

物流センサスを活用したトラック隊列走行の 燃費削減効果推計手法に関する研究

竹田 郁海¹・平田 輝満²・阿部 柊人³

¹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四丁目12-1)

E-mail:19nm821t@vc.ibaraki.ac.jp

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四丁目12-1)

E-mail:terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

³非会員 青森県庁 (〒030-8570 青森県青森市長島一丁目1-1)

貨物輸送においてトラックが未だに大部分を占めているが、ドライバー不足が深刻化していることから、トラックの効率化を図っていく必要があると考え、その一つとして隊列走行に着目した。隊列走行に関する研究として、日本で隊列走行を導入した際の効果について、現実の貨物流動状況と現実的な隊列組成プロセスを同時に考慮して明らかにしたものはないことから、本研究では、隊列走行の参加ポテンシャルや効果を推計する確率モデルを、現実的な隊列運用プロセスを考慮しながら構築した。また、東北自動車道での隊列参加ポテンシャルや燃費削減効果を、物流センサスを用いて現実の貨物流動から定量的に明らかにし、さらに隊列参加ポテンシャルや燃費削減効果を向上させる要因を明らかにした。

Key Words: *Truck platooning, freight transport census data, probabilistic model, fuel saving*

1. はじめに

(1) 背景

2015年の物流センサスによると、代表輸送機関別シェアではトラックが約85%であり、また国内貨物輸送量(トンキロベース)を見ると自動車貨物量は2015年では50.2%となっている¹⁾。このように、我が国ではトラック輸送が貨物輸送の大部分を担っている。また、近年では時間指定ニーズの増加を主な原因として、物流件数の増加と小口化が進行しており、結果としてトラックの積載率低下を引き起こしている。2015年の営業用トラックの平均積載率は40.5%と、トラックの能力のおよそ4割しか利用していないこととなる¹⁾。さらに、トラックドライバーは今後不足することが予測され²⁾、また現状でも、荷主企業へのアンケート調査によると、特に300 km以上の中長距離ドライバーを確保しづらいという声や²⁾、青果物卸業界からはそうした中長距離ドライバーの確保難により遠隔地の農産物が届きづらいという声がある³⁾。

また、総合物流施策大綱に「物流は、我が国の産業競争力の強化、豊かな国民生活の実現と地方創生を支える、社会インフラであり、途切れさせてはならない。」⁴⁾とあるように、トラックドライバーの不足といった現状の

中でも物流を維持し、豊かな国民生活の実現と地方創生を支えるためにもトラック運用の効率化は必要である。

トラック運用の効率化案の一つとして、隊列走行が提案されている。隊列走行とは、複数のトラックが列をなして走行するもので、すべてのトラックにドライバーが存在する後続有人の場合でも、空気抵抗軽減による燃料使用量やそれによる二酸化炭素排出量の削減が期待される。さらに、自動運転により、先頭車両以外にドライバーの存在しない後続無人が実現された場合では、燃料使用量や二酸化炭素排出量の削減に加え、省力化や人件費削減の効果があると期待されており、現在実用化が目指されている。

しかし、クローズドコース⁵⁾や、公道実走実験⁶⁾のような実証実験を始め、実用に向けた技術開発に関する研究は国内外で多く行われているが、隊列走行を導入した際に、どれほどの車両が隊列走行に参加することができるのか、またどれほどの効果があるのかを我が国の物流市場を対象に分析されたものは少なく、また現実の隊列走行の運用を十分に考慮した研究であるとは言えない。

よって、後続無人の隊列走行について、より実際のマッチングメカニズムを想定して、隊列走行のマッチングポテンシャルと燃料消費量の削減量を明らかにすること

は、隊列走行導入効果のより正確な推計および後続無人の場合での隊列運用方法の検討のために必要であると考ええる。

(2) 既往研究

隊列走行の車両コーディネーション問題に関しては、隊列を編成する場合、大きく分けて、事前に出発時刻やルートを調整する方法 (off-road coordination) と走行しながら隊列相手を探す方法(on-road coordination)の2つがあり、前者は隊列走行のための自動運転車両の普及率が低い状況で適していることが指摘されている⁷⁾。また、どのように車両をマッチングさせるかを分析している研究が様々存在し、例えばZhang et al.⁷⁾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問題によりトラックの単独走行と隊列走行の総コストの差を分析している。また、Ling et al.⁸⁾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。このような理論的、仮想的な研究に対して、Kuo et al.⁹⁾は、実際のトラックの走行位置データを活用して、ヨーロッパ地域でどれほどの燃料削減が見込めるか、また、計画的に隊列を組むことで削減率はどのように変化するかを分析している。また、川瀬ら¹⁰⁾は後続有人隊列走行を対象に、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により車両マッチングを決定する交通マイクロシミュレーションを開発し、実際のマイクロな車両挙動と隊列運用を考慮したうえで、隊列運用方策ごとの燃料費削減効果や人件費削減量を分析した。一方で、本研究で着目しているように物流の諸特性 (貨物のOD, 貸切や混載などのトラック車種, 時間指定の有無など) を考慮した隊列車両マッチングの分析や我が国の道路ネットワークを対象とした研究はほぼない。車両マッチングやそのコーディネーションについて分析をする上で、利用経路や出発時刻等などの調整が重要となるが、モノの流れの特性を考慮することでより現実的な分析が可能になると考えられる。このような視点で分析した例として筆者らによる先行研究^{10) 11)}があり、これらの研究では後続有人隊列走行を対象に、東北自動車道での隊列走行の車両マッチングのポテンシャル推計方法について物流センサを用いて分析を行っているが、1時間単位の車両移動を想定しつつ、1時間で1度しか隊列を形成できないことを前提とした簡易な確率モデルによる推計に留まっており、必ずしも現実的な隊列組成プロセスを考慮した研究とはなっていない。

