

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～ Analysis of Vehicle Matching Potential for Truck Platooning

平田輝満(正会員：茨城大学大学院)、阿部柊人(非会員：青森県庁)
Terumitsu HIRATA (Ibaraki Univ.), Syuto ABE (Aomori Pref.)

要旨

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。

Abstract

Truck platooning is one of the promising technologies for enhancing the efficiency of intercity freight transportation in the future. This study first developed the model for estimating the matching potential of trucks for platooning by using the inter-regional freight transport census data in Japan. Then, by applying the developed model to freight transport in east-Japan area, the matching potential of trucks for platooning in Tohoku Expressway was estimated and also the impact of truck platooning on fuel saving was evaluated.

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) が行われている。しかしながら、現時点では隊列の車間距離も 35m と長く、世界的にも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。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、といった課題が存在す

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ほぼなされていない。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。

そこで本研究では、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、そのポテンシャルを推計することを主たる目的とした。さらに隊列走行導入による社会的便益の一つとして燃費削減効果に着目し、推計した車両マッチングポテンシャルの結果をもとにその削減効果についても試算する。

2. 既存研究の整理と本研究の位置づけ

近年、隊列走行技術に関して本研究で着目している隊列車両のコーディネーション問題に関する研究が海外を中心に進展している。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⁽²⁾。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.⁽²⁾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、Liang et al.⁽³⁾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.⁽⁴⁾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。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存在しない。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、その点を分析することが本研究の特徴である。またそのための統計データが我が国で整備されている点も本研究を実施可能とする背景の一つである。

3. 使用データと分析対象エリア

3.1 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地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と、比較的短い距離帯(翌日午前配達が可能な距離など)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、物流センサス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あると考えられるが、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」は物流センサスデータからは不明であった

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。

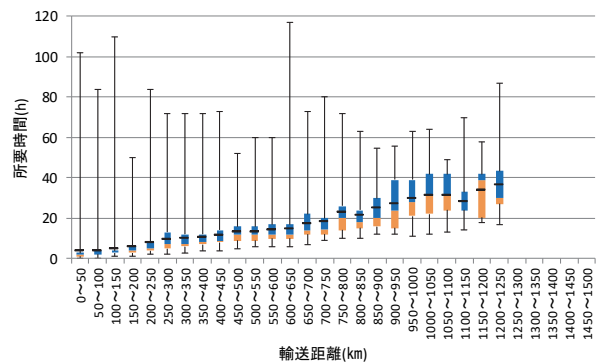


図1 一車貸切の高速道路利用時の所要時間と輸送距離の関係 (2015年)

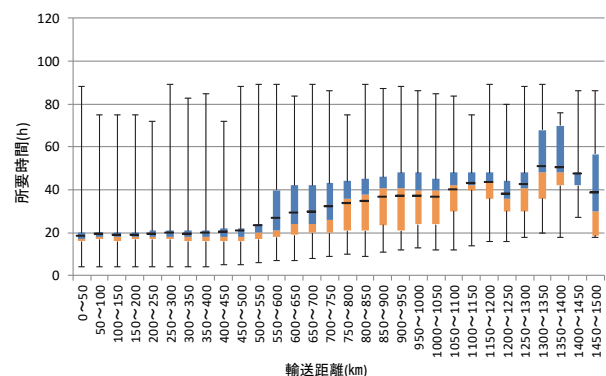


図2 宅配等混載の高速道路利用時の所要時間と輸送距離の関係 (2015年)

3.2 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

物流センサスでは、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。

3.3 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 </tr <tr> <td>g</td> <td>鏡石(福島県)</td> <td>上河内(栃木県)</td> <td>83.0km</td> </tr> <tr> <td>h</td> <td>上河内(栃木県)</td> <td>加須(埼玉県)</td> <td>77.3km</td> </tr> <tr> <td>i</td> <td>加須(埼玉県)</td> <td>中野長者橋(東京都)</td> <td>61.7km</td> </tr>	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
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

