

ドライバーコストを考慮した隊列走行の車両マッチングに関するシミュレーション分析

川瀬 俊明¹・平田 輝満²・森岡 駿介³・鍛冶 竜馬⁴

¹正会員 前 茨城大学大学院 理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

²正会員 茨城大学准教授 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)
E-mail: terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

³学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

⁴非会員 茨城大学 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

本研究はトラックの隊列走行に関してドライバーコストを考慮した運用方を提案すると共に、これらを考慮した隊列編成の意思決定を組み込んだシミュレーションを開発し、隊列編成による遅延量や方策別の総コストを比較・検討した。具体的には、高速道路上での隊列走行の運用方を検討するにあたり、トラックドライバーの労働時間における法的制約を整理し、隊列走行車のドライバーにおける労働条件制約の検討事項を示した。次に、隊列走行の運用策や制約条件から高速道路上での隊列走行の車両マッチングを評価可能なシミュレーションを開発した。本シミュレーションでは、隊列走行の輸送コスト評価で新たに指標として加えたドライバーコストによって、従来よりも総輸送コストが削減されることを示した。

Key Words : *Truck platooning, Freight transport, Vehicle matching, Drivers cost, Simulation*

1. はじめに

増加する交通事故の減少や交通渋滞を緩和させるために新たな交通サービスの創出が求められている。現在、国土交通省では自動運転技術の実用化に向けてシステムの実証実験やルールの整備を推進し、2020年度の無人走行による移動サービスの実現を目標として定めている¹⁾。その中で特に隊列走行は都市間交通の輸送の中で、車両の省エネルギー化や交通流改善に大きな役割を果たす。

我が国における隊列走行の実証実験では、NEDO²⁾が2013年に大型トラック3台で時速80 km/hの走行を可能とし、15%以上のエネルギーを削減したことで我が国での先進的な事例として挙げられ、着々と実証試験が進められている。政策的には内閣府で開かれている未来投資会議構造改革徹底推進会合³⁾で、自動運転の実現に向けたルールの整備や隊列走行の実証実験を段階的に実施している。

物流業界が抱える問題として、トラックドライバー不足や過酷な労働環境が挙げられる。特に都市間輸送を担うトラックドライバーは、長距離輸送による長い拘束時間や宿泊勤務などにより、都市内配送のドライバーと比

較しても過酷な労働環境が懸念される。これに対して隊列走行は後続車両を自動追従や無人化することで、トラックドライバーへの負担が大きく解消されることが期待される。

将来的な隊列走行の導入にあたっては事前に現行の法制度上の問題点や実運用上での課題などの具体案を検討する必要がある。また、隊列走行を導入する場合には関連施設の立地や道路インフラの整備・運用管理、隊列走行機能を持つ車両の導入など、一定程度の追加的費用が掛かる可能性が考えられるため、その導入効果を事前に推計することは重要である。特に隊列を編成するための施設立地場所によっては、隊列の効果や安全性に大きな影響を及ぼす可能性も考えられることから定量的な評価が必要である。また、隊列走行は完全無人走行が最終的な目標であるが、技術的な導入初期段階においては、安全上の観点から先頭車両のみの有人走行だけではなく、先頭車両以外の全車両にドライバーを乗車させて運用する場合も可能性としては十分にあり得る。しかし、現段階では導入初期段階の具体的な運用策についても定まっていないため幅広い議論と検討が必要である。

一方、隊列走行に関する研究は国内外で行われている

が、海外の方がより先進的な研究が多い。例えばZhang et al.⁴⁾ (2017)は、不確実性を考慮した車両のスケジューリング問題に対する総費用の最小化の問題とトラックの単独走行と隊列走行の総コスト費用の差を分析した。また、Ling et al.⁵⁾ (2016) は、トラックの車両マッチングの際に前後車両を参照し、燃料消費コストの計算を行うことで最適な速度を決定するアルゴリズムを内包したマイクロシミュレーションを構築している。これらの研究は他にも多岐にわたるが、隊列走行のメリットの一つである燃料消費削減効果や隊列編成に伴う遅延量に焦点を当てた研究のみにとどまっている。我が国での隊列走行導入効果を考えると、トラックドライバーの労働環境改善や労働力不足への寄与も大きく、トラックの隊列を組む意義は諸外国よりも大きい可能性も考えられる。