(3) 本研究の目的

以上を踏まえ、本研究では2015年物流センサデータ

をもとに東北自動車道を通過する貨物トラックに注目し、筆者らによる先行研究^{10) 11)}の手法を元に、以下の2点について研究を行う。

- ① 都市間物流データをもとに、複数車両からなる隊列組成や現実的な隊列組成プロセスを考慮した隊列車両マッチングのポテンシャルの推計方法を検討する。
- ② 東北自動車道を対象に、後続有人隊列走行による隊列車両のマッチングポテンシャルと燃料消費量の削減効果を推計する。

2. 分析対象路線と使用データ

(1) 分析対象路線

本研究では、国土交通省および経済産業省で検討されている通り¹²⁾、高速道路上で隊列走行を行うとし、対象とする高速道路としては、代替道路が少ないこと、また物流事業者からドライバー不足や荷量の偏在等で対策に苦慮する区間として首都圏と東北間が挙げられていることから¹³⁾、平田ら¹¹⁾と同様、東北自動車道を分析対象路線とした。表-1、図-1に区間設定の詳細を示す。また、物流センサの時間に関する情報は1時間単位での記載であるため、どの時間帯に東北自動車道のどの区間にトラックが存在するかを把握しながら分析を行うこととし、

表-1 分析対象路線と区間設定の詳細

区間名	開始IC	終了IC	IC間距離
a	青森(青森県)	十和田(秋田県)	77.9km
b	十和田(秋田県)	滝沢(岩手県)	80.5km
c	滝沢(岩手県)	水沢(岩手県)	72.8km
d	水沢(岩手県)	三本木(宮城県)	82.5km
e	三本木(宮城県)	国見(福島県)	90.8km
f	国見(福島県)	鏡石(福島県)	82.1km
g	鏡石(福島県)	上河内(栃木県)	83.0km
h	上河内(栃木県)	加須(埼玉県)	77.3km
i	加須(埼玉県)	中野長者橋(東京都)	61.7km



図-1 分析対象路線と区間設定の詳細

高速自動車国道である東北自動車道での大型貨物自動車の最高速度が80 km/hであることも考慮して、IC間の距離が80 kmに近くなるように東北自動車道の上りを基準にして9区間に区切った。区間*i*については、東北道の終点である川口まででは短かったため、東京都庁の乗降ICである中野長者橋ICまでを区間とし、この区間は約60kmであるが、東京外環自動車道・首都高速道路を含んでおり、交通状況の混雑が予想されることから同等の区間と仮定した。

(2) 輸送経路の設定

本研究では、平田ら¹¹⁾と同様、我が国で唯一の「純流動統計」として、国土交通省により1970年以来、5年おきに実施されている物流センサスのうち、2015年3日間調査のデータを分析対象として利用し、現実の貨物流動を対象に分析を行う。物流センサスでは、貨物流動1件ごとに、発着地や出荷時間、所要時間、輸送手段、貨物重量などを把握することができる。

しかし、物流センサスでは、発着高速道路ICのデータが少ないことから輸送における経路までは把握することはできない。そこで、平田ら¹¹⁾と同様、物流センサスに加えて、国土交通省の提供する、複数対複数の地点間による経路情報を取得できる総合交通分析システムNITASを利用し、各貨物流動の輸送経路情報を設定した。このとき、物流センサスでは発着地は市町村別で把握されているが、OD数が膨大となるため、本研究では物流センサスの各データの発着地を、各市町村の存在する都道府県の都道府県庁であると設定し、NITASによって各都道府県庁間の輸送経路情報を取得し、各データの輸送経路として使用した。輸送経路ごとに高速道路への乗降ICを取得できたため、乗降ICが区間内にあった場合は次の区間までの距離をみて、40 km未満であれば次の区間において出発・到着、40 km以上であればその区間において出発・到着と仮定した。区間については、30 kmを基準として出発・到着の区間を設定した。

輸送経路情報取得の際のNITASの設定条件は以下のとおりである。

[NITASの設定条件]

- 発着地：各都府県庁
(北海道・沖縄県はフェリーを含むため除去)
- 道路ネットワーク：2015年3月
- 探索条件：所要時間最小
- 交通モード：道路・物流モード
- 道路速度：平均旅行速度（約80km/h）

