

都市間物流におけるトラック隊列走行の導入効果の推計

Estimating the Potential Benefits of Truck Platooning in Inter-Regional Freight Transport in Japan



平田 輝満：茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学領域 准教授

略 歴

2005年東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士後期課程修了（博士（工学））。日本学術振興会特別研究員（DC2・PD）、財団法人運輸政策研究機構運輸政策研究所研究員、独立行政法人宇宙航空研究開発機構客員研究員などを経て、2013年より現職。

[要約] 近年、隊列自動走行による貨物トラックの輸送効率の向上が検討されていることに着目し、本研究では、我が国の都市間物流を調査している物流センサスを用いて全国での都市間の貨物の動きを考慮した場合の貨物トラックの隊列車両マッチングポテンシャルの推計方法を検討し、東日本エリアを対象に東北自動車道での隊列走行の車両マッチングポテンシャルおよび出発時刻制約の緩和によるポテンシャルの向上効果を推計し、その結果をもとに簡易ではあるが燃費削減効果についても試算を行った。また、空車回送問題に対する隊列走行の活用方法の提案と実際の貨物輸送データを活用した効果推計も行った。

1. はじめに

インターネット社会が到来して以来、人々はモノを実店舗に買いに行くのではなく、インターネットで検索・注文をし、モノ自体は自宅まで運んでもらうスタイルが一般的になっている。このようなEコマースが普及することで宅配等の物流量が急増し、それを支える物流システムは社会経済にとって不可欠なインフラとなっている。2015年の物流センサス⁽¹⁾によれば我が国の物資輸送の約85%（重量ベース）はトラック（営業用・自家用）が担っている一方で、我が国では少子高齢化が進展し、トラックドライバーの不足と高齢化が深刻な問題となっている。特に都市間の物流を

担う長距離ドライバーは労働環境が厳しいことが一般的であり、その担い手の確保とともに、より効率的な輸送方法の検討と導入が喫緊の課題となっている。また、地方創生の観点からも地方における生産品を首都圏等の大消費地に効率よく安定的に輸送する手段の確保は地域の産業や雇用を守る上で極めて重要と考えられる。トラック輸送の効率化方策の一つとして近年、自動運転技術を活用したトラックの隊列自動走行（以降、「隊列走行」と称する）が注目されている。隊列走行は、その短い車間距離により、燃費向上（空気抵抗減少）とCO₂削減、交通容量増加（交通密度増加）、省力化といった効果が期待されている。我が国でも2018年1月には新東名（遠

州森町PA～浜松SA間）と北関東道（壬生PA～笠間PA間）において隊列走行の実証実験（隊列台数はそれぞれ3台、4台）が行われ、それ以降も新東名における後続有人・後続無人の走行実験が継続されている。現時点では隊列走行車両の要素技術について基礎的な安全性や社会受容性を確認している段階であると思われるが、仮に隊列走行のための車両技術が確立したとしても、交通工学・交通計画上の重要な課題として、異なるOD（Origin-Destination）・経路の複数のトラックをどのようにコーディネートし、隊列の編成を行うか、また、物流ビジネス上で具体的にどのような形で導入し効率化が可能か、といった課題が存在すると考えられる。このような課題に対して近年、世界的に学術研究も発表されるようになってきており、主にトラックの出発時刻や経路設計に関する研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾がいくつか存在するが、都市間のモノの流れの面やその特性からみた分析は少ない。また、我が国の道路交通ネットワークと物流特性を加味した隊列走行の車両マッチングに関して分析を行った事例は存在せず、実際に隊列走行を我が国に導入した際の潜在的な効果・社会的便益がどの程度存在するのか、どの区間またはどの時間帯に隊列走行を行うことでより大きな効果が得られるか、全く未知であると言える。

そこで本稿では、今後、我が国で隊列走行の本格導入を検討する際に、その導入による社会的便益を定量的に把握することが重要と考え、物流センサスデータから抽出した実際のモノの流れをもとに、隊列走行が可能なト

ラック車両がどの程度存在するか、そのポテンシャルおよび燃費削減効果を推計した結果を紹介する。また、燃費削減以外の隊列走行の活用方法として、空車トラックの回送への応用についても紹介したい。

2. 使用データと分析対象エリア

2.1 物流センサスの概要と所要時間分析

本研究では、都市間を移動する貨物トラックが、経路途中で出会い（マッチングし）、その後、隊列を組んで走行を行うことを想定している。そのマッチングの可能性（ポテンシャル）を推計するために、全国の貨物流動を網羅的に調査・把握している物流センサス（全国貨物純流動調査）のデータのうち、「3日間流動調査（3日間調査）」を使用した。また、隊列車両マッチングのポテンシャルを推計するためのデータとして、各車両の走行特性・所要時間が重要となるが、車種ごと（一車貸切、宅配等混載、自家用トラック、トレーラー）にその傾向が異なるとすると、それらを考慮する必要がある。そこで、各車種の走行距離別の所要時間の分布を集計した。結果の一部として一車貸切と宅配等混載の集計結果を図1、図2に示す。図中は箱ひげ図として平均値、第1・第3四分位点の値、最大・最小値を示している。これら図より一車貸切では平均所要時間が距離に概ね比例して増加しているが、混載では短中距離において所要時間の変化が見られない。また第1第3四分位点の範囲をみると、そのばらつきも混載の方が大きい。貸切についてはある地点で集荷後に目

