2012)で検証する。連続型である正規分布を61級数へ離散化しカイ二乗統計量の値 χ^2 を求めると、 $\chi^2 = 8.6$ となる。危険率5%のカイ平方二乗値は自由度50で67.5であり、 $8.6 < 67.5$ から仮説検定により観測分布は正規分布に従うと見なせる。

自動車が保有するエネルギー量を確率事象であるとして、地域において自動車に残るエネルギー残量が正規分布に従いバラツキの小さい安定した数値となることを示す。 n 台の自動車がある地域を考える。ある時点において X_i を自動車 i のエネルギー残量を表す確率変数、 $f_i(\alpha_i)$ をその確率分布とする。 $f_i(\alpha_i)$ が同一分布で X_i が独立だとすると、それら共通の確率分布 $f(\alpha)$ の平均 μ 、分散 σ^2 を用いることで、中心極限定理(東京大学教養学部統計学教室, 1991)からは $\bar{X} \equiv (\sum_{i=1}^n X_i)/n$ 、平均 μ 、分散 σ^2/n の正規分布に従う。まず給油機会は他の利用者とは独立と見なせるのでガソリン残量も独立に近いと言える。次に、どの自動車も日々の活動で毎日ほぼ等量のエネルギーを消費する。一方で車の燃料タンク容量は限られており、残量が少なくなると心理的要素も働き給油行動をとるためタンクが空の状況は長く続かない。従って、どの車のエネルギー残量も、ある一定区間で一樣分布に近いと言えよう。実際、各車両のエネルギー残量の分布、つまり表3-1の行の分布の一例(一台のPHV, データ数368)を確率分布表示すると図3-7のようになり一樣分布に似ている。また、非常時における給油行動のモデル化では、ガソリン残量に関してタンク容量を踏まえ一樣分布を仮定している(讃岐ら, 2012)。

もし中心極限定理が成り立つのであれば、地域が保有するエネルギー残量が正規分布に従うので平均値による点推定に加え、パラメトリック手法として区間幅が σ/\sqrt{n} に比例し精度が保証される区間推定が可能となる。区間幅は \sqrt{n} に反比例するので地域での自動車数が多い場合にはスケールメリットが働き精度の高い推定値を提供できる。

中心極限定理が成り立つとして、各車両の残量に従う一樣分布の形状を求める。調査の都合によりサンプル数は変動しその平均は48.7であった。表3-4から標準偏差73.9より、一樣分布の標準偏差は $73.9\sqrt{48.7} \approx 515.7$ となる。この値と表3-4で示された平均858.9からモ

ーメント法にてパラメータを推定すると、図3-7の長方形で示すような区間[-34,1752]の
 一様分布となる。ガソリンをリットル換算すると区間[-1.0,50.5]となる。

実測分布が一様分布に従っているかをカイ二乗適合度検定で確かめる。連続型一様分布
 を51級数へ離散化するとカイ二乗統計量の値 χ^2 は $\chi^2=16.8$ となる。自由度45の危険率5%の
 カイ平方二乗値は61.7であり、 $16.8 < 61.7$ により観測分布は一様分布に従うと言えよう。供
 試されたPHVのガソリンタンク容量は45リットルであるから空と満タンの間で一様分布し
 ていることが確認できた。

表 3-4 残熱量の平日・休日比較（単位は MJ）

	標本数	平均	標準偏差
全日	368	858.9	73.9
祝休日	123	859.4	68.8
平日	245	858.7	76.3

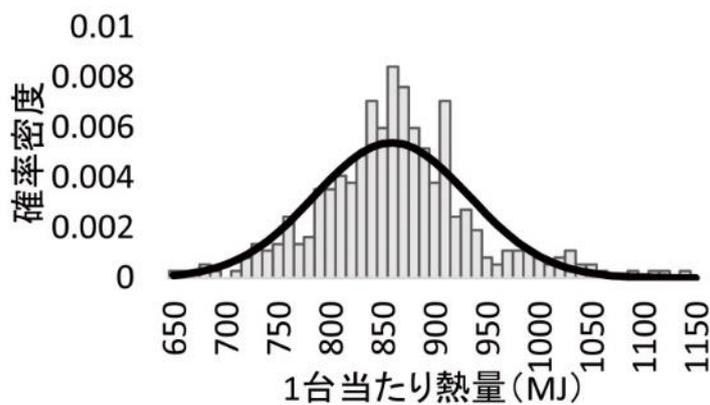


図 3-6 エネルギー残量日別平均値の分布

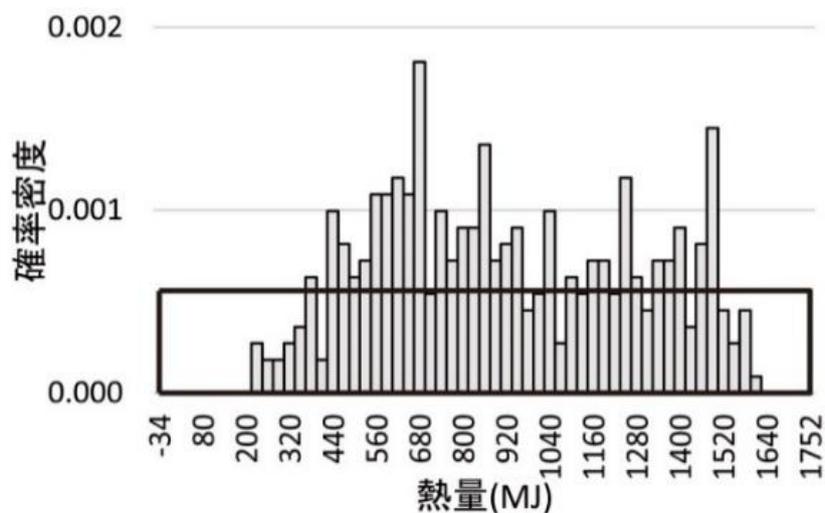


図 3-7 車両のエネルギー残量分布

3.3.3 結果の解釈

ジュールより、kWh（キロワット時）で電力量換算してエネルギー量を表わす方が理解しやすい。多くの方々との情報共有のため次の仮定を設定する：

- (b-1) 地域にある自動車は平成27年度の登録自動車（国土交通省自動車局，2015）とし、軽自動車を対象外とする。
- (b-2) 各車両に残るエネルギー残量を豊田市実証データの平均値とする。
- (b-3) 被災時に登録台数と同数の自動車，平成 22 年国勢調査人口データと同数の住民が存在する。

これらの仮定の下，地域における登録台数と豊田市実証実験での一台あたり平均残量との積で，自動車が地域へ提供できるエネルギー量を推定する。

第一に，日本全体の自動車に残っているエネルギー量は，国民一人あたりで換算すると 84.6kWh となる。一世帯あたりだと残量は 208.6kWh となる。2010 年前後の一世帯あたりの月単位電力消費量は 300kWh であるので，約 20 日分のエネルギーとなる。

第二に，地域性の差異を踏まえ，都道府県別で推計する。都道府県別数値を図化すると図 3-8 のようになる。自動車登録台数に比例するため，南海トラフ地震による被害が想定される愛知県が突出しそのエネルギー総量は 787.4GWh にも達する。首都直下地震が想定されている東京都が続き 752.9GWh となる。東日本大震災被災地でもある茨城県の量は 347.7GWh となる。住民一人あたりとした数値を図 3-9 に示す。横軸が夜間人口比，縦軸が昼間人口比を表しており，それぞれ一人あたりの登録台数に比例する量である。昼間人口

が夜間人口より多い都道府県では45度線より下側に位置する。昼夜間人口問わず、北関東3県が常に上位3県、東京及び大阪がそれぞれ最下位から二番目となる。夜間人口ベースでは最も高い群馬県、最も低い東京都での一人あたりエネルギー総量は、それぞれ、119kWh、57kWhとなり、2.1倍の差がある。一方で、昼間人口ベースだと最も高い茨城県、最も低い東京都における一人あたりエネルギー総量は、それぞれ120kWh、48kWhとなり、2.5倍に差が開く。発災が昼の時間帯だと、自動車エネルギー利用に関して地域差が生じることが理解できる。

第三に集計単位を市町村へ狭くすることで、自動車保有率や昼夜間人口差がより敏感に反映される。そこで、三つの理由から、和歌山県及び高知県に関して市町村別に推定する。まず、平成24年8月発表の内閣府「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」被害想定において、都道府県別比較にて人口あたり死亡者数の最大が和歌山県、人口あたり要救助者数の最大が高知県であること。そして、沿岸部と山間部を両方有し地理的に孤立化する可能性が高いこと。最後に、各種計画を立案し実施する主体は自治体だが、小規模が多いことである。

人口データから算出した住民一人あたりの数値（単位 kWh）を図3-10及び図3-11に示す。これらの図を図3-9と比較すると、和歌山県では、2町村を除くと60kWh～90kWhという狭い範囲で一つの塊の散布図となっており昼間と夜間とで大きく異なる市町村が多い。一方で、高知県では、縦長に伸びる分布であり市町村間で熱量の差が開くが、昼夜間での差は小さい。さらに、深刻な津波被害が想定される和歌山県串本町や高知県黒潮町では東京都並みに低い水準となることが読み取れる。

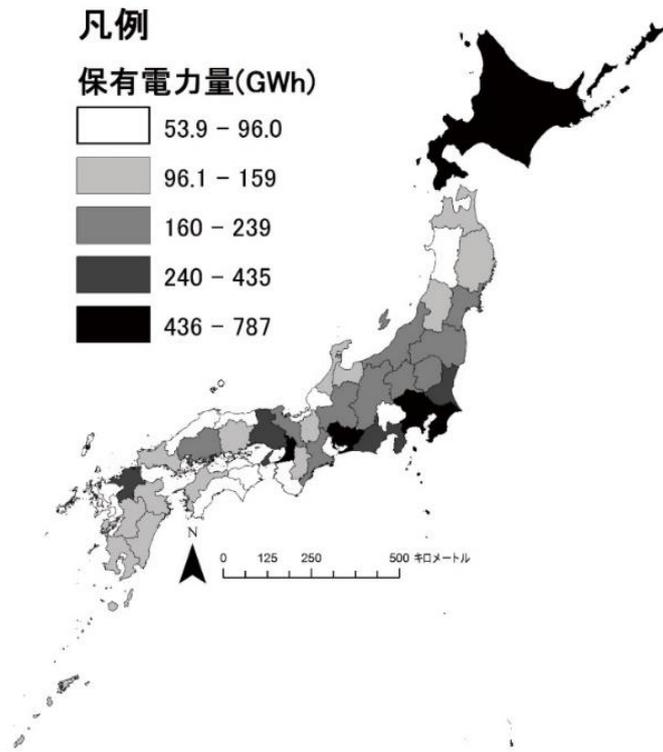


図 3-8 都道府県別エネルギー残量

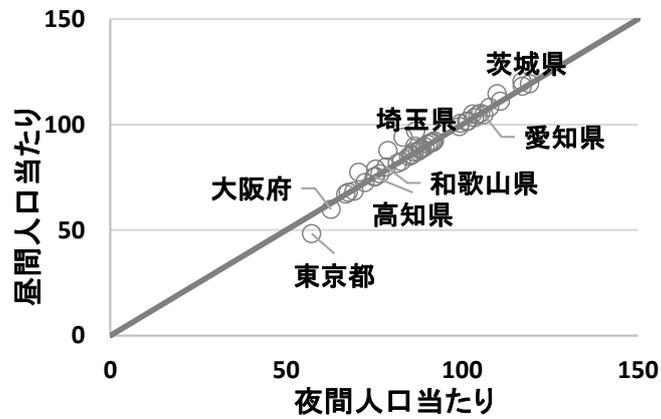


図 3-9 都道府県別一人あたりエネルギー残量

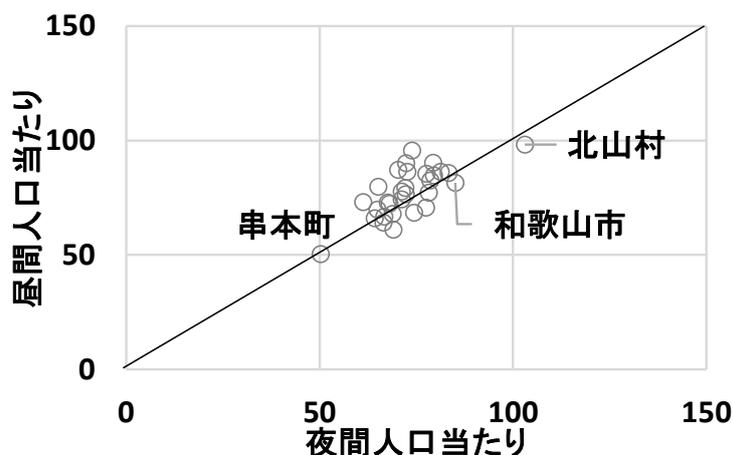


図 3-10 和歌山県市町村別一人あたりエネルギー残量

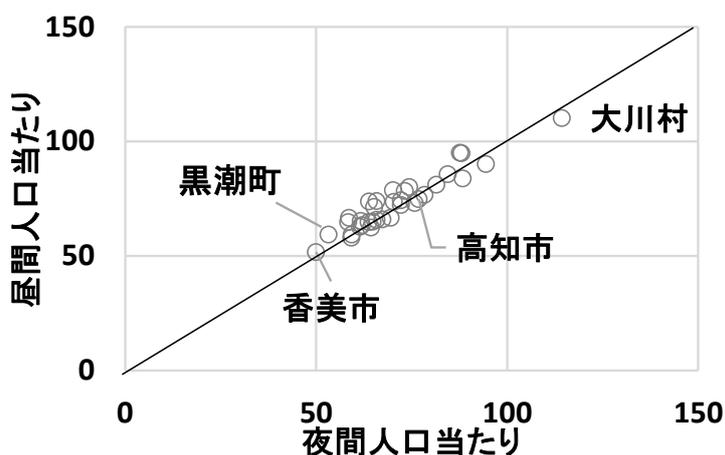


図 3-11 高知県市町村別一人あたりエネルギー残量

3.4 おわりに

大規模災害に備え、東日本大震災の経験を科学的に整理し、防災政策へ反映させることが重要である（八木ら，2015）。被災時におけるプラグインハイブリッド自動車，電気自動車さらには燃料電池自動車に対する電源供給機能やIoT車両情報の利活用への期待は高い。しかし，現在は被災時に自動車に残されたエネルギーがどの程度活用できるのかは明確になっていない。そこで，本章では豊田市実証実験の航続可能距離データを用いて，被災時での移動距離，保有エネルギー量を熱量換算して考察した。

第一に，自動車が被災時において移動できる地理的範囲さらには燃料残量ゼロまでの日数を求めた。特に，待機と待避・避難との関係を可視化した上で，被災想定地域外への到

達不可能率を算出した。

第二に、地域が保有する自動車の合算値が正規分布に従う安定した数値であることを確認した。その上で、国、都道府県、さらには市町村単位で利用可能な熱量を住民一人あたりの電力量で提示した。具体的には、日本全体で、自動車に残っているエネルギー量は、一世帯あたりの電力消費量換算で20日分に相当することなどを示した。

自動車そのものが被災する可能性もある。すべての自動車が電気自動車さらには燃料電池車に替わる頃には人口や燃費も大幅に変わっているであろう。しかし、防災・減災、危機管理では、研究者のみならず市民、行政、産業界との情報共有が重要である。そのためわかりやすい仮定を設定しパラメータを少なくするなど単純化した議論が必要である。大規模災害の正確な想定は困難であり、本章で得た数値は第一次近似値と見なせる。

本章では、実証実験でサンプリングされた、燃料タンク内残量、蓄電池残量などのIoT車両情報に着眼して分析した。燃料タンクと蓄電池内の各車両の残存燃料を今後瞬時に把握できるとなれば、平時は地域で必要とする燃料需要の正確な予測につながり、不測の事態では被害規模や活用可能な移動分散型エネルギー量を時空間分布として把握でき、結果俯瞰的な視点で救援・救助・避難誘導などの判断に貢献できる。また、給油過疎自治体であれば、時間とともに変動する地域燃料需要の情報は事業者にとっても有用である。本格化する自動車のIoT車両情報の社会応用の有用性を示したとも言える。

参考文献

- [3-1] 赤松隆, 大澤実, 長江剛志, 山口裕通 (2013) 「3.11震災時の東北地域で生じたガソリン需給ギャップの時空間分析」, 『土木学会論文集D3 (土木計画学)』, 69 (2), 187-205.
- [3-2] 一般社団法人新エネルギー導入促進協議会 (2015) 『愛知県豊田市における「家庭・コミュニティ型」低炭素都市実証プロジェクトのマネジメント』, 次世代エネルギー・社会システム実証事業成果報告.
- [3-3] 岩坂友也, 大窪和明, 奥村誠 (2012) 「待ち時間を考慮した施設選択モデルと震災時給油問題への適用」, 『都市計画論文集』 47 (3), 997-1002.
- [3-4] 上田遼, 瀬尾和大, 元木健太郎 (2006) 「道路閉塞・火災延焼被害を考慮した地震時における災害時要援 護者救助シミュレーション」, 『地域安全学会論文集』 8, 341-348.

- [3-5] 奥村誠, 藤原潤子, 植田今日子, 神谷大介 (2013) 『途絶する交通, 孤立する地域』, 東北大学出版社.
- [3-6] 経済産業省 (2012) 『2012年版エネルギー白書』.
- [3-7] 国土交通省自動車局 (2015) 『市区町村別自動車保有車両数』, 自動車検査登録情報協会.
- [3-8] 讃岐亮, 鈴木達也, 吉川徹 (2012) 「非常時のアクセスビリティとキャパシティに着目した施設利用可能性分析—青森市のガソリンスタンドを対象として—」, 『都市計画論文集』 47 (3), 859–864.
- [3-9] 佐々木麻衣, 氏原岳人, 阿部宏史, 鈴木理恵 (2014) 「南海トラフ巨大地震を想定した津波避難における自動車利用意向とその動機及び抑制可能性」, 『都市計画論文集』 49 (3), 861–866.
- [3-10] 高島秀雄 (2014) 『南海トラフ巨大地震の防災対策』, 鹿嶋出版会.
- [3-11] 東京大学教養学部統計学教室 (1991) 『統計学入門』, 東京大学出版会.
- [3-12] 日刊工業新聞社 (2014) 『街を駆けるEV・PHV』, 日刊工業新聞社.
- [3-13] 伏見正則, 逆瀬川浩孝 (2012) 『Rで学ぶ統計解析』, 朝倉書店.
- [3-14] 藤井聡 (2013) 『巨大地震Xデー』, 光文社.
- [3-15] 盆子原歩, 小林隆史, 大澤義明 (2014) 「給油所過疎地域に関する数理的考察」, 『都市計画論文集』 49,603–608.
- [3-16] 八木勇治, 大澤義明ほか (2015) 『巨大地震による複合災害』, 筑波大学出版会.
- [3-17] 湯崎真梨子, 揚妻直樹, 塚田晃司, 中島敦司 (2013) 「被災時孤立可能性集落の不安と安心の要因」, 『日本地域政策研究』 11, 53–62.

第 4 章

燃料電池自動車の普及に向けたステーション配置

-移動式ステーションによる需給整合と IoT 車両情報の連携-

4.1 はじめに

4.1.1 社会背景

我が国ではサービスステーション（以下SSと記す）の設置数が地方部を中心にピーク時から45%減少した。朝日新聞(2016/03/12)によると、高速道路では100km以上にわたるSS空白区間が全国で83箇所にとのぼり、150km以上では16箇所にも及んでいる。その結果、燃料切れトラブルや給油機会のために行動制約を受けるなど本来の自動車の利便性を損なう事態が発生している。さらに、タイヤの交換・修理やバッテリー点検などSSでの油外サービスが受けられないことは走行安全確保の観点からも問題である。

地方山間部では農業機械用のガソリン、寒冷地では暖房用灯油へのニーズがあり、日々の暮らしにSSへの依存度は高い。SS減少は我が国の重点政策の一つである地方創生という観点からも解決すべき喫緊の課題となっている。このようなSSの急速な閉鎖・廃業の原因として、自動車保有の減少や免許取得の減少など若い世代のクルマ離れ、ハイブリッド車などエコカーの普及による燃費向上、ガソリンの価格競争による収益性の低下、2010年6月の消防法改定によるSS地下タンク規制強化など、取り巻く外部環境が事業者の負担増となっている。さらに、人口減や将来の見通しの不安などによる後継者不足などが追い打ちをかけている（浅田，2013）。このため、資源エネルギー庁ではSS数が3カ所以下の自治体を給油過疎自治体として指定し国民との情報共有を図ると同時に、給油所のタンク改修等に関して補助金などの支援策を打ち出してきた（株式会社価値総合研究所，2011）。しかし、2012年度257ヶ所、2013年度266ヶ所、2014年度283ヶ所と給油過疎自治体は年々増加している。中でもSSが全く無い自治体数は、それぞれの年度で7、8、10と増えておりSSの減少傾向に歯止めがかかっていない。給油に関する注意喚起の表示、高速道路から一般道のSSへの迂回に関して追加料金非徴収などの政策も行われているが、抜本的対策とはなっていない。

一方で、限られた資源や地球温暖化など取り巻く地球規模での課題に対して、水素で発電してモーターを駆動するゼロエミッションの燃料電池自動車が開発され、次世代のエコカーとして期待されている。今後、ガソリン自動車から燃料電池自動車への移行を推進させるためには水素ステーション設置を含めた水素流通網の整備が必要となる。日本経済新聞（2016/03/11）によると、水素ステーションは2016年3月までに国内に80前後を配置予定である。しかし、一部の都市地域のみでの設置であり、利用者にとって利便性を確保した配置と持続的な事業計画の両立が必要となる。燃料電池自動車の初期市場における水素ステーションは、給油過疎地域のSSと同様の課題を抱えている。すなわち燃料電

池車が少ないから水素ステーションが建設されない，水素ステーションが少ないから燃料電池車が増えないという状況を脱却する根本的推進方策が求められている．ステーションの利用者と事業者双方の最適配置には，本章で論じる基礎理論とIoT車両情報による組み合わせによる都市計画・インフラ配備が有用であることを示す．

4.1.2 目的

こうした社会背景のもと，燃料電池自動車の導入初期において有効な方策の一つとして移動式SSが注目を浴びている．需要に応じて機動的な対応ができることが利点であり，すでに我が国では東京都，愛知県などで配備されている（図4-1参照）．現時点で安全上の理由から移動式SSは認可されていないが，諸外国においては既に運用されている．ガソリン給油や水素充填は定置式SSが主体であり，設置数減少はSSへのアクセシビリティを低下させており，移動式SSによる柔軟な需給対応に期待は高い．一方で，移動式SSが実現したとしても，限られた移動式SSで供給を担保するには営業日，営業時間などの確保と同時に利用者・事業者にとって効率的な規定設置場の配置のあり方と巡回スケジュール・操業計画が必要となる（図4-2参照）．

本章では，移動式SSの配備がSSへのアクセスをどの程度改善できるのかを定量的に把握し，移動式SS配置に関する定石の検討を行う．特に，巡回スケジュールを工夫することで改善できるアクセス距離を数値的に示す．本モデルの特徴として，SSの利用者は起点と終点の二つの場所を保有するトリップとし，トリップは給油のための追加的距離が最も小さくなるSSを選択すると想定したことにある．本章では，結果の普遍性，感度分析の可能性，さらには今後のガソリン給油，水素充填の共存期におけるステーションの最適配置など後続研究への期待を込めて解析解を導出する．



図 4-1 名古屋市の移動式水素ステーション



図 4-2 移動式水素ステーション営業日

4.1.3 新規性

SSの配置に関して、栗田(2006)、Honma and Kurita(2008)では、対象地域の面積や人口からの最適なSS数を導いている。讃岐ら(2012)では、給油所までの距離、利用者人口などを算出して給油所撤退の影響を数値化している。盆子原ら(2014)では、給油所を公的施設と捉えた適切な施設量の提案及び給油所過疎地域に関する抑制施策の評価を試みている。解析的研究として、岡部ら(1992)は時空間を統合し施設の移動コスト制約の大きさが移動施設の最適配置に与える影響を分析している。その他に、通過交通に着目した橋梁⁸⁾、時空間での移動図書館などの研究もある(尾崎ら, 1992)。しかし、異なる起点と終点からなるトリップを明示的に取り扱い、巡回スケジュールと移動式SSへのアクセスとの基本的関係を示した研究は皆無である。

本章で提示したモデルは移動施設の移動コストを考慮していないが、移動式SSに限らず応用範囲は広い。買い物難民対策としての移動販売、過疎地域での巡回バス、学校統廃合により需要が高まった移動図書館などにも適用できる。

4.2 燃料充填機のための移動距離の分析

4.2.1 マンハッタンボロノイ図

本章では、図4-3のような長さ L の線分地域上に、トリップを構成する起点 O と終点 D が発生しているとする。もし、起点 O と終点 D の間にSSが位置していれば、起終点間移動中に給油でき、この行動をついで給油と呼ぶ。給油のための追加距離は発生しない。SSが起終点間になければ給油のために移動が必要となるため、ここでは迂回給油(わざわざ給油)と呼ぶ(奥村ら, 2013)。追加距離は O もしくは D から近い給油所 x_z までの往復距離 $2\min\{|O - x_z|, |D - x_z|\}$ となる。

n カ所のSSがこの線分上の x_1, x_2, \dots, x_n に配置されているとする。 x_i の添え字は座標が小さい順に対応し $x_i < x_{i+1}, (i = 1, \dots, n - 1)$ とする。 起点と終点という異なる2地点から構成されるトリップと施設との関係を表現するために、 図4-4のようにOD分布を2次元平面上で考える。 横軸はトリップ起点の座標、 縦軸はその終点の座標を表すので、 図4-4は交通の起終点を表すOD表に対応している。 SSについては、 対角線（45度線）上に布置させる。 本章では一貫して以下を仮定する。

(a-1)ガソリン(水素)に対する需要は非弾力的で、 追加距離が最も小さいSSを選択する。

45度線上に x_1, \dots, x_n が位置するマンハッタン距離ボロノイ図 (Okabe et al., 1999), (Ohsawa and Tamura, 2003), (Ohsawa et al., 2007)を用いると、 SSを選択するトリップは図4-5のように視覚的に表現できる (大澤, 1986)。 領域 V_i に属するトリップは x_i がマンハッタン距離で最も近い。 領域 V_{ij} では2点 x_i と x_j が等距離で最も近く、 領域 V_{ijk} では3点 x_i, x_j と x_k が最近隣となる。 図4-5の V_{123} 左上隅のトリップは x_1, x_2, x_3 ともに起終点間にあるのでこれら3点がついで給油となる。 等距離面が発生し、 2施設の等距離面は $n - 1$ 個、 3施設の等距離面は $n - 2$ 、 全施設の等距離面は1個生じる。

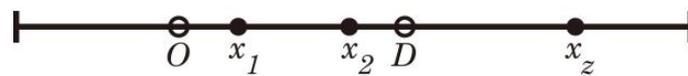


図 4-3 トリップと SS

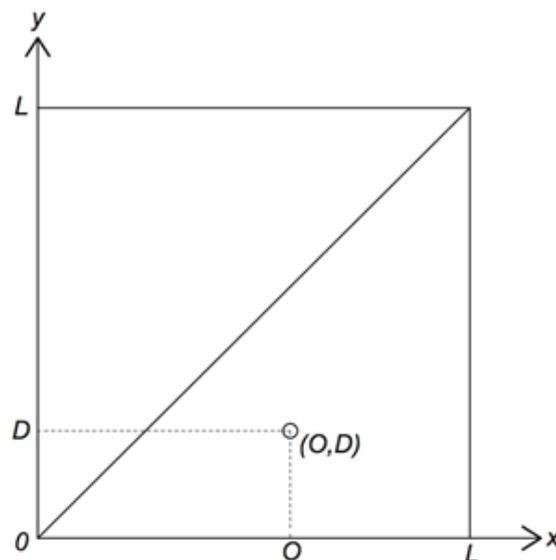


図 4-4 トリップと SS の二次元表示

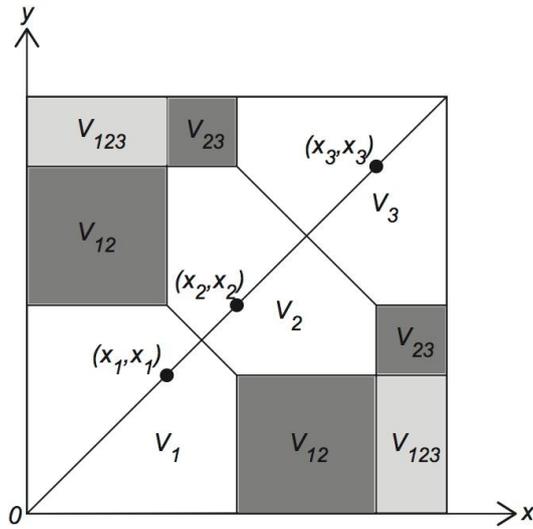


図4-5 マンハッタン距離ボロノイ図 ($n=3$)

4.2.2 給油のための総追加距離

さらに、本章では以下の仮定を設定する。(a-2)起点および終点が一様に独立に発生する。 w_i を隣接するSS間の間隔とし端の部分も考慮し、以下のように定義する。

$$w_i = \begin{cases} x_i & i = 1, \\ x_i - x_{i-1} & 2 \leq i \leq n \\ L - x_i & i = n + 1. \end{cases} \quad (4-1)$$

迂回給油トリップは図4-6のハッチングを施した部分に位置する。この領域数は $n+1$ 個となる。図4-6から、総移動距離(給油のためのアクセス距離合計) $\phi(w_1, \dots, w_{n+1})$ は、

$$\phi(w_1, \dots, w_{n+1}) = 2/3(w_1^3 + w_{n+1}^3) + 1/3 \sum_{i=2}^n w_i^3 \quad (4-2)$$

と表現できる(大澤, 1986)。式(4-1)及び式(4-2)から総追加距離は x_1, \dots, x_n の三次関数となることが分かる。

式(4-2)で与えられる総追加距離を最小化する最適間隔 w_i^* は、 $w_2^* = \dots = w_n^* = \sqrt{2}w_1^* = \sqrt{2}w_{n+1}^*$ であり、総追加距離の最小値 $\phi_n^* \equiv \phi(w_1^*, \dots, w_{n+1}^*)$ は次のようになる⁸⁾:

$$\phi_n^* = \frac{1}{3(n+\sqrt{2}-1)^2} L^3. \quad (4-3)$$

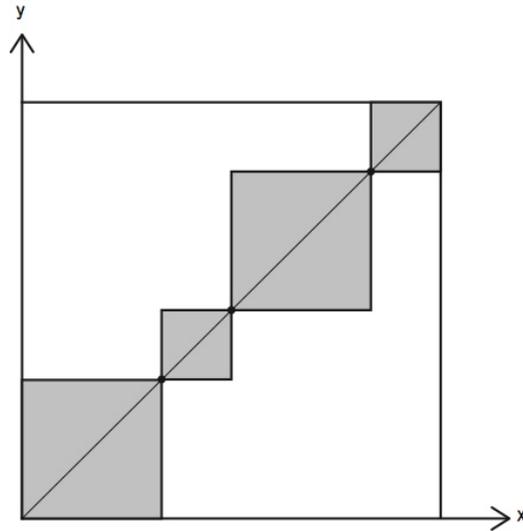


図 4-6 迂回給油トリップ ($n=3$)

