

地域間貨物輸送量バランスと空車回送に着目したトラック隊列走行活用手法の提案

深谷 泰己¹・平田 輝満²

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:16t5043h@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

トラック輸送の課題として地域間の貨物の輸送量バランスの不均衡より、空車トラックが発生しており、トラック物流の現状を圧迫する要素の1つである。そこで物流効率化策として期待される隊列走行技術に着目し、首都圏発で発生しがちと考えられる空車トラックを早急に地方圏に帰還させる隊列空車回送手法を提案し、これを評価するモデルを構築した。まず、仮想都市間でシミュレーションを行い、隊列回送手法を適用できる最適輸送距離帯を分析した。ケーススタディとして、東京一名古屋間の貨物量を物流センサデータから抽出し、実際の貨物流動での効果も推計し、トラック稼働率の向上や、ドライバーの車中泊数の減少、コストの削減と隊列空車回送手法の効果を定量的に示し、物流クライシスとも言われる現状の物流課題への対策案としての有用性を検証した。

Key Words : truck platooning, empty truck, inter-city freight transport volume balance

1. はじめに

(1) 背景

ネット通販の普及により貨物の多頻度化及び小口化が進行し、我が国におけるトラック輸送の平均積載率は約40%¹⁾、空車回送率は約30%、車両の実働率は約65%²⁾であり、トラック1台に対する輸送効率が非常に低いことが現状である。さらに長距離トラックではその労働環境の過酷さからドライバー不足が深刻となっており、荷主企業へのアンケート調査によると、特に300km以上の長距離ドライバーを確保しづらいという声³⁾や、青果物卸業界からは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にくいという声もある。また、トラック運送業界の高齢化も進んでおり、2014年では50歳以上の就業者が1/3以上を占めるなど労働力不足も問題となっている。ドライバーの高齢化や人手不足の現状と将来の深刻化は「物流クライシス」とも叫ばれており、それらを考えると、あらゆる手段を検討してトラック輸送の効率化をより一層図る必要がある。

ここで、産業が盛んな地域・人口集中地には多くの物が流れ、我が国では大消費地である東京首都圏に物の流れが偏る。これより、消費需要のある首都圏とそれを製

造する地方圏との地域間の貨物輸送量バランスは不均衡になり、下り方面には上りに対してトラックに空きが多く発生し、空車回送の原因となる。下り方面に向かうドライバーやトラックを所有する運送会社の心情として、空車で回送するよりは少しでも荷物を積んで帰ろうとする可能性が高いと推測できる。下りのドライバーが遠回りも辞さず少ない荷物を争うように集配していると、極めて非効率で、労働環境の悪化にも繋がる。このように我が国の極端な東京一極集中型は、トラック物流の輸送効率を下げる1つの要因であり、早期解決が急務である。

一方で、トラック運用効率化としてトラック隊列走行⁴⁾が提案されている。隊列走行は非常に短い車間距離で自動走行できることで、空気抵抗を受けにくくなることでの燃料使用量の削減や自動運転より後続のトラックはハンドルを握らず走行が可能であることでの労働環境改善効果が見込め、現在実用化が目指されている。しかしながら、実用化に向けた技術開発研究は多くされているが、貨物輸送の実態を考慮しつつ、隊列走行の具体的な活用・導入方法についてはほとんど検討がされておらず、その市場導入効果については未知数である。技術的なシーズが揃っても、具体のビジネスモデルからみえる投資

効果がはっきりしなければ、官民の隊列走行トラックへの投資判断が滞る可能性もある。

(2) 既往研究

我が国での長距離トラックドライバーの労働環境に関する研究では、藍郷⁹⁾は輸送会社の勤務帳簿より、トラックドライバーの労働環境の実態について分析し、労働環境悪化の原因は非効率な空車走行と荷役時間であると示し、我が国で空車トラックが発生する輸送実態と空車回送率を低減させる運用策の必要性を述べている。

隊列走行の海外研究ではAnirudh⁹⁾による隊列走行の既存研究をまとめたサーベイ論文があり、隊列走行が将来の緊迫する輸送実態の一助となる可能性について述べている。特に隊列走行導入により、後続に接続するトラックドライバーは運転が不要であり、労働環境悪化が進行するトラック物流の大きな手助けになると示している。また、国内の隊列走行研究では川瀬ら⁷⁾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含め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ミクロシミュレーションを開発し、ミ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効果を分析した。竹田ら⁸⁾は東北自動車道において物流センサデータより実際の貨物流動を考慮した隊列マッチングのポテンシャルの推計と燃料消費量の削減効果を推計した。

しかし、いずれの研究も貨物を積んだトラックのみを対象とし、我が国での空車トラックが発生する輸送実態を考慮していない。また、そもそも我が国における空車トラックが発生する実態を把握できていないものはない。トラックデータとしては、プローブデータやセンサデータが存在するが記載データには荷有り輸送を行っている時のデータがほとんどであり、空車トラックの走行を統計上で捉えきれていないのも事実である。よって空車トラックを含む総合的なトラック流動を考慮した、新たなトラック隊列走行のビジネスモデルを提案する必要がある。