的にそのまま向かう傾向が強く、一方で混載は夕方に貨物を集荷し、翌日の午前などに配達を行う形態が一般的であるとする、比較的短い距離帯（翌日午前配達可能な距離など）であれば、所要時間が変わらないのではないかと考えられる。なお、トレーラーも貸切と同様の傾向は見られたがデータのバラつきが比較的大きく、自家用トラックは短距離輸送が主であった。以上の結果を考慮し、本研究では所要時間の面でより輸送特性が同質で、輸送距離と所要時間が比例関係にあり、かつ一定量のサンプルが集まるデータサンプルとして「一車貸切」のみを分析対象とすることとした。

さらに次章以降で示す分析において必要となる情報の欠損がないように、以下に示す抽出条件を加えて、物流センサデータから分析対象サンプルを抽出した。具体的な条件は、「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、高速道路利用あり、東北自動車道利用」となる。なお、「3日間調査」では、出荷貨物の出荷日、品目、荷受人業種、届先地、届先施設、輸送機関、輸送機関、出荷時刻等が同一の場合は、重量を合算して、これを流動1件として調査しており、使用したトラックの台数や車種は不明である。つまり、上記のような条件を満たした場合、実際には複数台のトラックで輸送されていることも考えられるが、本研究ではこれらも1台のトラックと仮定して分析している。従って、実際よりも少ないトラック車両数を仮定して分析することになるた

め、対象車両数の視点からは、得られる結果は過小評価側、つまり最低でもこの程度の車両マッチングポテンシャルはある、という解釈となる。また「東北自動車の利用の有無」は物流センサデータからは不明であるため、次節で説明するNITASを活用して各サンプルのODに対する最短所要時間経路を探索し、その経路に東北自動車道が含まれるデータを抽出した。その結果、対象データ数は4170レコードとなった。これは3日間調査データの総データ数の約0.5%、一車貸切の総データ数の約1.6%に相当する。

図1 一車貸切の高速道路利用時の所要時間と輸送距離の関係(2015年)

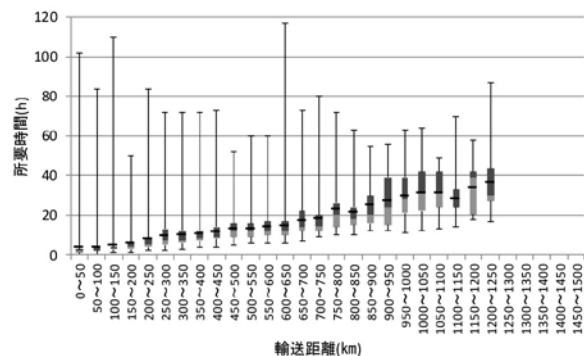
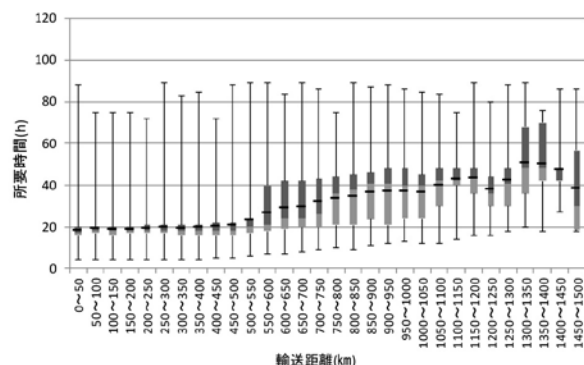


図2 宅配等混載の高速道路利用時の所要時間と輸送距離の関係(2015年)



2.2 NITAS（総合交通分析システム）による経路・所要時間情報の算出

物流センサでは、当該トラックの発着地情報と輸送にかかる時間については把握することができる。しかし、高速道路IC利用の

データ欠損が多いことから、輸送における経路までは把握することはできない。今回の分析では、隊列車両マッチングのポテンシャルを探る上で、各トラックのある程度の経路と位置情報が必要となる。そこで、物流センサスに加えて、地点間の経路・所要時間情報をNITASから算出・設定した。NITASの設定条件は、「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）」である。

2.3 分析対象エリアと車両移動の仮定

今回は、比較的代替道路が少なく、かつ長距離の幹線道路である東北自動車道を選定した。経路については、各都道府県庁を発着地として、所要時間が最小となる経路を算出し、物流センサスでの時間に関連するデータが1時間単位であること、平均旅行速度が約80kmに近くなるようにすることを考慮し、東北自動車道の上りを基準にして表1、図3のように9区間に区切った（ただし、最も東京に近い区間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までの60kmを区間とした）。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、40km以内であれば次の区間において出発・到着、40km以上であればその区間において出発・到着と仮定した。