2. 本研究の目的

研究の最終的な目的は、隊列走行の車両マッチングを決定する上で考慮されていなかったトラックドライバーコストを加えた輸送コスト評価関数を提案すると共に、隊列走行の車両マッチングを評価可能なシミュレーションを開発し、運用方策別の効果を比較検討することで、今後の隊列走行の実現へ向けたインフラ整備に有用な知見を提供することである。具体的な目的として以下の3点を挙げる。

- ①高速道路上を想定した隊列走行の運用策とその課題を整理し、現行のトラックドライバーの労働条件などと合わせて、隊列走行の法的な問題と検討項目を示す。
- ②隊列走行の輸送コストを評価する指標として、燃料消費量に加えてドライバーコストを考慮した評価関数を検討し、それを内包した隊列走行の車両マッチング挙動を表現可能なマイクロシミュレータを開発する。これを用いてドライバーコストや待避所の有無を考慮した車両マッチングを再現し、輸送コストを定量的に示す。最終的に、提案した方策を組み合わせて、シナリオ別の効果について比較検討を行う。
- ③自動運転の技術進歩や隊列走行の法的制約に伴う将来の隊列走行運用策を仮定した上で、導入効果を比較検討する。

3. 隊列走行導入における検討項目の整理

(1) 想定するトラック隊列走行の技術的制約条件

トラックの隊列走行を我が国で本格的に導入するためには、隊列走行導入の効果や制度上の課題点を整理し、適切な運用方策を事前に検討しておく必要がある。特に

表-1 自動運転における自動化レベル指標⁶⁾

SAEレベル		ハンドル操作	走行環境	運転のバックアップ	システム能力
3	条件付き自動化	システム	システム	ドライバー	いくつかの運転
4	高度な自動化	システム	システム	システム	いくつかの運転
5	完全自動化	システム	システム	システム	全ての運転

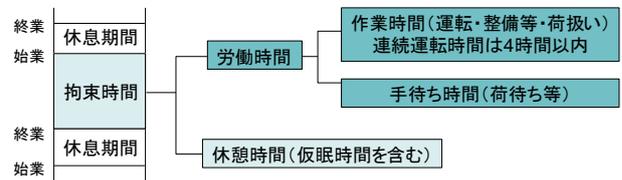


図-1 トラックドライバーの労働時間区分

隊列走行に関する法的な制約については国でも鋭意議論中であるが、隊列走行のメリットが十分に生かされるように現行の法制度の問題点を整理しておくべきである。

まず想定する隊列走行の技術的な導入段階について提示する。本研究では、原則的にSAE(Society of Automotive Engineers)レベルで示されているレベル3が可能であるという前提の下で議論を行う(表-1参照)。具体的には、トラック間の車車間通信が可能で周辺トラックの位置情報が既知であり、かつそれぞれのトラック情報を受信することで加減速が可能であるとする。各トラックは先頭車のトラックに追いついて追従する際に、すべての意思決定を先頭車へ移譲することで、先頭車両のみが他の車両との通信を行うと仮定する。

(2) トラックドライバーにおける労働条件と隊列走行時の運用策の整理

本節では、隊列走行の導入時のドライバーコストを評価するにあたって、現行のドライバーの労働条件と隊列走行時のドライバー運用策の具体例を示す。

厚生労働省によって公表されているトラックドライバーの労働時間区分は図-1のように分けられ、それぞれの時間に制約条件を設けている。本研究で特に着目する点は、作業時間に含まれる連続運転時間の制約である。現行の制約では、長時間運転に伴う集中力の低下を防ぐため、連続で4時間運転した後に30分以上の休憩が原則義務付けられている。一方、特例として2人乗務の場合や北海道-本州で輸送するためにフェリーへ乗船する際には規則が異なる。2人乗務の場合は1日の最大拘束時間が20時間まで延長され、休憩期間は4時間まで短縮可能となる。またフェリー乗船時には、船内を自由に移動できるとみなし全て休憩期間となる。