(3) 走行時間の設定

本研究では、NITASによって輸送経路情報を取得する際、同時に各輸送経路における走行時間も取得した。こ

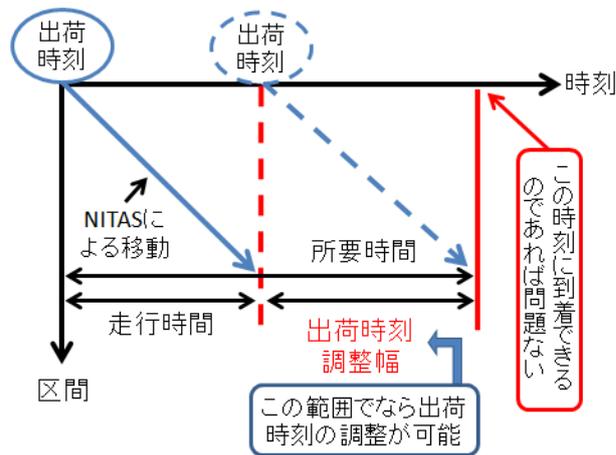


図-2 走行時間と出荷時刻調整幅の定義

の際、各都道府県庁から乗降IC間については、走行距離が短いため考慮していない。また、ドライバーの休憩行動については、後述の隊列組成方法にも一定程度影響すると考えられるが、個々の車両の休憩の位置や時間を考慮した隊列組成方法が複雑になることから、本研究では簡略化のため休憩行動は考慮していない。また、区間情報とNITASでの最小所要時間を比較したところ、±1時間の誤差が生じていたため、区間情報を優先して最小所要時間を修正し、これを「走行時間」と定義した。

この際、走行時間は、物流センサスに記載されている所要時間より短い場合がある。これは、休憩時間を考慮していないことに加え、物流センサスが荷主企業など出荷側へのアンケート調査であり、ドライバーによる回答ではないため、予定時間を所要時間として回答する場合があるためである。貨物は所要時間内に到着すれば問題ないと仮定すると、走行時間が物流センサスの所要時間よりも短いとき、出荷時刻を遅らせることも可能である。そのため、所要時間から走行時間を引いた値を「出荷時刻調整幅」と定義し、出荷時刻調整幅の範囲でなら出荷時刻を調整できるものとした。図-2に出荷時刻調整幅の考え方を示す。

(4) 使用する物流センサスデータの選定

本研究では、混載ではなく中継地の存在を考慮しなくてよいこと、平田ら¹¹⁾により輸送距離と所要時間が比例関係にあり、分析対象にしやすいことが示されていることから、輸送手段が一車貸切となっているデータのみを使用する。また、NITASによって把握した輸送経路情報に基づき、東北自動車道を利用するデータのみを抽出する。このとき、短距離の輸送では隊列に参加することが難しく、また隊列組成が可能であったとしても、燃費削減効果が小さく、隊列組成のために加速することによる燃費の悪化によって相殺される場合が多いと考えられるため、東北自動車道を2区間以上走行するデータのみを

抽出した。推計に使用した物流センサデータの抽出条件は以下のとおりである。

[推計に用いたデータの抽出条件]

- 代表輸送手段：一車貸切
- 所要時間記入あり
- 出荷時刻記入あり
- 到着日時指定記入あり
- 出荷日：20, 21, 22日
- 高速道路利用
- 東北自動車道2区間以上走行

また、物流センサでは、貨物流動1件ごとにどのようなトラックが何台使われたかの記載はなく、推測も難しい。そのため、使用されたトラックはすべて大型トラックであるとした。このとき、一車貸切のデータの中にはトレーラーが含まれず、トレーラーではない大型貨物自動車の車両総重量は25tまでであること、1台の大型トラックの最大貨物積載量は15.1tであると考えられることから、貨物流動1件ごとの貨物重量のデータを用い、貨物重量15.1 tごとにトラックが1台使用されたと仮定し、分析対象となるトラックを選定した。

以上のデータ抽出より、分析対象となるトラックは3593台となり、このうち、東北自動車道上りを走行するのは2043台、下りは1550台となる。

平田ら¹⁴⁾は貨物重量15.1 tごとにトラックが1台使用されたと仮定しておらず、貨物流動1件ごとに1台のトラックが使用されたとしており、さらに東北自動車道2区間以上走行という条件を抽出条件としていないため、分析対象となるトラックは4170台で、このうち、東北自動車道上りを走行するのは2286台、下りは1884台であったが、本研究ではより現実的であると考えられる隊列参加可能なトラックの選定条件を用いたため、これよりも分析対象台数が少なくなっている。

3. 隊列組成方法の基本的条件の整理

(1) 隊列組成場所

隊列を組成する場所は、大きく下記の2つのパターンに分類できると考えられる。

- ① 隊列組成拠点で、停車中に組成
- ② 高速道路本線上で走行しながら組成

①の場合では、複数の運送会社による複数車両での隊列編成を簡単に実施できる他、積載率の低い車両間同士を混載することで、共同化を推進することが可能と考えられる。しかし、隊列走行の専用拠点を設けるためには土地と費用、拠点設置位置の選定が必要になる可能性がある。また、長大な隊列走行車を円滑に合流させる方法についても検討が必要になる。

②の場合では、新規の設備整備や、隊列車両の合流問

題についての検討が不要で、さらに隊列の組成を走行中に行うため、流出入 IC が異なる車両とも隊列を組むことが可能で、柔軟な運用ができると考えられる。しかし、隊列組成可能なトラックが近傍に無い可能性があることや、オペレーションが複雑になる可能性がある。