また、図4に示すように、物流センサスの所要時間と比較してNITASから算出した（最小）走行時間が短かった場合、出荷時刻を遅

らせることも可能と考えられる。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。

次に、車両の移動については図3の区間をベースに、分析を単純化するために、1時間後に次の区間に移動することを仮定した。この単純化を仮定した際の所要時間とNITASでの最小所要時間を比較したところ、上記の区間設定の仮定（乗降ICについて区切り位置から40km前後で丸める仮定）の関係で、±1時間程度の誤差が生じていたため、区間情報で単純化した所要時間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。

表1 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3 区間設定の詳細

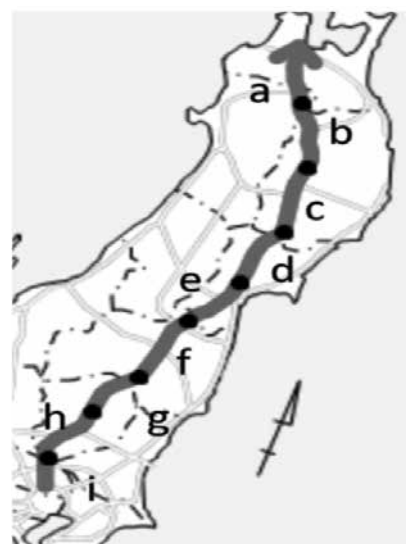


図4 走行時間と出荷時刻調整幅の定義

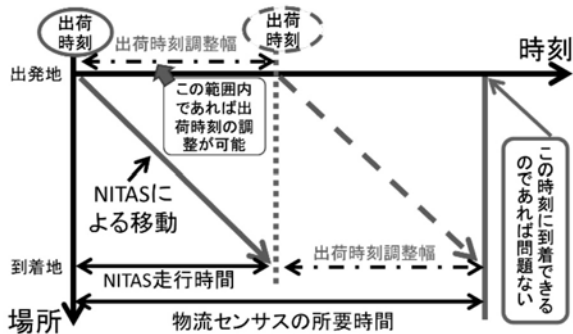
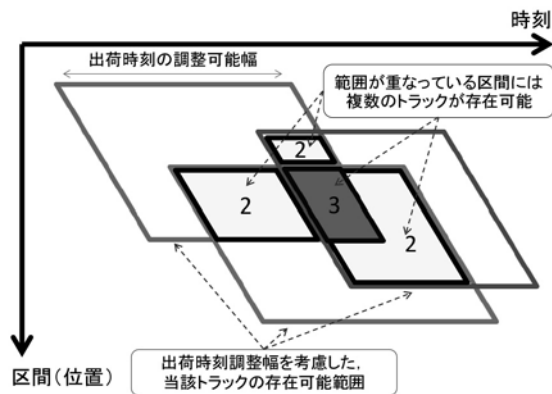


図5 出荷時刻調整幅を考慮した時空間上のトラック存在位置の分析イメージ(3台の例)



3. 時空間上の貨物トラック存在可能台数分布の算出

物流センサスデータから抽出した東北自動車道を利用する可能性のある車両（実際にはモノの出荷1件）について、NITASから算出した移動時間をもとに、東北自動車道の各区間に何時に存在可能であるかのデータを割り当て、データベース化した。前述のとおり、「出荷時刻調整幅」がある場合、出荷時刻（出発時刻）を変化することが可能であることから、ある時刻に複数の区間に存在できる可能性を考慮しており、これを時空間図上で示せば図5のような平行四辺形となり、その重複部分が複数車両が同時に同区間に存在可能な台数を示すこととなる。このように集計することで、物流センサスの調査日である3日間

(2015年10月20～22日)で、トラックの存在可能台数の時空間分布の概略を把握できる。その集計結果のうち比較的トラックの存在可能台数の多かった時間帯の結果を図6、図7に示す。なお、図中のハッチ色の濃淡は台数の大小を示している（濃いほど大）。これより、東北自動車道において、上りでは東京に比較的近い区間で夕方以降～24時前後にかけて多くのトラックが存在可能であることなどが分かる。つまり、これらの時間帯・区間において車両マッチングポテンシャルが高いと言える。

ここで、これらの結果は出発時刻に幅を持たせたままで集計しており、重複した車両カウントとなっているが、実際には1つの上流側で隊列を組んだ方が長い距離を隊列走行可能であり、燃費改善等の効果も大きい。そこで、各車両の出発時刻と隊列台数を以下のように決定した。

- 1) 残存走行距離（時間）に応じた重みを各車両に割当
- 2) 出荷時刻調整幅を残しつつ、上記の重みを考慮した台数を各区間・各時間（図6、図7の各セルに該当）で集計
- 3) 上記2)の重み付き台数の最大セルを選択し、そのセルに含まれる車両の出荷時刻を当該セルを通過するように確定し、当該車両の確定時刻以外の出荷時刻調整幅時刻に対応した車両を削除し、2)の台数分布表を更新
- 4) 更新した台数分布表をもとに3)を再度行い、以後これを繰り返すことで全車両