これらの労働条件より隊列走行時の運用を考えると、

隊列走行の導入初期に安全管理の観点から後続車両へドライバーが乗車する場合に、現状の労働基準で①作業時間、②休憩時間、③休息期間のどれに該当するのが運用上重要である。SAEレベル3で先頭車両に追従する際には、後続ドライバーは運転業務には従事しない。しかし、基本的に走行中外に出ることは不可能であるため休息期間とはならない点や、運転業務に従事しないので作業時間ともならないことから、現行基準では休憩時間としての扱いが妥当ではないかと考える。また、労働時間の制約は2人乗車の基準が参考となるのではないかと考えられる。但し、運転をしていない状況下で車内に身体を伸ばして休息可能か否かが1つの重要な観点になると考えられる。

仮に、後続のドライバーが休憩時間として認められる場合には、隊列走行の導入による様々なメリットが考えられる。例えば、図-2に示すような単独走行と隊列走行の所要時間を比較した場合、大きく分けて①ドライバーの労働環境改善、②所要時間の短縮効果が挙げられる。前述のように、本来は4時間連続で運転した場合には30分の休憩が義務付けられているが、図-2のトラック④のように単独で運転後に隊列を組むことで休憩を車内でとりながら移動可能である。この間は車内での休息の他にも、運転時間外の業務を車内で行うことで総拘束時間が短縮されると共に、30分間の休憩をせずに出発するので総所要時間も短縮できる。基本的に輸送コストは所要時間に依存するため、所要時間の短縮は大きな効果が期待できる。

4. 隊列走行を想定した都市間配送に関するシミュレーションの構築

(1) ドライバーコストを考慮したコスト評価関数の提案

第3章で整理した隊列走行の運用策や法的制約を基に、隊列走行の車両マッチングによる輸送コストを評価可能な関数式を新たに提案する。既往研究では、燃料消費量やスケジュールミスを定量的に評価するモデル式を提案しているが、ドライバーコストに関しては考慮されていない。ドライバーコストを評価関数に内包することでドライバーの有無によるコストなど隊列走行の段階的な導入に対しても単純比較が可能となる。式(1)~(3)に本研究で提案する評価関数について示す。

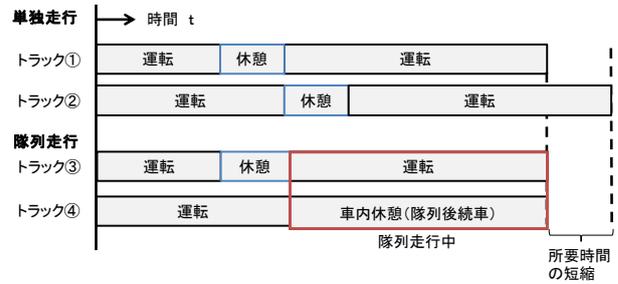


図-2 単独走行と隊列走行時の所要時間のイメージ

- 総コスト関数
$$C_{(n)} = C_{t(n)} + C_{f(n)} \quad (1)$$
 - 時間コスト関数
$$C_t = C_c + C_d$$

$$(C_d = w_d(w_c t_c + t_l), C_c = w_t t_t) \quad (2)$$
 - 燃料コスト関数
$$C_f = w_f(a f_{(v)} t_p v + f_{(vm)} v t_a + t_s v) / \delta \quad (3)$$
- 但し、

- $C_{(n)}$: 総コスト(円)
- $C_{t(n)}$: 時間コスト(円)
- $C_{f(n)}$: 燃料コスト(円)
- C_d : ドライバーコスト(円)
- C_c : 車両・貨物コスト(円)
- w_t : 車両・貨物の時間価値(円/h)
- t_t : 旅行時間(h)
- w_f : ガソリン価格(円/L)
- a : 空気抵抗削減率
- $f_{(v)}, f_{(vm)}$: 燃費関数
- 速度 : v (km/h)
- δ : 燃費(km/L)
- t_p : 隊列編成中の時間(h)
- t_a : 加減速中の時間(h)
- t_s : 単独の走行時間(h)
- w_d : ドライバーの時間価値(円/h)
- t_l : ドライバーの運転時間(h)
- w_c : 後続車両定数
- t_c : 隊列の後続走行時間(h)