本研究では、既存のインフラのみで運用可能で、隊列車両の合流問題も考慮する必要がなく、隊列組成方法の検討も比較的容易な②の場合のみを想定して分析を行うこととした。

(2) 隊列組成方法

走行しながら隊列を組成する方法は、大きく下記の3つのパターンに分類できると考えられる。

- ① 後方車両が加速して隊列を組成
- ② 前方車両が減速して隊列を組成
- ③ 後方車両が加速、前方車両が減速して隊列を組成

いずれの場合でも、減速を行えば燃費は良くなるが到着時間は遅くなり、加速を行えば到着時間は早くなるが燃費が悪くなる。本研究では、車両同士で時間や燃費の変化量がある程度相殺されると考えられる、③の場合を想定し、大型貨物自動車はスピードリミッターが搭載されていることから加速の場合には90 km/hで走行するとし、減速の際には70 km/hで、加減速を行わない場合は80 km/hで走行するとして分析を行う。

(3) 隊列組成計画

隊列組成計画は、大きく下記の3つのパターンに分類できると考えられる。

- ① スケジュール既知の隊列計画

トラックが走行を開始する前にすべてのスケジュールが既知であり、それに基づいて計画を立てることが可能な方法。

- ② 逐次情報更新型の隊列計画

トラックの走行情報を走行中に収集して、オペレーターがその情報を基にトラック個々の情報を把握することで、隊列編成を指示する方法。

- ③ トラック間同士の隊列計画

トラックが主体となり近傍に接近している車両に対して、計画を立てることなく前後のトラック同士で隊列を編成する方法。

本研究では、②の隊列組成計画に基づいて隊列を組成させる。走行しながらの隊列組成であり、他の車両が道路上に存在し、不確定要素が多いため、すべてのスケジュールを既知にすることができないこと、各トラックが主体になれば、各主体の意思がバラバラで、隊列を組成できない場合が発生すると考えられることから、意思決定主体が1つであり、また不確定要素があっても安定的に隊列を組成できると考えられるこの方法を採用した。

4. 隊列走行の車両マッチングに関する確率モデルの開発と燃費削減効果の推計方法

本研究では、隊列が組成されるという事象は確率的な事象であるとして確率モデルを構築し、モンテカルロシミュレーションによって、隊列走行効果推計を行った。

(1) 確率モデル

検討した隊列運用方針をもとに、本研究では、隊列は、高速道路上で走行しながら加減速により組成されるとし、毎正時に、各トラックに加速や減速を指示し、1時間かけて加減速を行うことで隊列を組成するという運用を想定した確率モデルを構築した。図-3に確率モデルのフロー図を示す。以下に確率モデルの詳細を示す。

分析は1時間ごとに行うとし、1時間の分析では、まず、高速道路に流入する車両の位置を、乱数を用いて決定する。次に毎正時に東北自動車道に存在するトラックの位置から、各トラックは前後どちらのトラックと近いかを判別し、近いトラック同士を1つのグループとし、各グループ内で一つの隊列を組成しようとする。このグループ分けの概念図を図-4に示す。図-4では、左から3番目のトラックと左から4番目のトラックは、互いに他のトラックよりも遠いトラックであるため、別のグループとしてグループ分けされ、また左から2番目のトラックは、左から3番目より1番目のトラックのほうが近いが、左から3番目のトラックは左から2番目のトラックのほうが近いので、これらのトラックは同じグループに分類される。以上のような近いトラック同士を1つのグループにというアルゴリズムで区間ごとに先頭車両から順にグループ分けされ、1つのグループの最大車両数は無制限である。

このとき、各グループのトラックの重心位置を、そのグループの基準位置であるとし、グループ内のトラックは、加減速を1時間かけて行い、グループの基準位置にたどりつき隊列を組成するとした。このとき、基準位置は80 km/hで移動し、加速を行うトラックは90 km/hで、減速を行うトラックは70 km/hで走行するとした。しかし、勾配やカーブ、他の車両の存在などにより、トラックは常に定速で走行できないと考え、各トラックが基準位置にたどり着けるかどうかは確率的な事象であると仮定した。このとき各トラックが基準位置にたどり着ける確率、すなわち隊列に参加できる確率は、各トラックの位置と基準位置との距離差によって決まるとし、距離差が小さければ隊列に参加しやすく、また速度差10 km/hで1時間以内に追いつける距離差は10 kmであるので、各トラックが基準位置にたどり着ける確率は式(1)のような線形式によって求められると仮定した。

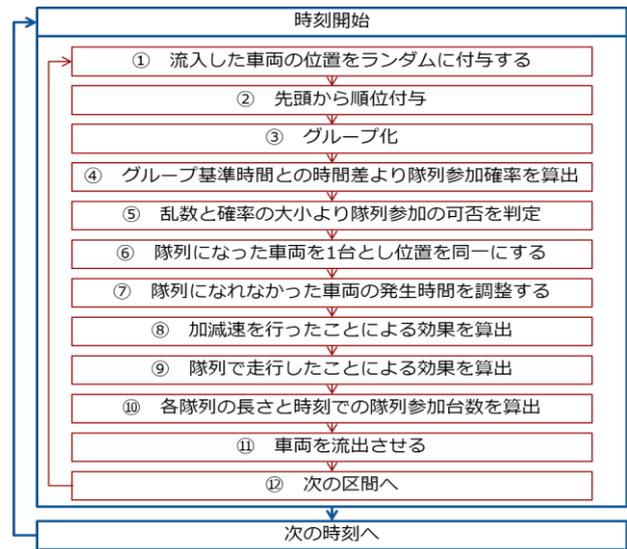


図-3 隊列組成確率モデルのフロー図



図-4 グループ分けの概念図

$$h(t) = 1 - \frac{t}{10} \quad (t \leq 10) \quad (1)$$

$$h(t) = 0 \quad (t > 10)$$

t : 重心位置との距離差 (km)