の出荷時刻を確定し、最終的な台数分布表を算出。

また、到着指定条件の緩和による台数分布の変化を確認するため、図4のように出荷時刻調整幅を考慮して、到着指定時刻について、以下の4つの条件を仮定して計算を行った：
 ①無調整（実際の出荷時刻）、②調整あり（現状制約：到着時刻は不変）、③調整あり（到着指定時間を+3時間）、④調整あり（到着指定時間を+6時間）。ここで③④は到着時刻の時間指定がされているデータサンプルのみを対象に調整した。

図6 20日15時～21日3時の東北自動車道における上りでの存在可能台数分布

上り	時刻												
	20日									21日			
区間	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3
a	41	35	61	69	56	42	34	29	22	30	17	12	8
b	5	26	24	47	59	47	33	27	23	17	21	12	8
c	31	37	55	63	86	98	80	60	58	44	34	31	18
d	37	39	46	66	78	101	111	92	72	63	47	37	33
e	70	93	98	112	121	127	139	148	117	92	77	59	49
f	136	141	135	154	182	182	195	179	169	140	120	93	76
g	41	89	91	86	108	133	139	156	144	142	117	98	71
h	68	120	174	182	168	177	204	205	228	218	207	175	149
i	30	26	39	80	92	79	96	111	116	138	121	114	95
総計	459	606	723	859	950	986	1031	1007	949	884	761	631	507

図7 20日18時～21日9時の東北自動車道における下りでの存在可能台数分布

下り	時刻															
	20日					21日										
区間	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	10	20	20	17	19	22	23	22	17	17	18	15	13	12	12	10
b	20	20	17	19	21	19	19	15	15	16	14	12	11	11	9	5
c	29	32	41	48	45	34	35	38	45	46	42	42	40	28	24	15
d	41	45	54	52	39	38	41	49	49	46	45	43	31	26	17	16
e	71	72	90	81	96	109	125	135	135	135	129	101	91	77	66	61
f	66	91	83	102	124	152	163	165	169	165	143	135	119	106	84	68
g	81	74	83	100	125	129	131	128	123	103	97	81	75	59	45	32
h	81	112	134	164	164	169	165	165	156	151	131	135	119	95	82	58
i	75	77	96	93	88	85	80	68	66	53	64	59	47	40	20	15
総計	474	543	618	676	721	757	782	785	775	732	683	623	546	454	359	280

上下区間別の存在可能台数について台数規模別の比率で表した結果を図8、図9に示す。当然ながら、出荷時刻を調整し、さらに到着指定時刻を緩和することで、同じ時刻に同区間に存在する車両数を大きくすることが可能となり、より隊列走行を行うポテンシャルを上げることができることが分かる。

図8 出発時刻調整条件ごとの存在可能台数割合（東北自動車道上り。2台以上対象）

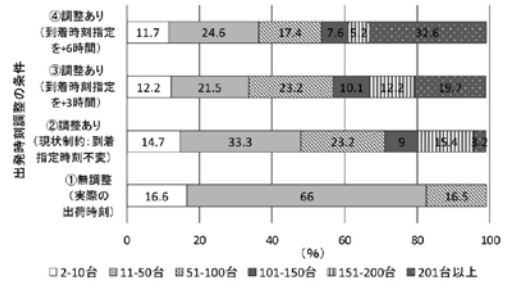
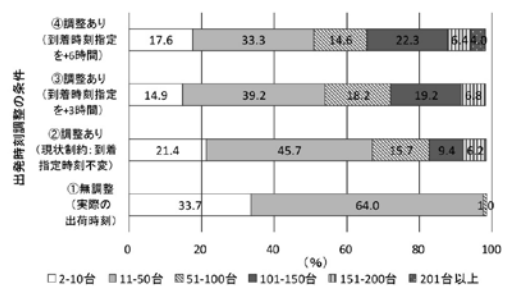


図9 出発時刻調整条件ごとの存在可能台数割合（東北自動車道下り。2台以上対象）



4. 隊列編成確率を考慮した隊列車両数に関するシミュレーション分析

前章で各条件下における各区間・時刻の車両存在可能台数を算出したが、同時刻同区間に存在するからといって必ずすべての車両が隊列を組めるとは限らないと考えられる。また、各車両のODによって経路途中で対象としている東北自動車道から流出することから、隊列編成を組んでも途中で離脱することも考慮すべきである。そこで、前章で算出した車両数xをもとに各区間における車両発生間隔tを指数分布（確率密度関数をf(t)）で仮定し、その間隔が短いほど隊列が組みやすいと仮定した。ある区間での隊列を組める確率h(t)については車両発生間隔が0のとき1、別途仮定した隊列限界時間長Tのとき0となるように発生間隔の線形関数で仮定し、以下の式で各時刻区間の隊列走行車両数sを算出した。

$$s = \int_0^T x \cdot f(t) \cdot h(t) dt \quad (1a)$$

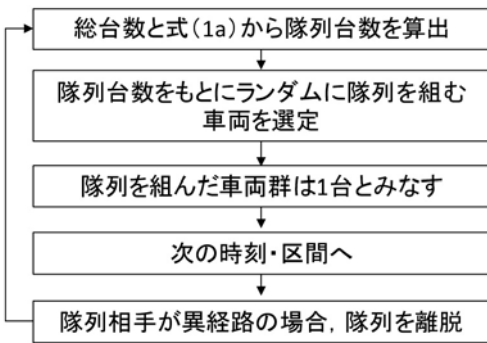
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1b)$$