である。

これらはトラック毎に計上される輸送コストを定量的に示したものであり、①時間コスト、②燃料消費コストを和にしたものを総輸送コストとする。本評価指標は、時間コストを車両・貨物コストとドライバーコストに分けた点が特徴である。ドライバーコストは変数により、後続車ドライバーの扱いによる差を表現可能とした。

(2) 車両マッチングシミュレーションの構築

第3章では、隊列走行を導入した際のコスト削減効果や運用上の課題点などを整理し、隊列走行の定性的な効果について示した。隊列走行車両の導入に関しては車両の技術だけではなく、高速道路の道路構造やターミナルや待避所などの付帯施設の立地条件についても検討しておく必要がある。また、車両技術・自動運転レベルに関しても導入時期を含め不確実な要素が残されているため、①車両挙動、②施設配置の2つに関して様々なパターンを検討しておく必要がある。そこで、車両の制御方法によるコスト削減効果を定量的に示すために、高速道路上での車両マッチングシミュレーションを作成した。

シミュレーションのフローを図-3に示す。車両の発生分布は物流センサス(2015年調査)のデータから東名高速道路(東京-小牧IC)を全区間通る車両を抽出して与えた(図-4参照)。本研究では特に交通量の多い出発時間が15~17時台のデータを用いて、一時間当たりの発生台数の中でランダムにトラックを発生させた。隊列走行を想定したマイクロシミュレーションは、大きく分けて1)完全スケジュール既知の計画モデルと2)リアルタイムに更新するトラックの位置情報から逐次組む隊列を決定する計画モデルに分けられる。本研究では将来的な不確実性の付与などのシミュレーションの拡張性を考慮して2)の計画モデルをベースとするトラック同士の隊列計画を検討した。隊列を組むトラック間の組み合わせは、当該トラックが持っている前後トラックの位置情報とマッチングまでに要する時間、マッチング後残距離の情報を基に、第4章(1)で示したコスト評価関数の値を計算する(図-5参照)。トラックのペアはa)前方車両、b)後方車両、c)単独走行から最もコスト関数が低い組み合わせを決定する。なおコストの計算にあたって必要な諸条件は表-2に示す。

また、本シミュレーションでのトラック速度制御は、高速道路に進入後、一定の速度(V_{Avg})で走行するものとし、隊列編成時にのみ速度を調整(V_{Max} , V_{Min})して隊列を組むと仮定した。隊列編成後は元の速度に戻るものとする。

本研究における新規性の一つにドライバーコストを定量的に示すことを挙げているが、我が国における現行の法制度ではトラックドライバーの連続4時間以上の運転は労働基準法違反となる。仮にこの法制度がない場合においても、人間が運転する以上、トイレなどのために数時間に一度の休憩は必要となってくる。仮に完全無人走行の状況下でも電気自動車を導入した場合には数時間に一度の充電が必要となることも考えられる。よって、長期的な将来の運用を考慮しても数時間に一度の停止を含めた隊列走行の効果を検証することが必要と考えた。本シミュレーションでは、厚生労働省から公表されている指針に倣い、連続4時間以上走行する場合には原則的に