(3) 本研究の目的

以上をもとに、本研究では我が国における将来的な隊列走行導入を想定し以下の3点について研究を行う。

- [1] 地域間での貨物の輸送量バランスに差異がある実態を分析し、発生する空車トラックに着目した新たな隊列走行の活用手法を提案する。
- [2] 現行の労働基準に則り、仮想空間上で、提案した活用手法を評価するモデルを構築する。
- [3] 東名間をケーススタディとして、提案した活用手法の効果を定量的に評価し、隊列自動走行に関連する新たな労働基準に関する制度設計の可能性につ

いて考察する。

2. 隊列走行の活用における前提条件

(1) 隊列組成場所⁹⁾

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。

(i)高速道路本線上で走行しながら組成

(ii)隊列組成拠点等で、停止中に組成

(i)の場合は高速道路走行中での組成であり、新規設備を必要とせず、異なったICから流入したトラックに対しても組成が可能である。しかし、高速道路上では一般乗用車などが多数存在すること、日本の高速道路の複雑性を考慮すると、走行中での組成は技術上・安全上困難が伴う可能性がある。対して(ii)の場合では、拠点を設置することでのインフラ整備費用などの初期投資は必要となるが、複数の車両での隊列組成を簡単に行うことができ、安全性も高いと考えられる。

よって本研究では、高速道路本線上に既存のSA/PAのイメージで新たに隊列組成拠点を設置した場合の(ii)を想定し研究を行う。

(2) 隊列走行状態⁹⁾

隊列走行の走行状態は以下の3パターンである。

(i)後続有人走行

隊列走行中全てのトラックにドライバーが乗車する。後続ドライバーは隊列走行中、緊急時以外はハンドルを離すことも可能。

(ii)後続無人走行

先頭のみドライバーが乗車し、後続トラックは無人状態での隊列走行を行う。

(iii)完全無人走行

すべてのトラックに人は乗車せず、自動運転の最終形態である近未来的な運用方法。

自動運転に対する基準として SAE レベルというものが存在し level0-level5 で定められている。上記の3パターンでの SAE レベルは(i)が level3, (ii)が level4, (iii)が level5 である。我が国の現在での実現可能な自動運転レベルは level3 での全車有人の場合であり、level4 を取り入れる段階で足踏みしている。(ii)と(iii)の運用レベルが認可されない理由としてはどちらも無人のトラックが存在する所が大きなハードルとなっている。情報通信技術が近年発達したものの、高速道路上を 80km で無人のトラックが走行するというのは制度上、未だめどが見通せない。トラックに人が乗車しないことは人件費削減の大きなメリットがあるが、トラブルや事故発生時の緊急対応が難しく実現には時間を要する可能性がある。よって今回の研

究では、比較的近未来で実用化が見込まれる(i)のような全車有人での隊列走行を想定する。

3. 地域間における貨物輸送量バランスの分析

本研究では、大消費地東京方面に物の流れが相対的に偏り、輸送貨物量が首都圏方向に多く需要が発生していることを前提としている。よってまず、この現状を確認するため、2015年の物流センサスデータ¹⁰⁾を用いて、地域間でどれほどの貨物が輸送されているのかを分析した。物流センサスデータには貨物ごとの流動を捉え、出荷された県と到着した県が貨物データごとに記載がある。なお、調査日時は10月20,21,22日の3日間である。この3日間で首都圏の東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県の一都三県と地方の主要都市各5県間の方向別の流動トン数を分析した。

また、貨物車両には多種多様な形状が存在し、積み荷の産業別で区別されている¹¹⁾と推測できる。隊列走行に適したトラックは、主にバンボディと呼ばれる形状のものであり、長い木材などを積み荷とする平ボディ車や油種を輸送するタンクローリー車は隊列走行には適していないと考察する。しかし、物流センサスデータには多様な産業の貨物データが記載されているため、木材などを輸送する貨物データも含まれている。よって、データをバンボディ車だけに制限するため、記載のある産業別のコードより車両形状を推測し、バンボディで輸送すると考えられる貨物の品目のみを抽出し、分析対象とした。

分析結果を表-1に示す。表から分かる通り、どの地域間でも下りに対して上のトン数が増えることが確認された。これより、下り方面でトラックの空車回送が発生する可能性が高いことが、データからも示唆される。