$$h(t) = 1 - t/T \quad (1c)$$

$$\lambda = x/60 \quad (1d)$$

この算出式は車両の前後関係を厳密に想定して、どの車両同士が隊列を組むかを表現できているわけではないが、車両相互の走行間隔がランダムな状況において確率的にどの程度の隊列が組まれる可能性があるかをマクロに推計した値となる。次に、上記算出式で求めた隊列台数をもとに、モンテカルロ・シミュレーションにより、区間ごとの隊列車両走行の連続性と区間途中での離脱を考慮した最終的な隊列編成状況を推計した。その推計フローを図10に示す。

図10 隊列編成状況の推計のフロー



具体的には、上流区間から順番に、各区間に存在する全車両に0～1の一樣乱数を付与する。その後、式(1a)で算出された隊列台数(隊列台数が奇数の場合は1台減じた台数)になるまで乱数の大きいものから順番に隊列ペアを組み、残りの車両は隊列を組まない単独走行車両とした。一度隊列を組んだ車両は次の区間では1台として扱い(図11)、次の区間での総台数を更新して、再度同様の方法で隊列を組む車両をランダムに選定する。分析

の単純化のため1区間では1回のみ隊列を組むことを仮定しているため、複数区間を経て3台以上の隊列も生じることとなる。またIC・JCTごとに東北自動車道を離脱する車両については(各車両にODと経路の属性がついている)、その時点で隊列から分離させている。以上のシミュレーションを複数の隊列限界時間長と出発時刻制約(到着指定時刻制約)条件において20回ずつ試行し、得られた結果の平均から隊列編成数別のシェアを算出したものを図12、図13に示す。

図11 隊列が次の区間に移動した際の挙動

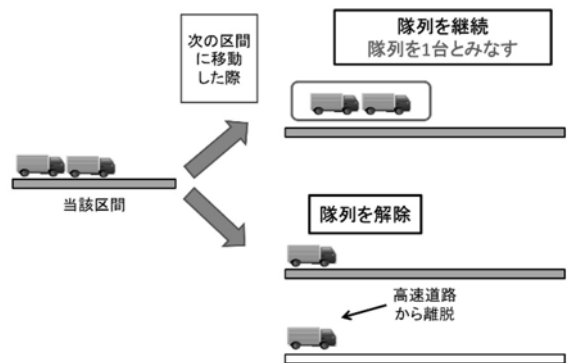


図12 隊列編成台数別シェア(東北道上り)

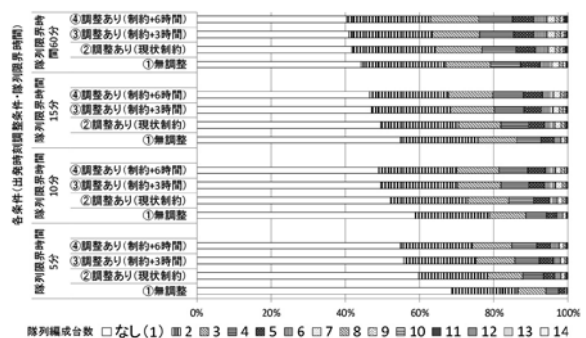
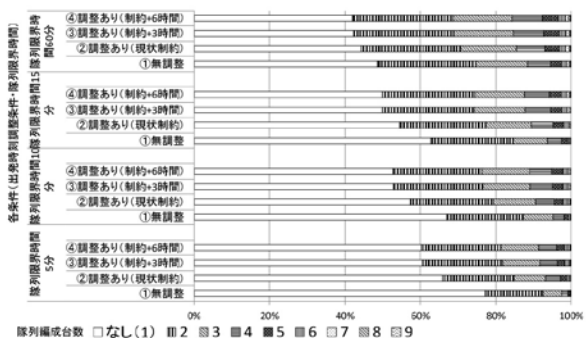
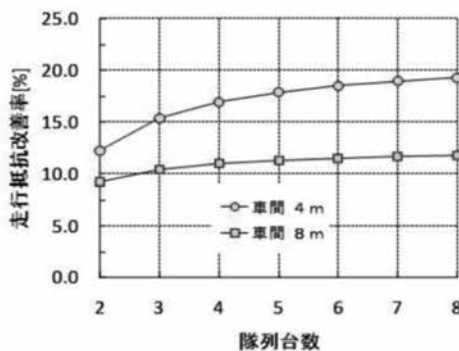


図13 隊列編成台数別シェア(東北道下り)



隊列限界時間長が大きいほど、到着時刻調整幅が大きいほど、隊列を組める確率（以降、隊列編成確率）が高まっていることが分かる。また、今回対象とした物流データと区間においては、一番厳しい条件では3割程度、一番良い条件で6割程度が隊列を組むことができる可能性があることを示している。詳細は割愛するが、分析上でモノの発地別にも隊列編成確率算出でき、宮城県・福島県周辺で隊列率が最も高く、トラックの存在可能台数分布と照らし合わせると、台数が集中している区間で隊列編成確率が高くなっていることが示された。