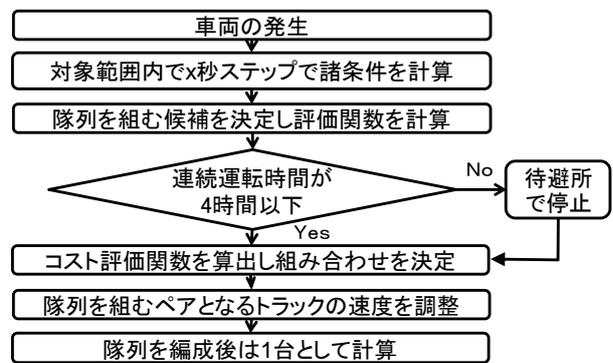


図-3 シミュレーションのフロー

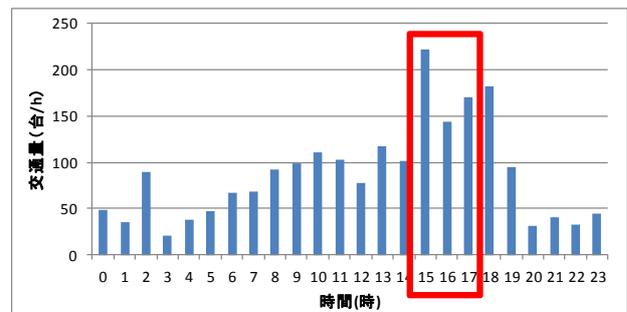


図-4 東名高速道路(東京-小牧IC)の時間帯別交通量

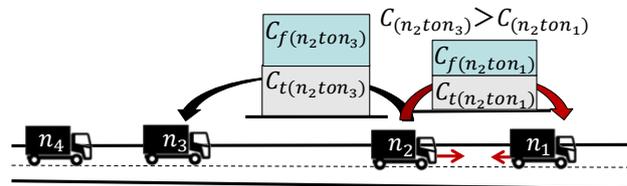


図-5 トラック間の組み合わせ決定イメージ

表-2 シミュレーション条件

道路長(東名高速道路)	346.7	(km)
V_{Avg} , V_{Max} , V_{Min}	80, 90, 70	(km/h)
w_t : 車両・貨物の時間費用	536	(円/人・時間) ⁹⁾
w_d : ドライバー機会費用	3,323	(円/人・時間) ⁹⁾
w_f : ガソリン価格	100	(円/L) ⁸⁾
α : 空気抵抗削減率	0.82-0.88	(2-4台)
δ : 燃費	4	(km/L) ⁹⁾
$f_{(vm)}$: 燃費関数	$f_{(vm)} = -0.025v^2 + 3.25v + 15$, v : 速度(km/h)	
w_c : 後続車両定数	1.0	

30分の休憩を待避所とするものとする。なお、待避所では隊列走行車両の組み替えは行わず、既存の隊列のまま停止するものとする。図-6に構築したシミュレーション環境を示す。本研究では、東名高速道路の道路長を想定し、当該区域内のSA・PAの設置数を平均して15 km毎に待避所を設置する。

5. 高速道路上での隊列走行マッチングと導入効果に関するシミュレーション分析

(1) 既存の隊列形成モデルとの比較と効果の検証

既往研究では、隊列形成の際に燃料消費量削減に効果があるトラックの組み合わせを決定するアルゴリズムを提案していた。ここでは、新たに加えた評価項目や待避所における停止挙動を考慮した隊列走行車両のコスト評価を行う。なお本シミュレーションにおいては、隊列を組んだ車両のうち1台以上の連続運転時間が4時間を超える場合には待避所で30分休憩するが、休憩時、隊列内に連続運転時間2時間以下のドライバーが存在する場合には5分間の休憩後に走行を再開し休憩時間を短縮できるものとする。

a) 燃料消費量だけの車両マッチングと所要時間コストを加えた場合の隊列挙動及び総コストの比較

我が国においては、既述したようにドライバーの労働環境改善のニーズが高まっている。本項ではドライバーコストを考慮した隊列走行の導入効果を検証する。図-7には、コスト関数別の車両マッチングと単独走行の総輸送コストと総所要時間の比較を示す。従来の消費燃料のみの評価にドライバーコストを含む所要時間の項を加えることで、隊列を組むことにより所要時間が短くなるトラック間においてマッチングが行われ総コストが削減された。また、ドライバーコストと燃料費コストに着目すると、それぞれの評価指標で最適化されていることが示された。

b) 待避所の有無による輸送コストの比較

トラックの都市間輸送は比較的長時間の輸送となり、トラックドライバーの休憩時間やEVトラックの充電など停止時間が必要となる。既存研究で示されている隊列走行のコスト削減効果には、停止時間を考慮していないことから輸送コスト削減量を過大評価している可能性がある。図-8に休憩のための停止の有無（待避所の有無）による総輸送コストと所要時間の比較を示す。総輸送コストは約130~160万円/全台数3時間の差があることが確認でき、停止時間の考慮の有無によるコスト削減量の差異が分かる。