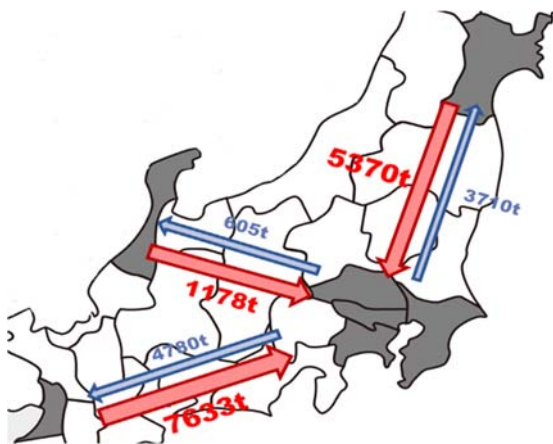


図-1 地域間の貨物流動トン数¹¹⁾

表-1 地域間の貨物流動トン数の集計結果：首都圏（1都3県）⇔愛知・大阪・石川・新潟・宮城県

発県	⇒	着県	トン数	トン数差
愛知県	⇒	1都3県	10626t	2169t
1都3県	⇒	愛知県	8457t	
大阪府	⇒	1都3県	7633t	2853t
1都3県	⇒	大阪府	4780t	
石川県	⇒	1都3県	1178t	573t
1都3県	⇒	石川県	605t	
新潟県	⇒	1都3県	4497t	1554t
1都3県	⇒	新潟県	2943t	
宮城県	⇒	1都3県	5370t	1660t
1都3県	⇒	宮城県	3710t	

4. 空車トラックに着目した隊列走行活用法の提案

前章にて、地域間の貨物輸送量バランスの不均衡より、下り側では上りに対して輸送需要が少なくトラック同士が競争的に帰り荷を取り合っているのが現状であり、極めて非効率である可能性を示した。図-2は上りは満載で輸送したA-Eの5台のトラックが、帰り荷の下りは首都圏での貨物の競い合いにより1台ごとの積載率が低下している非効率な現状の輸送形態を表した図である。この現状の輸送方法はトラックの最大限の力を発揮しているとは言い難く、望ましくない。そこで、隊列走行を用いて、非効率な輸送方法を改善するオペレーションを提案する。首都圏での需要がトラック5台に対して、3台分である場合、帰り荷に必要な必要最小限のA-Cのトラックのみを首都圏に残し、不必要なDとEのトラックは荷物を卸した後、早急に隊列走行の組成スポットまで移動し、隊列走行の後続に接続することで、地方圏へ回送し、ドライバーも後続のトラックに乗車し、自宅のある地域に早急に帰還できるオペレーションを提案する(図-3)。これより通常であれば、5台のトラックとも長距離トラックの労働条件の制約上車中泊をとっていたが、隊列走行により不必要な2台のDとEのトラックは早急に地方圏に帰還が可能となり、自宅での休息が可能となる。これにより車中泊回数が減少(自宅での休息増加)し、次の輸送を行えるまでのスパンが短くなりトラック1台当たりの稼働率の向上も見込まれる。

ここで、制約となってくるのがドライバーの連続拘束時間の制約である。労働基準より、ドライバーは1度の労働で、基本的に連続拘束時間13時間以内、次の労働までの休息時間は8時間以上と明確に定められている¹³⁾。空車トラックを隊列走行で早急に回送した場合、後続車として運転は不要となっても拘束から解放されているわけでもないため、この連続拘束時間の法的制約がネック

となる。隊列走行中の後続ドライバーの状態を推測すると、後続ドライバーはハンドルを握らずとも走行が可能であるが、この状態というのは「休憩時間」の定義である「完全に自由な時間」の定義とも一致しない。とはいえ、運転操作を行っておらず、もし睡眠も可能な状態まで技術や法制度が進展すれば、完全な拘束時間とも一致しない可能性もある。よって、本研究では新たな法制度が整い、隊列走行中の後続ドライバーの労働定義を拘束時間でも休憩時間でもない「準休憩時間（または準拘束時間）」として新たに定義できた場合を想定する。このような準休憩時間は、その後の労働がない場合（その後に休憩となる場合）、または帰宅のための走行といった軽度の労働の場合には、ドライバーの労働環境が全体として改善につながるのであれば、特に検討の価値があると考えている。また、下りを空車トラックが隊列走行で走行後、即座に次の運行に移すと、準休憩時間の後が拘束時間となってしまう、完全に休んでいるとは言い難くなる。よって、準休憩後一定数の休憩時間を与え、自宅での休憩時間を可能とする。今回のオペレーションの様々、隊列走行後に休憩時間を与えられる場合や、トラックの後続につき、運転操作を行わない場合は新たな法整備として「準休憩時間」が制度設計できる可能性もあるのではないかと考える。