それぞれの車両は、式(1)により求められる隊列参加確率に応じて、隊列に参加できるとして隊列を組成させる。隊列に参加した車両は基準位置に移動させ、参加できなかった車両についても、加減速により基準位置にいくらか近づいたとして、基準位置との距離差と、0以上1未満の乱数との積が、基準位置に近づいた距離であるとして、基準位置にいくらか近づかせる。また、高速道路から流出する車両を流出させ、次の1時間での分析に移る。このとき、隊列になった車両は1台の車両であるとして扱い、分析を行う。

(2) トラックの出荷時刻の調整

本研究では走行しながら隊列を組成するという運用を想定しているため、隊列を組めるように高速道路上で待機することはない。しかしそれぞれのトラックは出荷時間調整幅により、複数の出荷時刻を選択できる場合がある。この出荷時間調整幅を用い、同時間帯に同区間に存在するトラック台数が多くなるように出荷時刻を決定すれば、トラックは隊列を組みやすくなり、隊列への参加率や燃費削減量が多くなると考える。よって、平田ら¹¹⁾と同様に、現状（実際）の出荷時刻を用いたパターン

(出荷時刻調整なし) , 現状での到着時刻指定の制約下で出荷時刻調整幅を付与するパターン, さらに実際の到着時刻指定が時間単位で指定されている制約の厳しいトラックについて, (荷主の協力を想定して) 到着時刻指定を3時間・6時間遅らせた上で出荷時刻調整幅を付与するパターンを条件として考えた. 以下にその出荷時刻調整幅の付与の4つのパターンを整理する.

- ① 出荷時刻調整幅を考慮しない場合
(出荷時刻から設定時間通りに輸送)
- ② 出荷時刻調整幅を考慮した場合
(現状の到着指定時刻までに到着できるように出荷時刻調整幅を付与)
- ③ 到着時刻条件を緩和し,
出荷時刻調整幅を考慮した場合
(時間指定トラックは現状の到着指定時刻+3時間までに到着できるように出荷時刻調整幅を付与)
- ④ 到着時刻条件をさらに緩和し,
出荷時刻調整幅を考慮した場合
(時間指定トラックは現状の到着指定時刻+6時間までに到着できるように出荷時刻調整幅を付与)

出荷時刻の決定方法として, 単に同時時間帯に同区間に存在するトラック台数が増えるようにするのではなく, 東北自動車道での残りの走行区間が長いトラックを優先させるため, 東北自動車道に存在している残りの走行区間を考慮した「重みづけ」という項目を加えた. 例として, 区間a~eを走行するトラックがあるとすると, ある時刻に区間bに存在しているデータには, 区間b~eの残り4区間東北自動車道に存在していることから「重みづけ」という項目に4を代入した.

これより, 各時刻・区間における重みづけ合計値の分布を作成し, 合計値の大きい部分から関与しているデータの経路を選定していき, 全トラックの経路を1つに選定した. 例として, ①と②の出荷時刻調整幅付与条件のときの, 東北自動車道上りにおける, 20日13時から24時の出荷時刻決定後の車両台数分布を図-5, 図-6に示す. これらを見ると, 図-5では15時から22時にかけて区間eからiで比較的台数が多く分布しているが, 全体的にばらついてトラックが分布していることが分かる. これを, 出荷時刻調整幅を用いた出荷時刻の調整を行うことにより, 図-6のように, トラックがある程度まとまって存在するようになり, 200台以上が同時刻の同区間に存在するようになった. このように, 出荷時刻の調整によって現状よりも同時刻の同区間にトラックが多く存在するようになることによって, 隊列車両のマッチングポテンシャルが向上し, さらに隊列走行による燃料消費量削減効果も向上すると考えられる. 以上のように出荷時刻を決定して分析することで, スケジューリングや到着時刻条件の緩和を行うことによる効果の変化を分析する.

時刻	20日											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
区間 a	1		24	3	33	24	9	2				4
b	2	1		24	3	33	24	9	2			
c	10	11	7	10	26	17	36	26	9	2	10	
d	15	10	12	12	16	27	21	37	27	11	2	10
e	16	27	20	77	48	42	36	25	37	28	11	2
f	9	23	67	48	82	73	60	46	44	29	22	14
g	29	7	19	62	44	82	73	55	45	41	29	22
h	9	31	11	27	65	52	82	67	56	49	45	31
i	11	4	27	6	24	55	38	71	57	40	41	40

図-5 出荷時刻調整幅を考慮しない場合(条件①のとき)の東北道 上り20日13時から24時の車両台数分布

時刻	20日											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
区間 a	2		25	1	8	50			5			
b		2		25	1	8	50			5		
c			4		55	1	9	54			15	
d	16			4		62	1	11	58			16
e		24	1	1	37	4	171	1	12	59		
f		2	68	6	3	46	10	262	4	15	46	
g	14		2	65	6	3	46	10	248	4	14	46
h	5	20		4	68	6	3	46	10	259	4	16
i	1		19		4	52	4	1	40	5	206	4