4.2.3 均等配置での総追加距離

図 4-7 の x_i のように、区間 $[0, L]$ 上に $n (\geq 1)$ 個の SS が均等間隔で配備されている状況を考える：

$$x_i = \frac{2i-1}{2n}L, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (4-4)$$

ただし、線分両端から最寄り SS までの距離は SS 間距離の半分となっている。今後、この場所を、移動式 SS の巡回場所とする。この理由は少なくとも 3 点ある。

第一の理由として、このような配置には一般性があり利便性と事業性から適当と考えられる。第二に、均等間隔のため、後述する級数和や積分の計算の煩雑さを多少取り除くことができる。解析解の導出を念頭に置いており、このメリットは大きい。第三に、図 4-7 に $n = 6$ の最適配置 x_i^* を示す。最適配置は均等配置より多少内側に位置するが、以下に示すように最適配置の目的関数値（総追加距離）と均等配置の目的関数値（総追加距離）の差異は僅かオーダー $O(1/n^3)$ である。従って、この均等配置はほぼ最適配置である。

実際、式(4-1)から $w_1 = L/2n, w_2 = \dots = w_n = L/n, w_{n+1} = L/2n$ となり、これを式(4-2)に代入することで均等配置での総追加距離 $\phi_n^R \equiv \phi(L/2n, L/n, \dots, L/n, L/2n)$ は

$$\phi_n^R = \frac{2n-1}{6n^3} L^3 \left(= \frac{L^3}{3} \frac{2n-1}{2n^3} \right) \quad (4-5)$$

となり、式(4-3)と同様にオーダー $O(1/n^2)$ となる。式(4-5)と式(4-3)との差は、

$$\phi_n^R - \phi_n^* = \left(\frac{2n-1}{2n^3} - \frac{1}{(n+\sqrt{2}-1)^2} \right) \frac{L^3}{3} = \frac{((4\sqrt{2}-5)n-2\sqrt{2}+3)(n-1)}{6n^3(n+\sqrt{2}-1)^2} L^3.$$

このようにして、 $\phi_1^R = \phi_1^*$ 、 $\phi_n^R > \phi_n^* (n \geq 2)$ さらには、それらの乖離がオーダー $O(1/n^3)$ であり目的関数値そのもののオーダーより低い。両者の乖離は極めて小さいことが証明できた。

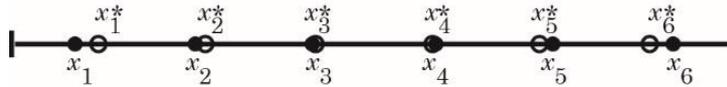


図 4-7 均等配置と再配置

4.3 移動式サービスステーションと IoT 車両情報の連携

4.3.1 総追加距離の下限值

1台の移動式SSが均等配置された n ヶ所の配備場所を巡回する。そのときに発生する追加距離の合計を用いて以下を満たす巡回スキームを評価する：

(b-1)移動式SSは毎日1ヶ所だけ訪問する。

(b-2)移動式SSは配備場所すべてを n 日で一周する。

なお、移動式SSの移動コストは考慮しない。ガソリンや水素の運搬を想定しており、移動コストは小さいと考える。二つの特別な場合を考える。まず、すべての利用者は n 日に1回給油するだけで過ごせる時間的余裕がある場合を考える。巡回場所数と定義した n は給油間隔に一致するので総追加距離 μ_n は n ヶ所の施設が配置された場合の移動距離式(4-5)を用いて一般に、給油したいタイミングに最寄りの配備場所にて移動式SSが配置されている保証は無く、総追加距離はこれより大きくなる。従って、式(4-6)は移動式の追加距離の下限值を与えると解釈できる。この結果は巡回スケジュールの組み方（日程と場所の組み合わせパターン）とは無関係となる。なお $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_n = 0$ となり、配備場所数 n を限りなく大きくすると迂回給油は減り続け追加距離はゼロに近づく。

$$\mu_n = \frac{2n-1}{6n^3} L^3. \quad (4-6)$$

4.3.2 総追加距離の上限値

もう一つの特別な場合として、すべての利用者は毎日給油する必要があり、給油のためにどこまでも移動する状況を考える。この場合、結果として n ヶ所の配備場所全てを訪問することになる。

SSの位置を x とすると、総追加距離 $\varphi(x)$ は式(4-2)から、

$$\varphi(x) = \left(\frac{2}{3}x^3 + (L+x)^3 \right).$$

x_1, \dots, x_n は式(4-4)で与えられるので、平均追加距離 $\bar{\mu}_n \equiv 1/n \sum_{i=0}^n \varphi(x_i)$ は、 $\sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n (L-x_i)^3$ に注意して

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_n &= \frac{2}{3n} \sum_{i=1}^n (x_i^3 + (L-x_i)^3) = \frac{4}{3n} \sum_{i=1}^n x_i^3 = \frac{4}{3n} \left(\frac{L}{2n} \right)^3 \sum_{i=1}^n (2i-1)^3 \\ &= \frac{L^3}{6n^2} (n^2(2n^2-1)) = \frac{2n^2-1}{6n^2} L^3. \end{aligned} \quad (4-7)$$

式(4-7)は移動という機動力を活かしていない最悪ケースであり追加移動距離の上限値となる。配備場所数 n とともに $\bar{\mu}_n$ は増加し、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{\mu}_n = 1/3 L^3$ となるが、 $1/3 L$ は長さ L 上をランダムに分布する2点間距離の期待値に一致する (A.M.Mathai, 1999)。

総追加距離の下限値 $\underline{\mu}_n$ 及び上限値 $\bar{\mu}_n$ を配備場所数 n の関数で示すと、それぞれ図4-8の実線になる。 n が増えるにつれて、下限値 $\underline{\mu}_n$ では $y=0$ が、上限値 $\bar{\mu}_n$ では $y=1/3 L$ が漸近線となる。 n が増えるにつれて上下限界が開き有用な結果とは必ずしも言えない。

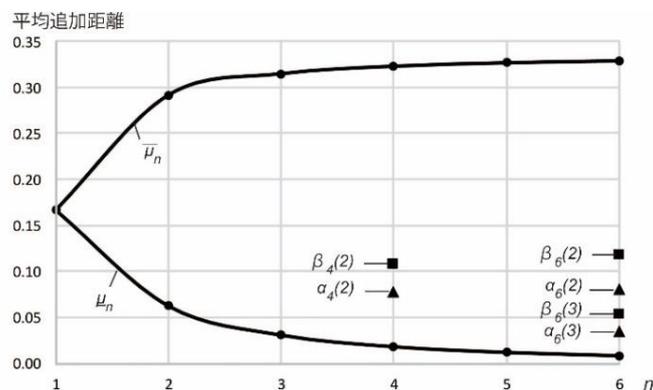


図4-8 平均追加距離の上下限界 ($L=1$)

4.3.3 給油間隔と巡回スケジュール

遠距離での毎日給油，近距離での n 日間隔給油は限定的状況である．より一般的に以下を仮定する：

(a-3)利用者は $\tau(1 \leq \tau \leq n)$ 日に1回給油する．

(a-4)利用者は給油のため片道距離 R まで移動できる．

(a-5)利用者は自分に最も近い場所にSSが巡回するのを待って給油する．

このように，時間制約として給油までの時間的余裕の限界日が与えられ，一方で空間制約として移動距離が制約される状況を考える．本章では本質的な状況での結果を得るために，以下の条件が満たされるとし論を進める．

$$\tau R \geq L (\Leftrightarrow \tau \geq L/R \Leftrightarrow R \geq L/\tau). \quad (4-8)$$

なお， n 日間の間隔給油では $\tau = n$ ， $R = L/n$ ，毎日給油では $\tau = 1$ ， $R = L$ であり，**条件(4-8)**を満たす．つまり，これらの給油スケジュールを特別な場合として含む． $n = 6$ 日の場合，巡回スケジュールの組み方は $6! = 720$ 通りである．**表4-1**～**表4-4**に， $n = 6$ 日（便宜上，日曜日以外開業とする）の例を示す．**表4-1**のスケジュールでは，月曜日に x_1 ，火曜日に x_4 にて移動式SSが開業することを意味する．巡回スケジュールの組み方を工夫することで，追加距離を抑えることを検討する．

線分地域を τ 個に等分割する．区間長 L/τ となるような地域をゾーンと呼び，以下のスケジュールリングを考える．(b-3)移動式SSは各ゾーンへ毎日移動し， τ 日で一周して元のゾーンに戻る．仮定(a-3)にて τ を需要サイドの給油間隔と定義したが，仮定(b-3)から τ は供給サイドからゾーンへの巡回に対応する．**表4-1**～**表4-4**から分かるように，時空間に線引きされた n 個のセル（縦の長さ τ ，横の長さ n/τ ）を移動式SSが巡回する．

表4-1及び**表4-3**には $\tau = 2$ ，**表4-2**及び**表4-4**には $\tau = 3$ の例を示す．どのゾーンも τ 日間隔で移動式SSの訪問を受けるため，**式(4-8)**で与えられる条件を踏まえると，すべてのトリップは給油可能となる．自然数 τ は自然数 n の約数とする．つまり， $\tau \leq n$ であり，時空間のセルの縦の長さ τ 及び横の長さ n/τ はともに自然数とする．

表 4-1 巡回スケジュール ($\tau=2$, 順シフト)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
月	○	—	—	—	—	—
火	—	—	—	○	—	—
水	—	○	—	—	○	—
木	—	—	—	—	—	—
金	—	—	○	—	—	—
土	—	—	—	—	—	○

表 4-2 巡回スケジュール ($\tau=3$, 順シフト)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
月	○	—	—	—	—	—
火	—	—	○	—	—	—
水	—	—	—	—	○	—
木	—	○	—	—	—	—
金	—	—	—	○	—	—
土	—	—	—	—	—	○

表 4-3 巡回スケジュール ($\tau=2$, 逆シフト)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
月	○	—	—	—	—	—
火	—	—	—	—	—	○
水	—	—	—	—	—	—
木	—	○	—	—	○	—
金	—	—	○	—	—	—
土	—	—	—	○	—	—

表 4-4 巡回スケジュール ($\tau=3$, 逆シフト)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
月	○	—	—	—	—	—
火	—	—	—	○	—	—
水	—	—	—	—	○	—
木	—	○	—	—	—	—
金	—	—	○	—	—	—
土	—	—	—	—	—	○

二つの巡回スケジュールを比較する。最初（順シフトと呼ぶ）を以下のように定める：

(s-1) L/τ 間隔で移動することを，初期点 x を変えて n/τ 回繰り返す。

順シフトでは τ 分割されたゾーンを，ゾーン内で相対的位置が同じ場所に移動することを繰り返す。

表 4-1 は $\tau = 2$ ，表 4-2 は $\tau = 3$ のスケジュールである。

表 4-1 では， $|x_1 - x_4| = |x_2 - x_5| = |x_3 - x_6| = L/2$ となり翌日の移動距離差はすべて等しくなる。

一巡する n 日を連続する τ 日で分割し，分割された期間（ τ 日）内で各トリップはゾーン内外から最寄りとなる移動式 SS で給油する場合を計算する。例えば，表 4-1 のスケジュールでは月火，水木，金土ごとに，最寄りの SS を利用する。第一ゾーン（最も左側のゾーン）内 SS の位置を x とすると総追加距離 $\varphi(x)$ は，式(4-2)から

$$\varphi(x) = \frac{2}{3} \left(x^3 + \left(\frac{L}{\tau} - x \right)^3 \right) + \frac{\tau-1}{3} \left(\frac{L}{\tau} \right)^3 .$$

第一ゾーンに属する $x_1, \dots, x_{n/\tau}$ は式(4-4)で与えられるので，

$$\text{平均追加距離 } \alpha_n(\tau) \equiv \sum_{i=1}^{n/\tau} \varphi(x_i) \text{ は，}$$

$$\alpha_n(\tau) = \frac{2\tau}{3n} \sum_{i=1}^{n/\tau} \left(x_i^3 + \left(\frac{L}{\tau} - x_i \right)^3 \right) + \frac{\tau-1}{3} \left(\frac{L}{\tau} \right)^3 = \frac{4\tau}{3n} \sum_{i=1}^{n/\tau} x_i^3 + \frac{\tau-1}{3\tau^3} L^3 = \frac{2n^2-\tau}{6\tau^2 n^2} L^3 . \quad (4-9)$$

$\alpha_n(1) = \bar{\mu}_n$ なので $\alpha_n(\tau)$ は $\bar{\mu}_n$ を一般化している。 $\alpha_n(\tau) = \underline{\mu}_n$ なので $\underline{\mu}_n$ も一般化している。

式(4-9)から， $\alpha_n(\tau)$ の分子は τ の減少，分母は τ の増加なので， $\alpha_n(\tau)$ は τ の減少関数となる。

また $\alpha_n(\tau) = (3/\tau^2 - 1/6\tau n^2)L^3$ と変形できるので， $\alpha_n(\tau)$ は n の増加関数となる。

τ の増大とともに近隣のSSからの給油が可能となりアクセスが改善する。一方で， n の増加とともにゾーン内で移動効率が落ちアクセスが悪化する。

これらの結果は $\alpha_4(2)$ ， $\alpha_6(2)$ ， $\alpha_6(3)$ をプロットした図4-8からも確認できる。

移動式SSの配備場所が線分地域で連続的に一様分布すると $\varphi(x)$ の期待値は

$$\frac{\tau}{L} \int_0^{\frac{L}{\tau}} \varphi(x) dx = \frac{1}{3} \left(\frac{L}{\tau} \right)^3 + \frac{\tau-1}{3\tau^3} L^3 = \frac{1}{3\tau^2} L^3$$

となり， $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n(\tau)$ と一致する。

第二の巡回スケジュール（逆シフトと呼ぶ）を以下のように定める：

(s-2) 初期点 x から $L/\tau - 2x, 2x, \dots, L/\tau - 2x, 2x$ の間隔で移動することを，初期点 x を変え

て n/τ 回繰り返す。

逆シフトでは隣接するゾーン境界に関する点対称移動を繰り返す。表 4-3 は $\tau = 2$ 、表 4-4 は $\tau = 3$ にてこの条件を満たす巡回スケジュールの例である。表 4-3 の 2 日間毎の巡回場所の重心は $x_1 + x_6/2 = x_2 + x_5/2 = x_3 + x_4/2 = L/2$ となりすべてのゾーン境界に位置する。最も左端のゾーン内の配備場所を x とすると、総追加距離 $\varphi(x)$ は

$$\varphi(x) = \frac{2}{3}(2x^3) + \frac{1}{3}\left(\frac{\tau}{2}\left(\frac{2L}{\tau} - 2x\right)^3 + \left(\frac{\tau}{2} - 1\right)(2x)^3\right) = \frac{4}{3}\left(\tau\left(\frac{L}{\tau} - x\right)^3 + (\tau - 1)x^3\right).$$

これに式(4-4)を代入すると平均追加距離

$$\beta_n(\tau) \equiv \frac{\tau}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{\tau}} \varphi(x_i) \text{は,}$$

$$\beta_n(\tau) = \frac{4\tau}{3n} \sum_{i=1}^{n/\tau} \left(\tau \left(\frac{L}{\tau} - x_i \right)^3 + (\tau - 1)x_i^3 \right) = \frac{4\tau(2\tau-1)}{3n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{\tau}} x_i^3 = \frac{(2\tau-1)(2n^2-\tau^2)}{6\tau^3 n^2} L^3. \quad (4-10)$$

$\beta_n(1) = \bar{\mu}_n$ 、 $\beta_n(n) = \underline{\mu}_n$ なので $\beta_n(\tau)$ は $\bar{\mu}_n$ 及び $\underline{\mu}_n$ を特別な場合として含む。式(4-10)から、 $\beta_n(\tau)$ の分母は τ の増加、分子を $\mu(\tau) \equiv (2\tau - 1)(2n^2 - \tau^2)$ と定義すると、 $u'(\tau) = -6\tau^2 + 2\tau + 4n^2$ となる。 $\tau > 2/3$ では $u'(\tau) < 0$ となり、 $\tau \geq 1$ の範囲では $u(\tau)$ は τ の減少となり、結局 $\beta_n(\tau)$ は τ の減少関数となる。また、 $\beta_n(\tau) = (2\tau - 1)(1/3\tau^2 - 1/6\tau n^2)L^3$ と変形できるので、 $\beta_n(\tau)$ は n の増加関数となる。 $\beta_4(2), \beta_6(2), \beta_6(3)$ をプロットした図 4-8 からこれらを確認できる。巡回場所が連続一様分布する場合、 $\varphi(x)$ の期待値は

$$\frac{\tau}{L} \int_0^{\frac{L}{\tau}} \varphi(x) dx = \frac{4\tau}{3L} \left(\frac{2\tau - 1}{4} \left(\frac{L}{\tau} \right)^4 \right) = \frac{2\tau - 1}{3\tau^3} L^3$$

となり、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n(\tau)$ と一致する。

4.3.4 結果の解釈

順シフト及び逆シフトの結果から以下の4点が読み取れる。

第一に、平均距離 $\alpha_n(\tau)$ 及び $\beta_n(\tau)$ は、 τ の減少関数である。つまり、順シフトも逆シフトも給油巡回期間 τ が大きくなるにつれて追加距離を削減できる。給油頻度を見極めそれに応じたゾーンを設定し適切な時空間巡回スケジュールを作成する意義を理解できる。

第二に、順シフトと逆シフトとを比較する。式(4-9)と式(4-10)から $\beta_n(\tau)$ と $\alpha_n(\tau)$ の比は、 $\beta_n(\tau)/\alpha_n(\tau) = (2\tau - 1/\tau)(2n^2 - \tau^2/2n^2 - \tau)$ となる。

$\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n(\tau)/\alpha_n(\tau) = 2\tau - 1/\tau$ なので、比 $\beta_n(\tau)/\alpha_n(\tau)$ は $2\tau - 1/\tau$ まで達する。さらに $\tau \propto$

n であれば、 $\beta_n(\tau)$ は $\alpha_n(\tau)$ の2倍まで達成する。つまり、等間隔でシフトする順シフトの巡回スケジュールが、間隔が長くなったり縮まったりする逆シフトよりアクセスで圧倒的に優れることが分かる。

第三に、追加距離 $\alpha_n(\tau)$ 及び $\beta_n(\tau)$ はSS配備数 n の増加関数である。両シフトとも一つのゾーン内において移動式SSの巡回場所数 n/τ が多くなるにつれて、追加距離は伸びる。ゾーン内で分散する場所を巡回するのではなく、中心1ヶ所固定が優れることを意味する。ゾーン内の公平性の観点から巡回場所を増やすという考え方は理解できるが、移動の非効率性に加え、規定設置の増設負担、視認性も踏まえると、意義は小さいと言える。

最後に m 基の定置式SS配置より n ヶ所巡回の移動式SSの方が優れる給油期間 τ を導く。順シフトに対応する式(4-9)で示した距離 $\alpha_n(\tau)$ と式(4-5)で示した均等配置にある定置式SSへの総追加距離 ϕ_m^R とを比較する。 $\alpha_n(\tau) < \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n(\tau)$ であり、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n(\tau) < \phi_m^R \Leftrightarrow \tau > m\sqrt{m/m - 1/2}.$$

さらに、 $m + 1 > m\sqrt{m/m - 1/2}$ なので $\tau \geq m+1$ ならば $\alpha_n(\tau) < \phi_m^R$ となる。

つまり、給油頻度 τ が $m + 1$ 以上であれば巡回場所数 n がどのように多くても定置式より移動式が優れる。上記結果はゾーン内の巡回場所が1ヶ所の場合は明らかである。ゾーン内での巡回場所増はアクセスを悪化させるが $\tau \geq m + 1$ であれば常に移動式の方が移動効率に優れる。

給油のため、利用者の時間を制限するという前提ではあるが、巡回スケジュールを工夫することで給油アクセス距離を大幅に短縮できる。ハイブリッド車などによる燃費の向上はSS減少に拍車をかけているが、一方で給油タイミングの時間間隔が延びる。結果、移動式SSでは、迂回給油の機会を減らすのである。

4.4 おわりに

現在、燃料電池自動車のMIRAI（トヨタ自動車）では周辺の定置式水素ステーションの水素充填の可否を自動車とスマートフォンから確認できる。エネルギー需給の整合を試みる取り組みが進んでいる。

本章では移動式水素ステーションの運用だけではなく、移動式給油SSの運用が給油過疎地域などで認められた場合の効果を含めて、SSへの追加アクセス距離をどの程度削減できるのかについて次元空間モデルを通して明らかにした。限られた水素ステーション

ョンでのタイムリーな燃料水素の充填にはアクセスとIoTによるステーション情報が必須である。一方で事業者にとっても、周辺地域での需要量が先読みできれば、より効率的な事業スキームや最適配置の実現につながる。そこで、将来のIoT車両情報の導入を見越して市場創生期に必要な移動式ステーションを念頭に理論化を進めた。具体的には移動式SSの設置数の影響を把握するため、移動式SSの追加距離の上下限値を場所数の関数で明らかにした。

次に、移動式SSの巡回スケジュールに関して以下の3点を明らかにした。

第一に、巡回サービスのパターンを工夫することで、追加距離を大幅に削減できることを証明した。特に、給油待ち日数制約を緩和できれば空間アクセスを大きく改善できることを示した。また、順シフトが逆シフトと比較して2倍効率的であることを導いた。

第二に、移動式SSの配備場所は給油頻度を見極めてゾーン数を決め、ゾーン中心だけの配備が有効であることを示した。つまり、高い密度で分散配置するのでは無く給油待ち期間に応じてゾーン幅を定め、ゾーン中心だけに整備するようなコンパクト配置が効率的であることを示した。

第三に、定置式と比較してアクセスの面で移動式が優れる状況となる給油頻度の条件を導いた。移動式は利用者の時間を制約するが、定置式よりも迂回給油を減らせるためアクセスに優れたサービスを提供できることを数値的に示せた。

本章では、多くの関係者が情報共有できるよう検討モデルを極力単純化した。今後の課題として、給油量とネットワーク上を移動するトリップのモデルの拡張、さらに地域固有のエネルギー需要予測に基づいた配置検証、移動式SSでの作業時間、稼働率での検証が考えられる。これらはIoT車両情報の燃料タンクのモニタリング情報により格段の精度向上が期待できる。地域内の自動車の燃料残量と給油・給水素の頻度を持続的にモニタリングすることで地域内の移動式SSの事業スキームは改善できる。

定置式SSの最適配置と移動式SSの配備は地域未来の社会基盤づくりに貢献する。

参考文献

- [4-1] A.Okabe, B.Boots, K.Sugihara and S.N.Chiu(1999) *Spatial Tesselations*.Wiley, Chichester.
- [4-2] A.M.Mathai(1999)*Introduction to Geometrical Probability*. Gordon and Breach Science Publishers.
- [4-3] Y.Honma and O. Kurita(2008)“A mathematical model on the optimal number of hydrogen stations with respect to the difusion of fuel cell vehicles”. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 51(2), 166-190.
- [4-4] Y.Ohsawa and K.Tamura(2003)“Efficient location for a smi-obnoxious facility ”. *Annals of Operations Research*, 123, 173–188.
- [4-5] Y.Ohsawa, N.Ozaki, F.Plastria and K.Tamura(2007)“Quadratic ordered median location problems”. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 50(4), 540–562.
- [4-6] 浅田和幸 (2013)「どう生き延びる給油所過疎地」,『日経グローバル』, 220,10–23.
- [4-7] 大澤義明 (1986)「橋の本数と迂回との関係について」,『都市計画論文集』, 21, 241–246.
- [4-8] 岡部篤行, 鈴木敦夫 (1992)『最適配置の数理』. 朝倉書店.
- [4-9] 奥村誠, 藤原潤子, 植田今日子, 神谷大介 (2013)『途絶する交通, 孤立する地域』. 東北大学出版社.
- [4-10] 尾崎尚也, 大澤義明 (2001)「利用者行動属性の多様性を考慮した時空間施設配置モデル」,『都市計画論文集』, 36, 853–858.
- [4-11] 株式会社価値総合研究所 (2011)『平成22年度石油産業体制等調査研究 (石油製品供給不安地域調査) 報告書』, 資源エネルギー庁委託調査事業.
- [4-12] 栗田治 (2006)「水素ステーション網の適正整備に関するマクロモデル–適切な水素ステーション数の性質とガスパイプライン形状の数値解–」,『都市計画論文集』, 41, 193–198.
- [4-13] 讃岐亮, 吉川徹 (2012)「ガソリンスタンドのアクセシビリティ評価と施設撤退の影響評価」,『日本建築学会計画系論文集』, 673, 639–648.
- [4-14] 盆子原歩, 小林隆史, 大澤義明 (2014)「給油所過疎地域に関する数理的考察」,『都市計画論文集』, 49,603–608.

第 5 章

矩形都市移動時における太陽光逆光割合の導出 による運転支援

-IoT 車両情報と都市計画の融合による知能化-

5.1 はじめに

早朝や夕方の自動車で太陽の逆光状態により信号が判読できないなど運転環境が妨げられることがある。この時間帯では、通勤通学のため交通量も多く、運転手の視野を遮る逆光は交通安全上からも問題となる。季節の観点から、冬場は太陽高度が低く空気も澄むことも相まって顕著となる。また地理的観点から、北海道のような高緯度地域帯では太陽の位置が低い時間帯が長い時間逆光による運転障害が発生しやすい。運転手へ逆光に関する地域・季節・時刻別情報を与えることで、逆光へ備える先読み安全運転の支援が可能となる。

自動運転はその実用化が図られている（太田，2015；鶴原・仲森，2014；保坂ほか，2015；桃田，2016）。自動運転には次の効果が期待されている。判断ミスによる交通事故の減少，交通渋滞の緩和，交通弱者の外出促進，物流コストの低減と労働力の解消，過疎地域での公共交通の確保，低燃費運転支援の実現，災害時対応の迅速化，自動駐車による駐車スペースの節約，道路作業車などがある。

一方で、逆光により自動運転の実現に重要となる車載単眼カメラへのセンサー機能への影響も危惧される（保坂ほか，2015）。逆光環境では、光学的コントラストが小さく障害物や道路白線の認識力が落ちるため、この技術的課題の解決には、道路インフラ側の整備も含め複数手法を組み合わせた補完性が必要となる。そのために、逆光というカメラの弱点がどの場所でいつ発生するのかなどの時空間情報は自動運転においても極めて重要である。逆光と交通事故との関係を追求した研究（萩田・森，2011，2013a，2013b；松田・村田，2015）の中で、太陽と車両との相対的位置関係に着目し、GISや統計手法を駆使して車両交通事故を分析した研究（萩田・森，2011，2013a）は興味深い。しかし、それは千葉県に限定されたデータ分析である。日本は中緯度に位置しながらも幅広の緯度を有しており、様々な都市形態や道路網パターンを保有している。多様な状況を含み一方で多くの読者がイメージできるという利点から、単純な仮定の下で解析的に論じる必要がある。

そこで、矩形都市を想定し起終点が連続的かつ一様に発生する単純な状況を考える。変化する太陽の位置に注目し、低高度となる太陽への向きと進行方向が合致するトリップを特定しその量を計算することで、逆光が都市全体でどの程度生じるかを算出する。矩形都市内で発生する全トリップ長で逆光となるトリップが占める比率から逆光割合を定義する。

都市内道路網として、起終点間を直線で移動する直線型道路網（腰塚・小林，1983）と，京都，札幌，旭川などの計画都市，名古屋などの区画整理地域のように基盤目状の格子に沿って移動する格子型道路網（鈴木，2006；布野・ホアンラモン，2013）を想定する．本章では，稠密な道路網を仮定するため，距離は前者では直線距離，後者では直交距離となる．それぞれの道路網ごとに，都市の形態・位置・向きなど都市の地理的要因が逆光をどの程度発生させるのかを定量的に考察する．形態を矩形と限定し単純化することで，都市の形態，都市の緯度，さらには南北方向となす道路網の角度が逆光をどの程度生じさせているのかを数量として抽出できる．このように，逆光が生じさせる都市側の要因を整理し，逆光割合という指標で逆光の規模を数値化することに本章の研究意義がある．

5.2 矩形都市におけるトリップの角度分布

5.2.1 確率密度関数

図5-1のように，横，縦の長さが a 及び b の矩形都市を考える．この矩形都市上をトリップの起点 O 及び終点 D が互いに独立かつ一様に分布しているとする．図5-2に示すように，トリップの起終点間の直線距離 r と矩形底辺（水平方向）となす角度 θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) が定まる．これら直線距離 r と角度 θ の同時確率分布は次のようになる

(Ghosh, 1951 ; 腰塚, 1978 ; Mathai, 1999) .