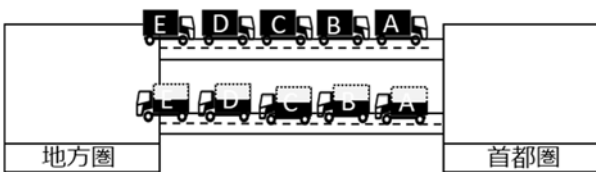


図-2 下りが低積載率な通常の輸送オペレーション

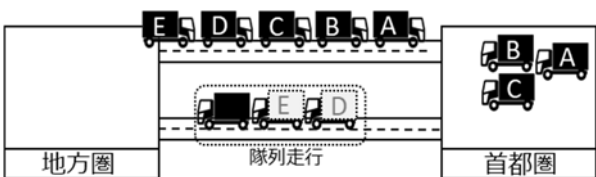


図-3 隊列走行を活用した新たな輸送オペレーション

表-2 2つのオペレーション比較

	通常オペレーション	隊列オペレーション
車中泊回数	5台	3台
自宅休息数	0台	2台
荷有トラック 平均積載率	60%	100%

表-3 新制度設計の労働基準

拘束時間	始業時刻から終業時刻までの時間、労働時間と休憩時間（仮眠時間を含む）の合計時間。
休憩時間	勤務と次の勤務との間の時間。睡眠時間を含め、全く自由な時間。
準休憩時間	隊列走行中の後続ドライバーの状態。緊急時のハンドル操作以外自由度が高い状態。

5. 隊列空車回送の評価モデルの構築

隊列走行活用手法の効果を評価するため、分析において基本となる単純な仮想のネットワークを定めた。長距離トラックの運送形態には一車貸切と混載の2パターン⁴⁾が主に存在している。一車貸切は荷主が単独でトラックを貸し切り、直接物流施設から物流施設の間を輸送するものであるため、多少の一般道走行が発生すると推測できる。対して混載輸送とは、ある拠点となる物流施設に多様な荷物を一旦集約し、1台のトラックに混載してから長距離の幹線部分を輸送する形態である。基本は高速道路IC近辺に物流施設が設置される傾向が多く、幹線を結ぶ長距離トラックはほとんど一般道路を走行しない。よって双方の特徴を考慮した評価モデル構築を行いCase1（図-4）とCase2（図-5）とした。各々のCaseは三角輸送などの複雑なトラック運送を行わず、単純なピストン輸送を行うとし、物流施設A側を地方圏、物流施設B側を首都圏と定めた。また、各圏内に組成スポットを設置し、隊列組成を行えるスポットを設置した。

表-4 評価モデル上の変数

T_{time} :往復時間(h)	d_A :施設-スポット距離(km)
t_A :施設 A での荷役(h)	d_B :施設-スポット距離(km)
t_u :施設 B での荷役(h)	d_h :スポット間高速距離(km)
T_{sB} :B 側での休息(h)	v_G :一般道走行速度(30km/h)
T_{sA} :A 側での休息(h)	v_h :高速道路速度(80km/h)
T_{pc} :隊列組成時間(h)	T_{ps} :隊列分離時間(h)

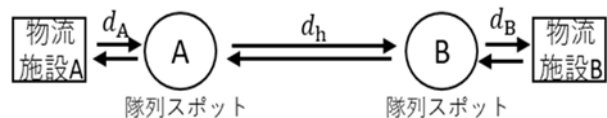


図-4 Case1：一車貸切運用を想定した仮想の評価モデル

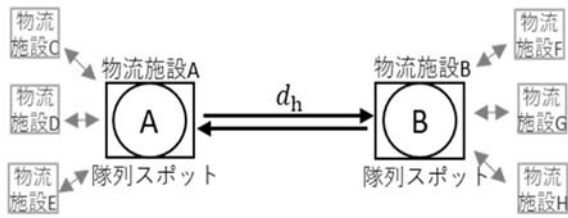


図-5 Case2：混載運用を想定した仮想の評価モデル

次に、モデル上で一連のトラックのオペレーションを、帰り荷（下り方面の荷物）の有無で分け、一往復にかかる総所要時間を定式化した。一往復というのは、A側、つまり地方を出発し、B側の首都圏に到着し、再度A側の地方圏に戻る一連の流れを一往復と定義する。行列走行導入効果を示すため、①行列走行活用手法を導入した場合、②単独で走行した場合の2つに分けてモデル化し、それぞれの所要時間モデル式を以下に示す。また、行列空車回送を想定するため、行列活用により帰り荷が無い場合 (A) と、帰り荷が有る場合 (B) がある。本研究では行列走行を用いた新たなビジネスモデルの提案に重きを置いており、トラックやドライバーの運行パターンや所要時間モデルの各パラメータ設定は、労働法などからみた最低限の妥当性のみを考慮した仮定となっている。また、表-4及び式中の T_{pc} と T_{ps} はそれぞれ行列走行の組成と分離に必要な時間を表現した変数である。実際の行列組成スポットでの組成や分離というのは多少の時間が必要となると推測する。しかし、本研究の時間単位は1時間単位とマクロであるため、この時間を表現することが困難である。よって本研究での行列の組成と分離は早急に行えるものとし、 $T_{pc} = T_{ps} = 0$ とした。