c) 走行距離別の休憩時間短縮による総コストの比較

本研究は東名高速道路(346 km)を想定し分析を行ったが、この区間において80 km/hでの走行と連続運転時間4時間を仮定すると最大で2回程度の休憩が発生することとなる。本項ではより長距離の輸送を考慮するために道路長を東名の2,3倍とし、距離別の休憩時間短縮の効果を比較する。図-9に道路長別の総輸送コストの内訳と総所要時間の比較を示す。いずれの場合でも休憩時間短縮による所要時間およびコストの削減効果が示された。また輸送距離が長いほど所要時間の差やコスト削減

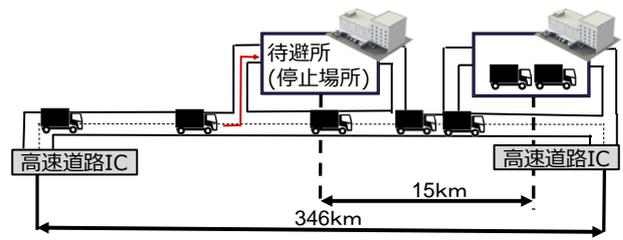


図-6 シミュレーションの概要

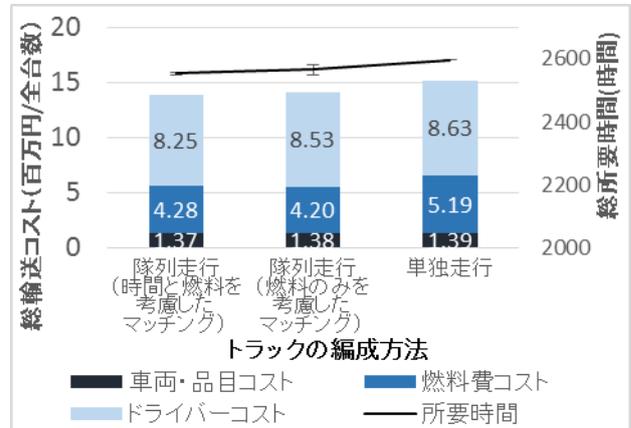


図-7 コスト関数別の総輸送コストの内訳と総所要時間

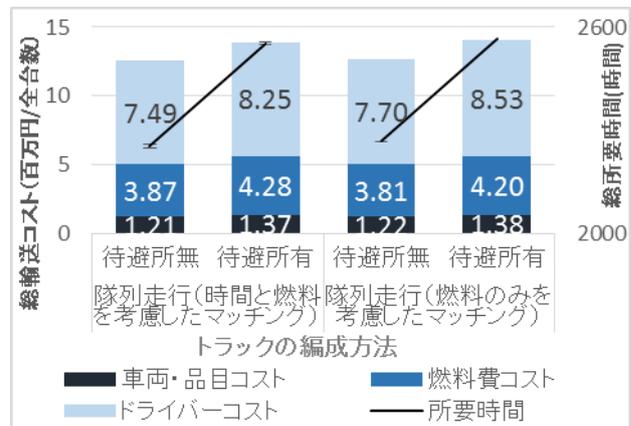


図-8 待避所の有無による総コストと所要時間の比較

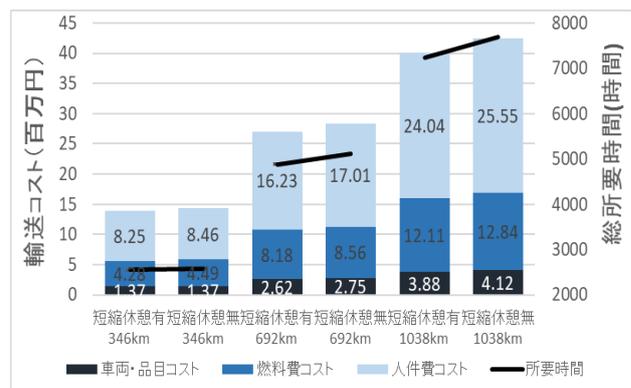


図-9 走行距離別の総輸送コストの内訳と総所要時間

の割合が大きいことが明らかとなった。

(2) 将来の状況を想定したシナリオ別の比較

a) 隊列走行後続車のドライバー時間価値別の効果検証

本研究で構築した人件費評価関数は、後続走行定数である w_c の値を変化させることで、隊列走行の後続車両のドライバー時間価値を変更可能である。隊列走行における後続車両のドライバーに関する労働基準は法的な制約が定まっていないため、事前に十分な議論が必要である。そこで、評価関数に含まれている後続走行定数を $w_c=1.0, 0.5, 0$ の3通りの場合分けし、ドライバーの人件費削減効果について感度分析を行った。それぞれの定数におけるシナリオは下記に示す。