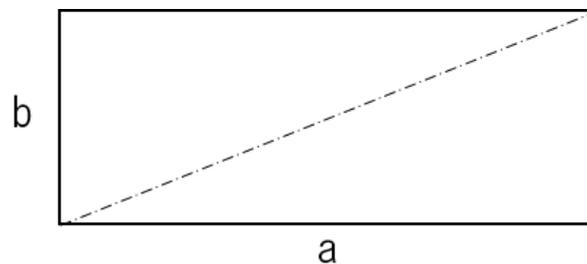


図 5-1 矩形都市の形状

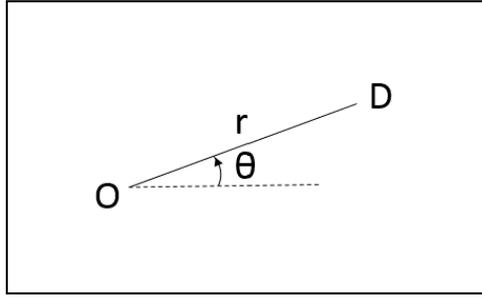


図 5-2 トリップの直線距離 r と角度 θ

$$f(r, \theta) = \frac{4r}{a^2 b^2} (a - r \cos \theta)(b - r \sin \theta).$$

確率分布なので $\int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} f(r, \theta) dr d\theta = 1$ を満たしており、トリップ総量は基準化されている。なお、対称性から角度 θ を $0 \leq \theta \leq \pi/2$ と限定している。その結果、異なる 4 種類の起終点トリップを 1 つのトリップへ集約している。

直線距離 r に関する周辺分布 $\int_0^{\pi/2} f(r, \theta) d\theta$ は導かれている (Ghosh, 1951; 腰塚, 1978)。

トリップが角度 θ 方向にどの程度の移動するかを表す周辺分布 $f(\theta) \equiv \int_0^{\infty} f(r, \theta) dr$ を求める。 θ の値で r の積分範囲が異なる。図 5-1 の一点鎖線で示す矩形対角線がなす角度は $\arctan b/a$ であり、この前後で θ に関して場合分けする。

$0 \leq \theta \leq \arctan b/a$ の場合、定積分の下端 r_1 及び上端 r_2 は、 $r_1 = 0$, $r_2 = \frac{a}{\cos \theta}$ となり、

$\arctan \frac{b}{a} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ では $r_1 = 0$, $r_2 = \frac{a}{\sin \theta}$ となる。

式(5-1)を r に関して区間 $[r_1, r_2]$ で定積分すると、

$$\int_{r_1}^{r_2} f(r, \theta) dr = \frac{4}{a^2 b^2} \left[\frac{\cos \theta \sin \theta}{4} r^4 - \frac{b \cos \theta + a \sin \theta}{3} r^3 + \frac{ab}{2} r^2 \right]_{r_1}^{r_2}. \quad (5-1)$$

場合分けを通して次のように定積分が求まる：

(i) $0 \leq \theta \leq \arctan \frac{b}{a}$

$$f(\theta) = \frac{2a}{3b \cos^2 \theta} - \frac{a^2 \sin \theta}{3b^2 \cos^3 \theta}. \quad (5-2)$$

(ii) $\arctan \frac{b}{a} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$f(\theta) = \frac{2b}{3a \sin^2 \theta} - \frac{b^2 \cos \theta}{3a^2 \sin^3 \theta} \quad (5-3)$$

角度に関する確率密度関数 $f(\theta)$ は、矩形都市の縦横化 b/a に依存する。対称性から式(5-2)の θ 、 a 、 b の代わりに $\frac{\pi}{2} - \theta$ 、 b 、 a を代入すると、式(5-3)に一致する。下端及び上端における関数値を確認すると $f(\arctan \frac{b}{a}) = \frac{a^2+b^2}{3ab}$ 、 $f(0) = \frac{2a}{3b}$ 、 $f(\frac{\pi}{2}) = \frac{2b}{3a}$ となる。矩形領域の主軸である水平方向、($\theta = 0$)と鉛直方向($\theta = \frac{\pi}{2}$)の数値を比較すると $\frac{f(\pi/2)}{f(0)} = (b/a)^2$ となり、長さ比 $\frac{b}{a}$ の二乗となる。また、 $a > b \Leftrightarrow f(0) > f(\arctan \frac{b}{a}) > f(\frac{\pi}{2})$ という不等式が確認できる。

$a = b$ 、 $a = 2b$ 、 $a = 3b$ 、 $2a = b$ 及び $3a = b$ に関する5本の確率密度関数 $f(\theta)$ を図化すると、図5-3のようになる。図5-3から、 $a = b$ の場合、ほぼフラットだが $f(0) = f(\frac{\pi}{4}) = f(\frac{\pi}{2}) = \frac{2}{3}$ となりW字型となる。これは正方形と円との重ね合わせから理解できるように、横方向、縦方向と45°方向で円よりトリップが多く発生するためである。また、東西方向に横長となる都市ほど小さい θ において密度関数値が高くなり角度の浅いトリップがより発生することも読み取れる。

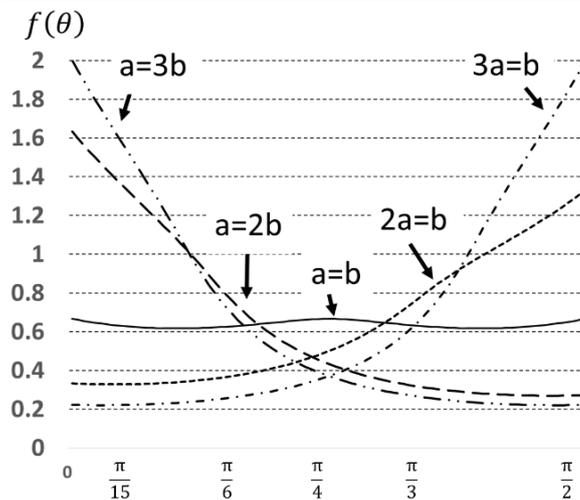


図5-3 トリップ数の確率密度関数

5.2.2 分布関数

密度関数 $f(\theta)$ を定積分することで、角度区間に属するトリップの総量を求めることができる。下端0から上端 θ までの定積分である分布関数 $F(\theta) \equiv \int_0^\theta f(x) dx$ は次のようになる：

(i) $0 \leq \theta \leq \arctan \frac{b}{a}$

$$F(\theta) = \frac{2a}{3b} \tan \theta - \frac{a^2}{6b^2} \left(\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1 \right). \quad (5-4)$$

(ii) $\arctan \frac{b}{a} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$F(\theta) = F\left(\arctan \frac{b}{a}\right) + \int_{\arctan \frac{b}{a}}^\theta f(r, \theta) d\theta \quad (5-5)$$

$$= 1 - \frac{2b}{3a} \cot \theta - \frac{b^2}{6a^2} \left(\frac{1}{\sin^2 \theta} - 1 \right). \quad \text{ここで, } F(0) = 0,$$

$F(\arctan \frac{b}{a}) = \frac{1}{2}$, $F(\frac{\pi}{2}) = 1$ となり、矩形領域の対角線の角度 $\arctan \frac{b}{a}$ より角度が浅い

トリップと深いトリップは同数であり、 $F(\arctan \frac{b}{a}) = \frac{1}{2}$ を説明できる。

5.3 進行方向別の総トリップ長の分布

5.3.1 直線型道路網での密度関数

式(5-2)及び式(5-3)は角度別に発生するトリップ量の分布である。しかし、この分布ではトリップ長が考慮されていない。そのため、逆光を受ける時間が異なる短距離トリップと長距離トリップとが同一扱いとなっている。そこで、ここでは各角度にどの程度の移動総距離が発生しているのかを計算する。

起終点密度 $f(r, \theta)$ に長さ r を掛け角度 θ 方向の全てのトリップ長の合計を求めたものを $g(\theta)$ とする：

$$g(\theta) \equiv \int_0^\infty r f(r, \theta) dr. \quad (5-6)$$

$g(\theta)$ を計算するために、 $r f(r, \theta)$ を r に関して区間 $[r_1, r_2]$ で積分すると、

$$\int_{r_1}^{r_2} r f(r, \theta) dr = \frac{4}{a^2 b^2} \left[\frac{\cos \theta \sin \theta}{5} r^5 - \frac{b \cos \theta + a \sin \theta}{4} r^4 + \frac{ab}{3} r^3 \right]_{r_1}^{r_2}.$$

式(5-2)及び式(5-3)と同じ場合分けから

(i) $0 \leq \theta \leq \arctan \frac{b}{a}$

$$g(\theta) = \frac{a^2}{3b \cos^3 \theta} - \frac{a^3 \sin \theta}{5b^2 \cos^4 \theta}. \quad (5-7)$$

(ii) $\arctan \frac{b}{a} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$g(\theta) = \frac{b^2}{3a \sin^3 \theta} - \frac{b^3 \cos \theta}{5a^2 \sin^4 \theta}. \quad (5-8)$$

なお、計算結果、式(5-7)と式(5-8)に関する先行研究は見当たらない。式(5-2)と式(5-3)の関係のように、式(5-7)の θ 、 a 、 b の代わりに $\frac{\pi}{2} - \theta$ 、 b 、 a を入れると、式(5-8)が得られる。端点の値は $g(\arctan \frac{b}{a}) = \frac{2(a^2+b^2)\sqrt{a^2+b^2}}{15ab}$ 、 $g(0) = \frac{a^2}{3b}$ 、 $g(\frac{\pi}{2}) = \frac{b^2}{3a}$ となる。よって、水平方向($\theta = 0$)と鉛直方向($\theta = \frac{\pi}{2}$)を比較すると $\frac{g(\pi/2)}{g(0)} = (b/a)^3$ となり、長さ比 $\frac{b}{a}$ の三乗となる。

なお、 $a = b = 1$ の場合、 $g(\frac{\pi}{4}) \approx 0.377 > g(0) = g(\frac{\pi}{2}) = \frac{1}{3}$ となり、 $\theta = \frac{\pi}{4}$ にて $g(\theta)$ の最大値が達成される。対角線方向($\theta = \frac{\pi}{4}$)では最長トリップが発生するなどトリップ長が長くなる。このように、トリップ数の結果 $f(0) = f(\frac{\pi}{4}) = f(\frac{\pi}{2})$ とは異なるのである。

5.3.2 直線型道路網での累積関数

密度関数 $g(\theta)$ を下端 0 から上端 θ まで定積分すると累積関数 $G(\theta) \equiv \int_0^\theta g(x) dx$ が次のように求まる：

(i) $0 \leq \theta \leq \arctan \frac{b}{a}$

$$G(\theta) = \frac{a^3}{15b^2} \left(1 - \frac{1}{\cos^3 \theta} \right) + \frac{a^2}{6b} \left(\frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} \log \tan \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right). \quad (5-9)$$

(ii) $\arctan \frac{b}{a} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$\begin{aligned}
G(\theta) &= \frac{b^3}{15a^2} \frac{1}{\sin^3 \theta} - \frac{b^2}{6a} \left(\frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} - \log \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \\
&+ \frac{1}{30a^2b^2} \left(2a^5 - 2(a^4 + b^4 - 3a^2b^2)\sqrt{a^2 + b^2} + 5a^4b \log \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{a} \right. \\
&\left. + 5ab^4 \log \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{b} \right).
\end{aligned} \tag{5-10}$$

ここで、式(5-9) 及び式(5-10)よりから、

$$\begin{aligned}
G(0) &= 0, \\
G\left(\arctan \frac{b}{a}\right) &= \frac{1}{30a^2b^2} \left(2(a^5 + b^5) - (2a^4 - 3a^2b^2)\sqrt{a^2 + b^2} + 5a^4b \log \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{a} \right), \\
G\left(\frac{\pi}{2}\right) &= \frac{1}{30a^2b^2} \left(2(a^5 + b^5) - 2(a^4 + b^4 - 3a^2b^2)\sqrt{a^2 + b^2} + 5a^4b \log \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{a} + \right. \\
&\left. 5ab^4 \log \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{b} \right).
\end{aligned} \tag{5-11}$$

$G\left(\frac{\pi}{2}\right)$ は直線距離 r の期待値 $\int_0^{\pi/2} \int_0^\infty rf(r, \theta) dr d\theta$ に一致する (Ghosh, 1951; 腰塚 1978; Mathai, 1999). 式(5-10) は式(5-11)を特殊な場合として含むので、式(5-9)と式(5-10)は式(5-11)のような既存結果を大きく一般化している. 式(5-11)で示された総直線距離を角度 θ ごとに割り振ったのが関数 $g(\theta)$ である. 本章では、逆光割合を累積関数 $G(\theta)$ から算出する. $b = 1$ と固定し、 $a = b$, $a = 2b$ 及び $a = 3b$ の3本の累積関数 $G(\theta)$ をそれぞれ、実線、点線、破線にて図5-4に示す.

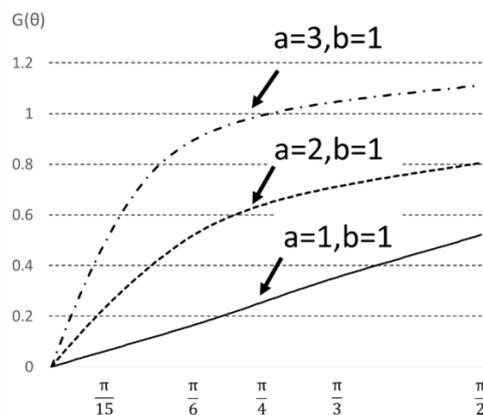


図 5-4 進行方向の分布関数

5.3.3 格子型道路網での密度関数

図5-5からも理解できるように，格子型道路では起点 O と終点 D とを結ぶ最短経路は一意には定まらないが，進行方向は東西 ($\theta = 0$) 及び南北 ($\theta = \frac{\pi}{2}$) のみに分解できる．角度 θ を固定した時のトリップの移動総距離の関数を $h(\theta)$ とする． $h(\theta)$ は式(5-2)，式(5-3)，式(5-7)及び式(5-8)のような連続関数ではなく2点のみで値を取る離散関数となる．式(5-6)より，

$$h(0) = \iint r \cos \theta f(r, \theta) dr d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta g(\theta) d\theta,$$

$$h\left(\frac{\pi}{2}\right) = \iint r \sin \theta f(r, \theta) dr d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta g(\theta) d\theta.$$

式(5-7)や式(5-8) を活用し定積分を求めると，結果はシンプルとなり

$$h(0) = \frac{a}{3}, \tag{5-12}$$

$$h\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{b}{3}. \tag{5-13}$$

このように直線移動とは根本的に異なり，単純な結果となる．なお，これらの値は長さ a や b の直線分上を連続的に一様分布する2点間距離の期待値（平均距離）に一致する（Mathai, 1999）．また， $\frac{h(\pi/2)}{h(0)} = \frac{b}{a}$ となり，直線移動と比べ縦横比 $\frac{b}{a}$ に対する影響は小さくなる事が分かる．

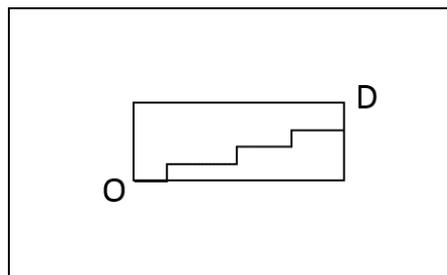


図 5-5 格子型道路網での最短経路

5.3.4 格子型道路網での累積関数

式(5-12)及び式(5-13)から、累積関数 $H(\theta)$ は次のようになる：

(i) $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$

$$H(\theta) = h(0) = \frac{a}{3}, \quad (5-14)$$

(ii) $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$H(\theta) = h(0) + h\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{a+b}{3}. \quad (5-15)$$

式(5-15)は矩形都市内の直交平均距離に一致する。また、 $a = b = 1$ のとき、 $G\left(\frac{\pi}{2}\right) \approx 0.521 < H\left(\frac{\pi}{2}\right) \approx 0.667$ となり直交距離の方が長いことを確認できる。

5.4 逆光割合導出とIoT車両情報による運転支援

5.4.1 太陽の位置と逆光との関係

正面方向に太陽が直接見える状況を特定するためには、運転手と太陽との相対的位置を把握する必要がある。既存研究（萩田・森，2011，2013a）を踏まえ、(1) 太陽高度（仰角）が一定の角度内に収まる時間帯（図 5-6 参照）にて、(2) 太陽へ向かうトリップ（図 5-7 参照）を特定する。そして、そのトリップ長の総量を踏まえ逆光割合を計算する。

δ を太陽位置を表す赤緯、 ϕ を矩形都市の緯度（北緯）、 h を太陽高度（仰角）とする。時間ごとに変化する時角 t 及び方位角 A は次の連立方程式から定まる（長沢，1999）。

$$t = \arccos\left(\frac{\sin h - \sin \delta \sin \phi}{\cos \delta \cos \phi}\right), \quad (5-16)$$

$$A = \arcsin\left(-\frac{\cos \delta \sin t}{\cos h}\right). \quad (5-17)$$

月日で定まる太陽赤緯 δ 、都市緯度 ϕ は固定値である。そこでまず、図 5-6 で示すような太陽高度 h を式(5-16)へ代入することで時角 t が定まる。その時角 t を式(5-17)へ代入し方位角 A が決まる。このように、赤緯 δ により季節の影響、緯度 ϕ により都市位置の影響を組み込んだ体系である。なお、太陽高度 h の一つの値に対し、図 5-7 の方位角が午前と午後それぞれ 1 回合計 2 回定まる。

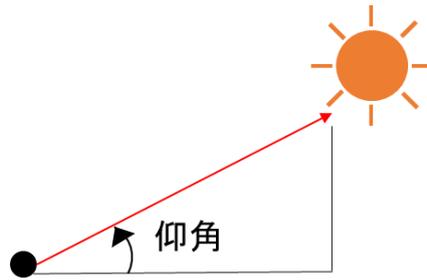


図 5-6 太陽高度 (仰角)

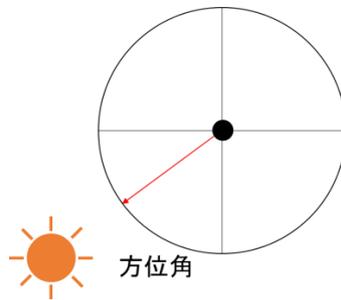


図 5-7 太陽方位角

サンバイザー、沿道建物、街路樹、さらには地形の高低差により太陽光が遮られること、これらを考慮に入れ太陽の眩しさが顕著となる太陽高度を 10° から 20° と設定する(萩田・森, 2011, 2013a). これらの太陽高度が達成される方位角が、連立方程式(5-16), (5-17)から午前及び午後ごとに求まる. これらの方位角を, $A_{M,10}$, $A_{M,20}$, $A_{E,10}$, $A_{E,20}$ と定義する. 区間 $[A_{M,10}, A_{M,20}]$ は日の出, 区間 $[A_{E,10}, A_{E,20}]$ は日没にて逆光となる方位角に対応する. なお, 対称性から, $A_{E,10} - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} - A_{M,10}$, $A_{E,20} - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} - A_{M,20}$ が成り立つ. 図 5-8 は, つくば市の午後にて太陽高度が 10° から 20° となる方位角の区間 $[A_{E,10}, A_{E,20}]$ を示す. この図から, 2016/1/1 から 2016/6/1 までの各月初日に逆光時間帯となり得る方位角の方向別表示が図 5-9 のように表現できる.

式(5-9)及び式(5-10)で示した分布関数には, 進行方向が組み込まれていないので, 直線移動の場合

$$\delta_M \equiv \frac{G(A_{M,20}) - G(A_{M,10})}{2G(\frac{\pi}{2})}, \quad (5-18)$$

$$\delta_E \equiv \frac{G(A_{E,20}) - G(A_{E,10})}{2G(\frac{\pi}{2})}. \quad (5-19)$$

それぞれ、日の出及び日没で逆光となる割合となる。同様に、式(5-14)及び式(5-15)を通して、直交移動の場合の逆光となる割合は次のようになる：

$$\mu_M \equiv \frac{H(A_{M,20}) - H(A_{M,10})}{2H(\frac{\pi}{2})}, \quad (5-20)$$

$$\mu_E \equiv \frac{H(A_{E,20}) - H(A_{E,10})}{2H(\frac{\pi}{2})}. \quad (5-21)$$

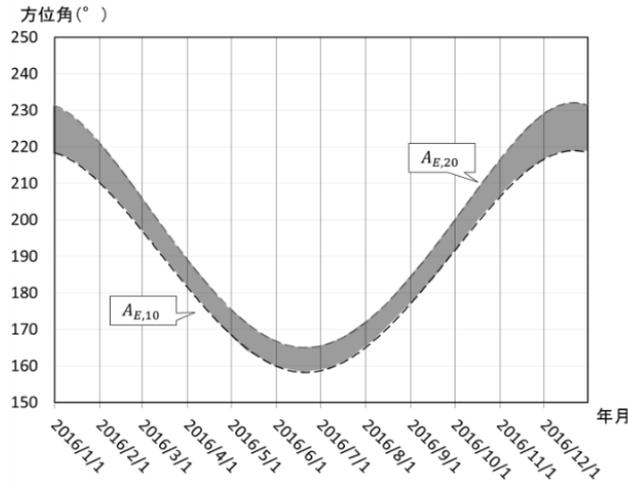


図 5-8 太陽方位角の時系列変化

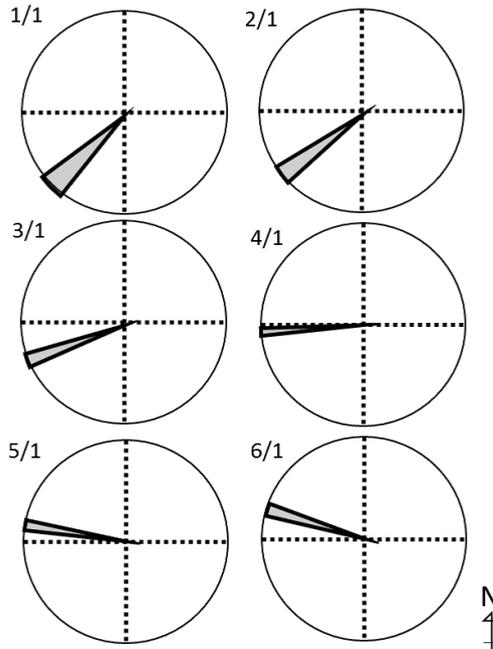


図 5-9 つくば市にて逆光が生じる方位角範囲

本章ではこれらの値を逆光割合と呼ぶ。なお式(5-9), 式(5-10), 式(5-11)から分かるように, δ_M 及び δ_E は矩形都市の縦横比 b/a の関数となる。同様に, 式(5-14), 式(5-15)より, μ_M 及び μ_E も縦横比 b/a の関数となる。

図 5-10 のように α を矩形都市が東西（水平）軸となす回転角度とする。 $\alpha = 0$ は京都や奈良など道路が東西南北に走る状況である。しかし, 表 5-1 の第三列に示すように, 多くのグリッド都市では必ずしも東西南北軸とはならない。回転角度の影響は式(5-18)-(5-21)において δ_M , δ_E , μ_M , μ_E の角度を読み替えることにより計算できる。

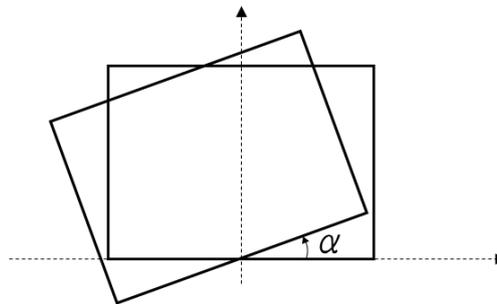


図 5-10 太陽方位角

表 5-1 グリッド地域の東西方向角度と緯度

市区	場所	角度	緯度
旭川市	名寄国道	45°	44°
北見市	大雪通	6°	43°
札幌市	厚別滝野公園通	26°	43°
十和田市	中心部	31°	40°
東京都	八重洲	27°	35°
近江八幡市	中心部	35°	35°
京都市	中心部	0°	35°
豊岡市	中心部	1°	35°

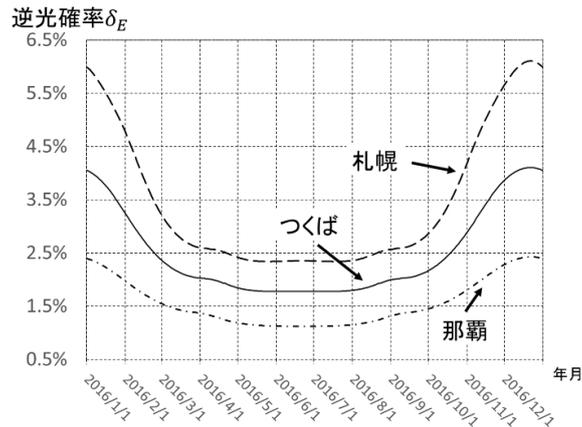


図 5-11 直線移動と都市位置

5.4.2 都市位置の影響

日本は南北に長く、都市は様々な緯度に位置する。例えば、代表的な格子状都市の緯度を表 5-1 の第四列に示す。そこで、札幌、つくば、那覇の北緯である $20^{\circ}03'$ 、 $36^{\circ}13'$ 、 $26^{\circ}12'$ を用いて逆光割合を計算する。図 5-11 及び図 5-12 は、横軸に月日、縦軸に式(5-19)及び式(5-21)から得られた日没の逆光割合 δ_E 及び μ_E を示す。ただし、 $\alpha = 0$ 、 $a = b = 1$ とし、東西南北軸と平行な正方形領域とする。角度 $\alpha = 0$ なので対称性から $\delta_M = \delta_E$ 、 $\mu_M = \mu_E$ となる。

直線移動の結果である図 5-11 から、逆光割合 δ_E は一年を通して 1~6% に収まっている。形状は U 字型であり夏は低く冬は高く、夏至付近が最小、冬至付近が最大となる。冬では太陽高度が低いからである。都市別に比較すると、那覇、つくば、札幌の順で逆光割合が年間を通して高くなる。高緯度地域ほど太陽軌道の位置が低くなるためである。

対照的に、直交移動の結果 μ_E を示す図 5-12 では、真東から太陽が昇り真西に太陽が沈む春分及び秋分付近のみで逆光割合が発生する。ここでは、完全な東西・南北に平行な格子道路を想定しているためである。また、これら逆光割合は $\frac{1}{4} = 0.25$ となり、かなり高い。なお 0.25 という数値は全体の移動が東西・南北、上り・下りに限定され 4 分割できることから理解できる。

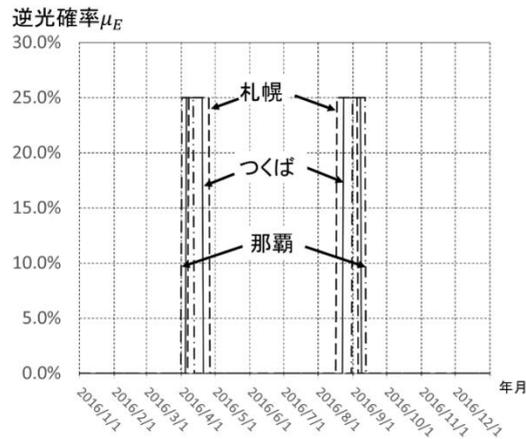


図 5-12 直交移動と都市位置

また、高緯度に位置する地域では太陽軌道の位置が低いこともあり、逆光が生じる期間は那覇、つくば、札幌の順で長くなる。

以上から図 5-11 及び図 5-12 より、高緯度ほど逆光割合が高まり、逆光割合の月日影響は直線移動と直交移動とで大きく異なることが分かった。

5.4.3 都市形態の影響

図 5-13 及び図 5-14 に、それぞれ直線型道路網、格子型道路網別に都市形状ごとの逆光割合 δ_E 及び μ_E を示す。矩形都市の回転角度を $\alpha = 0$ とし、緯度をつくば市と同一に設定した。ここでも $\delta_M = \delta_E$ 、 $\mu_M = \mu_E$ となる。5 本の関数は、それぞれ $a = b$ 、 $a = 2b$ 、 $a = 3b$ 、 $2a = b$ 及び $3a = b$ に対応する。

直線型道路網の結果 δ_E を示す図 5-13 から、東西方向に横長となる ($a = 2b$ 、 $a = 3b$) ほど逆光割合は 6% まで上昇する。日没及び日の出方向と向きが重なる東西方向トリップが多く発生するためである。特に、朝夕東西方向に日光を落とす春分及び秋分付近で逆光割合は上昇する。一方で、南北縦長となる場合 ($2a = b$ 、 $3a = b$) では逆光割合は 10% 台までに低く抑えられる。

次に、格子型道路網の割合 μ_E を示す図 5-14 から、春分・秋分の時期付近で逆光が発生する。その割合は、東西方向の半分であり $\frac{a}{2(a+b)}$ と一致する。例えば、図 5-14 における $2a = b$ の値は $\frac{1}{6}$ 、 $3a = b$ の値は $\frac{1}{8}$ である。このように、都市形態は都市全体の逆光に大きく影響する。

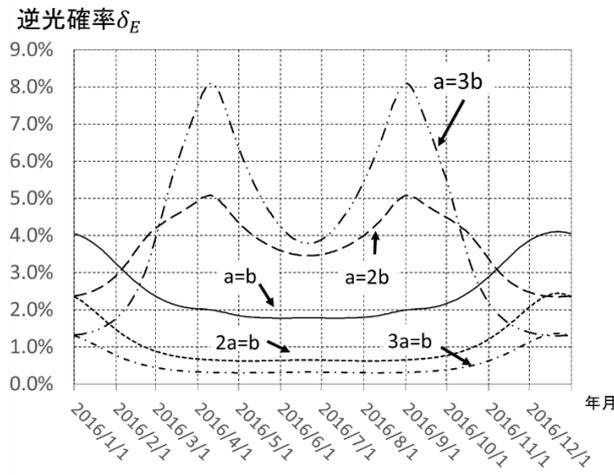


図 5-13 直線移動と都市形状

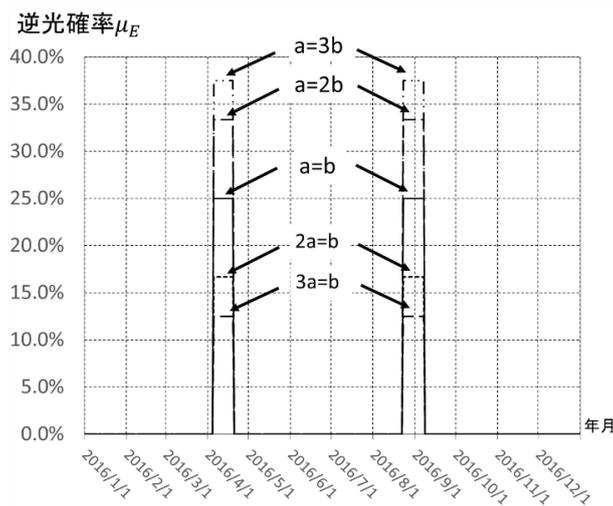


図 5-14 直交移動と都市形状

5.4.4 回転角度の影響

図 5-15 及び図 5-16 は、東西方向からの回転角度が逆光割合に与える影響を示す。都市形状を正方形、緯度をつくば市と同一とした。無回転の場合に加え、回転角度を15°、30°、45°、60°及び75°、合計6ケースを計算した。それぞれ、日没における逆光割合 δ_E 及び μ_E のみ記載する。

直線移動の影響 δ_E を示す図 5-15 では都市形状が正方形であることもあり、逆光割合の絶対量も大きく変化せず U 字型形状が多少歪む程度である。回転角度 α の影響は小さいことが理解できる。回転角度変化に対し安定した結果が得られた。

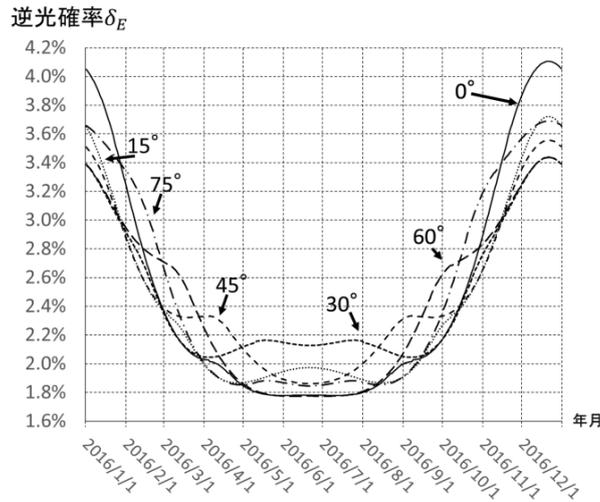


図 5-15 直線移動と都市回転角度

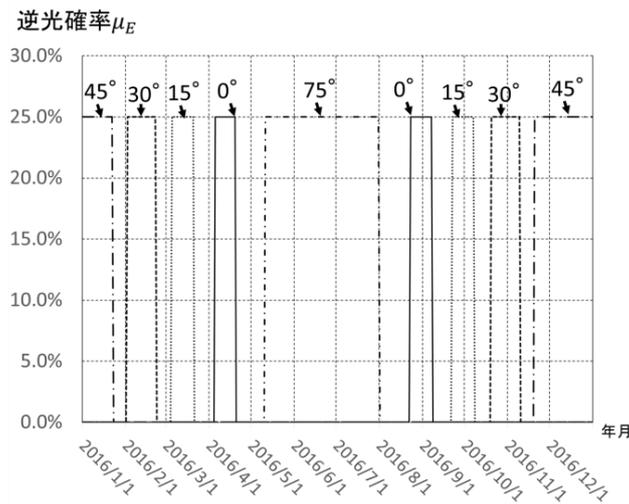


図 5-16 直交移動と都市回転角度

一方、図 5-16 に示す直交移動の割合 δ_E については、逆光時期は無回転での春分秋分時期から回転角度が増えるにつれて冬季へシフトすることが分かる。そして、回転角度 60° では日没逆光が発生せず、角度 75° では一転して夏期へシフトする。回転角度とともに冬季へシフトする理由は、直交する道路軸のうち南西方向へ向かう道路軸は回転角度と南側へ向かうため、太陽高度が低くなる冬季にて逆光となるからである。このことは、図 6-9 に示した 4/1, 3/1, 2/1, 1/1 の結果からも確認できる。角度 60° にて日没逆光が生じないのは、南西 60° 道路軸では仰角が高すぎて北西 30° の道路軸では逆に低すぎて、仰角が 10° から 20° の範囲に収まらないのである。角度 75° にて逆光季節が夏期へジャンプする理由は、南西 75° 道路軸では仰角が高いが北西 15° 道路軸には日が入るからである。