① 行列走行の場合

・ Case1

$$T_{\text{time}} = t_1 + \frac{d_A}{v_G} + T_{pc} + \frac{d_h}{v_h} + T_{ps} + \frac{d_B}{v_G} + t_u \quad (A)$$

$$+ \begin{cases} \frac{d_B}{v_G} + T_{pc} + \frac{d_h}{v_h} + T_{ps} + \frac{d_A}{v_G} + T'_{sA} & (A) \\ T'_{sB} + t_u + \frac{d_B}{v_G} + T_{pc} + \frac{d_h}{v_h} + T_{ps} + \frac{d_A}{v_G} + t_1 + T'_{sA} & (B) \end{cases} \quad (1)$$

・ Case2

$$T_{\text{time}} = t_1 + T_{pc} + \frac{d_h}{v_h} + T_{ps} + t_u \quad (A)$$

$$+ \begin{cases} T_{pc} + \frac{d_h}{v_h} + T_{ps} + T'_{sA} & (A) \\ T'_{sB} + t_u + T_{pc} + \frac{d_h}{v_h} + T_{ps} + t_1 + T'_{sA} & (B) \end{cases} \quad (2)$$

② 単独走行の場合

・ Case1

$$T_{\text{time}} = t_1 + \frac{d_A}{v_G} + \frac{d_h}{v_h} + \frac{d_B}{v_G} + t_u + T_{sB} \quad (A)$$

$$+ \begin{cases} \frac{d_B}{v_G} + \frac{d_h}{v_h} + \frac{d_A}{v_G} + T'_{sA} & (A) \\ t_u + \frac{d_B}{v_G} + \frac{d_h}{v_h} + \frac{d_A}{v_G} + t_1 + T'_{sA} & (B) \end{cases} \quad (3)$$

・ Case2

$$T_{\text{time}} = t_1 + \frac{d_h}{v_h} + t_u + T_{sB} \quad (A)$$

$$+ \begin{cases} \frac{d_h}{v_h} + T'_{sA} & (A) \\ t_u + \frac{d_h}{v_h} + t_1 + T'_{sA} & (B) \end{cases} \quad (4)$$

6. 行列空車回送導入の効果推計

(1) 仮想都市間における効果推計

仮想都市間上において、図-4、図-5のそれぞれの評価モデルの高速道路長 d_h を変化させた際の効果を推計する。本研究は時間を1時間単位のマクロな分析を行っているため、トラックの高速道路走行速度 $80\text{km/h}^{19)}$ に合わせるため、 80km ごとに変化を加えていく。また、トラックの発生時刻は荷物の出荷時刻に依存し、長距離トラックは夕方から夜にかけてトラックの整備点検や荷物の積み込みを行い、深夜中に高速道路を走行し、早朝配送先で積卸しを行うのが一般的である¹⁰⁾。よってこの現状を考慮し、首都圏側、地方圏側双方とも簡易に16時～18時のみ出荷貨物が存在し、出荷が可能と仮定した。トラックの発生台数は地域間の貨物量バランスの差異を簡易に分かりやすく表現するため、上りの貨物需要に対して、下りの貨物需要は半分と仮定し、上りは満載満車で60台のトラックが毎時輸送を行い、下りは半分の30台のトラックが満載で、残りの30台のトラックが空車回送を行うとした。この条件において、通常のトラック運用方法である単独走行を行った場合と行列空車回送のオペレーションを用いた場合の両ケースで、1週間で必要なトラック数とドライバー数をシミュレーションした。その結果を表-5に示す。

仮想都市間におけるシミュレーションによる効果推計では、同じ貨物量を輸送した場合でも、行列空車回送を用いた場合は単独走行に比べ、必要なトラック数とドライバー数がともに削減できる結果が、当然ながら得られた。これより、人件費や運行コストの削減効果が得られるが、その効果は輸送距離帯によって異なり、長距離になると行列回送によるドライバー数削減効果が得られないことが分かる。例えば、Case1では320km、Case2で

は480kmを超えると必要ドライバー数が増加し、単独走行と同じ人数が必要となる結果となっている。これは隊列走行によって、空車トラックを早急に地方圏に返した場合でも距離帯が長すぎてしまうため、次の地方圏の出荷時刻 16 時～18 時に間に合わないためである。よって、今回の前提条件においては、Case1 では 320km 帯、Case2 では 480km 帯が本オペレーションの適正距離帯であると考察できる。

表-5 仮想都市間での距離別シミュレーション結果

高速道路長	単独走行		隊列走行(Case1)		隊列走行(Case2)	
	トラック数	ドライバー数	トラック数	ドライバー数	トラック数	ドライバー数
240km	360台	360人	270台	270人	270台	270人
320km	360台	360人	270台	270人	270台	270人
400km	360台	360人	270台	330人	270台	270人
480km	360台	360人	270台	360人	270台	270人
560km	360台	360人	270台	360人	270台	330人
640km	360台	360人			270台	360人
720km	360台	360人			270台	360人