$w_c=1.0$ 後続車両のドライバーも乗っているだけの仕事無

$w_c=0.5$ 後続車両内で他の仕事に従事

$w_c=0$ 後続車両を無人走行であると仮定

図-10に後続車ドライバーの時間価値別の総輸送コストの内訳と総所要時間を示す。本研究において定義した後続走行定数の値が小さくなる毎に人件費コストが削減されるが、燃料費コストと車両・品目コストに関してはコストが不変である。このことから、後続走行定数は隊列の組み合わせに対しては影響を及ぼさず、総輸送コストの減少量のみに影響することが分かる。

b) 隊列走行車両の普及率の影響分析

物流事業者が都市間輸送で隊列走行車両を導入するには、新型車両の新規購入や、特殊運転技能の習得など完全導入へはハードルが高い。そこで、隊列走行が可能となる車両の普及率別の総コストを比較した。図-11, 12には、隊列走行の普及率別によるコストと所要時間、台キロ当たりの隊列編成率を示す。隊列可能なトラック台数が少ないほど当該トラック間の距離が長くなるため、隊列を組むために要する時間も長くなる。本分析では普及率が1%の場合には台キロ当たりの隊列台数が4台になる割合が3.2%であることから、ほとんどの区間で隊列を組むことがなかった。このことから隊列走行の普及率がコスト削減に与える影響は大きく、物流事業者が隊列走行に参加しやすい枠組みを構築することが重要となる。

また本研究ではSAEレベル3の自動運転の導入を仮定して行ってきたが、今後の技術開発に伴いより高度な自動運転が実現する可能性がある。そこで隊列走行のシナリオ別総輸送コストと総所要時間を比較し、結果を図-13に示す。SAEレベル5は完全自動運転となるため、ドライバーの休憩時間が皆無となり停止することなく目的地へ到達することができる。このため所要時間は短縮され、また輸送コストはSAEレベル3の1/3程度となった。