図-6 出荷時刻調整幅を考慮した場合(条件②のとき)の東北道 上り20日13時から24時の車両台数分布

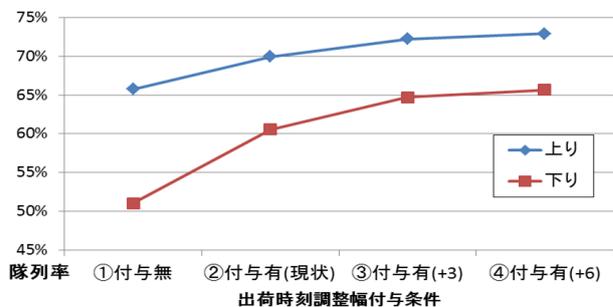


図-7 出荷時刻調整幅付与条件による隊列率の変化

5. 隊列走行による燃費削減効果の推計結果

乱数を用いたモンテカルロシミュレーションであるため, 東北自動車道の上りと下りで, 4つの出荷時刻調整幅の付与条件の場合について, それぞれ100回の試行を行い, 隊列率, 隊列編成台数別割合, 燃費削減率, 燃料費削減額, 走行時間変化量の平均値を算出した.

全ての台・時間に対する隊列を組んだ台・時間の割合を隊列率として図-7に示す. これを見ると, 隊列率は50~70%程度となっており, すべての場合で半分以上の台・時間で隊列が組成できている. また出荷時間調整幅の付与量が大きいほど, また分析対象台数の多い上りのほうが隊列率が大きくなっている. さらに平田ら¹¹⁾によって算出された隊列率と比較すると, 平田らは30~60%程度であったのに対し, 本研究では複数車両からなる隊列組成を考慮しているため, 平田らよりも上り下りともに5~30%程度高い値となった.

また, 隊列走行により各車両が受ける空気抵抗は低下し, 燃費削減効果が得られるので, 隊列組成のための加減速による燃費変化を考慮したうえで, 隊列走行を行わず, すべてのトラックが常に80 km/hで走行した場合と

比較して、トラック1台当たりの燃費削減率と燃料費削減額を算出した。このとき、隊列走行による燃費削減量は、図-8の青木¹⁴が空力シミュレーションによって空気抵抗の変化を計測することで求めた、車間4 mのときの算出値を用いて、隊列が9台以上の時は8台ごとに隊列は分かれるとして隊列走行による燃費削減量を算出した。また、加減速による燃費変化は、図-9のいすゞ自動車が速度ごとの定速走行時の燃費を計測した値¹⁵を用いた。また、燃料費は100 円/Lであるとした。図-10に算出した燃費削減率を、図-11に燃料費削減額を示す。

これを見ると、燃費削減率は5～11 %程度、燃料費削減額は300～700 円程度となっており、また出荷時間調整幅の付与量が大きいほど、また分析対象台数の多い上りのほうが燃費削減効果が大きくなっている。さらに平田ら¹¹によって算出された燃費削減率と比較すると、平田らは4-8 %程度であったのに対し、本研究では複数車両からなる隊列組成を考慮しているため、平田らよりも上り下りともに2-5 %程度高い値となり、また現実的な隊列組成プロセスを考慮して分析を行ったため、本研究のほうがより正確な値を算出できたと考える。

以上より、分析台数の多い上りの方が隊列走行による効果が高くなっていることから、分析対象台数が多くなれば隊列の組成可能性や隊列走行による効果は向上することが明らかとなった。

また、出荷時刻調整幅の付与量が大きくなるほど、隊列走行による効果が高くなっていることから、到着時刻指定条件の緩和や、出荷時刻スケジューリングは隊列走行に対して効果的であることを定量的に示した。

ここで、出荷時刻調整幅の条件を緩和するほど隊列率・燃費削減率が向上しているが、現状の到着時刻指定の緩和を仮定した③④の条件ではその向上効果は低減している。これは現状の到着時刻指定の制約内における出荷時刻調整のみでも十分な隊列率の向上効果があり、さらなる制約緩和の効果は必ずしも大きくないことを示唆している。図-12と図-13はセンサデータで到着時刻指定が時間単位で付与されている車両に関して、条件②での出荷時刻と条件③④における出荷時刻との変化量の分布を示している。当然ながら条件が緩和されるほど出荷時刻の変化量も増加するが、その変化量の増分は必ずしも大きくはないことが分かる。当然、隊列率や燃費削減率は向上するが、一方で出荷時刻調整や到着時刻指定の緩和自体が、物流システム上、必ずしも容易にできることではなかったり、荷主等の理解が得られなかったりする可能性もある。よって、最終的には出荷時刻調整や到着時刻指定緩和のコストと隊列率向上の効果を比較考量して、その実施効果を検証する必要がある。また今回の分析結果からは現状の到着時刻指定制約の範囲内でも十分な効果が確認されたので、それを超える物流システ