(2) 東京-名古屋間における隊列空車回送の導入効果推計

(a) 必要トラック台数・車中泊回数の比較

(1)で行った仮想都市間でのシミュレーションから最適距離帯として示された320kmに近似している都市間である、東京都と愛知県間をケーススタディとして、実際の貨物流動を前提とした際の隊列空車回送オペレーションの効果を推計する。対象としたデータは2015年物流センサスデータに記載のある3日間の貨物流動データであり、東京都を出発地とし愛知県に到着するデータと、愛知県を出発地とし東京都に到着するデータを分析した。また、先述した地域間における貨物輸送量分析と同様に、隊列走行に参加可能と想定できるバンボディ車と想定できるトラックのみを抽出した。データでは貨物のトン数のみ記載があるため何台のトラックで輸送されたかは未知である。よって、輸送はすべて一般的に流通する15tトラックで行うと仮定をし、データのトン数が15t未満であれば1台のトラックで輸送を行うとし、15t以上であるならば15tトラックで何台が必要であるか算出し、それを輸送に使用したトラック台数と仮定した。

この条件によって、物流センサスより抽出したトラック台数は、3日間で上り方向が1358台、下り方向が603台であった。また、この3日間の時間ごとの出荷台数分布を図-6、図-7に示す。このような台数が、3日間で東京都と愛知県で発生する時、(1)で行った仮想都市間でのシミュレーションと同様に、単独走行の場合と隊列走行の場合で行い、必要なトラック台数を出力した(図-8)。また本研究では隊列空車回送のオペレーションにより、労働環境の改善も見込めると考えており、労働環境改善を計測する指標として、車中泊回数(逆に考えれば、自宅での休息回数)を使用する。長距離トラックドライバ

一の高頻度な車中泊は、物流業界では大きな問題となっており、何日も自宅での休息を行えないドライバーが多く存在し、車中泊回数の減少というのがドライバーの労働環境の改善に繋がると考えられる。よって提案のオペレーションによる車中泊回数の変化も同時にシミュレーション上で出力し、結果を図-9に示す。結果より、総トラック数と車中泊回数はともに減少し、トラックの稼働率向上効果や労働環境改善効果が明らかとなった。

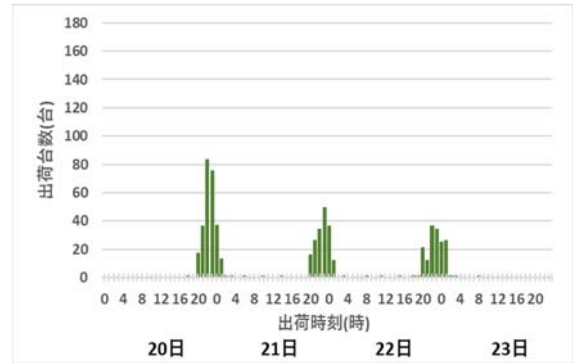


図-6 東京→愛知 時間帯別出荷台数

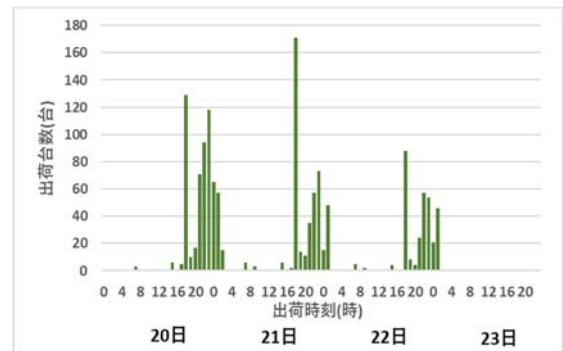


図-7 愛知→東京 時間帯別出荷台数

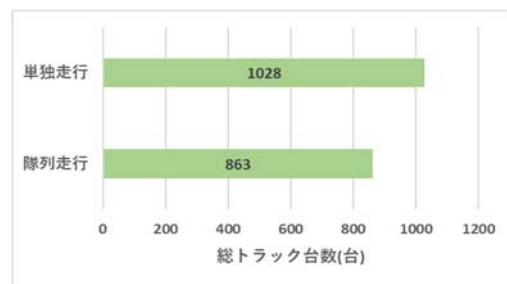


図-8 東名間における必要総トラック台数比較

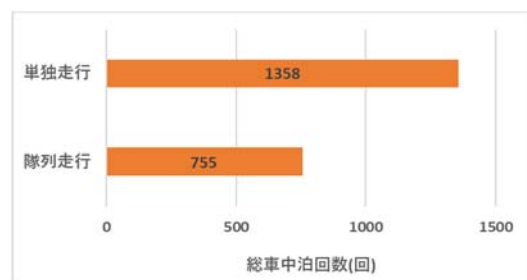


図-9 東名間における総車中泊回数比較

(b) 運行コストの比較

上記では車中泊回数減少による労働条件の改善や必要トラック数削減によるトラックの稼働率向上効果が定量的に明らかとなり、現在の緊迫する物流市場に対する一助になる可能性を示せた。ここでは、本オペレーション導入によって、単独走行の場合と隊列走行の場合の総コストにはどのような影響を与えるのかを推計する。総コストは運用に必要となる4つの要素の和でそれぞれ表される。総コストを示す式を以下に表す。次に各要素の算出方法について記載する。

$$\text{totalcost} = \sum C_h + \sum C_f + \sum C_d + \sum C_v \quad (5)$$

$\sum C_h$: 高速道路料金 , $\sum C_f$: 燃料コスト
 $\sum C_d$: ドライバーコスト , $\sum C_v$: トラックコスト