図14 隊列台数と走行抵抗改善率(出典:青木⁽⁵⁾)



次に、推計した隊列編成確率から燃費削減効果を簡易に推計した。隊列による燃費削減効果については青木⁽⁵⁾を参考に、車間4mと8mの場合の隊列編成台数別（8台以上は同様の値を仮定）の走行抵抗改善率（4mで約10～20%、8mで10%前後）を仮定して算出した（図14）。燃費については国土交通省の統計データ⁽⁶⁾より、10tトラックの燃費基準値である6km/Lを用いた。結果を図15、図16に示しているが、東北自動車道上りでは車間距離4mで約4～8%、車間距離8mで約3～5%、下りでは車間距離4mで約3～7%、車

間距離8mで2～5%の燃費削減率となり、東北自動車道において隊列走行を導入した場合には、約2～8%の燃費削減効果が見込まれる結果となった。さらに、今回の対象トラックが一部であったことを考慮すると、実際に走行しているトラックの台数はさらに多いことから、隊列率・隊列編成台数ともに増加することが予想され、今回示した結果以上の燃費削減効果が期待できるのではないかと考えられる。

以上の分析をまとめると、東北自動車道における隊列車両のマッチングポテンシャル、つまり隊列を組むことが可能なトラック台数は、隊列限界時間長（隊列を組む可能性のある車両間隔）の仮定によって変化するが、実際の出荷時刻を前提にすると3～5割程度の車両数と推計された。また、到着時刻指定の緩和を想定し出荷時刻調整幅を大きくとることができれば、マッチングポテンシャルは最大で6割程度まで向上できる可能性を示した。また、燃費削減効果を簡易に推計した結果、仮定する条件により変化はするが概ね2～8%程度の改善が見込めることが示唆された。なお、今回は東日本エリアの比較的少ない車両数を対象にしたことを考慮すれば、実際にはより大きな隊列車両マッチングポテンシャルが見込める一方で、隊列走行が可能な車両の普及率に、それら効果は大きく依存することは言うまでもなく、本研究ではあくまで全てのトラックが隊列可能という理想状態での最大ポテンシャルを推計した形となっている。なお、以上の成果は別稿でも発表しているため、参照されたい⁽⁷⁾。

また、以上の分析では1時間の走行中で1回のみ隊列組成が可能としていたが、3台以上の車両を同時に組成させるロジックを導入した場合には、隊列率がさらに5～30%程度向上し、燃費削減効果も2～5%程度さらに向上する可能性も示している(詳細は竹田・平田・阿部(2019)⁽⁸⁾を参照)。

図15 燃費削減率の変化(東北道上り)

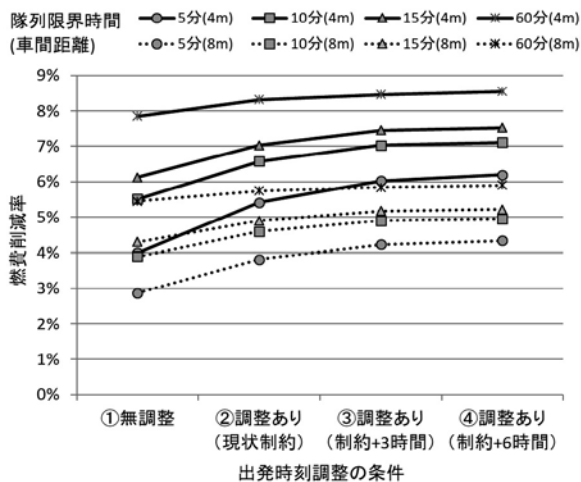
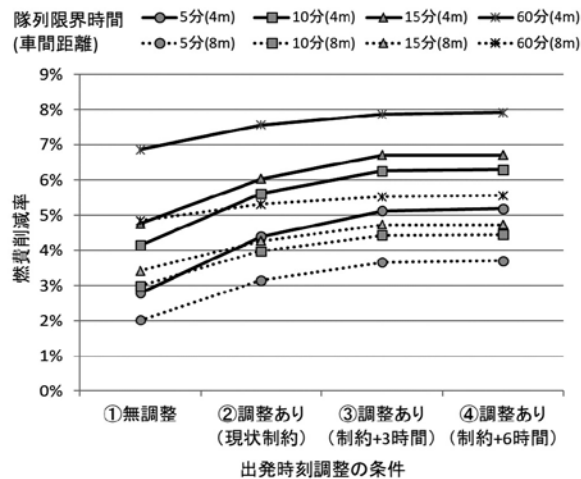


図16 燃費削減率の変化(東北道下り)