この点は図 4-9 の 6/1 の結果からも理解できる。

対称性から、角度 30° では日の出では逆光が発生しないこと、角度 30° で日没逆光となることから角度 60° では日の出逆光となる。なお、同様な計算を通して那覇のような低緯度地域では太陽高度が高く、回転角度 45° では日の出及び日没ともに逆光とならない。つまり、那覇周辺の回転角度 45° の格子型道路網では年間を通して逆光が発生しないのである。

5.5 おわりに

本章では道路と太陽の相対位置関係から逆光となるトリップを抽出する空間モデルを提示した。運転の障害となる逆光が発生する条件を示した上で、時空間的視点を踏まえた都市側の要因から次の4点を理論的に明らかにした。

第一に、両道路網で冬の季節ほどさらには高緯度地域ほど逆光状況が増える。

第二に、両道路網で東西方向に横長な地域ほど逆光となる総トリップ長は伸びる。

第三に、直線型道路網では年間を通して様々な方向で低い割合で逆光が発生するが、格子型道路網では特定の月日のみに多くのトリップが同時に逆光となる。

第四に、直線型道路網と比べ格子型道路網では矩形都市の回転角度から受ける逆光への影響は大きい。

以上より、運転手の運転環境障害さらには自動運転での周辺監視障害となり得る逆光を、都市形態、道路網パターンなど都市側の地理的要因から特徴付けた。逆光は、沿道建物、街路樹、さらには天候など変動要素にも大きく左右される。今後、IoT 車両情報の進展により広域で大量に逆光データがサンプリングされる。車載カメラ車両に搭載された車室内のサンバイザーの可変回転軸の回転角度とその操作情報を収集することで逆光状況をリアルタイムで把握できる。変化する逆光情報を踏まえ、経路や出発時刻などに関して運転手や自動運転車を誘導することで安全運転に寄与できる。個人の運転経験や記憶が IoT 車両情報として地図情報に記録されることで、自動運転の安全性向上に貢献できる。都市計画・道路計画などへの利活用も可能である。自動車から収集される逆光発生情報は時刻と位置情報をタグ付けした IoT 車両情報として発信され、周辺車両や地図情報に伝達・蓄積される。智能化を進める自動運転車両への危険回避情報として有用である。本章で論じた逆光割合は先読み型の安全運転や経路選択に応用できる。

参考文献

- [5-1] Ghosh, B. (1951) Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, 43, 17-24.
- [5-2] Mathai, A. M. (1999) *Introduction to Geometrical Probability*. Gordon and Breach Science Publishers.
- [5-3] 太田勝敏 (2015) 自動運転が開く明日の交通社会を考えるーオートサピエンスの“素晴らしき新世界”, 特集『未来のクルマ』, 「交通工学」, 50 (2), 8-14.
- [5-4] 腰塚武志 (1978) 地域内距離. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 21 (2), 302-319.
- [5-5] 腰塚武志・小林純一 (1983) 道路距離と直線距離. 「都市計画論文集」, 18, 43-48.
- [5-6] 鈴木勉 (2006) 直交格子型道路網都市における斜線道路の距離短縮効果について. 「都市計画論文集」, 41 (2), 57-64.
- [5-7] 鶴原吉郎・仲森智博 (2014) 『自動運転ーライフスタイルから電気自動車まですべてを変える破壊的イノベーションー』. 日経 BP 社.
- [5-8] 長沢工 (1999) 『日の出・日の入りの計算ー天体の出没時刻の求め方』. 地人書館.
- [5-9] 布野修司・ヒメネスベルデボホアンラモン (2013) 『グリッド都市』. 京都大学学術出版会.
- [5-10] 萩田賢司・森健二 (2011) 太陽の眩しさが交通事故に与えた影響の分析, 「土木学会論文集 D3 (土木計画学)」, 67 (5), 1055-1062.
- [5-11] 萩田賢司・森健二 (2013a) 太陽の眩しさにより発生した交通事故の要因分析, 「交通工学」, 46 (4), 62-71.
- [5-12] 萩田賢司・森健二 (2013b) 各方向からの太陽の眩しさが運転者に与える影響, 「自動車技術会論文集」, 44 (4), 1079-1084.
- [5-13] 保坂明夫・青木啓二・津川定之 (2015) 『自動運転ーシステム構成と要素技術ー』. 森北出版.
- [5-14] 松田大樹・村田佳洋 (2015) 西日のグレア値を考慮した経路最適化, 「情報処理学会第 77 回全国大会講演論文集 (第 1 分冊)」, 377-378.
- [5-15] 桃田健史 (2016) 『IoT で激変する車ー自動車業界に押し寄せるモビリティ革命ー』. 洋泉社.

第 6 章

走行速度に関するモニタリング選択問題

-IoT 車両情報の利活用への成立モデルと社会受容性-

6.1 はじめに

自動運転を実現する上で、センサーから通信により遠隔から即時に自動車の走行状態を示すIoT車両情報の利活用が実現される日は近い。代表的なIoT車両情報として、絶対位置情報、走行速度、走行軌跡、操作情報、燃料残量などがある（高原，2016）。このような社会的計測機能を持つIoT車両情報を社会で共有し、利活用することでより安全、安心、効率的な社会を構築することが期待できる。

一方で、IoT車両情報は使用者の車両にあり、政府がその開示を常時強制することは困難である。しかしながら、使用者が情報開示に対して同意するならば困難はなくなる。したがって、情報開示に同意する経済的インセンティブと秘匿性を担保することが、IoT車両情報の社会的な利活用にとって重要な課題である。

情報を開示するということは、運転をモニタリング（観測・観察）されることを意味する。本章では、自分の運転が完全にモニタリングされることを完全モニタリングと呼び、一部の運転が観察されることを部分モニタリングと呼ぶ。そして、運転者が完全モニタリングか部分モニタリングを選択できる時、どの程度の経済的インセンティブを与えれば、完全モニタリングを選択するかという問題を本章では考える。IoT車両情報は全数計測は必要ではないが、部分計測である程度の分散度合いで収集することがその精度確保には必要となる。その意味でも完全モニタリングできる無作為抽出量と分散度合いが全体推定の精度確保には必要である。ここではその抽出量と分散は論じない。ここでは完全モニタリングの精度は担保されているものとする。

自動運転車両で走行する際に、IoT車両情報が常時観察されて記録できる場合とドライバー本人のみが承知して記録されない情報とでは大きな差異がある。本章が対象とする情報を明確にするために、まず情報の概念を整理する。

個人情報の保護に関する法律によると「生存する個人に関する情報であつて、当該情報に含まれる氏名、生年月日その他の記述等により特定の個人を識別できるもの（他の情報と容易に照合することができ、それにより特定の個人の識別することができることとなるものを含む。）」をいう。つまり、個人を特定できるような情報が個人情報である。個人情報の特徴としては、個人が同意するときのみ、自分自身の個人情報を第三者に開示することができるという点である。

IoT車両情報を分類する際に、「機密性」と「確認可能性」という概念が有用である。野口（1974）は、機密性のある情報を「ある情報を使用しつつ、ゼロの費用で、その内容を秘匿することが可能な場合」と定義し、確認可能な情報を「ある情報が（当初所有

者の) 許可なしに使用された場合, その事実(使用されたという事実, およびその使用者)が, ゼロの費用で探知できる」ような場合と定義している。

IoT車両情報は, 自動車の走行情報でありドライバーは自らの運転によりこれらの情報を生み出している。現時点の多くのドライバーにとってはドライブレコーダーなど一定の費用で記録可能であるが, 過去の情報は自ら記録する必要がある, 実際に記録されることは稀である。第三者にとって, これらの情報は目視あるいは恣意的な機械測定により確認可能であり, ナンバープレート登録や運転免許証により特定できれば個人情報となる。しかしながら, 第三者が走行している車両情報を得ることは非常に困難である。したがって, 機密性が高い。社会的に望ましくない走行を規制するために, 道路毎に規制速度が決められている。規制速度を守ってドライバーが運転しているか否かは, 警察の取り締まりにより, 速度超過したドライバーに罰金を課す。警察による取り締まりは, ドライバーの走行速度という車両走行情報を常にモニタリングすることはできない。このようにドライバーの車両情報が部分的にモニタリングされるような状況を, 本章では部分モニタリングと呼ぶ。

自動運転車両が多くの公道を走行する将来は, 自動車にはレーザー, レーダー, カメラなどの機能が装備され, 周辺監視情報は自らの車だけでなく, 近傍を走行する車と車車間通信で相互で共有することが可能になるであろう。さらに, それらを第三者に開示することも技術的には可能である。IoT車両情報が第三者にモニタリングされて共有される状況を, 完全モニタリングと呼ぶ。完全モニタリング下では, ドライバーが生み出す全ての情報は, ドライバーにも(ドライバーが同意した)第三者にも確認可能であり機密性はなくなる。IoT車両情報に関して, 政府とドライバー間で, 部分モニタリングでは情報が非対称であるが, 完全モニタリングでは情報が対称的になる。部分モニタリングでは観測不可能であった規制速度を守るような運転に対しても, 完全モニタリングではドライバーに経済的インセンティブを与えることが可能になる。

本章では, IoT車両情報である走行速度に着目して道路区間で定められる規制速度との関係を論じる。図6-1のように, ドライバーは部分モニタリングか完全モニタリングを選択でき, 政府は完全モニタリングが選択されるような経済的インセンティブを与えたいと考えている。本章では, 政府にとって最適な経済的インセンティブを求める。具体的には, 規制速度が外生的に与えられており, ドライバーは規制速度か(規制速度を超える)実勢速度のどちらかを選ぶ。また, ドライバーは部分モニタリングか完全モニタリングのいずれかを選ぶことができる。部分モニタリングが選択された場合には, ド

ライバーの走行速度がある確率で観察され、実勢速度の場合にはドライバーは政府に（外生的に与えられる）罰金を支払い、規制速度の場合にはドライバーと政府との間で金銭的授受は行われない。一方、完全モニタリングが選択された場合には、ドライバーの走行速度は完全に観察され、実勢速度の場合と規制速度の場合に金銭的授受（報酬あるいは罰金）が行われる。本章では、ドライバーが完全モニタリングを選ぶような金銭的授受（一般に、報酬と呼ぶ）を政府が設計する問題を考える。

社会的に望ましくない行動に対して規制を設け、規制に反する行動（犯罪とも呼ばれる）に対して罰金を課すことは、Becker（1968）により犯罪の経済学として分析が始まった。車両の規制速度に関しては、部分モニタリングの下での最適な規制速度について、例えば、Lee（1985）やRodriguez（1990）が分析を行っている。本章では、規制速度は外生的に与えられていると仮定し、その最適性は議論しない。むしろ、ドライバーの部分モニタリングと完全モニタリングの（内生的）選択という問題をモデル化し、金銭的授受を許容する枠組みの中で分析する。金銭的授受を許容したメカニズムデザインは、契約の経済学や情報の経済学とも呼ばれ、その文献は膨大である。例えば、代表的なテキストとして、Laffont and Martimort（2002）や伊藤（2003）が挙げられる。メカニズムデザインにおいても、モニタリング技術の内生的選択をモデル化、分析する意義は大きい。

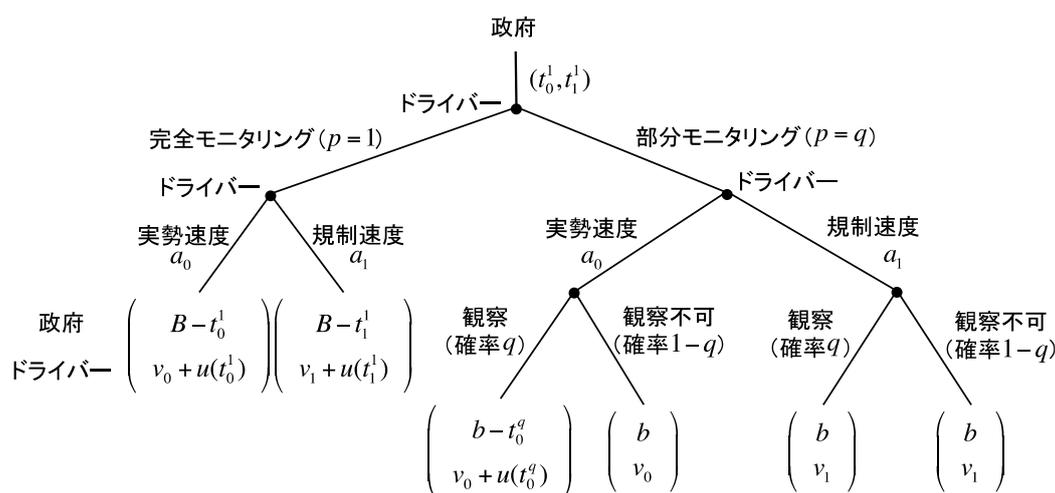


図6-1 モニタリング選択

6.2 制限速度規制を有する自動車の走行速度モデル

政府とドライバーという二つの経済主体を考える。ドライバーは、目的地に到着するために自動車を運転する。政府は負の外部性を伴う交通事故を考慮し、規制速度を設定する。政府は、ドライバーの行動を観察し規制速度を上回った場合は、ドライバーに罰金を課す。本章では、規制速度は外生的に与えられていると仮定する。

ドライバーが選択する運転行動として2種類のみを考える。一つは、規制速度を超えた高速運転で実勢速度と呼び a_0 により表す。もう一つは、規制速度を超えない低速運転で規制速度と呼び a_1 により表す。

ドライバーは、実勢速度 a_0 で運転することにより目的地への到着時間が早くなるが、規制速度 a_1 では目的地への到着時間が遅くなる。運転行動 α_k ($k \in \{0,1\}$) のときの到着時間に起因した効用を v_k と表す。運転しないという外部性選択の価値を0と基準化し、 $v_0 > v_1 > 0$ と仮定する。ドライバーは運転しないことよりも、運転をして目的地に行くことを好み、到着時間という観点からでは実勢速度による走行を規制速度による走行より好むとする。

政府はドライバーの運転行動をモニタリングする。任意の運転行動 α_k ($k \in \{0,1\}$) に対して、政府が α_k と観察できる確率を $p \in [0,1]$ としてモニタリング技術を表現する。 $p = 1$ のとき完全モニタリングと呼び、 $p < 1$ のとき部分モニタリングと呼ぶ。本章では、分析の簡略化のため、利用可能な部分モニタリング技術は、一つのみで外生的に与えられると仮定し q と表す。任意のモニタリング技術を $p \in \{q,1\}$ と記述する。

モニタリング技術 p の下で、ドライバーの運転行動 α_k が観察されたとき、政府はドライバーへの金銭移転を行う。この金銭移転を t_k^p と表す。 $t_k^p \geq 0$ のとき報酬であり、 $t_k^p < 0$ のときは罰金である。 t_k^p を（罰金であっても）報酬と呼ぶ。

現行のモニタリング技術は、部分モニタリングである。部分モニタリング ($p = q$) の下での政府からドライバーの金銭移転を特定化する。ドライバーの行動が観察されない場合は、金銭移転はない。また、規制速度 a_1 が観察されたときも金銭移転はない、つまり $t_1^q = 0$ である。一方、実勢速度 a_0 が観察されたときは、ドライバーは罰金を払う、つまり $t_0^q < 0$ である。本章では、分析の簡略化のため、部分モニタリングでの報酬 (t_0^q, t_1^q) は外生変数であると仮定する。この社会的最適報酬体系については、例えば、Becker (1968) を参照をされたい。さらに、報酬 (t_0^q, t_1^q) は $t_0^q < 0, t_1^q = 0$ を満足すると仮定する。

一方、完全モニタリング ($p=1$) 下では、政府はドライバーの行動を完全に観察できるので、実勢速度 a_0 に対しても規制速度 a_1 にも、それぞれ報酬 t_0^1 と t_1^1 を与えること

ができる。特に、部分モニタリングと異なり規制速度 a_1 に対してドライバーに報酬 t_1^1 を与えることができる。

政府のモニタリング技術の（報酬以外の）社会的評価を次のように仮定する。部分モニタリング下の社会的評価は b であり、完全モニタリング下の社会的評価は B とする。 $B > b$ とし、 B は b に比べ十分に大きいと仮定する。つまり、完全モニタリングの社会的評価は部分モニタリングよりも十分に大きい。完全モニタリング下では、走行速度ばかりでなく、それに伴う位置情報や交通量などが得られ、燃料消費を最小にするような経路選択の誘導、将来の道路投資など都市計画への利用などが期待される。このような側面を社会的評価 B は公益的価値として捉えている。

完全モニタリングへの移行は、ドライバーの運転行動が動的に常時観察されることになるので、政府は強制的に完全モニタリングを実行することは困難である。よって、本章では、ドライバーは運転行動に加えて、モニタリングを選択することができる状況を考える。

ドライバーが運転行動 a_k とモニタリング技術 p を選択した時のドライバーの効用を定式化する。運転行動が観察されない場合はドライバーの効用は v_k となる。一方、運転行動が観察された場合には、ドライバーの効用を $v_k + u(t_k^p)$ と表現する。ここで、 u は、金銭に対する評価を表す von Neumann and Morgenstern 型効用関数であり、連続関数であり、かつ厳密な増加関数で、 $u(0) = 0$ を満足すると仮定する。つまり、指示関数 I を用いて行動が観察された場合に $I = 1$ 、観察されなかった場合 $I = 0$ と定義すると、ドライバーの効用は、 $v_k + u(t_k^p)I$ と書くことができ、準線形効用関数を仮定する。

本章のモニタリング選択は図6-1で表される。まず、政府が完全モニタリングでの運転報酬 (t_0^1, t_1^1) を選択し、ドライバーが完全モニタリング $p = 1$ か部分モニタリングを $p = q$ 選択した後に、実勢速度 a_0 か規制速度 a_1 を選択する。

報酬 (t_0^q, t_1^q) を用いて部分モニタリングで実勢速度と規制速度が混在する道路交通から、完全モニタリングとその下での規制速度運転が選ばれるような道路交通へ (t_0^1, t_1^1) を用いて移行させることが目的であり、そのために政府にとって最適な報酬 (t_0^1, t_1^1) を求める。

6.3 IoT 車両情報のモニタリング選択問題（対象情報下）

6.3.1 部分モニタリングで実勢速度を選ぶドライバー

本章では、ドライバーに関わる外生変数 v_0, v_1 は、ドライバーと政府の間で共通知識と仮定する。ドライバーの速度に関する効用 v_0, v_1 は、ドライバーだけでなく、政府も知っているという対称情報下での分析を行う。非対称情報下での分析は次節で行う。

部分モニタリングにおいては、外生変数 t_0^q, v_0, v_1 の値によって、ドライバーは実勢速度あるいは規制速度を選ぶ。実勢速度 a_0 を選ぶ場合の期待効用は $v_0 + qu(t_0^q)$ 、規制速度 a_1 を選ぶ場合の（期待）効用は v_1 である。したがって、実勢速度を選ぶ場合は、

$$v_0 + qu(t_0^q) \geq v_1 \quad (6-1a)$$

$$v_1 \geq v_0 + qu(t_0^q) \quad (6-1b)$$

のときである。

部分モニタリングで実勢速度あるいは規制速度を選ぶドライバーそれぞれの場合に対して、完全モニタリングと規制速度が選ばれるような報酬体系を分析する。本章では、完全モニタリング下での実勢速度と規制速度の報酬 (t_0^1, t_1^1) を報酬体系と呼ぶ。

部分モニタリングで実勢速度を選ぶドライバーを考える。すなわち、式 (6-1a) が成り立つ。このようなドライバーに対して、完全モニタリング $p=1$ と規制速度 a_1 が選ばれるような報酬体系 (t_0^1, t_1^1) を求める。

まず、ドライバーが完全モニタリングを選択する条件としてインセンティブ条件を導入する。これは、部分モニタリングとその下での行動である実勢速度よりも、完全モニタリングと規制速度を好むことを要求する。すなわち、

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_0 + qu(t_0^q) \quad (6-2a)$$

である。左辺はドライバーが完全モニタリング $p=1$ と規制速度 a_1 を選ぶ際の効用であり、右辺は部分モニタリング $p=q$ で実勢速度 a_0 を選ぶ際の効用である。

次に、完全モニタリング下で、ドライバーが実勢速度よりも規制速度を選ぶという速度に関するインセンティブ条件を導入する。これは

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_0 + u(t_0^1) \quad (6-2b)$$

である。左辺はドライバーが規制速度 a_1 を選ぶ際の効用であり、右辺はドライバーが実勢速度 a_0 を選ぶ際の効用である。

最後の条件は、ドライバーが外生選択を選ぶよりも規制速度 a_1 を選ぶ方が少なくとも良いという個人の合理性条件である。つまり、

$$v_1 + u(t_1^1) \geq 0 \quad (6-2c)$$

である。

政府の問題は、3つの条件 (6-2a), (6-2b), (6-2c) の下で、利得 $B - t_1^1$ を最大にする報酬体系 (t_0^1, t_1^1) を求めることである。解を最適報酬体系と呼ぶ。

補題1 最適報酬体系において、 $t_1^1 \geq 0$ であり、個人合理性条件 (6-2c) は厳密な不等号で成立する。

証明 最適報酬体系を (t_0^1, t_1^1) と表す。式 (6-1a) と (6-2a) より、 $u(t_1^1) \geq 0$ 。よって、 u は厳密な増加関数であり、 $u(0) = 0$ であるから、となる。また、 $v_1 > 0$ であるから、 $v_1 + u(t_1^1) > 0$ が成り立つ。(証明終)

補題2 最適報酬体系において、モニタリング・インセンティブ条件 (6-2a) は等号で成り立つ。

証明 補題1より、個人合理性条件 (6-2c) は無視できる。さらに、モニタリング・インセンティブ条件 (6-2a) が成り立つ任意の t_1^1 に対して、政府の利得 $B - t_1^1$ を変えることなく、速度インセンティブ条件 (6-2b) が成り立つように、 t_0^1 を調整することができる。よって、政府の利得を最大化する最適報酬体系においては、モニタリング・インセンティブ条件 (6-2a) が等号で成り立つ。(証明終)

定理1 部分モニタリングで実勢速度で運転するドライバーに対する最適報酬体系 (t_0^1, t_1^1) は、

$$t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q)) < 0 \quad (6-3a)$$

$$t_1^1 = u^{-1}(v_0 - v_1 + qu(t_0^q)) \geq 0 \quad (6-3b)$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングと規制速度で運転する。ここで u^{-1} は u の逆関数である。特に、完全モニタリングでの実勢速度における(最適報酬としての)罰金 $|t_0^1|$ は、部分モニタリングでの罰金 $|t_0^q|$ よりも小さくできる。

定理1は、部分モニタリングにおいて実勢速度で運転するドライバーは、最適報酬体系の下で完全モニタリングを選び、そして規制速度で運転する。完全モニタリング時の最適報酬は、実勢速度 a_0 のとき、規制速度での罰金 $|t_0^q|$ よりも小さくすることができる。一方、規制速度では、罰金でなく報酬を与える必要がある。

証明 最適な t_1^1 は、補題2から明らかである。また、それが非負であることは補題1から得られる。

次に、最適な t_0^1 に関する証明をする。補題2からモニタリング・インセンティブ条件 (6-2a) が等式で成り立つことと、速度インセンティブ条件 (6-2b) ことより、この両式より $v_1 + u(t_1^1)$ を消去して、 $qu(t_0^q) \geq u(t_0^1)$ を得る。よって、関数 u は厳密な増加関数であるから、式 (6-3a) の $t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q))$ を得る。このとき、速度インセンティブ条件 (6-2b) が成り立つ。政府の問題で、 t_0^1 が現れるのは速度インセンティブ条件 (6-2b) だけであり、政府の利得 $(B - t_1^1)$ に影響を与えない。よって、 t_0^1 は、不等式 $t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q))$ を満たす限り、最適になる。また、仮定より $q > 0$, $t_0^q < 0$, $u(0) = 0$, u は増加関数であるから、 $u(t_0^q) < 0$ となり、 $u(t_0^q) < qu(t_0^q) < 0$ を得る。したがって、 $t_0^q < t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q)) < 0$, $|u^{-1}(qu(t_0^q))| \leq |t_0^1| < |t_0^q|$ つまりとなるように最適な t_0^1 を取ることができる。(証明終)

定理1 (6-3b) より、最適報酬 t_1^1 は、 t_0^q , q と v_0 それぞれに関して増加関数であり、 v_1 に関して減少関数である。すなわち、

1. 部分モニタリング技術 q の精度が高まれば高まるほど、
2. 実勢速度の効用 v_0 が高ければ高いほど、
3. 罰金 $|t_0^q|$ の額が低ければ低いほど、
4. 規制速度の効用 v_1 が小さければ小さいほど、

完全モニタリングでドライバーが規制速度で走行した場合の報酬 t_1^1 は、高くなる。

系1 最適報酬体系を (t_0^1, t_1^1) とする。政府は、

$$0 \leq t_1^1 \leq B - b + t_0^q, \text{ つまり}$$

$$0 \leq u^{-1}(v_0 - v_1 + qu(t_0^q)) \leq B - b + t_0^q$$

のとき、部分モニタリングから、ドライバー完全モニタリングと規制速度を促すような最適報酬体系を好む。その逆も成り立つ。

よって、部分モニタリングから完全モニタリングへの移行は、社会的評価の変化 $B - b$ が十分高いことを要求する。

証明 政府の利得は、部分モニタリングで $b - t_0^q$ であり、ドライバーが完全モニタリングと規制速度を選んだ下では $B - t_1^1$ である。よって、一つ目の不等式が得られ、**定理1**より二つ目の不等式が得られる。（証明終）

6.3.2 部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバー

次に、部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバーの場合を考える。すなわち、式**(6-1b)**が成り立つ。このようなドライバーに対して、完全モニタリング $p = 1$ と規制速度 a_1 が選ばれるような報酬 (t_0^1, t_1^1) を求める。

前節で扱った場合と同様に、報酬体系は、モニタリングに関するインセンティブ条件、速度に関するインセンティブ条件、個人の合理性条件を満たす必要がある。前節での各条件の式が異なるのは、モニタリングに関するインセンティブ条件だけである。

モニタリングに関するインセンティブ条件は、ドライバーが完全モニタリングを部分モニタリングよりも好むという条件である。本章では、報酬体系により完全モニタリングで規制速度を選ぶ。一方、部分モニタリングでは、本節の仮定、規制速度を選ぶ。したがって、モニタリング・インセンティブ条件は

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_1 \tag{6-4a}$$

となる。左辺はドライバーが完全モニタリング $p = 1$ と規制速度 a_1 を選ぶ際の効用であり、右辺は部分モニタリング $p = q$ で規制速度 a_1 を選ぶ際の効用である。

政府の問題は、3つの条件**(6-4a)**、**(6-2b)**、**(6-2c)**の下で、利得 $B - t_1^1$ を最大にする報酬体系 (t_0^1, t_1^1) を求めることである。ここでも解を最適報酬体系と呼ぶ。

補題3 $t_1^1 \geq 0$ ならば、モニタリング・インセンティブ条件 **(6-4a)** が成立する。

証明 u が増加関数であるから、明らかである。(証明終)

補題4 最適報酬体系において、 $t_1^1 \geq 0$ であり、個人合理性条件 **(6-2c)** は厳密な不等号で成立する。

証明 最適報酬を (t_0^1, t_1^1) と表す。モニタリング・インセンティブ条件 **(6-4a)** より、 $u(t_1^1) \geq 0$ 。よって、 u は厳密な増加関数であり、 $u(0) = 0$ であるから、 $t_1^1 \geq 0$ となる。また、 $v_1 > 0$ であるから、 $v_1 + u(t_1^1) > 0$ が成り立つ。(証明終)

定理2 部分モニタリングで規制速度で運転するドライバーに対する最適報酬体系 (t_0^1, t_1^1) は、

$$t_0^1 \leq u^{-1}(v_1 - v_0) < 0 \quad (6-5a)$$

$$t_1^1 = 0 \quad (6-5b)$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングと規制速度を選ぶ。ここで u^{-1} は u の逆関数である。特に、完全モニタリングでの実勢速度における(最適報酬としての)罰金 $|t_0^1|$ は、部分モニタリングでの罰金 $|t_0^q|$ よりも小さくできる。

定理2は、部分モニタリングにおいて規制速度で運転するドライバーは、最適報酬の下で完全モニタリングを選び、そして規制速度で運転をする。完全モニタリング時の最適報酬は、実勢速度 a_0 のとき、規制速度での罰金 $|t_0^q|$ よりも小さくすることができる。一方、規制速度での報酬はゼロである。

証明 まず、式 **(6-5b)** を示す。**補題4**より、個人合理性条件 **(6-2c)** は無視できる。また、**補題4**より、最適報酬 t_1^1 の候補は0である。よって、 $t_1^1 = 0$ のとき、**補題3**より、モニタリングに関するインセンティブ条件 **(6-4a)** は成り立つから、速度に関するインセンティブ条件 **(6-2b)** が成り立つような t_0^1 が存在することを示せばよい。

$$\begin{aligned} v_1 + u(t_1^1) &= v_1 (\because t_1^1 = 0, u(0) = 0) \\ &\geq v_0 + qu(t_0^q) (\because (1b)) \\ &> v_0 + u(t_0^q) (\because u(t_0^q) < 0, q > 0) \end{aligned}$$

上記で、 $u(t_0^q) < 0$ は、 $t_0^q < 0, u(0) = 0$ と u が増加関数であることによる。したがって、 $t_0^1 = t_0^q$ のとき、速度に関するインセンティブ条件 **(6-2b)** が成り立つ。したがって、最適報酬では $t_1^1 = 0$ 、つまり式 **(6-5b)** が成り立つ。

次に、式 **(6-5a)**、つまり最適な t_0^1 に関する証明をする。政府の問題で、 t_0^1 が現れるのは速度に関するインセンティブ条件 **(6-2b)** だけであり、政府の利得 $(B - t_1^1)$ に影響を与えない。よって、先ほど示した最適報酬 $t_1^1 = 0$ を速度インセンティブ条件 **(6-2b)** に代入して、 $v_1 \geq v_0 + u(t_0^1)$ が成り立つ。よって、 $t_0^1 \leq u^{-1}(v_1 - v_0)$ を満たす t_0^1 が最適となる。