$\sum C_h$: 高速道路料金

高速道路料金は走行距離に依存し決定される。本研究では都市間を結ぶ幹線高速道路を想定しているため、首都高速道路や名古屋高速道路のような都市型の高速道路料金形態ではなく都市間を結ぶNEXCOの高速道路料金の算出方法⁷⁾を採用した。また、隊列走行の場合は後続についているため3台隊列の際でも1台分の高速道路料金が加算されるなどという方針が議論されているが、本研究では隊列が3台であった場合であっても、3台分の高速道路料金が発生するとした。算出式を以下に示す。

$$\sum C_h = 150 + (24.6 \times 1.65 \times \sum d_h) \quad (6)$$

$\sum C_h$: 総距離 $\sum d_h$ を走行するトラック全台の料金

$\sum C_f$: 燃料コスト

燃料費にはトラックの速度に大きく依存する。今回は簡略化のため、トラックの高速道路走行速度は一定で80km/hを仮定し、一般道速度は30km/hであるとし、加減速による影響は考慮しないとする。隊列走行で後続を自動走行の場合は先行トラックの後続につくことにより、空気抵抗が少なく燃費が向上する。よってその削減率を先行研究⁷⁾で用いられている空気抵抗削減率を採用し算出する。

$$\sum C_f = a \times \frac{w_f}{\text{fuelcost}} \times \sum d_h \quad (7)$$

w_f : ガソリン価格(115.6yen/L)
 fuelcost : トラック燃費(4.05km/L)
 a : 空気抵抗削減率(0.88)

$\sum C_d$: ドライバーコスト

ドライバーコストの考え方は先行研究である川瀬⁷⁾の評価関数と同様に1時間あたりに費やすドライバーのコ

ストを利用し算出する。先行研究では後続車のドライバーは運転業務から解放されることから、そのことによる人件費削減が可能であると考え(運転以外の作業や休憩に充てられると考え)、その削減率パラメータとして w_c と置いている。本研究でも隊列走行中のドライバーコストの上記パラメータを変化させ、効果を分析する。ここでは仮に $w_c = 0.5$ と同等の制度設計が行われた場合を想定し算出する。

$$\sum C_d = w_c \times w_d \times \sum t_b \quad (8)$$

w_d : 人件費(3323yen/時間)
 t_b : 拘束時間
 w_c : 後続定数(0.5)

$\sum C_v$: トラックコスト

トラックコストはトラックの購入費用に関連するコストであり、減価償却の考え方で用いられる耐用年数¹⁸⁾よりトラック1台の週ごとの費用を算出し用いる。日野自動車¹⁹⁾によるとトラック1台の料金は24,051,600yenであり、耐用年数は5年である。これより1週間ではトラック1台を保持するコストは約79,073yenと簡易に計算ができる。

以上を踏まえて、単独走行の場合と隊列走行の場合のそれぞれに費やすトータルコストを算出し、その結果を図-10に示す。単独走行に比べて隊列走行の場合がトータルコストが少なくコストの面でも効果を発揮できることが示された。中でもドライバーコストとトラックコストの削減量が大きく、隊列走行導入効果がコスト面にもあることが定量的に示された。なお、隊列走行が可能な高度なトラック車両は、しばらくは比較的高価となる可能性も高い。その面でも本分析で考慮したトラックの稼働率を上げ、単位期間あたりにトラック1台で得られる業務量・収益を極力向上させることも、隊列走行対応車両の導入を促進する上では重要と考える。