5. トラック空車回送問題における隊列走行の導入可能性の検討

次に、隊列走行の具体的な活用可能性の一例として、トラックの空車回送への適用について考えてみた。国交省の統計によれば近年のトラック輸送の積載効率は約40%、空車

回送率は約30%、車両の実働率は約65%で、数字上は輸送効率が非常に低いと感じる。特に、空車回送のうち一定数は帰り荷がないために生じていると思われる。空車で帰るよりは少しでも荷物を運んだ方がよいと、遠回りしてでも荷物を探したり集めたりしているのであれば、ドライバーの負担はさらに増大する。長距離輸送では往路の輸送を終えた後、自宅ではない都市での宿泊や、車中泊を余儀なくされる。これも昨今のドライバー確保の上では不利条件になる。また、物流センサスを用いてバンボディ車で輸送するような品目について簡易に集計すると、そもそも都市間の物流量では大消費地の首都圏方面の輸送が比較的多く、その逆の地方方面は少ないことが示唆される(表2)。

表2 東京都市圏(1都3県)と地方主要県との間の貨物流動トン数の集計結果(物流センサス3日間調査2015より集計)

出発→到着	貨物輸送量(t)	出発→到着	貨物輸送量(t)
愛知県→東京都市圏	10,626 (t)	東京都市圏→愛知県	8,457 (t)
大阪府→東京都市圏	7,633 (t)	東京都市圏→大阪府	4,780 (t)
石川県→東京都市圏	1,178 (t)	東京都市圏→石川県	605 (t)
新潟県→東京都市圏	4,497 (t)	東京都市圏→新潟県	2,943 (t)
宮城県→東京都市圏	5,370 (t)	東京都市圏→宮城県	3,710 (t)

もしそうであれば、どんなに求貨求車システムを企業間連携やIT活用で進めても、一定数の空車や低積載車が生じてしまう。深刻なドライバー不足の中で空車回送にドライバーを使ってしまうのはなんとも残念である。そこで隊列走行をこの空車回送の問題に活用することはできないだろうか。例えば、

首都圏から地方方面の復路において、少ない荷物のパイを多くの車両で取り合うのではなく、いっそのこと隊列走行で復路の空車を一定数回送し、ドライバーも空車後続車で自宅のある街に向けてすぐに戻るようなオペレーションはできないだろうか。そのようなオペレーションを図示したのが図17（通常）と図18（隊列）である。図17は上り（地方→首都）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、荷物を5台で分け合っている非効率な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、図18に示すように、首都圏から地方圏への需要がトラック5台に対して、3台分の貨物量である場合、帰り荷に必要な必要最小限3台の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である。空車は積荷がない分、到着時刻制約も比較的緩く、隊列車両のマッチングに係る時間調整も行いやすいかもしれない。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首都圏側でとっていたが、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も短くなりトラック1台当たりの稼働率の向上も見込まれる。

このような効果は都市間距離に依存することは容易に想像ができる。簡易なシミュレーション分析の結果から、貸切トラックのような運用では約300km以内、混載輸送の積み替え拠点間の輸送を想定した運用では約500km以内であれば、上記の提案手法により必要なトラックやドライバー数が大幅に削減可能となることが分かった。

さらに、これらの結果を参考に、実際の都市間貨物輸送データを対象にシミュレーションしてみた。対象は東京と愛知間をケーススタディとして、2015年物流センサスデータを用いて実際の時刻別貨物流動量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シミュレーションより推計する。抽出したデータは上り方向が1358台、下り方向が603台であり、この台数が3日間で発生する時、通常の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。また、ドライバーの労働環境の緩和として表される指標には、車中泊数の減少（逆にいえば自宅での休息回数の増加）があり、同時に出力した。結果として図19に示す通り、実データを対象

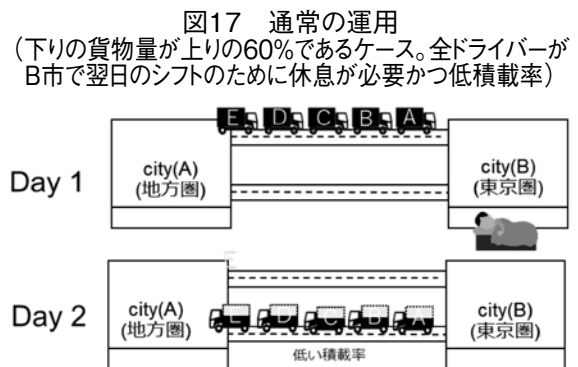


図18 提案する運用
 (上下方面の貨物量の差を考慮して一部のドライバーと空車車両を隊列走行ですぐに地方に輸送。帰還ドライバーは自宅では休息可能で、かつ下り車両の積載率は向上)