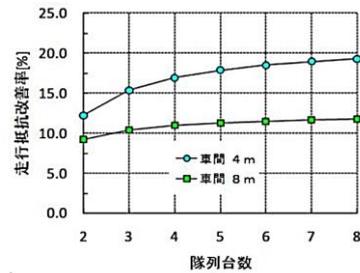


図-8 隊列台数と走行抵抗改善率¹⁴

大型車

	90km/h	80km/h	70km/h
エンジン回転数 (rpm)	1410	1280	1110
消費量(cc)	1060	947	871
燃費(km/L)	4.15	4.65	5.05
燃費差(%)	基準	12	22

図-9 大型車の速度ごとの燃費¹⁵

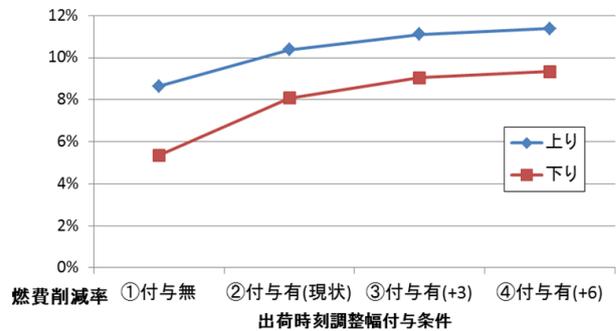


図-10 出荷時刻調整幅付与条件による燃費削減率の変化

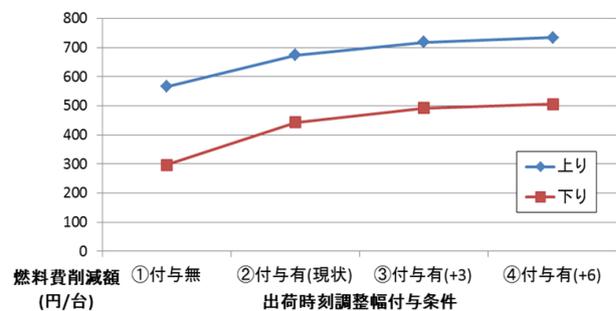


図-11 出荷時刻調整幅付与条件による燃料費削減額の変化

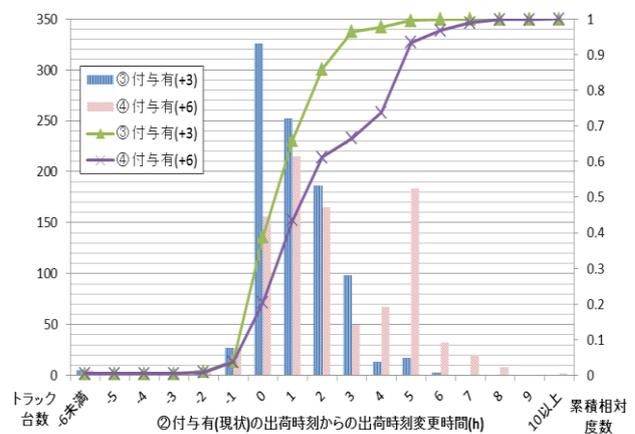


図-12 上りの出荷時刻変化量

ムへの影響が懸念されるような制約緩和は必ずしも必要性が大きいことが示唆される。

また本研究では、出荷時刻調整幅を用いた出荷時間調整やスケジューリングは隊列の効率的な運用に必要だと明らかにしたがこれを行うためには、物流会社の枠を超えて到着指定時刻などの情報を共有することや、その情報共有のために各物流会社にとって中立的な立場から到着指定時刻を収集し、各トラックの出荷時刻を決定する運営組織が必要であると考えられ、さらに現在長時間化が課題となっている荷待ち時間¹⁾などの、所要時間が不確定な時間に対する対応も政策上行っていく必要があると考えられる。

また本研究で対象としたトラックは物流センサスで捉えられたトラックの一部であり、また物流センサスは標本調査であるため、現実に隊列走行を導入した際には、隊列に参加する台数はより多くなり、隊列走行による効果もより大きくなると考えられる。

6. 結論

本研究では、隊列走行による車両マッチングポテンシャルと燃費削減効果を推計するための方法について、既往研究で考慮されていなかった、複数車両が同時にグループを組み、隊列を組成することを前提とした確率モデルを新たに提案し、モンテカルロシミュレーションにより東北自動車道において後続有人の隊列走行を導入した際の燃費削減効果や実際にどの程度隊列を組むことができる可能性があるかを定量的に明らかにした。その結果得られた知見を以下に示す。

- ① 東北自動車道において隊列走行を導入した場合、50~70%の台・区間で隊列が組成され、また5~11%程度の燃費削減率を得られることが明らかになった。
- ② 分析の対象になる車両が多い場合のほうが、また出荷時刻調整幅を用いた出荷時間調整及びスケジューリングを行った場合のほうが、隊列の組成可能性が上がり、隊列走行効果が向上することを定量的に明らかにした。
- ③ 到着時刻指定条件を現状以上に緩和したうえで出荷時刻調整幅を与えることは、その追加の効果は大きくないことから、制約緩和にかかるコストや課題を考えると、その必要性はあまり高くないことが示唆された。

また、平田ら¹¹⁾の既往研究で考慮されていなかった3台以上のトラックによる隊列組成を考慮し、より現実に近い隊列組成プロセスを考慮した分析対象トラックの選定やシミュレーションの構築を行ったため、隊列率は5~30%程度向上しており、さらに燃料費削減額についても、2~5%程度向上している。本研究では、より現実に