また、式 (6-1b) より、 $u(t_0^q) < 0$ であるから、 $u(t_0^q) < qu(t_0^q) \leq v_1 - v_0$ を得る。よって、 $t_0^q < t_0^1 \leq u^{-1}(v_1 - v_0)$ 、つまり $|u^{-1}(v_1 - v_0)| \leq t_0^1 < |t_0^q|$ となるように最適な t_0^1 を取ることができる。(証明終)

系2 最適報酬体系を (t_0^1, t_1^1) とする。政府は、

$$0 \leq B - b + t_0^q$$

のとき、部分モニタリングから、ドライバーが完全モニタリングと規制速度を促すような最適報酬体系を好む。その逆も成り立つ。

証明 政府の利得は、部分モニタリングで $b - t_0^q$ であり、ドライバーが完全モニタリングと規制速度を選んだ下では $B - t_1^1 = B$ である(定理2より)。よって、**系2**が得られる。(証明終)

6.4. IoT 車両情報のモニタリング選択問題 (非対象情報下)

前節では、ドライバーの速度に関する効用 v_0, v_1 は、ドライバーだけでなく、政府も知っているという対称情報下での問題を扱った。本章では、実勢速度に関わる効用 v_0 は、ドライバーは知っているが、政府は確率的にしか分からないという非対称情報下での問題を定式化し、分析を行う。分析の簡略化のため、規制速度に関わる効用 v_1 は、引き続き共通知識であると仮定する。

ドライバーには、2つのタイプがある。実勢速度に関わる効用 v_0 が、 v_{0H} で高いタイプ(高タイプと呼ぶ)、そして v_{0L} で低いタイプ(低タイプと呼ぶ)である。タイプは

私的情報であり，ドライバーは自分のタイプを知っている．一方，政府は，ドライバーがどのタイプであるか確率的にしか分からない．つまり，政府は，確率 α でドライバーは高タイプ，確率 $1-\alpha$ でドライバーは低タイプであることを知っている．ここで， $0 < \alpha < 1$ であると仮定する．また，

$$v_{0L} < v_{0H}, \quad (6-6a)$$

$$v_1 \leq v_{0H} + qu(t_0^q), \quad (6-6b)$$

$$v_{0L} + qu(t_0^q) \leq v_1, \quad (6-6c)$$

とする．すなわち，部分モニタリング下において，式(6-6b)より高タイプは実勢速度を選び，式(6-6c)より低タイプは規制速度を選ぶと仮定する．

報酬体系 (t_0^1, t_1^1) は，タイプ別に設定することにより，政府は利得を増やすことも可能かもしれない．よって，高タイプへの報酬を (t_{0H}^1, t_{1H}^1) ，低タイプへの報酬を (t_{0L}^1, t_{1L}^1) と表す．

ドライバーのそれぞれのタイプが完全モニタリング $p=1$ と規制速度 a_1 を選ぶような報酬体系 $\{(t_{0H}^1, t_{1H}^1), (t_{0L}^1, t_{1L}^1)\}$ を求める．

まず，報酬体系が満たすタイプに関するインセンティブ条件を導入する．

これは，完全モニタリング $p=1$ の下で，各運転行動 a_k に対してそれぞれのタイプが自分のタイプを偽って報告しないことを要求する．まず，規制速度 a_0 に対して，

$$v_{0L} + u(t_{0L}^1) \geq v_{0L} + u(t_{0H}^1) \quad (6-7a)$$

$$v_{0H} + u(t_{0H}^1) \geq v_{0H} + u(t_{0L}^1) \quad (6-7b)$$

となる．式(6-7a)は低タイプ，式(6-7b)は高タイプである．一方，実勢速度 a_1 に対して，

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq v_1 + u(t_{1H}^1) \quad (6-7c)$$

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq v_1 + u(t_{1L}^1) \quad (6-7d)$$

となる．式(6-7c)は低タイプ，式(6-7d)は高タイプである．

次に，完全モニタリングが選択される条件であるモニタリングに関するインセンティブ条件を導入する．これは，各タイプが，部分モニタリングとその運転行動よりも，完全モニタリングと規制速度を選択する条件である．まず，低タイプに対して，

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq v_1 \quad (6-8a)$$

となる．式(6-6c)より，低タイプは部分モニタリングでは規制速度を選ぶので上のようになる．また，高タイプに対して，

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq v_{0H} + qu(t_0^q) \quad (6-8b)$$

となる。式 (6-6b) より、高タイプは部分モニタリングで実勢速度を選ぶので上のようになる。

さらに、完全モニタリング下で、各タイプが実勢速度よりも規制速度を選ぶという速度に関するインセンティブ条件を導入する。低タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq v_{0L} + u(t_{0L}^1) \quad (6-9a)$$

となる。そして、高タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq v_{0H} + u(t_{0H}^1) \quad (6-9b)$$

となる。

最後に、各タイプが完全モニタリングを選択した下で外生選択よりも規制速度を選ぶという個人合理性を導入する。低タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq 0 \quad (6-10a)$$

となり、高タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq 0 \quad (6-10b)$$

となる。

ドライバーが完全モニタリングと規制速度を選択したときの政府の利得は

$$\alpha(B - t_{1H}^1) + (1 - \alpha)(B - t_{1L}^1) \quad (6-11)$$

となる。

政府の問題は、タイプ・インセンティブ条件 (6-7a) , (6-7d) , モニタリング・インセンティブ条件 (6-8a) , (6-8b) , 速度インセンティブ条件 (6-9a) , (6-9b) , 個人合理性条件 (6-10a) , (6-10b) を制約として、式 (6-11) で表される利得を最大にするような報酬体系 $\{(t_{0H}^1, t_{1H}^1), (t_{0L}^1, t_{1L}^1)\}$ を求めることである。解を最適報酬体系と呼ぶ。

補題5 最適報酬体系では, $t_{0L}^1 = t_{0H}^1$, $t_{1L}^1 = t_{1H}^1$ が成り立つ.

補題5は, 政府は報酬体系を通じて各タイプを識別できないことを示しており, タイプ・インセンティブ条件 (6-7a) - (6-7d) から容易に証明できる.

補題5を用いて, $t_0^1 := t_{0L}^1 = t_{0H}^1$, $t_1^1 := t_{1L}^1 = t_{1H}^1$ と表し, 報酬 (t_0^1, t_1^1) を報酬体系と呼ぶ. よって, 政府の問題を次のように簡略化できる.

- 目的関数: $B - t_1^1$.
- モニタリング・インセンティブ条件:

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_1 \quad (6-8a')$$

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_{0H} + qu(t_0^q) \quad (6-8b')$$

- 速度インセンティブ条件:

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_{0L} + u(t_0^1) \quad (6-9a')$$

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_{0H} + u(t_0^1) \quad (6-9b')$$

- 個人合理性条件:

$$v_1 + u(t_1^1) \geq 0 \quad (6-10')$$

最適報酬体系を求めるのに有用な補題を証明しよう.

補題6 式 (6-8b') ならば, 式 (6-8a') が成り立つ. また, 式 (6-9b') ならば, 式 (6-9a') が成り立つ.

証明 前半の主張は, 式 (6-6b) と式 (6-8b') より明らかである. 後半の主張は, 式 (6-6a) と式 (9b') より明らかである. (証明終)

補題6により, 非対称情報下での問題は, モニタリング・インセンティブ条件は式 (6-8b') だけ, 速度インセンティブ条件は式 (6-9b') だけ考えれば良い. したがって, 非対称情報下での問題は, 3つの条件 (6-8b'), (6-9b'), (6-10') の下で, 利得 $B - t_1^1$ を最大にする報酬体系 (t_0^1, t_1^1) を求めることである. よって, この問題は, $v_{0H} = v$ として, ドライバーが部分モニタリングで実勢速度を選ぶような対称情報下の問題 (3.1章) と同じになる. したがって, 次の結果を得る.

定理3 非対称情報下での最適報酬体系 (t_0^1, t_1^1) は,

$$t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q)) < 0 \quad (6-12a)$$

$$t_1^1 = u^{-1}(v_{0H} - v_1 + qu(t_0^q)) \geq 0 \quad (6-12b)$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングと規制速度で運転する。ここで u^{-1} は u の逆関数である。特に、完全モニタリングでの実勢速度における（最適報酬としての）罰金 $|t_0^1|$ は、部分モニタリングでの罰金 $|t_0^q|$ よりも小さくできる。

したがって、**定理1**と**定理3**より、非対称情報下での最適報酬体系は、対称情報下での高タイプと政府が既知のときの最適報酬体系と同じになることが分かる。つまり、政府は、低タイプを除外して、高タイプ（部分モニタリング下で実勢速度で走行するタイプ）だけに対応すればよいことがわかる。

系3 最適報酬体系を (t_0^1, t_1^1) とする。政府は,

$$0 \leq t_1^1 \leq B - b + t_0^q, \text{ つまり}$$

$$0 \leq u^{-1}(v_{0H} - v_1 + qu(t_0^q)) \leq B - b + t_0^q$$

のとき、部分モニタリングから、ドライバー完全モニタリングと規制速度を促すような最適報酬体系を好む。その逆も成り立つ。

この証明は**系1**と同様である。部分モニタリングから完全モニタリングへの移行は、社会的評価の変化 $B - b$ が十分高いことが担保される場合に実現する。

6.5 おわりに

本章では、現行の部分モニタリングだけでなく、ドライバーに完全モニタリングという選択肢が与えられている下で、政府がドライバーの完全モニタリング選択を誘導するような報酬体系を求めた。その結果、**定理3**で示したように、完全モニタリング下での規制速度には報酬をドライバーに与え、実勢速度には罰金を課すことで、政府の試みは達成できることを証明した。IoT 車両情報を社会公益的な利活用を進める上で、完全モニタリングを選択する社会制度の設計が可能であることを明示した。しかしながら、その利活用の鍵が社会受容性（アクセプタンス）にあることは明らかである。人間を中心としたよりよい社会とするためにデータの利活用がなされ、個人個人が生き生きと暮らしていくための社会基盤に必要であると認められて社会に浸透する。

本章では、部分モニタリングから完全モニタリングへの移行に関する社会的評価 ($B - b$) は十分に大きいと仮定した。この社会的評価の大きさが社会受容性に基づくものである。社会的評価については普遍的なものから地域や時刻に応じて変化するものがある。未来の社会基盤づくりにおいては、本章で定義した社会的評価を地域特性にまで踏み込んで理論と実証的検証が必要になる。

規制速度は外生的に与えられていたが、今後のIoT車両を保有する自動運転車両の社会実装、浸透の実現性を考えると、道路交通システムの制御方式やそれに関わる社会システムから内生的に可変性を有することが予見される。本論で検討した動的なIoT車両情報である走行情報と規制速度や実勢速度との関係はその具体的な先行研究であり、動的な交通流と安全性を担保した道路毎の動的な規制速度の可変性検討や将来の隊列走行時の慣性量を考慮した信号制御などさまざまなことがらが提起され始めている(高原, 2016)。これらは今後の課題である。安全、安心、効率的な社会にするための社会的計測機能を果たすIoT車両情報の利活用に関する研究の社会的意義は大きい。

本章ではその利活用に際しての社会応用に関する基礎理論を明らかにした。同様の考え方で利活用における事業モデルをの成立性検討が可能である。事業者と情報提供者に置換して完全モニタリングと部分モニタリングにおける事業モデルを報酬と罰金を売上と販促金に見立てるなど用途は広がる。道路交通に限定しても、完全モニタリングのインセンティブは交通違反における反則金や自動車の保険料率に留まらない。いずれ道路交通法や保険制度という社会制度に影響を与えることが予測される。

モニタリング選択とインセンティブに関連する社会制度と受容性(アクセプタンス)は、これからのIoT車両情報の利活用実現に向けた最大の鍵である。

参考文献

- [6-1] Becker, G. S (1968) Crime and punishment: An economic approach, *Journal of Political Economy*, 76 (2), 169 - 217.
- [6-2] Laffont, J.-J. and D. Martimort (2002) *The Theory of Incentives : The Principal - Agent Model*, Princeton University Press.
- [6-3] Lee, D. R. (1985) Policing cost, evasion cost, and the optimal speed limit, *Southern Economic Journal*, 34-45.
- [6-4] Rodriguez, R. J (1990) Penalty schedules and the optimal speed limit, *Estern Economic Journal*, 16 (1) , 59-64.
- [6-5] 伊藤秀史 (2003) 『契約の経済理論』, 有斐閣.
- [6-6] 総務省 (2015) 『平成27年版情報通信白書』.
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h27.html>
- [6-7] 高原勇 (2016) 『IoT車両情報の社会応用に向けて』, 内閣府システム基盤技術検討会 (第3回) 議事録.
- [6-8] 野口悠紀雄 (1974) 『情報の経済理論』, 東洋経済新報社.
- [6-9] N. Gregory Mankiw (1997) . *Principles of Economics*. South-Western Pub. (N.グ
レゴリー マンキュー 足立英之・柳川隆・石川城太・小川英治・地主敏樹・中
馬 宏之 (訳) (2000) . マンキュー経済学Iミクロ編 東洋経済新報社)

第7章

結論と今後の課題

—地域未来の社会基盤づくりへの応用と産学連携のあり方—

7.1 結論

本論文では、序論に示した論文の構成に則して、第1章から第7章まで研究を進めた結果、以下のような研究成果を得た。

第1章では、IoT車両情報の定義をした上で、豊田市実証実験で取得したサンプリングデータをIoT車両情報と見立てながら社会応用の可能性について論じた。第5期科学技術基本計画の第2章「未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組」で重要な施策としてSociety5.0の実現の社会応用について理論補完を行うことができた。また、IoT車両情報の社会計測機能の有用性とこれからの自動車の社会的共通資本としての発展性を示すことができた。

第2章では、車両特性が保証された大量の燃費データを解析し、実測燃費は地域の使用環境でカタログ値と有意に異なることを数値で示した。気象環境で実測燃費の差とバラツキが大きいことを明確にした上で、IoT車両情報による低燃費運転支援で実測燃費を改善する速度燃費曲線の理論化とその導出を行った。燃費解析にIoT車両情報による実測燃費の有用性と地域特性として温暖多降雨地域で優先度と支援効果の期待値が大きいことを示した。

第3章では航続可能距離データを用いて、被災時において自動車が移動できる地理的範囲さらには燃料残量ゼロまでの日数を求めた。特に、待機と待避・避難との関係を可視化した上で、被災想定地域外への到達不可能率を算出した。地域が保有する自動車の合算値が正規分布に従う安定した数値であることを確認して被災地での自動車のエネルギー供給の可能性を明示した。日本全体で自動車に残っているエネルギー量は、一世帯あたりの電力消費量換算で20日分に相応することなどを示した。自動車を移動分散型エネルギーとして捉えた場合の燃料残量の精度保証と空間分布を理論的に明らかにした。

第4章では移動式水素ステーションの運用だけではなく、給油過疎地域などで認められた場合の効果を含めて、SSへの追加アクセス距離をどの程度削減できるかについて一次元空間モデルを通して理論化した。巡回サービスのパターンを工夫することで、追加距離を大幅に削減できることを証明した。また、順シフトが逆シフトと比較して2倍効率的であることを導いた。次に、移動式SSの配備場所は給油頻度を見極めてゾーン数を決め、ゾーン中心だけの配備が有効であることを導いた。最後に、移動式は利用者の時間を制約するが、定置式よりも迂回給油を減らせるためアクセスに優れたサービスを提供できることを数値的に示せた。

第5章では道路と太陽の相対位置関係から逆光となるトリップを抽出する空間モデ

ルを提示して理論化した。第一に、両道路網で冬の季節ほどさらには高緯度地域ほど逆光状況が増える。第二に、両道路網で東西方向に横長な地域ほど逆光となる総トリップ長は伸びる。第三に、直線型道路網では年間を通して様々な方向で低い割合で逆光が発生するが、格子型道路網では特定の月日のみに多くのトリップが同時に逆光となる。第四に、直線型道路網と比べ格子型道路網では矩形都市の回転角度から受ける逆光への影響は大きい。以上より、運転手の運転環境障害さらには自動運転での周辺監視障害となり得る逆光を、都市形態、道路網パターンなど都市側の地理的要因から特徴付けた。

第6章では、ドライバーに選択肢が与えられている下で、政府がドライバーの完全モニタリング選択を誘導するような報酬体系を求めた結果、完全モニタリング下での規制速度には報酬をドライバーに与え、実勢速度には罰金を課すことで、政府の試みは達成できることを証明した。IoT車両情報を社会公益的な利活用を進める上で、完全モニタリングを選択する社会制度の設計が可能であることを明示した。しかしながら、その利活用の鍵が社会受容性(アクセプタンス)にあることを問題提起している。人間を中心としたよりよい社会とするためにデータの利活用がなされ、個人個人が生き生きと暮らしていくための社会基盤に必要であると認められて社会に浸透する。モニタリング選択とインセンティブに関連する社会制度と受容性(アクセプタンス)はこれからのIoT車両情報の利活用実現に向けた最大の鍵である。

本論文を通して、IoT車両情報の代表的なデータから安全性や燃費、さらには道路交通、インフラ監視、防災防犯などの広範な社会応用と新たな社会サービス創出にIoT車両情報の有用性を明らかにすることができた。車両センサーの稼働状態情報は安全運転の担保だけでなく、遠隔からその周辺監視状況を共有できる。地域での狭域災害の情報になる。走行情報は交通事故時の原因追求で再発防止となり、危険情報は未然防止になる。実測燃費の観測から地域特性と外部環境に即応する低燃費運転支援を実現する。IoT車両情報の社会応用は可能性に満ちている。

次節以降の今後の課題には地域未来の社会基盤づくりへの応用と産学連携への取り組みについて記している。天然資源の少ない日本であるが、先人から継承する規範と知恵による優れた行動様式がある。現在の営みを映すIoT車両情報のような良質なデータは日本の未来資源である。社会工学の視点を入れて、持続的な社会基盤づくりと未来産業形成にデータ利活用による社会応用を加速すべきである。

7.2 今後の課題

7.2.1 地域未来の社会基盤づくりへの応用

個人個人がいきいきと暮らせる超スマート社会の実現が Society5.0 の基本コンセプトである。サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合，経済的発展と社会的課題の解決をすることで人間を中心とした新たな社会を築くことにある。地方と都市部の情報格差は縮小して即時・遠隔・広域に共有できるシステム基盤が整備される。これまでには困難とされた時空間制約の解放が進み，地域未来の存立基盤が築かれ新たな産業形成が期待される。

自動運転は Society5.0 の実現に貢献できる重要な技術革新である。自動運転を基軸とする地域未来のエネルギーバリューチェーンや地域包括ケアや自動運転農機を用いる農業へのユースケースで役立つ。同時にサイバー空間ではその利用状況が IoT 車両情報として蓄積分析されて，次なる利用機会ではより優れた行動様式となるように智能化が進展する。日本は少子高齢化・過疎化の進行・産業競争力の低下など社会課題に直面している。社会課題は連鎖する。医療費を始めとする社会保障費の増大，インフラの老朽化，経済の低成長と財政赤字である。特に地方ではその存立基盤の維持が困難になる恐れが懸念されている。

日本には自然豊かな原風景を残す地方や地域が現存している。産業形成が困難な農業・保育・防災など地域未来の存立基盤を確かなものとする社会基盤づくりは Society5.0 で取り組む猶予なき重点テーマである。人と自然が共生する地域未来づくりは一朝一夕に叶うことではない。長期視点で地域未来の存立基盤を確保しながら，経済的成長と人材育成を実現する拠点形成で持続的な社会を築くことが必要である。持続的な社会を引き継ぐのは人である。地域の若手人材育成に注力すべきである。こらからの若い世代にとって必要な社会基盤は何であるのか。地方の直面する課題に技術革新で解決ができるか。その問いに真摯に考え対応していくことが重要である。

未来の社会基盤づくりは、国家と自治体として行政の職務である。大学は教育と研究の両面で社会基盤を担う責務がある。産業界には雇用と納税により社会基盤を支えて，よい製品や社会サービスで社会基盤を担う責務がある。産学官にそれぞれに未来の社会基盤に責務があることは論じるまでもない。地域未来の基盤づくりや拠点化において従来の時空間制約にとらわれずに新たな技術革新で考え直す時期を迎えているのではないだろうか。Society5.0 実現により時空間制約が解放された新たな地域未来の社会基盤づくりへ IoT 車両情報を始めとするデータ利活用を社会応用すべきである。

今後の少子高齢化の進行を踏まえ、中心地に拠点の核（ハブ）として都市機能を集約して、従来からの生活拠点としての核（ハブ）と連携（スポーク）でコンパクトシティの構築を図るハブアンドスポーク型の都市計画が複数の自治体で提唱されている。直近では東京都市計整備局による首都圏広域地方計画（平成 28 年 3 月）がある。これまでの交通ネットワークを最大限活用しながらも新たな括りで広域連携（スポーク）を図り新たな対流を創出する取組みである。

つくば市地域交通網形成計画（平成 28 年 4 月）は持続可能な公共交通網の実現と周辺自治体と連携（スポーク）しながら多極（ハブ）ネットワーク型でコンパクトシティの構築を取組む構想である。いずれも未来を見据えた構想である。

自動運転がハブをつなぐスポークで有用に活用されると思われる。一方で、自動運転の社会実装を進める米国ではどうであろう。自動運転により快適な移動が担保されれば、域内の移動への抵抗感は小さくなり核（ハブ）自体がスポークを含みながら、さらに巨大化するという研究や都市計画がある。国土の広さの違いがあるため単純な比較は意味がないが、集中投資による利便性の高度化などの視点で新たな発想で基盤づくりの研究と実現が予想される。

ハブアンドスポーク型都市構造を地方の拠点として考えて地域とする。この地域内とさらに周辺地域の IoT 車両情報を観測すると、日常的な交通実態と今後のハブアンドスポークの需要予測ができるのではないだろうか。自動車のそれぞれの移動をマイクロなスポークと捉えたビッグデータの蓄積と分析が可能になる。IoT 車両情報から将来のスポーク容量と長さ（道路交通の需要）から都市計画の必要条件と十分条件を検証することができるのではないだろうか。このような仮説を起点に、IoT 車両情報でさまざまな需要計測をすることから未来地域の社会基盤づくりへの応用を現在計画している。

IoT 車両情報による社会計測を地域の住民ならびに自治体との連携を通して、移動情報（通勤通学情報・目的地情報）、地域包括ケア（保育・医療・介護の送迎・頻度情報）などの地域計測のビッグデータから、あるべき社会基盤とありたい社会基盤像を描いていく。その実現に必要な技術は産業界との共同研究により先進技術を反映した製品として試供され、地域で効果実証がなされる過程で製品化の完成度が上がり地域に実装され、社会課題の解決につながる。そのようなサイクルが回る取り組みへの応用である。日本経済団体連合の未来産業・技術委員会 Society5.0 実現部会での地方 WG と産業競争力懇談会における地域未来の社会基盤づくりを推進テーマとする活動計画を準備している。IoT 車両情報を主軸にし、補完的にスマートフォンによる位置情報、衛星からの撮影情

報を活用することで、地域の社会計測データとして収集して人工知能センターとデータ共有を図る。サイバー空間と現実フィジカル空間の融合で Society5.0 の実現を先導したい。

国内の人口減少から想起される労働力、インフラ維持、治安への不安に対して、国外では人口増加によるエネルギー・食料・飲料水需要が懸念されている。現在の日本は先人から引き継ぐ知恵と規範から成る優れた行動様式と伝統文化がある。現代の知性をデータに分解・蓄積して個人の知性を社会公益に有用な知性へと共有し、循環させて世界に誇れる社会基盤を有する地域未来を築く機会である。

一方で、国家としての科学技術に対する相対的予算不足は否めない。国家戦略としての取り組みの強化が必要である。人工知能・生命科学に代表される科学技術の急激な進展で科学技術とデータ争奪は既に始まっているとあって過言ではないだろう。

その中で、日本の国家的なイノベーション創造システムとして政府、官庁、自治体、大学、国立研究所、産業界による本格的な産学官連携が深化持続することで未来への資産となるようにいち早く行動すべきである。文部科学省が日本再興戦略 2016（平成 28 年 6 月 2 日閣議決定）を踏まえて本格的な産学官連携の実現に向けたガイドラインを策定することになっている。策定に係る産学官連携進化ワーキンググループに構成員として参画したが、オープンイノベーションの実現と発展を心から期待したい。持続的な成長と地域社会の自律的な発展には日本の地方での労働生産性の向上と国内市場喚起が必須である。自律的に持続する地域未来の社会基盤づくりに IoT 車両情報と自動運転の社会応用を推進するべきである。

7.2.2 産学官連携と IoT 車両情報の利活用

日本の成長戦略の中核である Society5.0 は都市や地域・ものづくり・健康医療・インフラ等を取り巻く構造的な社会課題の解決を通して未来の社会基盤づくりに貢献することにある。人間を中心とした個人個人がいきいきと快適に暮らせる社会を築くことが目指すべき考え方である。その好循環による持続性を担保するには経済構造改革とイノベーション創出の仕組みが不可欠である。

Society5.0 実現への投資を起点に本格的な産学官プロジェクトが発足する。本格的なプロジェクトとは日本の未来を見据えた長期・協調領域的な視点で、経済・社会的課題の解決を図り社会実装を出口とする研究開発である。この課題解決と社会実装を通して大学・研究所等の研究開発力の向上が進み、イノベーションが創造されて国内 GDP600

兆円経済を早期に実現していく。産業界の収益増による税収増が新たな投資原資となり好循環が始まる。経済構造改革とイノベーションの関係性の一端を示す循環である。

政府の未来投資会議はじめ総合科学技術・イノベーション会議では政府研究開発投資の拡充が議論されている。科学技術関係予算の強化は重要な役割を果たす。文部科学省の調査によると、2000年度から2014年にかけて各国の政府研究開発予算は、中国は10倍、韓国は4.5倍、米国・ドイツ・英国は約1.5倍に拡大しているが、日本は約1.1倍に留まっている。無論、予算規模の多寡だけでイノベーション創造の多寡が決まるわけではないが、未来へ向けた投資的視点で考えれば優勢な状況とはいえない。限られた資源を有効に使って付加価値を創出することは我が国の得意とするところである。産学官による先人は米国やドイツなど科学技術で産業形成と拠点化による社会基盤づくりを有機的に進めるお手本は既に存在している。

また政府が府省連携と出口志向で推進するSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）など先行する好事例が進展している。複数企業群から有用な先進技術と人材と資金を大学や研究開発法人に結集して、オープンラボによる拠点化と協調領域における未来探索の拡大への期待は大きい。今こそ新たな産学官連携としてその具体化の先導を図るべきである。

地域未来の社会基盤づくりを照準とするオープンラボとして未来社会工学開発研究センターが筑波大学に設置が検討されている（平成29年度）。同大学の社会工学域を中核としながら、関連研究者と人工知能センターなどのバックアップにより学際性豊かな研究体制を整備する。複数企業群と実装に至る本格的な共同研究を想定自治体を含めて着手する。2050年の地域未来を見据えた地域の存立基盤として農業・保育・防災を重点研究テーマとして設定する。

その解決の糸口となる社会計測の手段として本章のIoT車両情報を主軸として利用する。スマートフォンと小型ロボットなどコミュニケーション型のパーソナル情報や衛星情報も補完的に利用する。いずれも使用者の理解と協力を得てサイバー空間情報として収集蓄積する。自動運転（レベル別）による送迎保育、病児保育さらには農機応用や被災時の避難応用がフィジカル空間での代表的な実証実験である。

これらの社会計測と社会実証の結果は筑波大学内に発足する人工知能センターで分析と知能化を行う。さらに、データプラットフォーム拠点として整備を進める国立研究開発法人の人工知能センターとの整備データの共有を図るべきと考えている。オープンラボ発の質の高い大量の研究データの価値を利活用するためにはデータ主導型研究に

利用しやすい形で整理したデータベースにしておくことが当然である。人工知能技術を活用していくには、解析に用いる知能化技術のみならず高品質で大量の整備データが必須である。

IoT 車両情報についても、新たな社会サービスや価値創造につながる解析が行うことができる基盤技術（データプラットフォーム）が必要である。同時にデータ取得からデータベース整備、解析結果に至るプロセスで共有先とのオープン・クローズ・シェアの検討が必要になる。公開可能なデータベースについては広く共有することが望ましく競争領域ではクローズとなるであろう。その際にも日本国内の研究データベースハブとして国立研究開発法人と企業間、大学間のデータ共有のあり方が重要になる。

IoT 車両情報は自動運転の進展に伴い急速に増大する。増加するデータ量と速度は個人や人の認知限界を超ビッグデータに潜在する有用な情報を十分に引き出せない状況が起こり得る。データの利活用には IoT 車両情報であればシステム技術や車両技術など自動車に係る専門知識から人工知能・機械学習・数理科学など理論科学などの高度な解析手法が必要になっている。IoT 車両情報による道路交通観測システムを構築するにあたっては従来の定点観測と変動点観測の補完関係を確保しながら、高精度な即時広域情報の把握を実現しながら、同時に利用者への運転行動に資する情報提供が必要である。低燃費運転支援として推奨速度や渋滞回避の経路選択や被災時の避難誘導など社会応用を現実的なものとするには高精度、高速な情報提供のあり方の確立が求められる。

また、IoT 車両情報は現時点では潜在的な有用情報と言われる多くのダークデータが含まれると考えられる。今後の社会変化に応じて他領域のデータベースとの組み合わせにより新たな価値や機能向上が図れる情報である。気象予測データベースと IoT 車両情報の組み合わせは、到着時刻や渋滞回避による経路選択や低燃費運転支援など高精度化だけでなく、人々の行動判断など現在では不確実性と呼ばれる領域での社会サービス創出の余地がある。

複数の異なるデータベースのマッチングや新たな社会サービス創出はオープンイノベーションやオープンラボにより実現される。大学の学際性や国立研究所の専門領域との組み合わせによるイノベーション創出を加速したいと考えている。筑波大学の未来社会工学センターは睡眠医科学や革新的サイバニックシステムやビジネスサイエンスなどの学際性あふれる研究領域との融合を始める。IoT 車両情報と睡眠医科学のデータベースの組み合わせは自動車の運転操作行為からの睡眠予兆を予測する新たな研究領域を創出し、新たな付加価値で社会課題に貢献することになるだろう。

情報のオープン・クローズ・シェアについては将来像の共有，競争領域と協調領域の明確化，特に公益的社会利用などのデータの潜在能力を引き出す仕組みや行動までもがデータ利活用者の責務である。データ提供者はそのフィードバック行動により評価をするであろう。国民対話を積み重ねて社会受容性（アクセプタンス）を醸成していくことが必須である。同時にデータ利用者の行動がデータ利用の是非を決定するだろう。

自動運転は実現そのものが大きな技術革新である。その実現による IoT 車両情報は新たな社会応用で公益・産業的価値を創出する。解決を待つ社会課題は時に顕在化して時に散逸している。イノベーションが連鎖する時代が到来しており，社会工学は未来開拓に重要な役割を果たすことになる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，指導教官である筑波大学システム情報工学系社会工学域教授 大澤義明博士には筑波大学と共同研究を開始してから今日に至るまで終始変わらぬ温かい笑顔で，数理的考察と社会使命にあふれるご指導ご鞭撻を賜りました．時に傾聴，時に示唆に富んだご助言で研究活動を導いて下さいました．研究室で学生を指導される様子はまさに若手育成の実践でした．ここに深甚なる謝意を表します．