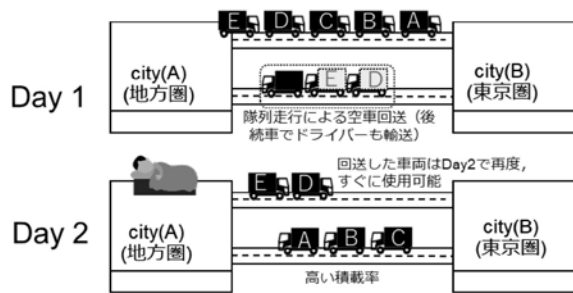
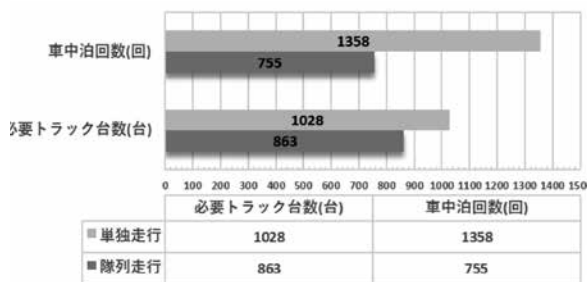


図19 車中泊回数・トラック数比較



に計算した場合でも必要トラック数と車中泊回数が大分減少していることが示された。なお、具体の貨物量分布や計算方法等の詳細は別稿を参照されたい (Hirata and Fukaya (2020) ⁽⁹⁾、深谷・平田 (2020) ⁽¹⁰⁾)

以上のように、空車回送に隊列走行を応用することで効率化の可能性があることを示したが、このとき長距離になればなるほど労働基準上の連続運転時間や拘束時間の上限が当然ネックとなる。つまり、隊列の後続車で運転が不要とはいえ、自動運転のレベル3であれば前方注視は必要であり、緊急時には運転をオーバーライドしなくてはならない。そのため、後続で乗車時も連続運転時間扱いとなり休憩や休息の扱いには現時点ではならない。現在、わが国では後続無人の隊列走行も実証実験中で、近年中に実用化を目指しているが、もし隊列の有人後続車が自動運転のレ

ベル4か、それに準じたレベルとして、労働基準上の拘束時間と休憩時間の間のような扱い (準休息的な扱い) で拘束時間等の上限緩和が制度上可能となれば、上記のようなオペレーションも可能となる。そもそも後続無人が可能であれば車両のみの回送がそのまま可能となるが、そこまでの過渡期や端末輸送・荷役等のために有人での輸送が一定程度残るのであれば、本研究で提案したような隊列走行による車両とドライバーの回送という運用も一定程度の価値があるかもしれない。また、戻った空車車両は翌日の首都圏方面の輸送需要にすぐに対応ができ、車両の実働率 (稼働率) も向上するため、もし将来、後続車無人が可能となっても、隊列走行対応車両の導入コストが高額になるほど、その固定費が経営上重荷になるため、車両の稼働率向上は重要となる可能性もある。

6. おわりに

本稿では、わが国における隊列自動走行の適用可能性を検討するため、東北自動車道を対象に隊列マッチングポテンシャルおよび燃費削減効果の推計を行った事例を紹介した。また、地域間の貨物輸送量の往復のアンバランスを想定した空車回送に対する隊列走行の応用アイデアを提案し、実際の地域間輸送データに適用した際の効果推計の結果を紹介した。筆者らにより、他にも、東名・新東名高速道路での隊列車両マッチングのマイクロシミュレーションの開発も行っており、SA/PAを活用した隊列組成のシミュレーション

や、SA/PAにおける隊列車両順序の入れ替えによる休憩時間の削減と速達性向上効果、さらにその運用によるSA/PAの駐車混雑緩和効果の推計も行っている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。これらについては別稿や今後の報告を参照されたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり国土交通省より物流センサデータの提供を受けた。また、これらの研究成果は科学研究費補助金基盤研究（B）19H02255「隊列走行を活用した都市間物流システムの運用評価モデルの開発と運用効率化方策の検討」の成果の一部である。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 国土交通省：第10回 2015年調査 物流センサス、2017.
- (2) Wei Zhang, , Erik Jenelius , Xiaoliang Ma : Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty, Transportation Re-search Part E, Vol.98, pp. 1-23, 2017.
- (3) 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.
- (4) Kuo et al. : Fuel-Saving Potential of Platooning Evaluated through Sparse Heavy-Duty Vehicle Position Data, IEEE Intelligent vehicles Symposium, June 8-11 2014
- (5) 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-laoki.pdf> (2018年2月25日閲覧)
- (6) 国土交通省：自動車の燃費基準値、<http://www.mlit.go.jp/common/001031331.pdf> (2018年3月5日閲覧)
- (7) 平田輝満、阿部柗人：都市間物流データを活用したトラック隊列走行の車両マッチングポテンシャルの推計～東北自動車道を対象として～、日本物流学会誌（論文R）、第27号、pp.91-98、2019.
- (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.L_891-L_899、2019.
- (9) Terumitsu Hirata, Taiki Fukaya: Potential of Truck Platooning for Transporting Empty Trucks considering Intercity Freight Demand Imbalances, LogForum (Scientific Journal of Logistics) , Vol.16, No.3, p.51-61, 2020.
- (10) 深谷泰己・平田輝満：地域間でのトラック空車回送問題における隊列走行導入効果に関する研究、日本物流学会第37回全国大会、2020.9.20.
- (11) 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.
- (12) 鍛冶竜馬：休憩行動及び複数ODを考慮したトラック隊列走行のミクロシミュレーションの開発、2020年度茨城大学大学院理工学研究科修士論文.