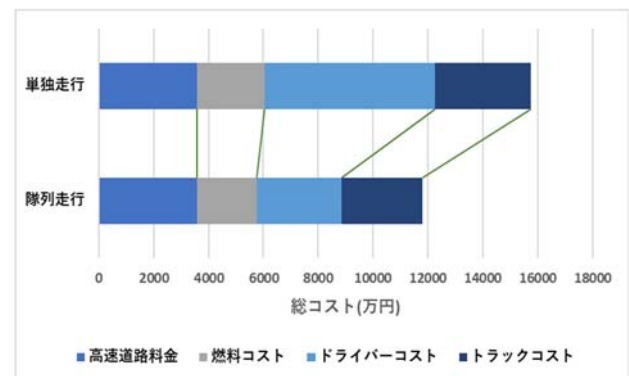


図-10 トータルコスト比較

7. 結論

本研究では小口化、多頻度化、高齢化などにより深刻化するトラックドライバー不足を背景に、物流問題の中の1つである首都圏と地方圏の輸送量需要の差の実態を物流センサデータから明らかにするとともに、それによって発生する空車回送トラックの問題点に着目し、空車回送トラックの非効率性を指摘した。ここで、隊列走行の応用可能性に着目し、隊列走行により空車トラックを回送する新たな隊列走行の活用手法を提案した。その活用手法の効果について分析した結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 仮想都市間で活用手法を評価するモデルを構築し、活用手法の最適距離帯は Case1 (一車貸切の場合) では 320km 帯であり、Case2 (混載の場合) では 480km であることをシミュレーションより推計した。また最適距離帯では、トラック台数の減少や車中泊回数の減少が可能でありコスト面・労働面での効果があることを明らかにした。
- 2) 物流センサデータより実際の東名間の貨物流動を捉え、東京-名古屋間をケーススタディとしたシミュレーション結果より、トラックの必要台数は 1028 台から 863 台に減少し、1 台ごとの稼働率の向上と、総費用のコストカットにつながる事が明らかとなった。また、車中泊回数も 1358 回から 755 回となり、労働環境改善効果があることが明らかとなった。
- 3) 隊列自動走行に関連する新たな労働基準として「準休憩時間」を定義し、その制度化により我が国の緊迫する物流実態を緩和させる可能性を示し、今後の隊列走行技術に関する 1 つの知見を示した。

今後の課題としては、隊列の先頭車両と空車回送トラックのマッチング方法、隊列トラック回送時の拘束時間制約に関する制度設計の課題検討、などが挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：物流を取り巻く現状について、<http://www.mlit.go.jp/common/001258392.pdf> (最終閲覧 2020/2/7)
- 2) 国土交通省：輸送機関別輸送分担、(最終閲覧 2020/2/10)

- <http://www.mlit.go.jp/statistics/pdf/23000000x012.pdf>
- 3) 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> (2020 年 2 月 21 日閲覧)
- 4) 国土交通省：トラックの隊列走行について、(最終閲覧 2020/2/8) <http://www.mlit.go.jp/common/001178890.pdf>
- 5) 藍郷なつき, 黒川久幸：トラック運送業者のドライバーの労働実態の把握に関する研究, H23 東京海洋大学修士論文 (最終閲覧 2020/2/7)
- 6) Anirudh Kishore Bhoopalama : Planning of Truck Platoons : a Literature Review and Directions for Future Research, *Transportation Research Part B* 107(2018)pp212-228.
- 7) 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.
- 8) 竹田郁海・平田輝満・阿部柗人：物流センサ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, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.5, pp.1_891-I_899, 2019.
- 9) 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> (2020 年 2 月 15 日閲覧)
- 10) 国土交通省：全国貨物純流動調査(物流センサ) 2015 年調査について、(最終閲覧 2020/3/3) <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/butsuryu06100.html>
- 11) 白地図:地図製作ツール (最終閲覧 2020/2/7) <https://n.freemap.jp/>
- 12) トラック協会：事業用トラックの種類, <http://www.jta.or.jp/coho/hayawakari/2.shurui-page1.html> (最終閲覧 2020/2/7)
- 13) 全日本トラック協会：トラック事業者のための労働法のポイント、(最終閲覧 2020/2/28) http://www.jta.or.jp/rodotaisaku/pdf/rodoho_point.pdf
- 14) テラテクニカル株式会社：チャーター便と混載便の違い, <https://tera-technical.com/> (最終閲覧 2020/3/2)
- 15) 国土交通省：自動車運送事業者が事業用自動車の運転者に対して行う一般的な指導及び監督の実施マニュアル, http://www.jta.or.jp/kotsuanzen/anzen/info/20180605/01_gaiyo.pdf (最終閲覧 2020/3/2)
- 16) 株式会社秋田エスエス商運：採用情報 運行のながれ, (最終閲覧 2020/3/4) <http://akita-ss-shoun.co.jp/recruit/recruit-3/recruit-3-2/>
- 17) 中日本高速道路：料金の計算方法, (最終閲覧 2020/3/4) <https://highwaypost.c-nexco.co.jp/faq/toll/findout/23.html/>
- 18) ゆりかご倶楽部：税務データベース (最終閲覧 2020/3/4) <http://tool.yurikago.net/586/yurikago/>
- 19) 日野自動車：トラックカタログ, (最終閲覧 2020/3/5) <https://www.hino.co.jp/products/>

THE POTENTIAL OF TRUCK PLATOONING FOR TRANSPORTING EMPTY TRUCKS CONSIDERING INTERCITY FREIGHT DEMAND IMBALANCES

Taiki FUKAYA and Terumitsu HIRATA