筑波大学システム情報工学系社会工学域教授で専攻長 谷口守博士，同教授 藤川昌樹博士，同教授 吉瀬章子博士にはトヨタ自動車株式会社との共同研究を発足以来，週間例の研究会議の機会をいただきました．研究動機から意義，目的についてさまざまな視点から質疑をいただき基礎理論のあり方や大学の役割に貴重なご指摘，ご指導を賜りました．あらためて厚く御礼申し上げます．

筑波大学システム情報工学系社会工学域教授 石田東生博士，同教授 鈴木勉博士には論文審査と大学院共通科目受講でご指導を賜りました．厚く御礼申し上げます．

筑波大学副学長 稲垣敏之博士には内閣府戦略的イノベーション創造プログラムの自動運転プロジェクトを機に，多大な指導を賜り，共同研究の立ち上げや体制整備において終始手厚いご支援をいただきました．

同産学連携本部審議役教授 内田史彦博士（当時 日立製作所勤務）には経団連での活動での確なご指導をいただくご縁から始まりました．産学連携の目指すべき姿に多大なご指導とご支援をいただきました．ここに厚く御礼を申し上げます．

トヨタ自動車株式会社代表取締役会長 内山田竹志さんが内閣府総合科学技術・イノベーション会議有識者議員へ就任されて以来，日本でのイノベーション・拠点化・産業形成・産学連携のあり方について多大な影響とご指導をいただきました．内閣府エネルギー戦略協議会始め多くの委員活動の機会を与えていただき，本研究活動に激励のお言葉をいただきました．

トヨタ自動車株式会社代表取締役副社長 加藤光久さんには未来創生に向けた社会研究を後押しいただき，インフラ，農業，宇宙開発の視点から地域未来の社会基盤づくりに至るまで広範なご指導をいただきました．産業競争力懇談会の実行委員活動では社会課題解決へ向けた取組みに貴重なご助言をいただきました．

本論文の第1章は豊田市実証実験でのデータ分析結果を応用地域学会で発表，オペレーションリサーチ学会特集号（2016/9）への寄稿内容を中心にまとめたものです．

筑波大学 猿渡康文博士，国立開発法人建築研究所主任研究員 石井儀光博士には寄稿にあたり，数多くのご指摘とご助言を賜りました。また，本結果は内閣府エネルギー戦略協議会，同システム基盤技術検討会で報告機会を得て，総合科学技術・イノベーション会議常勤議員 久間和生博士から貴重なご指摘と数々のご指導を賜りました。記して御礼申し上げます。

第2章ではIoT車両情報の低燃費運転支援について筑波大学システム情報系助教 安東弘泰博士と立正大学経済学部講師の小林隆史博士とデータ解析と考察を重ねて環境共生学会で発表した内容を中心にまとめたものです。誠実な研究議論と低燃費支援を実現するため多大なご指導，ご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

第6章ではIoT車両情報を実現するモニタリング選択について筑波大学システム情報系准教授 栗野盛光博士との数多くの議論を通して応用地域学会で発表した内容を中心にまとめたものです。社会制度に係るモニタリング選択問題の理論化に多大なご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

博士課程に入学以降は勤務先のトヨタ自動車株式会社未来開拓室ならびに関係部署のみなさまに多大なご支援いただきました。豊田市実証実験のデータ整備で支援をいただきました。本当にありがとうございました。

筑波大学都市計測実験室（大澤研究室）の皆様には毎週の定例ゼミから客員教授として講義サポート，研究計画，中間発表，予備審査に至る論文執筆、発表準備のさまざまな状況でたいへんお世話になりました。若くて才気あふれる研究室の皆様のこれからのご活躍を祈念します。本当にありがとうございました。

本論文の内容は，筆者が筑波大学システム情報系社会工学域とトヨタ自動車株式会社との共同研究「次世代社会システムとモビリティの新価値創造」で行った研究成果をまとめたものです。本論文を結ぶにあたり，お世話になりましたすべての皆様に深く感謝申し上げます。

最後に，支えてくれた妻 順子と長女 里奈，次女 沙英に感謝します。

2017年3月
高原 勇

論文リスト

本研究と係わる論文・講演リスト

■ 査読付き論文

- [1] 高原勇, 大澤義明: 矩形都市直線移動における太陽光逆光確率. GIS—理論と応用, 24(2), pp.105-114.
- [2] 栗野盛光, 高原勇: IoT 車両情報の速度に関するモニタリング選択問題, 応用地域学研究, 20, pp.25-35.
- [3] 川崎薫, 香月秀仁, 高原勇, 谷口守 (2016): FCV 普及過程における NIMBY 問題の発生可能性, —居住者のリスク認知の実態から—, 都市計画論文集, 51(3), pp.452-458.
- [4] 高原勇, 赤澤邦夫, 大澤義明 (2016): 時空間アクセスから見た移動式サービスステーションの効果. 日本計画行政学会, 39(4), pp.45-52.
- [5] 高原勇, 大澤義明 (2016): 自動車に残るエネルギー量の推定と被災地域への応用. 日本計画行政学会, 39(4), pp.53-60.
- [6] 高原勇, 安東弘泰, 大澤義明: IoT 車両情報による実測燃費の地域特性分析—豊田市実証実験の気候と速度域別の実測燃費—, 環境共生, 30 (印刷中).

■ 学会発表

- [1] 高原勇, 赤澤邦夫, 大澤義明 (2016): 地域が保有する自動車エネルギーの推定. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年春季研究発表会, pp.160-170.
- [2] 高原勇, 川岸卓司, 大澤義明 (2016): 災害地域における個車の走行可能距離・日数の推定. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年春季研究発表会, pp.171-172.
- [3] 赤澤邦夫, 高原勇, 大澤義明 (2016): 移動式水素ステーションの時空間配置. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年春季研究発表会, pp.311-312.
- [4] 湊信乃介, 高原勇, 大澤義明 (2016): 矩形都市直線移動時における逆光割合. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年春季研究発表会, pp.313-314.
- [5] 越川知紘, 高原勇, 谷口守 (2016): 個人の意識・交通行動に着目した FCV の利用意向, 交通工学研究発表会論文集, 36, CD-Rom.
- [6] 若林優妃, 野口宇宙, 高原勇, 大澤義明 (2016): 燃料電池車及び水素ステーションの空間的配備—IoT 車両位置情報の活用に向けて—. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, pp.98-99.

- [7] 安東弘泰, 高原勇, 大澤義明 (2016) : IoT 実測燃費の気候特性解析ー自動運転の
知能化に向けてー. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, pp.100-101.
- [8] 高原勇, 安東弘泰, 大澤義明 (2016) : IoT 実測燃費の経路特性解析ー制限速度の
可変性に向けてー. オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, pp.102-103.
- [9] 高原勇, 安東弘泰, 大澤義明 (2016) : IoT 実測燃費と気候特性との関係ーIoT 車両
情報の利活用と低炭素都市の実現に向けてー. 日本環境共生学会 2016 年度学術大
会発表論文集, pp.84-90.
- [10] 米原善秀, 川本雅之, 高原勇, 内田史彦, 谷口守 (2016) : スマートハウスにおけ
る経年的な電力利用実態とその要因, ー豊田実証実験データの解析を通じてー,
第 44 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.55-62.

■その他論文

- [1] 高原勇 (2016) : Society5.0 と社会応用へのOR 「特集にあたって」. オペレーショ
ンズリサーチ, 61(9), p550.
- [2] 高原勇 (2016) : Society5.0 における IoT 車両情報の社会応用に向けて. オペレーショ
ンズリサーチ, 61(9), pp.582-588.
- [3] 高原勇, 大澤義明 (2016) : 『IoT』をタイトルに含む書籍群. 応用地域学研究,
20, pp.155-157.
- [4] 高原勇 (2017) : 自動運転で得られる IoT 者籠城法は社会課題解決に威力. 日経 Big
Data,35,pp16-17.

■ 口頭発表

- [1] 高原勇, 大澤義明 (2015) : 社会的共通資本としてのこれからの車の機能と役割.
第 29 回応用地域学会研究発表大会 (2015 年 11 月 29 日, 慶應義塾大学三田キャン
パス)
- [2] 高原勇, 大澤義明 (2015) : 社会的共通資本としてのこれからのクルマの機能と役
割, 「都市のOR」ワークショップ 2015 (2015 年 12 月 12 日, 南山大学名古屋キャ
ンパス).
- [3] 夢名賀寛, 木村雅志, 高原勇, 川本雅之, 吉瀬章子 (2016) : 茨城県南部における
水素供給サービスを満足させセッションの配置モデル, 日本経営工学会 (JIMA) 秋
季大会 (2016 年 10 月 29 日, 日本教育会館).

- [4] 香月秀仁, 川本雅之, 高原勇, 谷口守 (2016) : 自動運転車(ADV)導入が個人の活動目的地の変化に及ぼす影響, 土木計画学研究・講演集, 54.

■ 講演

- [1] 災害時に地域社会のためにクルマができること.平成 27 年度防災・日本再生シンポジウム(2016/1/14, 茨城県総合福祉会館コミュニティホール) .
- [2] これからのクルマと社会, JSEM 日本実験力学会, (2016/2/18, 筑波大学 3 B 棟).
- [3] これからのクルマと未来の社会サービス創出に向けて, いばらぎ成長産業協賛会 (2016/7/19, 筑波大学高細精医療イノベーション棟).
- [4] 基調講演「自動車産業の未来に向けた取り組み」, RICOH 全国自動車担当者会議, (2016/8/24, リコージャパン (株) 田町事業所).
- [5] 来るべき低炭素社会における新しいモビリティと都市計画, エネルギー・資源学会 (2016/10/26, 東京大学工学部 2 号館).
- [6] 筑波大学シンポジウム: 人を支援する AI×ビッグデータで実現する「Society 5.0」 (2016/11/7, 筑波大学東京キャンパス).
- [7] IoT 車両情報の社会応用と Society5.0 の実現, 第 4 次産業革命実現後の暮らし・産業・社会—Society5.0 から生まれる新事業—, 電子情報技術産業協会 (2016/12/9, JEITA 大手センタービル).
- [8]本格的な産学官共同研究を進めるための地域フォーラム, 文部科学省, 経済産業省 (2017/2/1, 文部科学省東館講堂)
- [9]未来創造対話 in 大阪 2017, 産学連携の深化によるイノベーション促進に向けて, 文部科学省 (2017/2/7, コングレコンベンションセンターグランフロント大阪)

■ パネルディスカッション

- [1] 経済産業省, NEDO 共同開催,
第 3 回 TOKYO イノベーションリーダーズサミット, 新事業創造カンファレンス,
(2015/10/27, 虎ノ門ヒルズメインホール).
- [2] 産業競争力懇談会主催,
COCN フォーラム, 「Society5.0 のつくり方」人と社会と産業を考える
(2016/07/28, 日本プレスセンター).
- [3] JST 主催, サイエンスアゴラ 2015 「科学オリンピックへ集え」 (2015/11/15, 東京

都立産業技術センター).

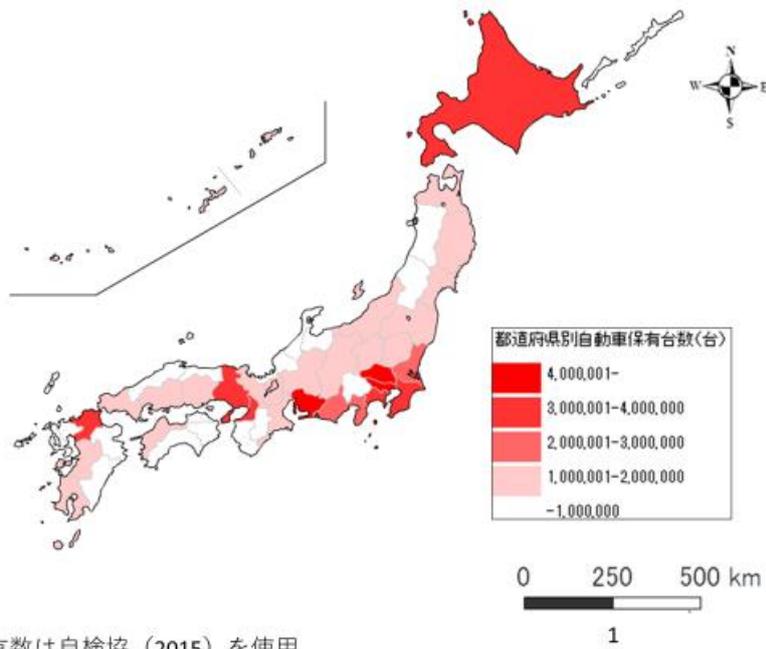
- [4] 電子情報技術産業協会主催, 「IT・エレクトロニクス業界が支える Society5.0」, 第4次産業革命実現後の暮らし・産業・社会—Society5.0 から生まれる新事業— (2016/12/9 JEITA 大手センタービル).
- [5] 文部科学省, 経済産業省主催, 本格的な産学官共同研究を進めるための地域フォーラム (関東甲信越地区) 「本格的な産学官共同研究に向けて」 (2017/02/01, 文部科学省東館).
- [6] 文部科学省主催, 未来創造対話 in 大阪 2017, 「産学連携の深化によるイノベーションの促進に向けて」 (2017/02/07, コングレコンベンションセンターグランフロント大阪北館).

■ 政府などの委員

- [1] 内閣府, エネルギー戦略協議会, 委員 (2014/11～現在)
- [2] 筑波大学, 国際産学連携本部運営協議会, 委員 (2015/1～現在)
- [3] 内閣府, 基盤技術のあり方に関する検討会, 委員 (2015/9～2015/12)
- [4] 日本経済団体連合会, 未来産業技術委員会 (2015/8～現在)
- [5] 産業競争力懇談会, 実行委員 (2016/4～現在)
- [6] 科学技術と経済の会, 運営委員 (2016/4～現在)
- [7] 文部科学省, AIP 予算評価検討会, 委員 (2016/4～現在)
- [8] 内閣府, システム基盤技術検討会, 委員 (2016/1～現在)
- [9] 経済産業省・文部科学省合同, 産学連携深化ワーキンググループ, 委員 (2016/8～現在)
- [10] 日本経済団体連合会, Society5.0 実現部会, 委員 (2016/11～現在)
- [11] 内閣府, ナノテクノロジー・材料基盤技術分科会, 委員 (2016/11～現在)
- [12] 内閣府, エネルギー・環境イノベーション戦略推進ワーキング, 委員 (2016/12～現在)

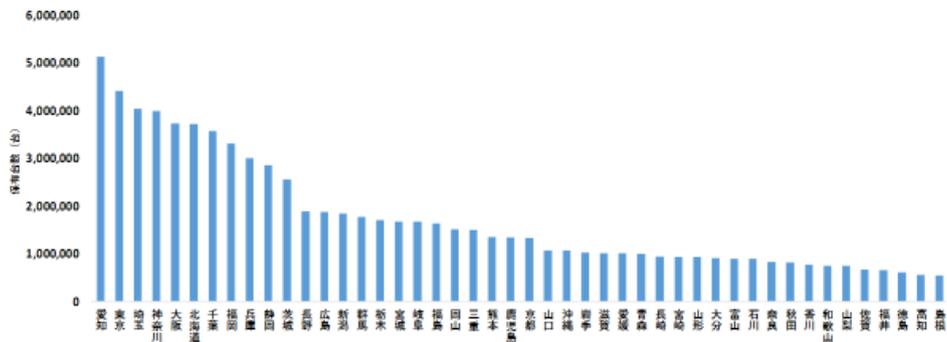
付録

付録 A 自動車保有数分析



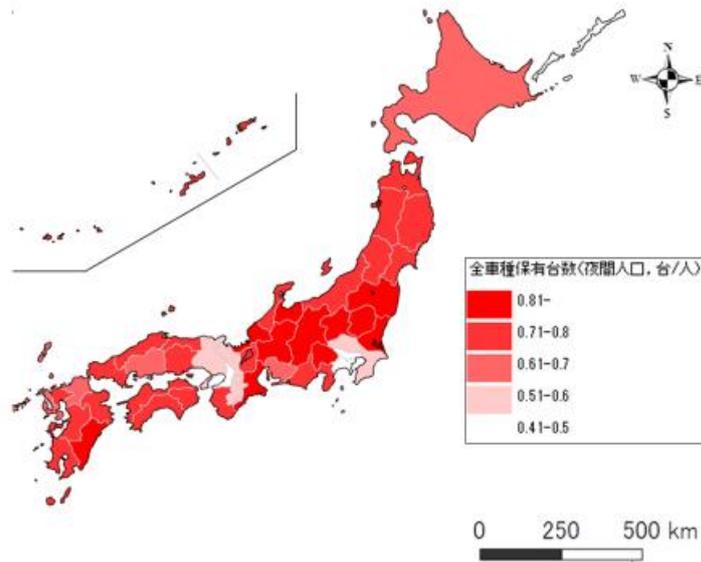
保有数は自検協（2015）を使用

A-1 都道府県別全車種保有数（2015年）



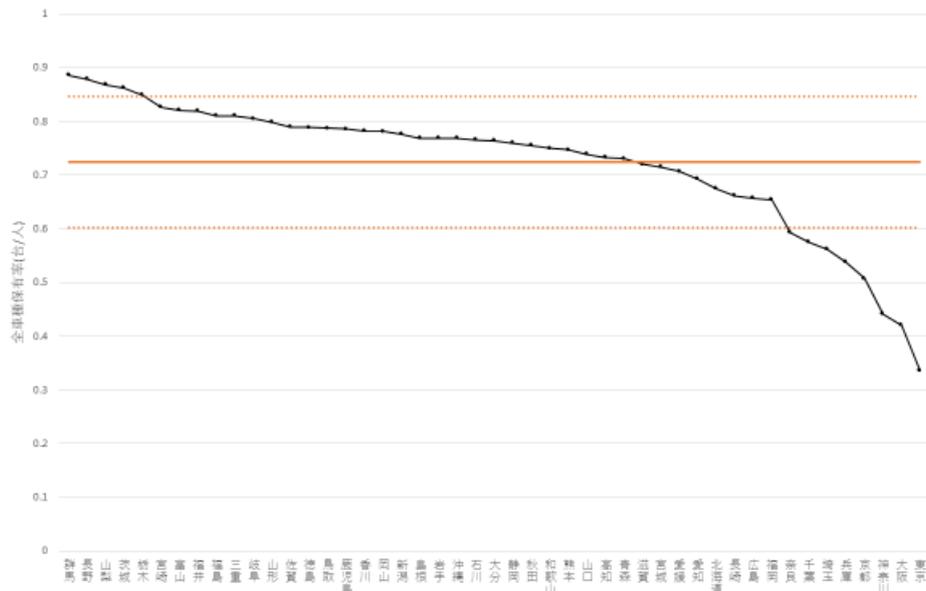
保有数は自検協（2015）を使用

A-2 都道府県別全車種保有数（2015年）



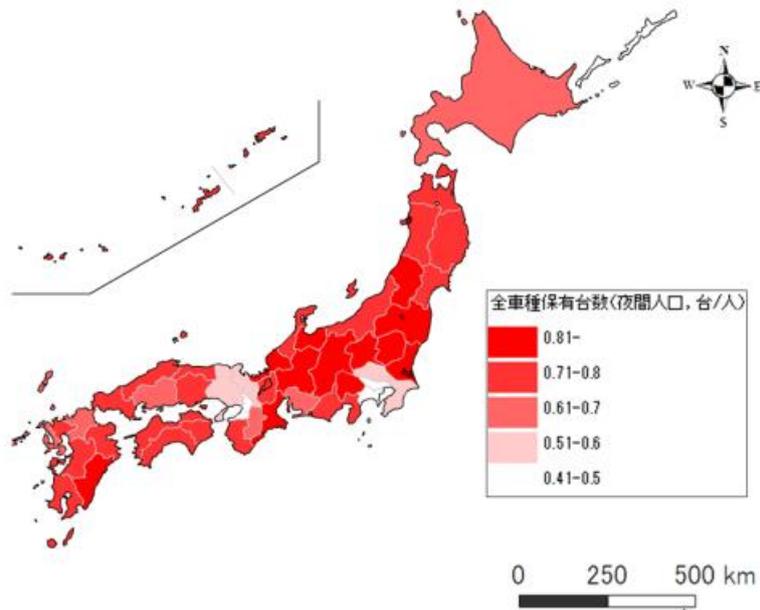
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-3 都道府県別全車種保有率（2010 年夜間人口）



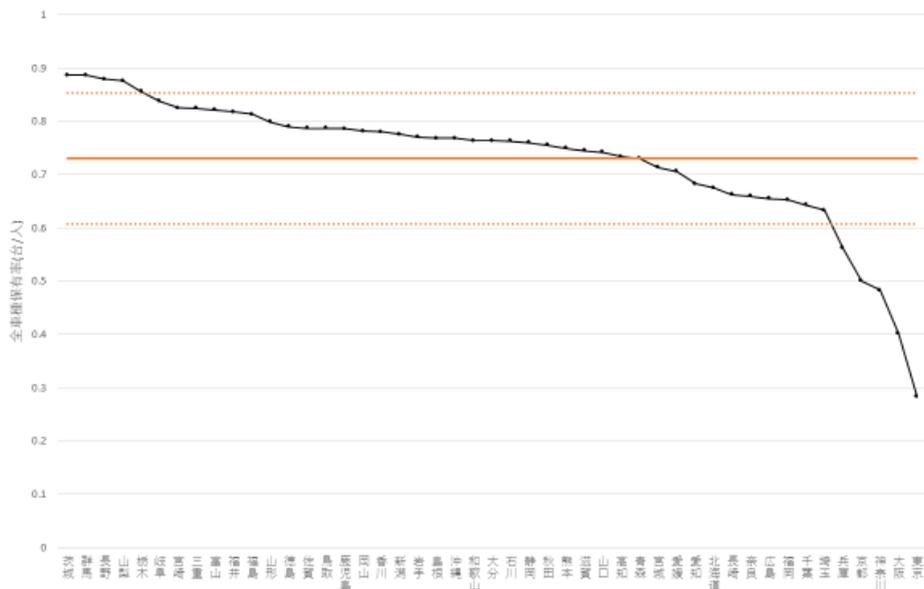
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-4 都道府県別全車種保有率（2010 年夜間人口）



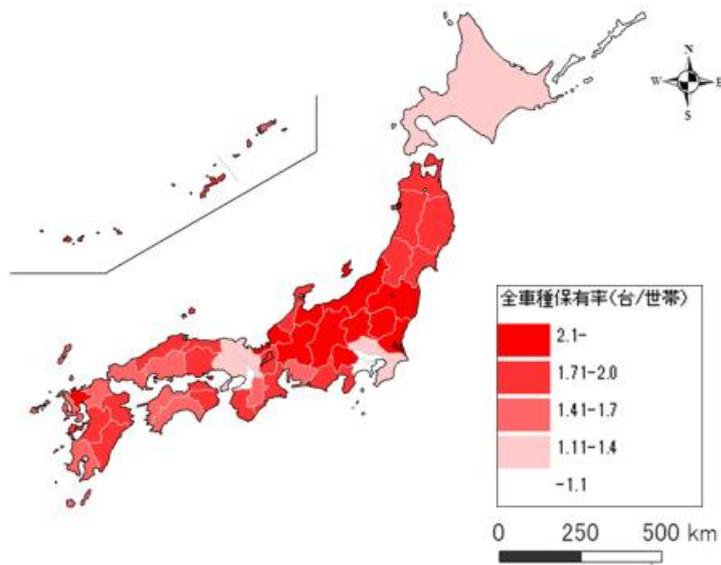
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-5 都道府県別全車種保有率（2010年昼間人口）



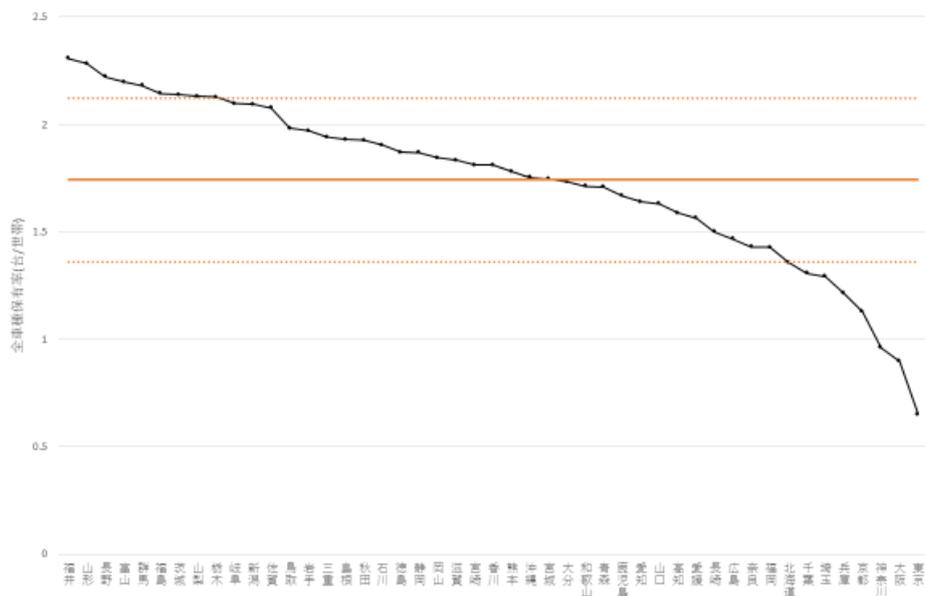
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-6 都道府県別全車種保有率（2010年昼間人口）



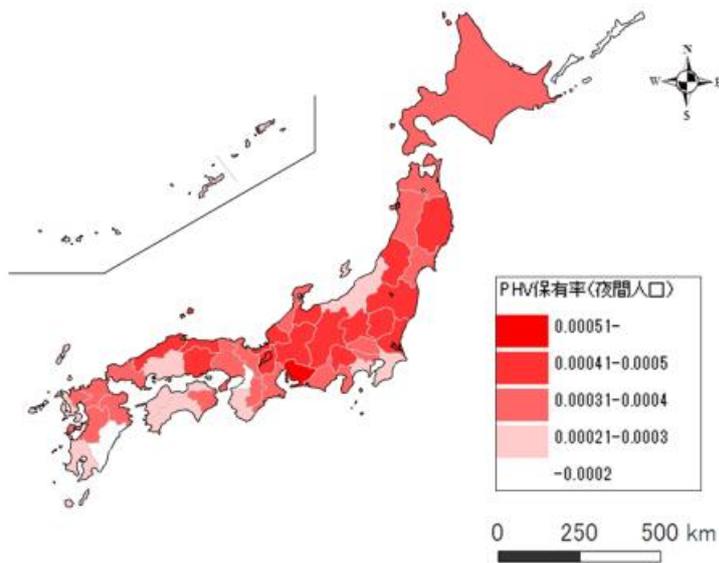
昼間人口は総務省（2015），保有数は自検協（2015）を使用

A-7 都道府県別全車種保有率（2010年世帯数）



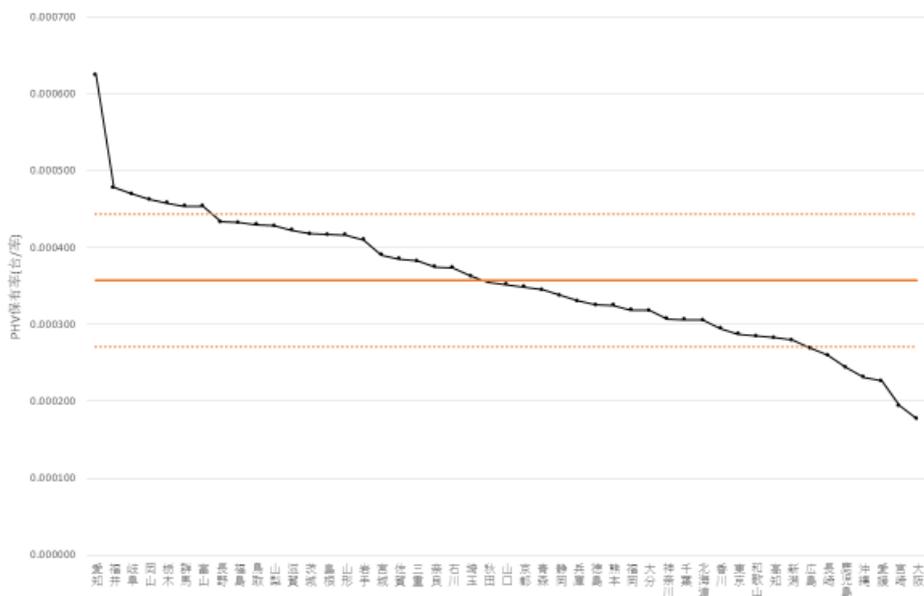
昼間人口は総務省（2015），保有数は自検協（2015）を使用

A-8 都道府県別全車種保有率（2015年世帯数）



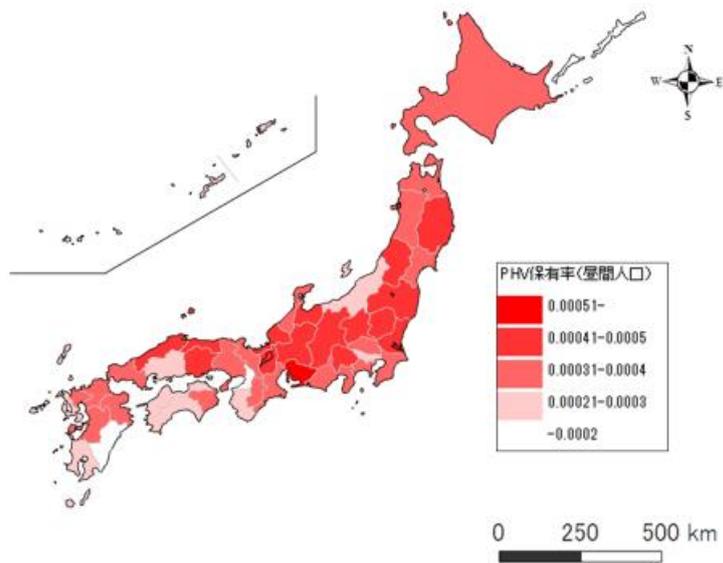
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-11 都道府県別 PHV 車保有率（2010 年夜間人口）



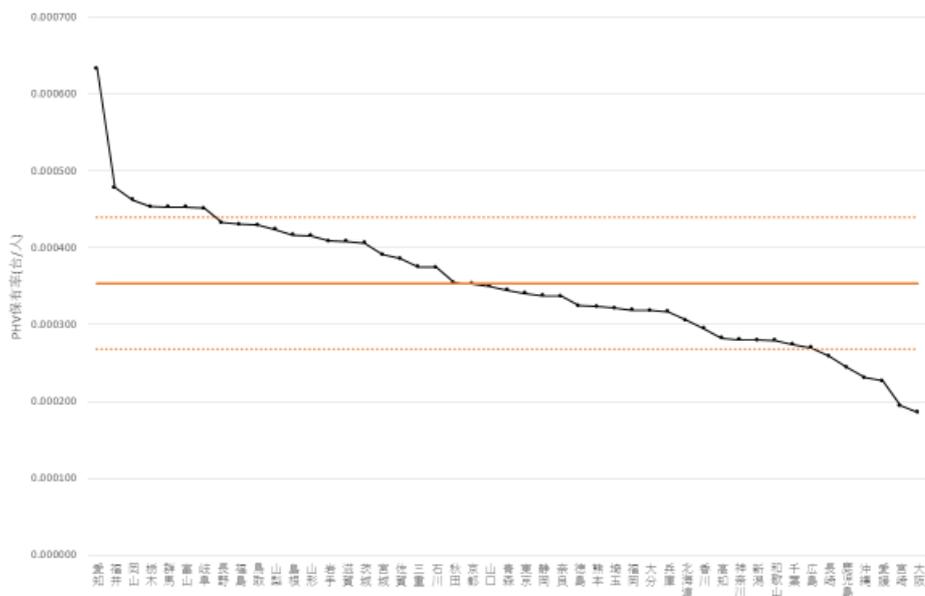
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-12 都道府県別 PHV 車保有率（2010 年間夜間人口）