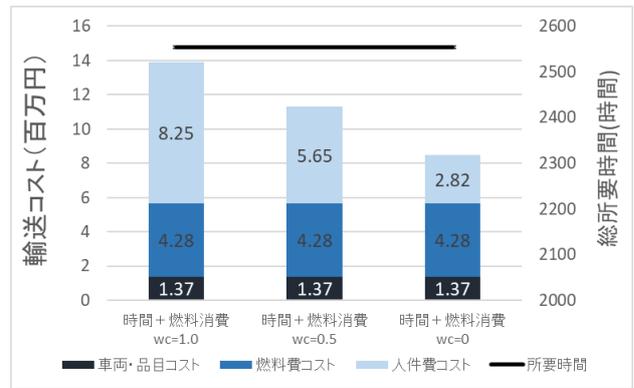


図-10 ドライバーの時間価値別の総輸送コストと総所要時間

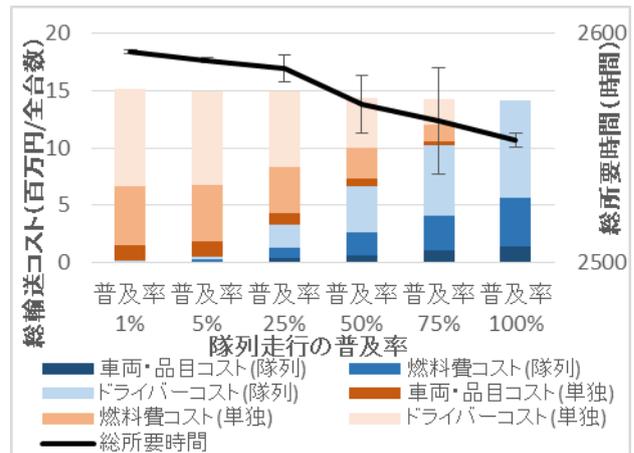


図-11 隊列走行車両の普及率別による総コストと総所要時間



図-12 隊列走行の普及率別による隊列走行の編成率

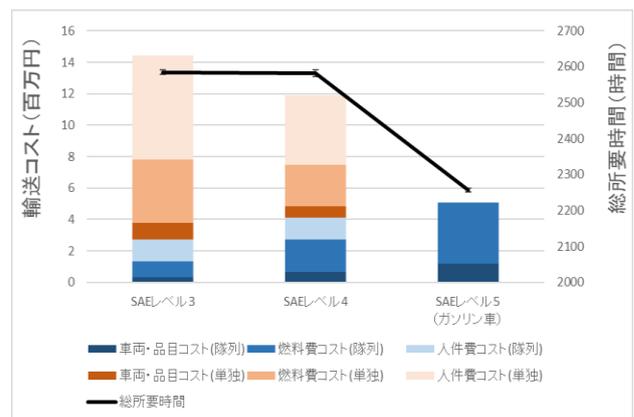


図-13 隊列走行のシナリオ別総輸送コストと総所要時間

6. 結論

本研究では、我が国のトラックドライバーにおける法的制約を整理し、隊列走行の後続車両にドライバーが乗車する場合における労働条件の扱いについて考察を行った。

加えて、上記で整理した隊列走行の運用策や制約条件を基に、高速道路上での隊列走行の車両マッチングシミュレーションを開発した。具体的には隊列走行導入におけるコスト評価で、これまで評価されていた燃料消費量に加えて、ドライバーコストを加えることによる隊列走行のマッチング挙動を評価可能なシミュレーションモデルを構築した。

最後に、今回新たに加えた人件費評価指標によって隊列走行時の総コストが削減されると共に、休憩などの理由でトラックが待避所で一時停止する場合を想定し、これまでの研究での隊列走行による削減効果が過大に推計されていたことを示した。また、隊列走行の普及や高いレベルの自動運転の実現によっては、より大きな輸送コスト削減や時間短縮といった効果が発生することを定量的に示した。

今後の課題としては、トラックの隊列を組む対象の選定に関する最適化手法の検討、より台数の多い隊列を組めるようにすること、対象区間（東名）において複数のODを設定すること等、が挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省，構造改革徹底推進会合第3回，http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/4th_sangyokakumei_dai3/sankou5.pdf，2018/7/30閲覧。
- 2) NEDO，News Release，http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100178.html，2018/7/30閲覧。
- 3) 首相官邸，構造改革徹底推進会合第3回，http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/4th_sangyokakumei_dai3/siryou6.pdf，2018/7/30閲覧。
- 4) Wei Zhang, Erik Jenelius, Xiaoliang Ma : Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty, Transportation Research Part E,98 ,(2017) 1–23.
- 5) Kuo-Yun Liang, Jonas Mårtensson, and Karl H. Johansson : Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation for Fuel Efficiency, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 17, NO. 4, pp1051-1061, 2016.
- 6) 国土交通省：SAE国際会議における自動化レベル，<http://www.milt.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/05/2.pdf>，2018/01/20閲覧。
- 7) 東京都トラック協会：軽油価格情報，http://www.totokyo.or.jp/management_index/diesel_oil_price，2018/01/26閲覧。
- 8) 国土交通省：自動車燃費一覧。
- 9) <http://www.milt.go.jp/common/000206664.pdf>，2018/7/30閲覧。

(2018. 7. 31 受付)