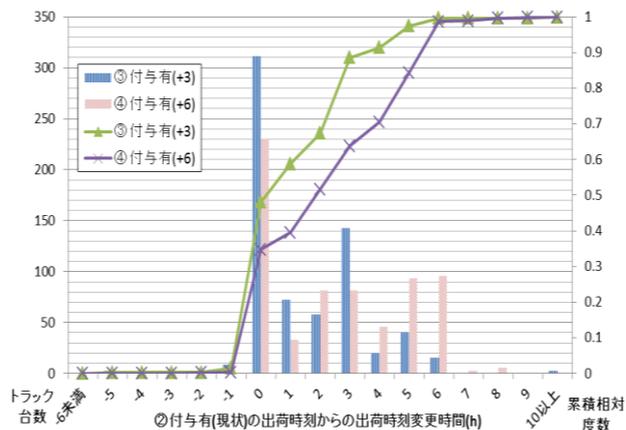


図-13 下りの出荷時刻変化量

近い隊列組成プロセスを考慮したため、平田ら¹¹⁾よりも現実に近い値を明らかにできたと考えられる。

本研究の課題としては、隊列組成運用方法のうちの1つのシナリオのみを用いて分析を行っているため、今後の隊列運用方策検討のため、複数のシナリオを想定し、シナリオ分析を行っていく必要があると考える。また本研究では、発着地を都道府県庁に丸め、都道府県庁間の走行時間と経路を用い、また都道府県庁と乗降IC間の走行時間は考慮しないこととしたが、輸送時間に関する項目は、トラック運行の制約条件として非常に重要なものであることから、市町村間の走行時間と経路を用い、発着地と乗降IC間の走行時間も考慮し、また今回考慮されていない走行途中の休憩も考慮できるような分析や隊列組成のための専用拠点施設を活用した場合の分析を今後行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：物流を取り巻く現状について、www.mlit.go.jp/common/001173035.pdf (2019年2月5日閲覧)
- 2) 鉄道貨物協会：平成25年度本部委員会報告書 (pdf) , <https://www.rfa.or.jp/guide/activity/pdf/25report.pdf> (2019年2月5日閲覧)
- 3) 味の素物流 東西の卸売市場内に「ゲートウェイ」設置 青果物の幹線輸送を共同化して脱・長距離, 月刊 ロジスティクス・ビジネス第18巻2号, pp.50-53, 2018.
- 4) 国土交通省：総合物流施策大綱 (2017年度~2020年度) , <http://www.mlit.go.jp/common/001195191.pdf> (2019年2月5日閲覧)
- 5) NEDO：大型トラックの自動運転・隊列走行実験に成功, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100178.html (2019年2月5日閲覧)
- 6) 経済産業省：今年度実証の成果と次年度実証について, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/jidousoukou/dai5/siryou1.pdf> (2019年2月5日閲覧)
- 7) Wei Zhang, Erik Jenelius, Xiaoliang Ma : Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty, Transportation Research Part E, Vol.98, pp. 1-23, 2017.
- 8) 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, pp.1051-1061, 2016.

- 9) Kuo et al. : Fuel-Saving Potential of Platooning Evaluated through Sparse Heavy-Duty Vehicle Position Data, IEEE Intelligent vehicles Symposium, June 8-11 2014
- 10) 川瀬俊明, 平田輝満, 森岡駿介, 鍛冶竜馬 : 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, 土木計画学研究・講演集, Vol.58, CD-ROM, 2018.
- 11) 平田輝満, 阿部終人 : 物流センサを用いた貨物トラックによる隊列車両マッチングのポテンシャル推計, 日本物流学会第35回全国大会, 2018.
- 12) 国土交通省 : 高速道路における後続車無人システム(後続車有人状態)を用いたトラックの隊列走行の公道実証を開始します, <http://www.mlit.go.jp/common/001268096.pdf>. (2019年2月7日閲覧)
- 13) ヤマト運輸株式会社 : トラック隊列走行に対するニーズと課題, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/4th_sangyo_kakumei_dai3/siryoku6.pdf. (2019年2月7日閲覧)
- 14) 青木啓二 : 自動運転・隊列走行の効果, 2013,12. <http://www.its-jp.org/wp-content/uploads/2012/09/1-2-1aoki.pdf> (2019年2月7日閲覧)
- 15) いすゞ自動車 : スピードは控えめに, http://www.isuzu.co.jp/cv/cost/manual/technique_4.html. (2019年2月9日閲覧)

(2019. ?? . ?? 受付)

ANALYSIS OF FUEL SAVING POTENTIAL OF TRUCK PLATOONING BY USING FREIGHT TRANSPORT CENSUS DATA IN JAPAN

Ikumi TAKEDA, Terumitsu HIRATA and Syuto ABE

Truck platooning is one of the promising technologies for making freight transport system more efficient and have already been tested in real-life field. But the potential benefit of truck platooning is not necessarily evaluated in the road networks in Japan. This paper developed the probabilistic model for estimating the potential of vehicle matching and fuel saving of truck platooning by using freight transport census data in Japan. The results of the analysis by the developed model indicated that the potential benefit in fuel saving can be around 10% averagely and can be enhanced by coordinating the departure time of goods transport.