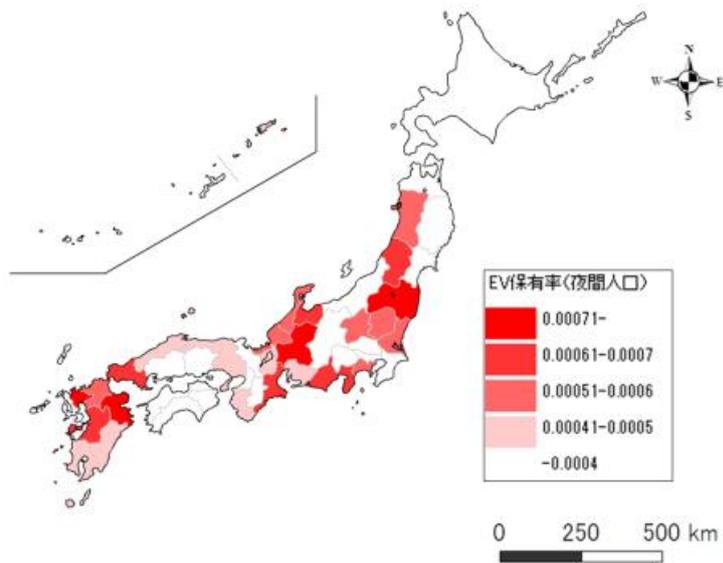
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-13 都道府県別 PHV 車保有率（2010 年昼間人口）



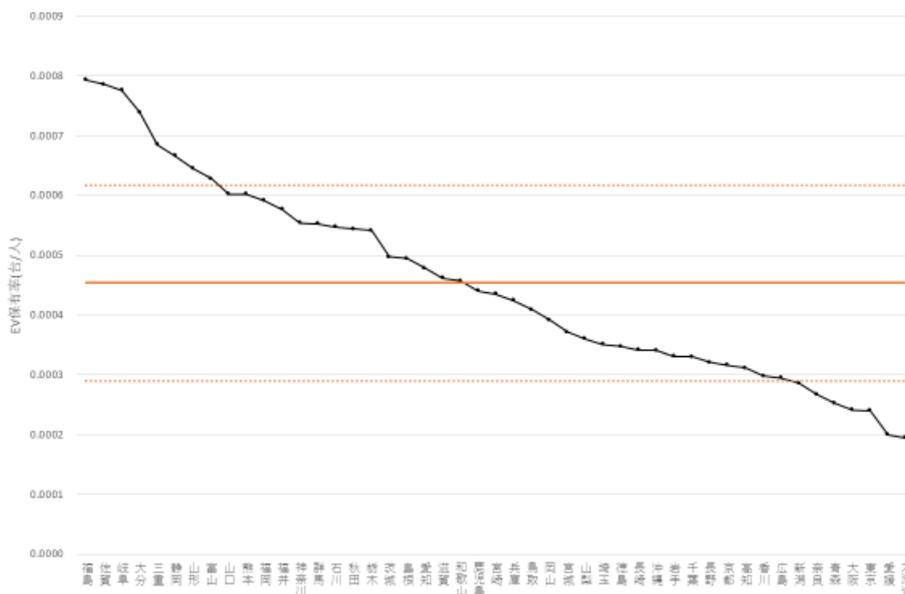
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-14 都道府県別 PHV 車保有率（2010 年昼間人口）



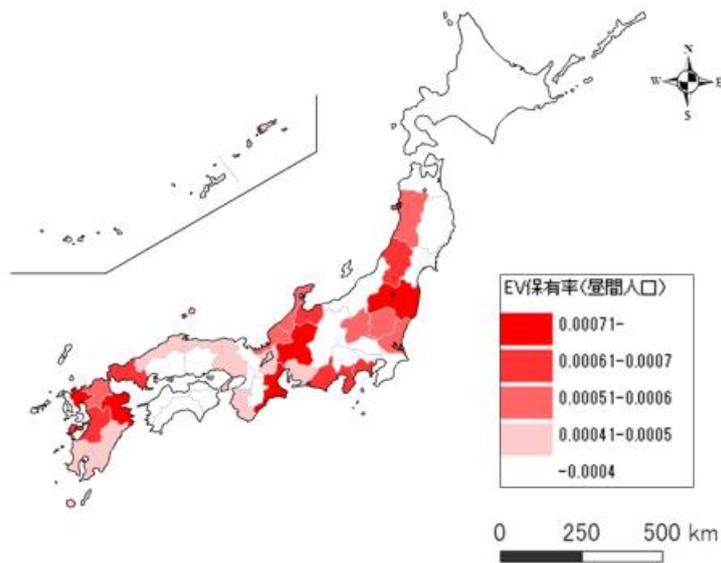
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-19 都道府県別 EV 車保有率 (2010 年夜間人口)



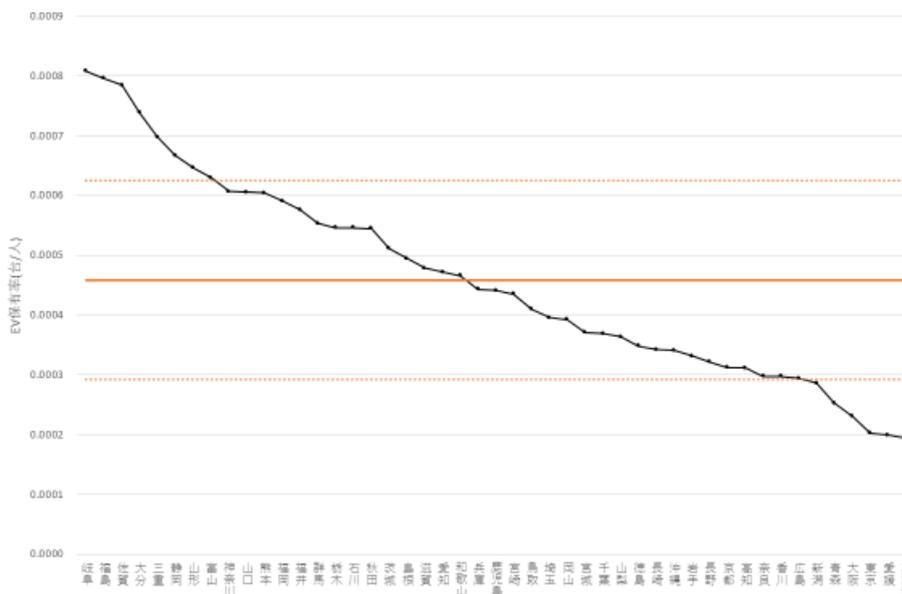
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-20 都道府県別 EV 車保有率 (2010 年夜間人口)



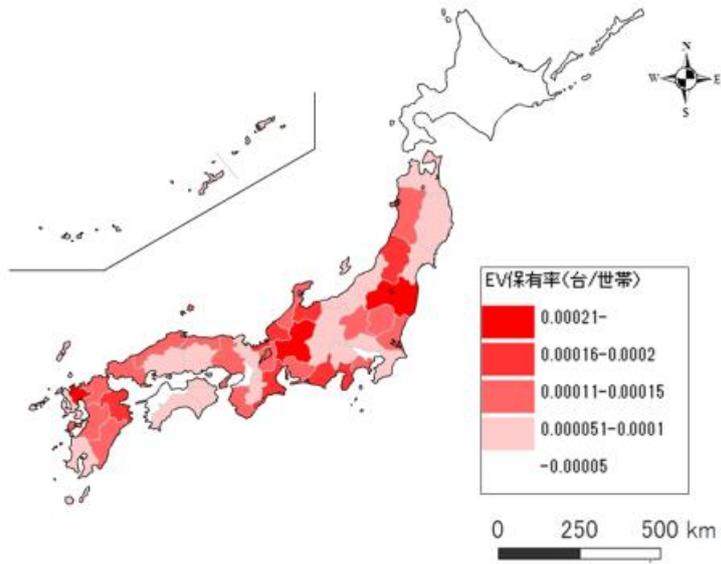
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-21 都道府県別 EV 車保有率（2010 年昼間人口）



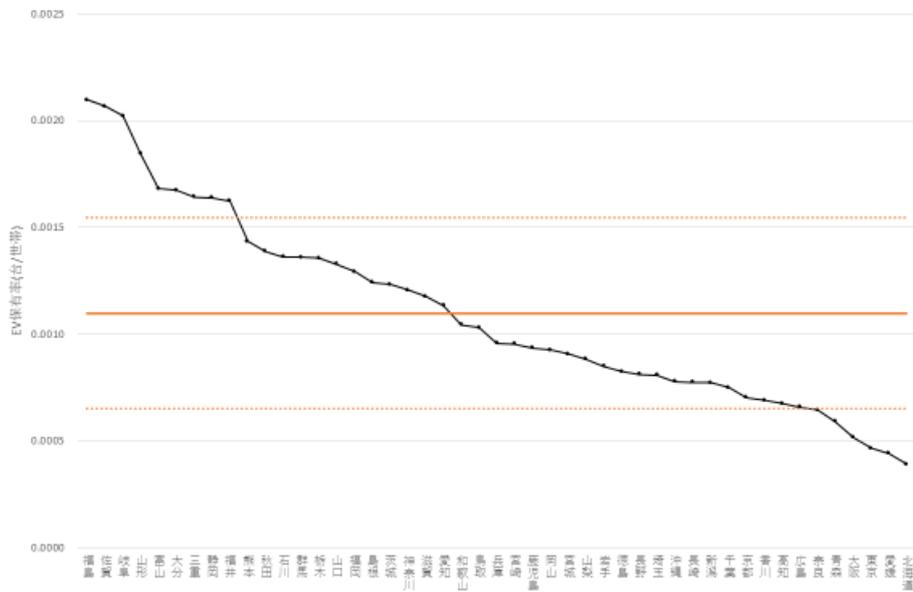
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-22 都道府県別 EV 車保有率（2010 年昼間人口）



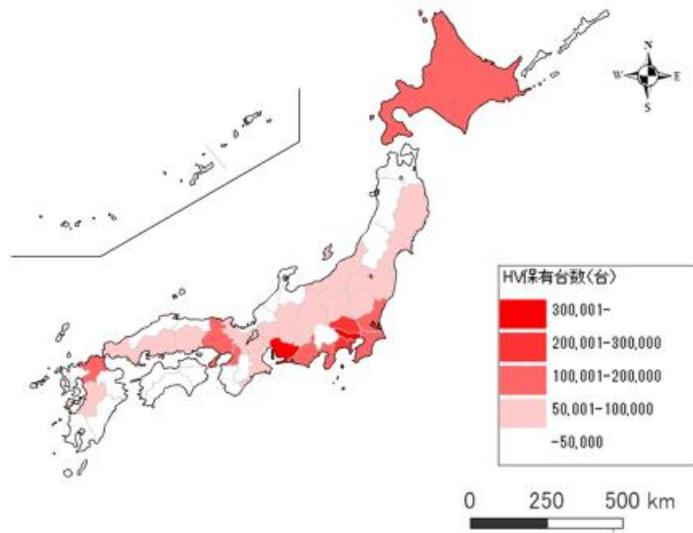
昼間人口は総務省（2015），保有数は自検協（2015）を使用

A-23 都道府県別 EV 車保有率（2015 年世帯数）



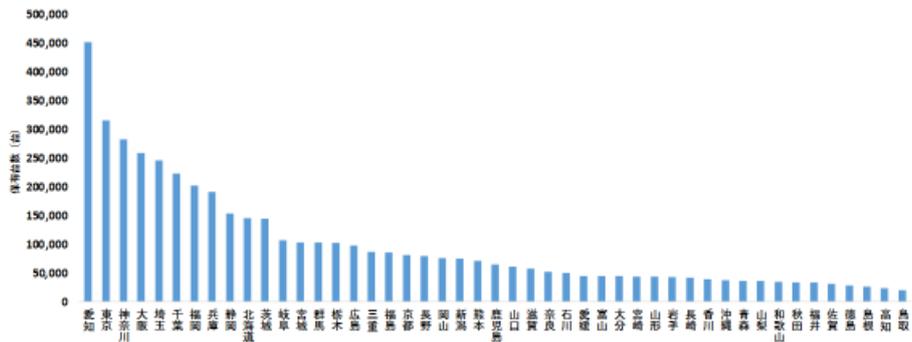
昼間人口は総務省（2015），保有数は自検協（2015）を使用

A-24 都道府県別 EV 車保有率（2015 年世帯数）



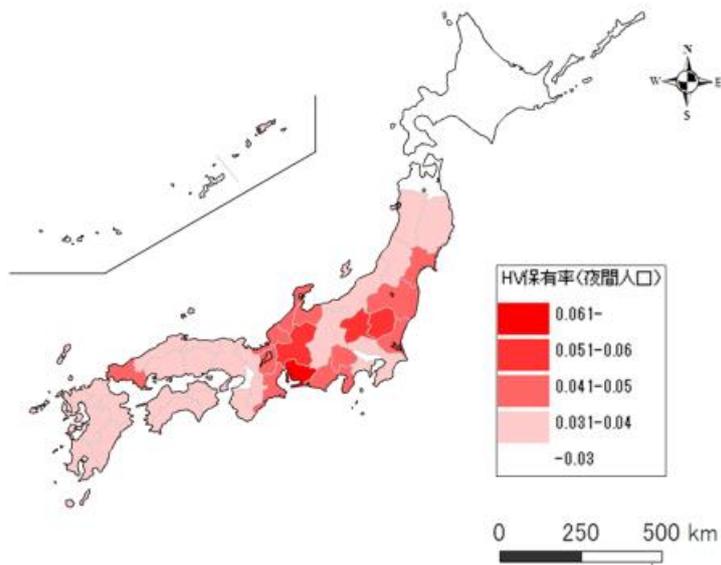
保有数は自検協（2015）を使用

A-25 都道府県別 EV 車保有数（2015 年）



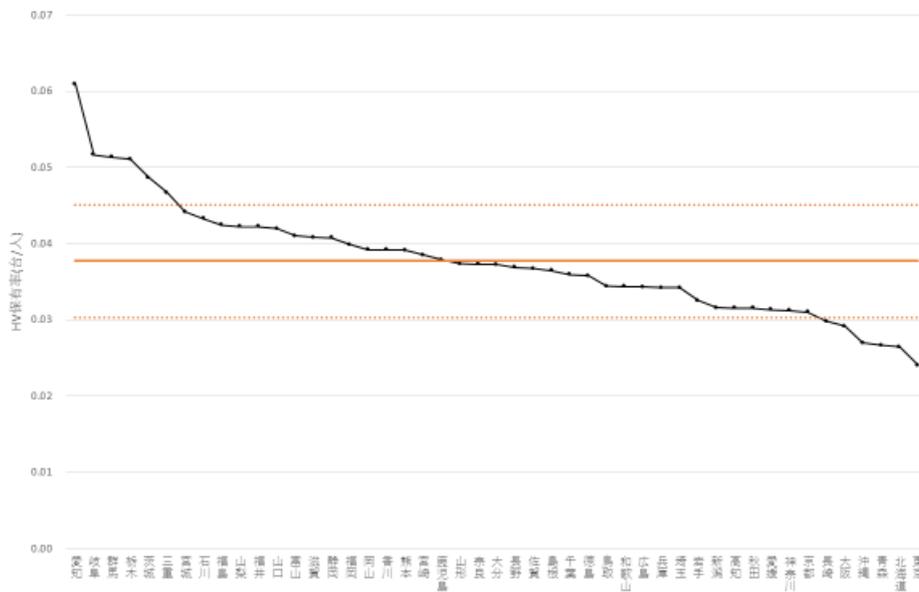
保有数は自検協（2015）を使用

A-26 都道府県別 EV 車保有数（2015 年）



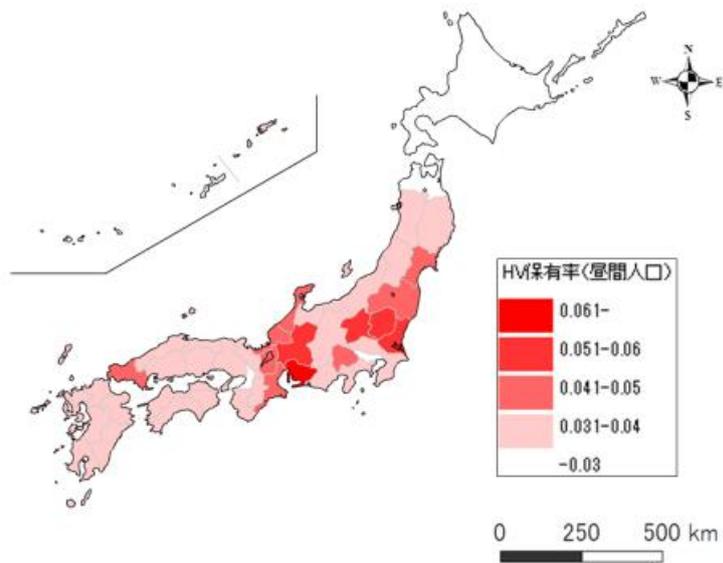
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-27 都道府県別 HV 車保有率（2010 年昼間人口）



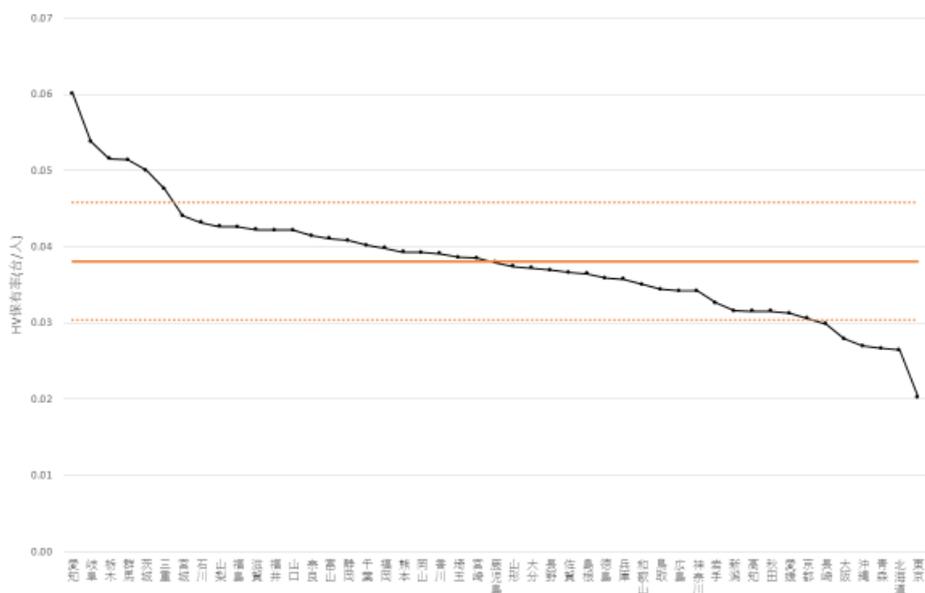
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-28 都道府県別 HV 車保有率（2010 年夜間人口）



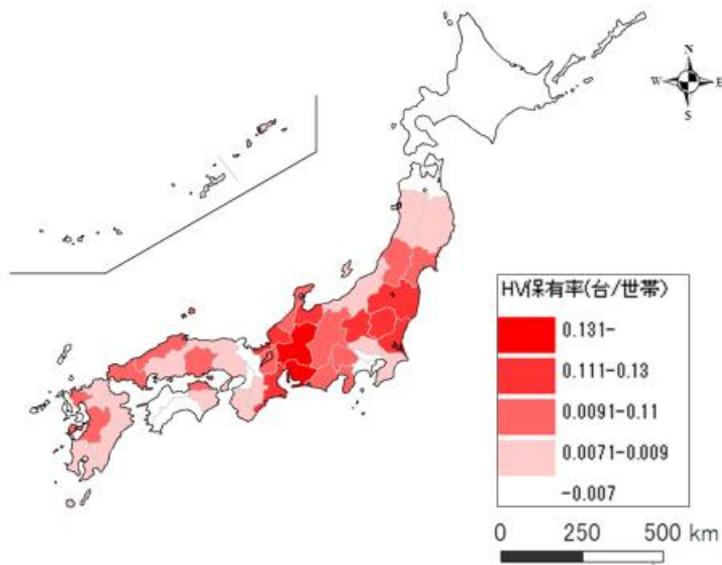
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-29 都道府県別 HV 車保有率（2010 年昼間人口）



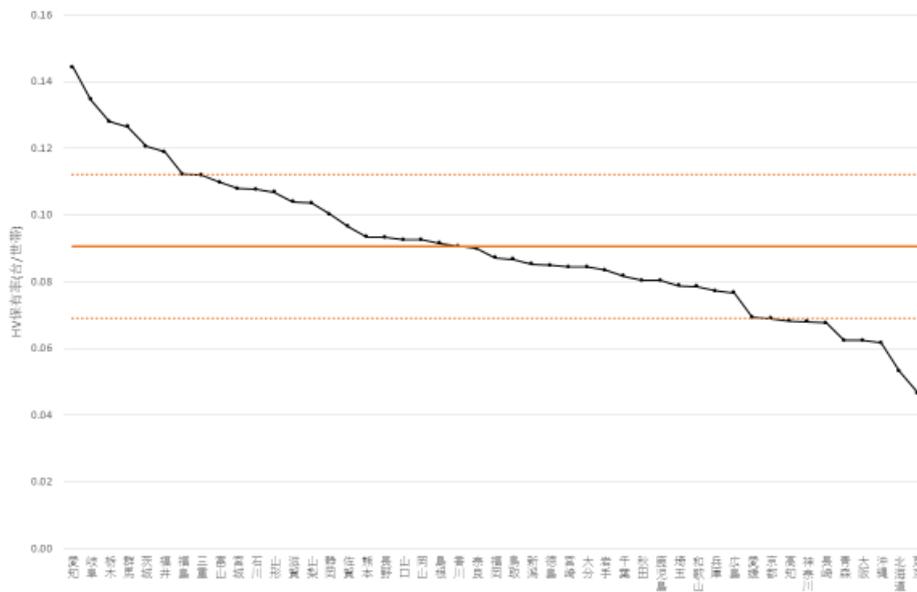
昼間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-30 都道府県別 HV 車保有率（2010 年昼間人口）



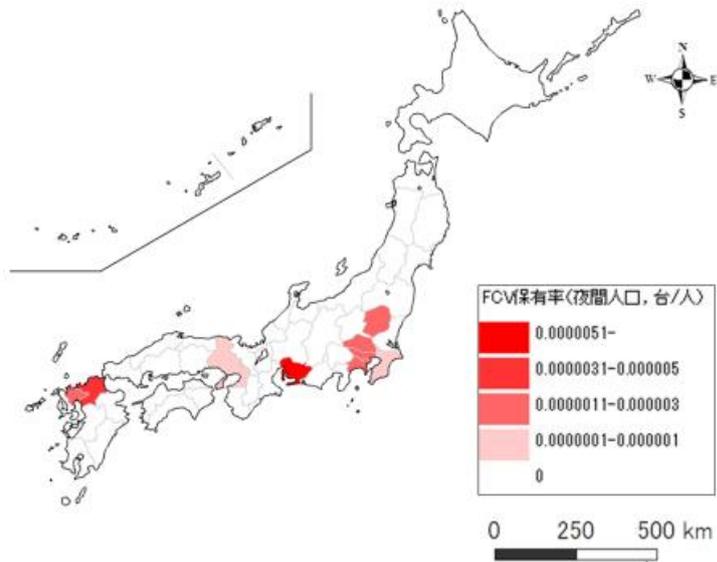
昼間人口は総務省（2015），保有数は自検協（2015）を使用

A-31 都道府県別 HV 車保有率（2015 年世帯数）



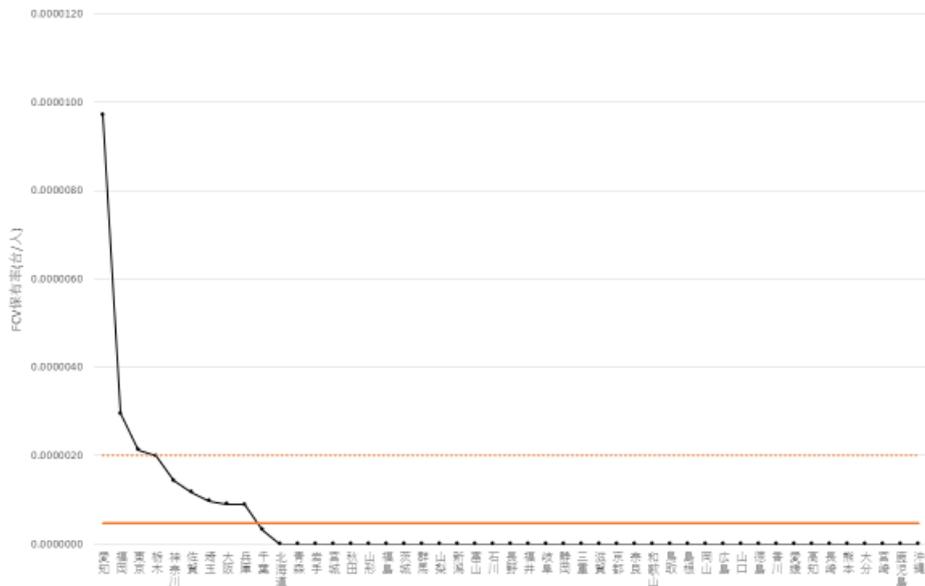
昼間人口は総務省（2015），保有数は自検協（2015）を使用

A-32 都道府県別 HV 車保有率（2015 年世帯数）



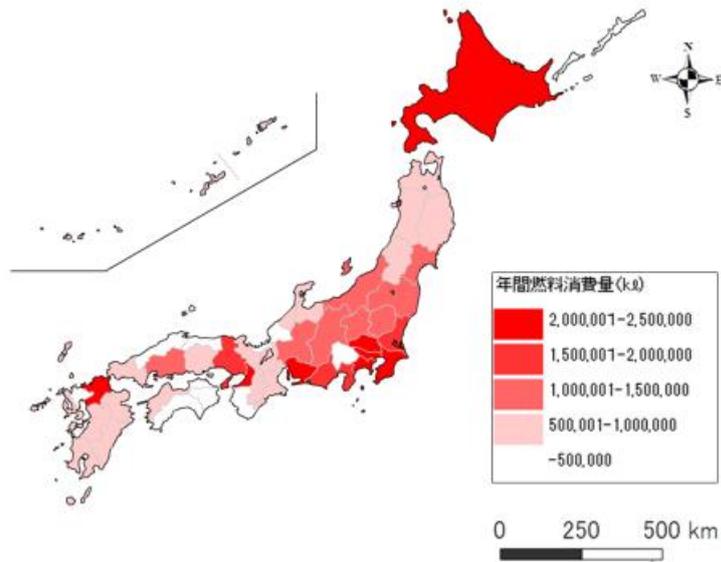
夜間人口は国勢調査（2010），保有数は自検協（2015）を使用

A-35 都道府県別 FCV 車保有率（2010 年夜間人口）



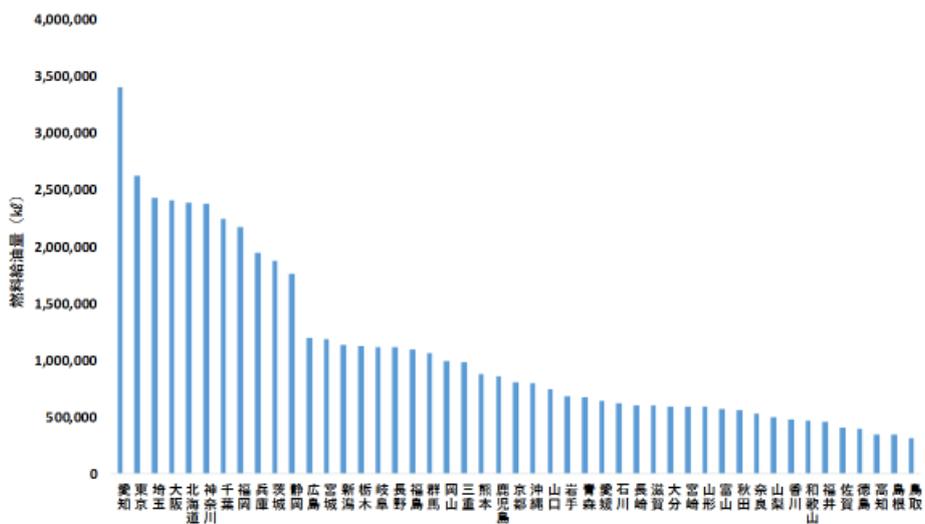
A-36 都道府県別 FCV 車保有率（2010 年夜間人口）

付録 B 燃料消費量分析



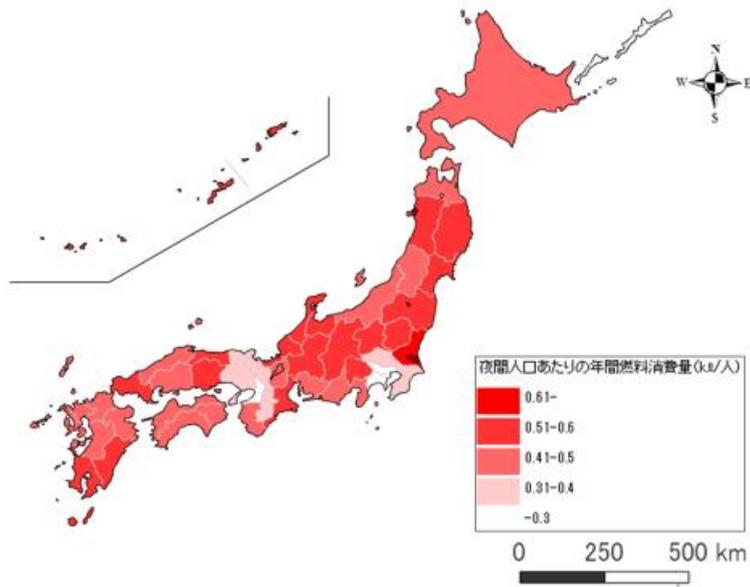
国土交通省（2015）：燃料別・都道府県別・10車種別 燃料消費量より

B-1 都道府県別年間ガソリン燃料消費量（2015年）



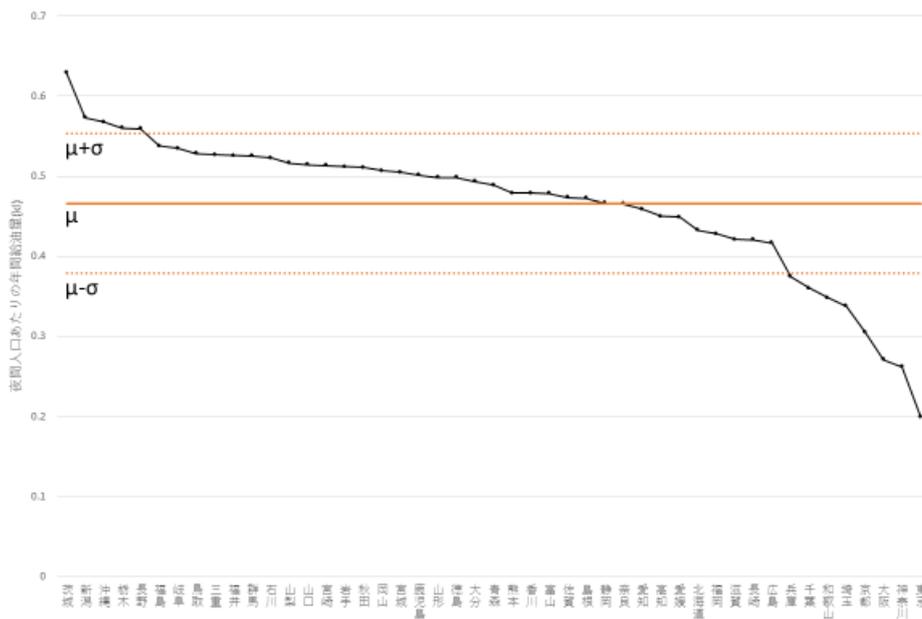
国土交通省（2015）：燃料別・都道府県別・10車種別 燃料消費量より

B-2 都道府県別年間ガソリン燃料消費量（2015年）



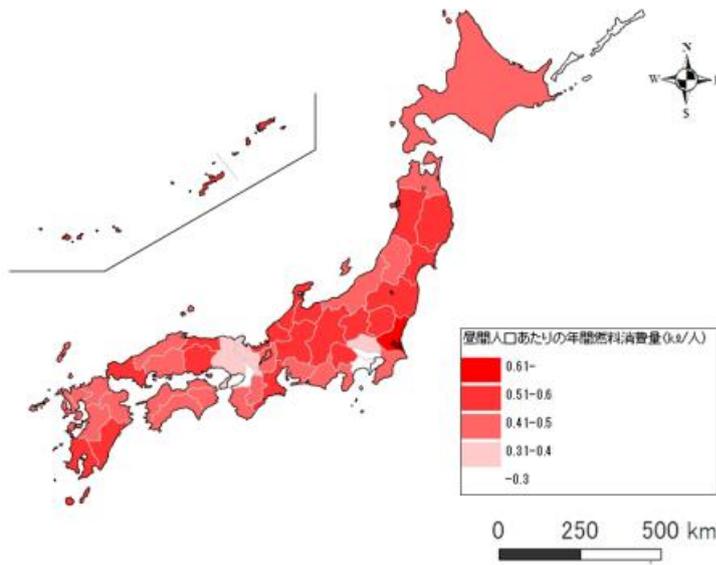
年間給油量は国土交通省（2015）：燃料別・都道府県別・10車種別 燃料消費量より
 昼間人口・夜間人口は総務省（2015）：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数より

B-3 夜間人口あたり都道府県別年間ガソリン燃料消費量（2015年）

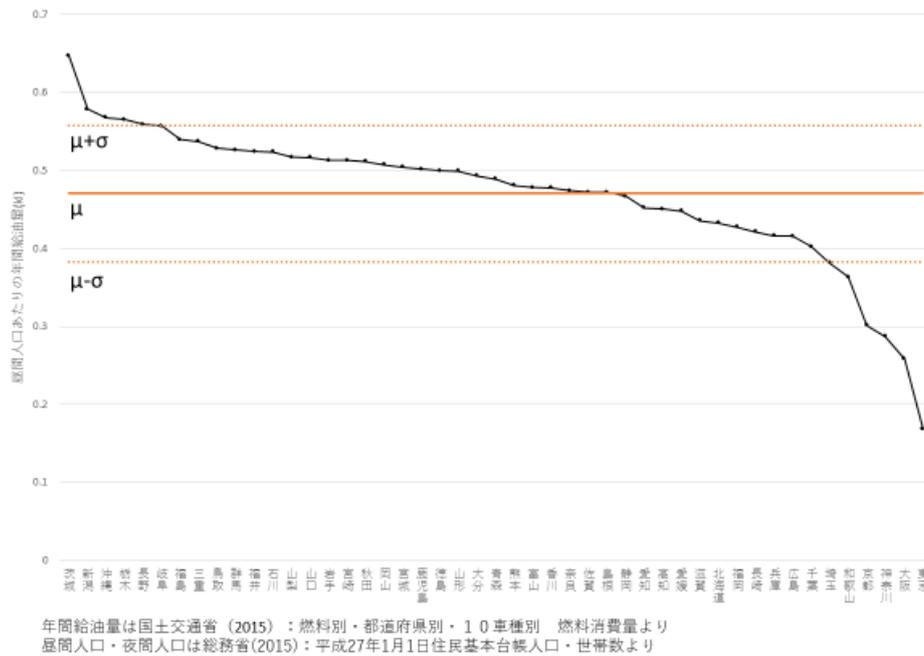


年間給油量は国土交通省（2015）：燃料別・都道府県別・10車種別 燃料消費量より
 昼間人口・夜間人口は総務省（2015）：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数より

B-4 夜間人口都道府県別年間ガソリン燃料消費量（2015年）

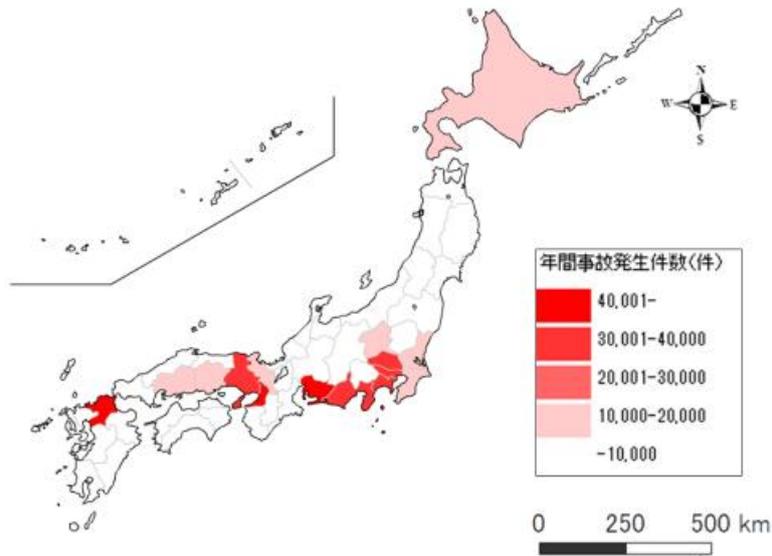


B-5 昼間人口あたり都道府県別年間ガソリン燃料消費量 (2015年)



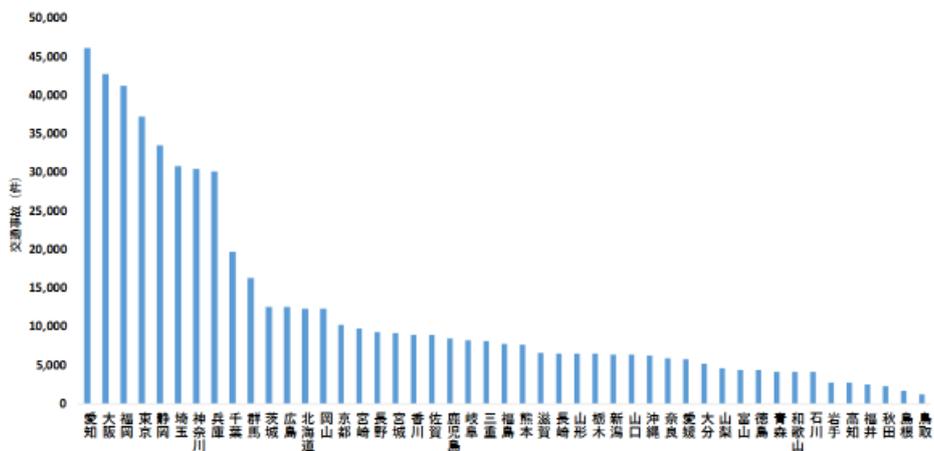
B-6 昼間人口あたり都道府県別年間ガソリン燃料消費量(2015年)

付録 C 交通事故件数分析



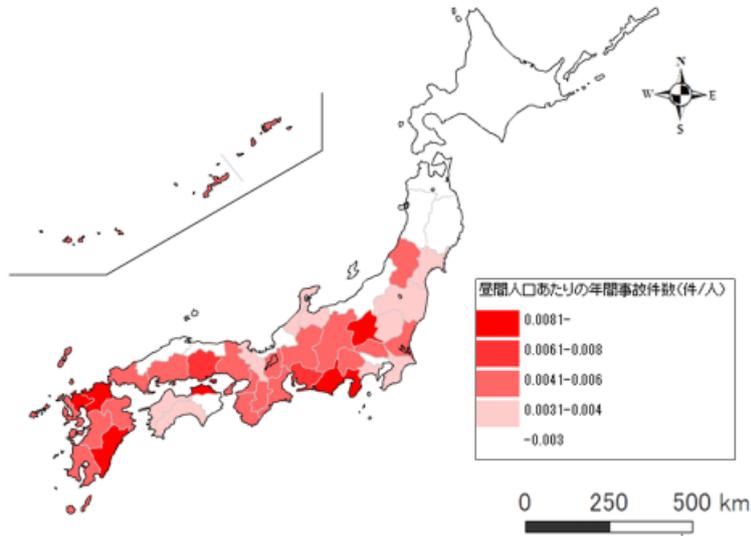
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-1 都道府県別年間交通事故件数 (2014年)



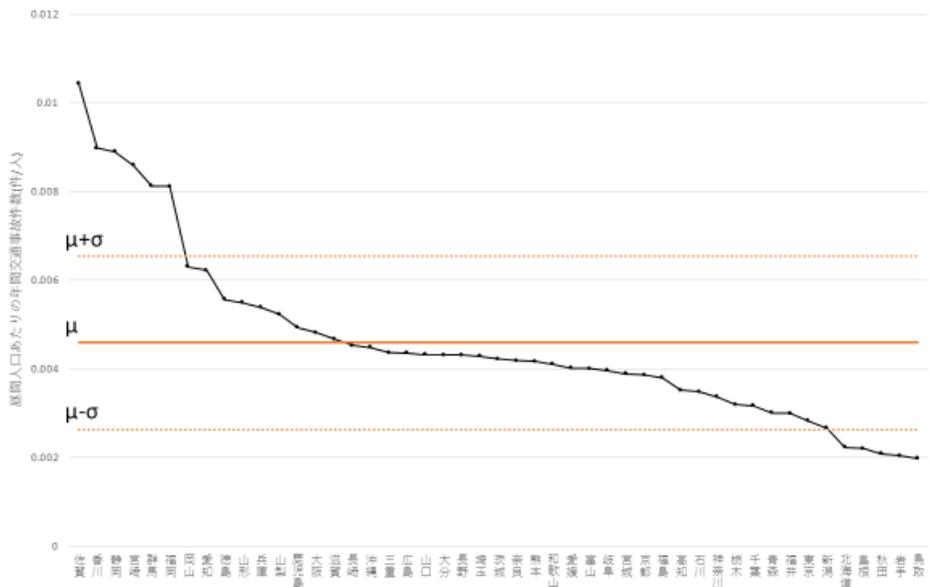
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-2 都道府県別年間交通事故件数(2014年)



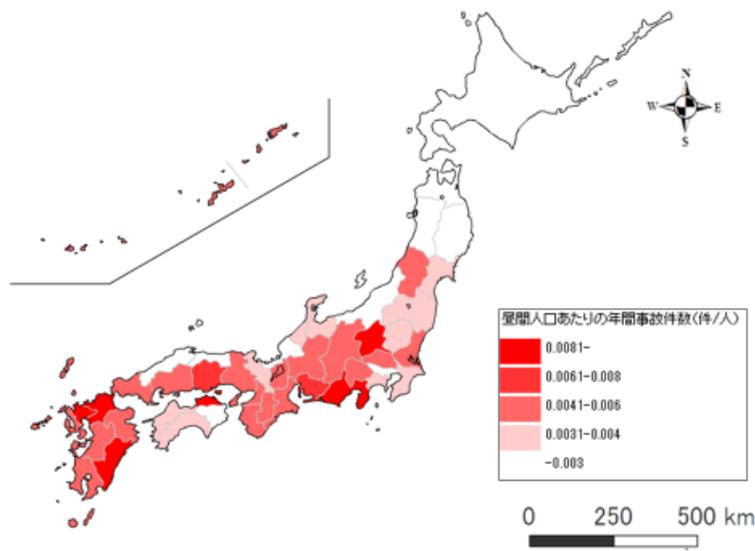
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
 昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-3 夜間人口あたり都道府県別年間交通事故件数(2014年)



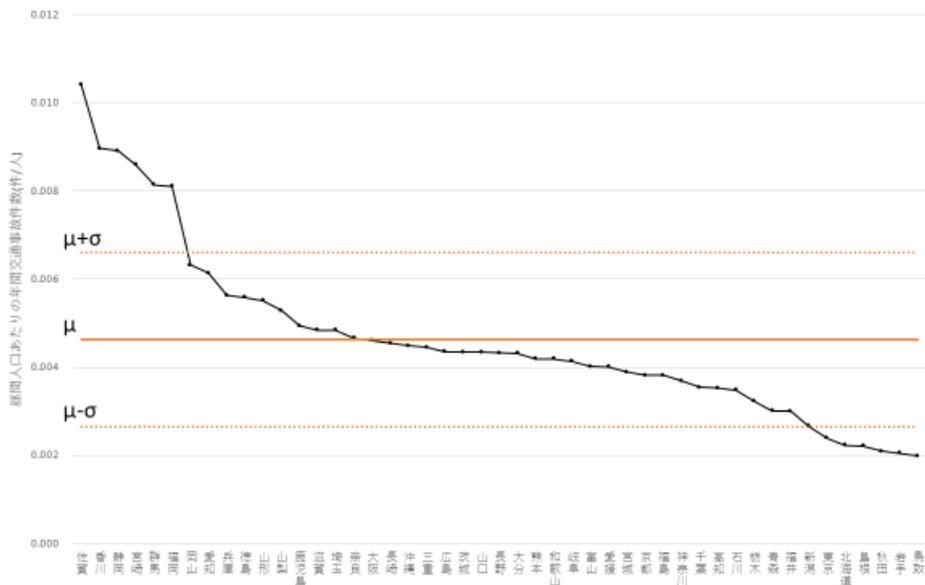
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
 昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-4 夜間人口あたり都道府県別年間交通事故件数(2014年)



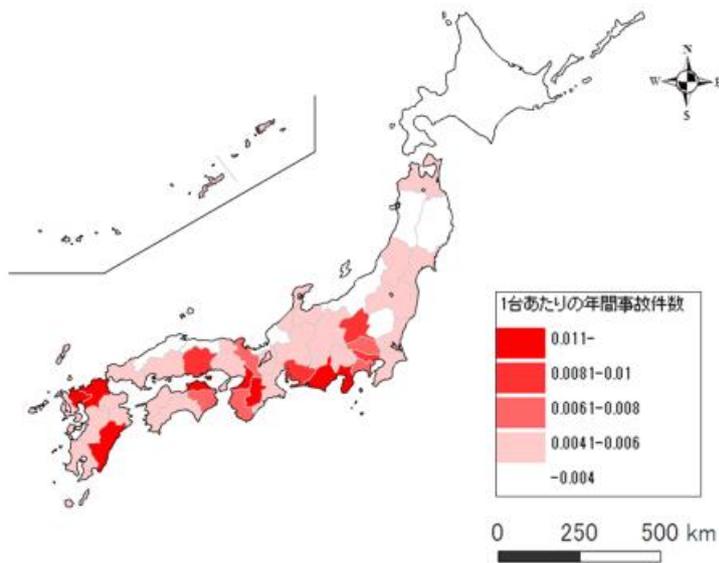
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
 昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-5 昼間人口あたりの都道府県別年間交通事故件数(2014年)



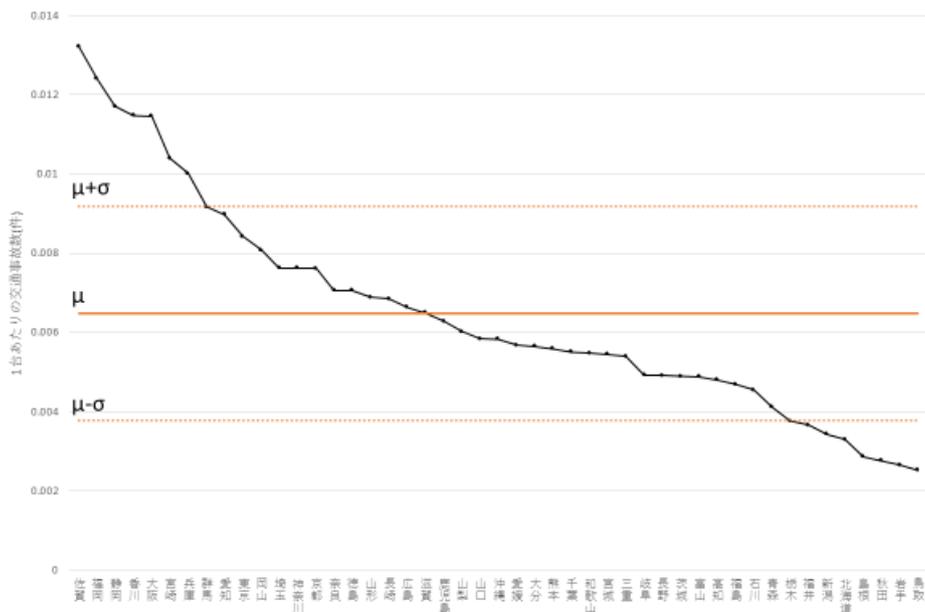
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
 昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-6 昼間人口あたりの都道府県別年間交通事故件数(2014年)



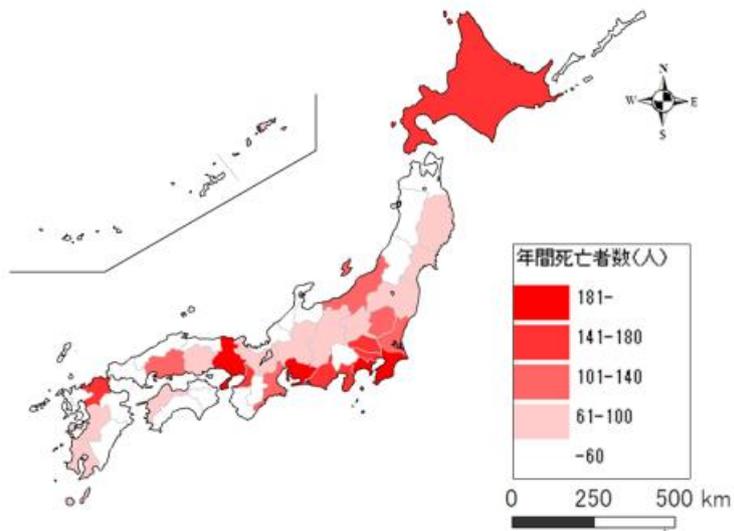
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-7 1台あたりの年間事故件数(2014年)



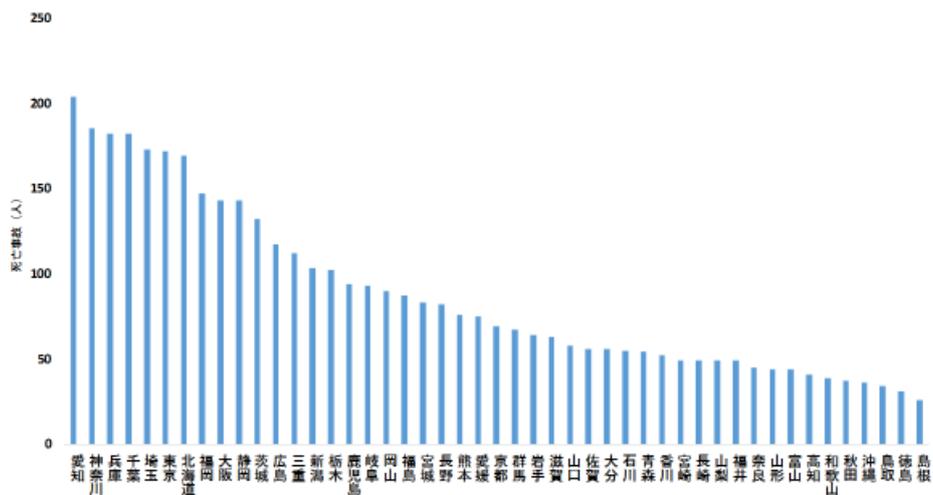
年間事故件数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-8 1台あたりの年間事故件数(2014年)



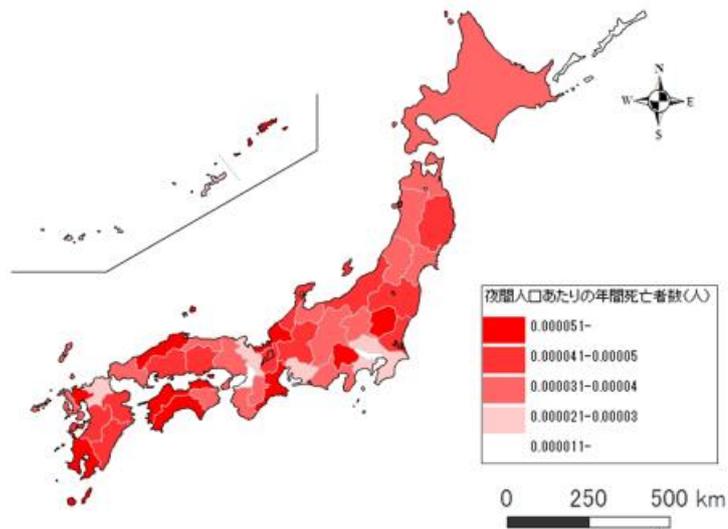
年間交通事故死亡者数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-9 交通事故における死亡者数(2014年)



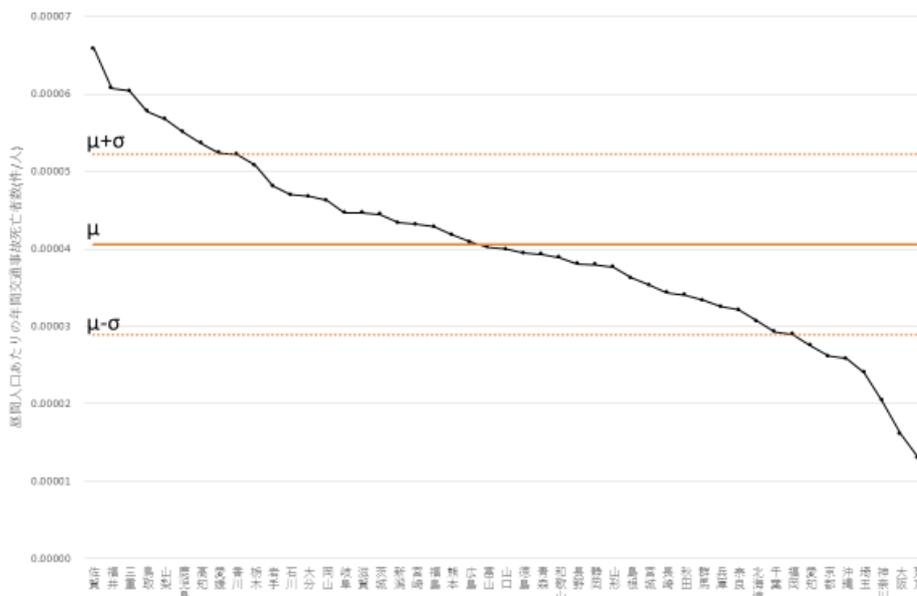
年間交通事故死亡者数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-10 交通事故における死亡者数(2014年)



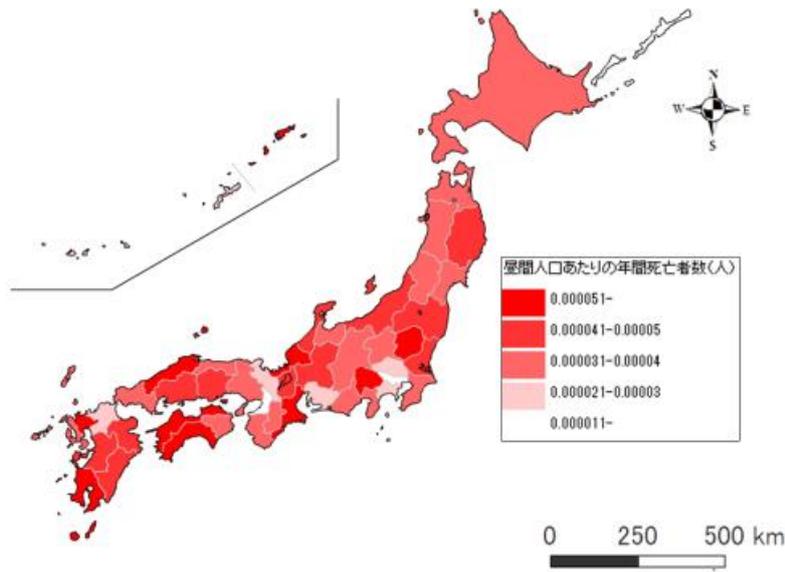
年間交通事故死者数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-11 夜間人口あたりの都道府県別年間交通事故死亡者数 (2014 年)



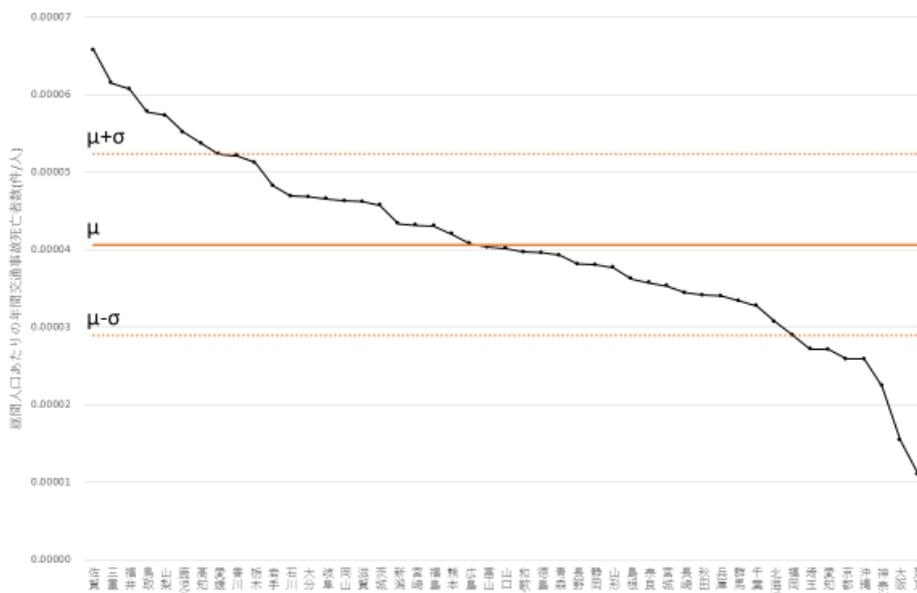
年間交通事故死者数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-12 夜間人口あたりの都道府県別年間交通事故死亡者数 (2014 年)



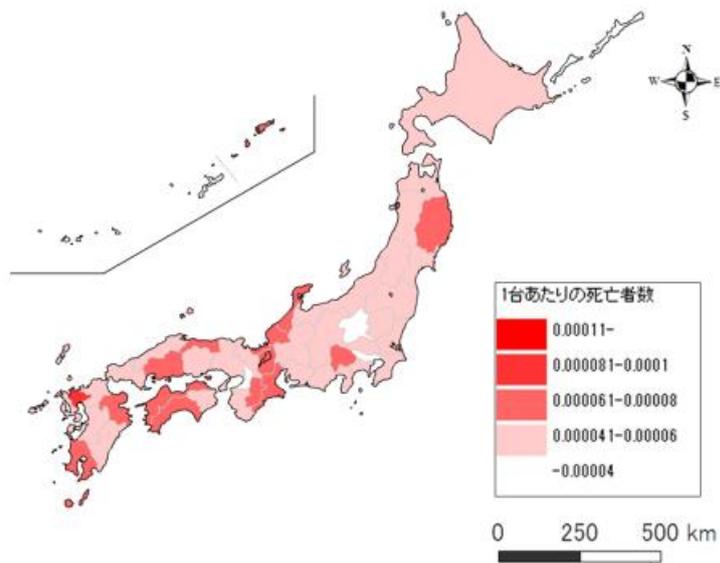
年間交通事故死者数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
 昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-13 昼間人口あたりの都道府県別年間交通事故死亡者数 (2014 年)



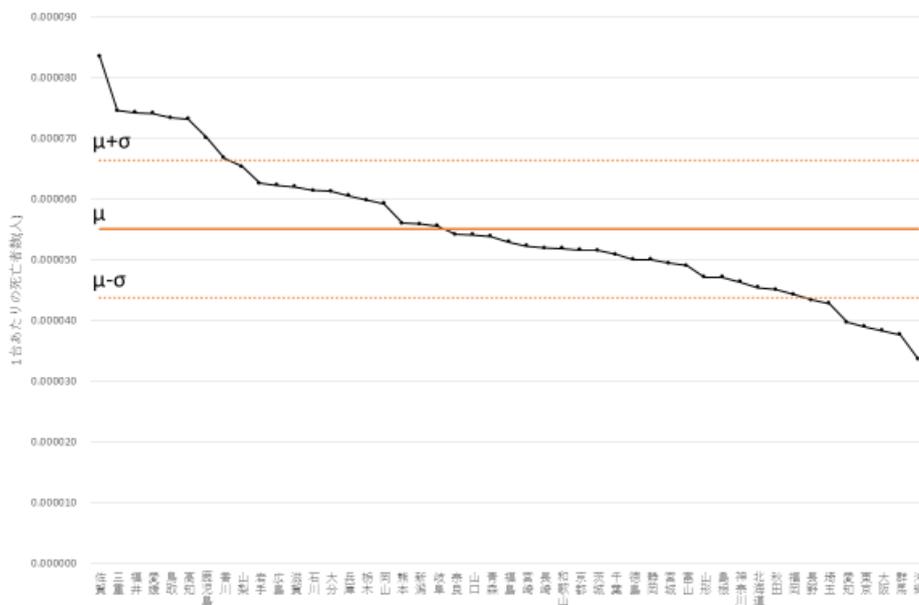
年間交通事故死者数は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故
 昼間人口・夜間人口は総務省(2015)：平成27年1月1日住民基本台帳人口・世帯数

C-14 昼間人口あたりの都道府県別年間交通事故死亡者数 (2014 年)



年間死亡者は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-15 1台あたりの年間死亡者 (2014年)



年間死亡者は国土交通省(2014)：都道府県別道路交通事故

C-16 1台あたりの年間死亡者 (2014年)