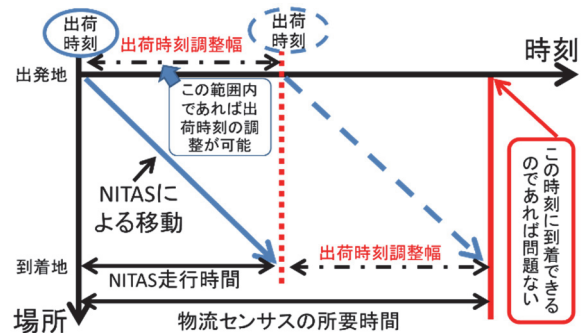


図 4 走行時間と出荷時刻調整幅の定義

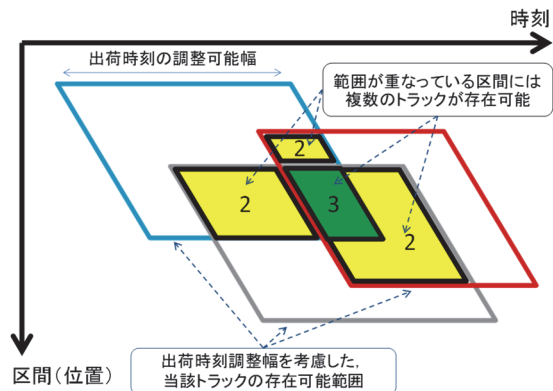


図 5 出荷時刻調整幅を考慮した時空間上のトラック存在位置の分析イメージ(3 台の例)

4. 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つの出発時刻を選択することになる。また、より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。

上り	時刻												
	20日									21日			
	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

下り	時刻															
	20日							21日								
	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

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

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。

5. 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分・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 をもとに各区分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。ある区分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ないわけではないが、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、区分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。具体的には、上流区間から順番に、各区分に存在する全車両に 0~1 の一様乱数を付与する。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

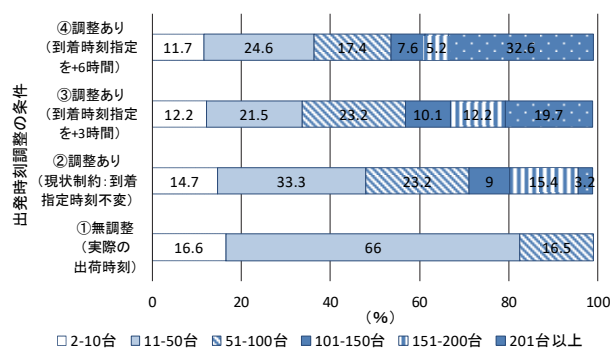


図 8 出発時刻調整条件ごとの存在可能台数割合 (東北自動車道上り、2 台以上対象)

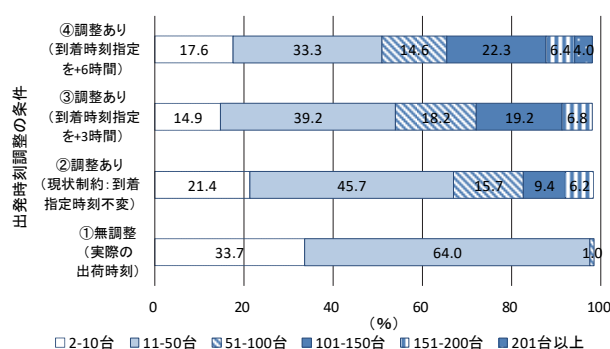


図 9 出発時刻調整条件ごとの存在可能台数割合 (東北自動車道下り、2 台以上対象)

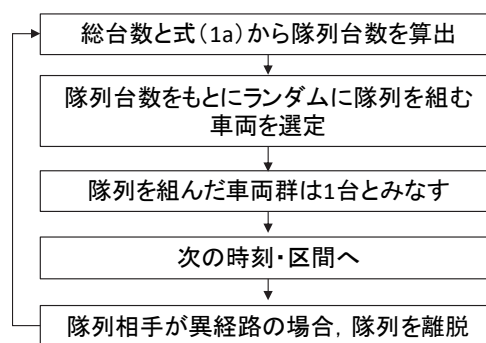


図 10 隊列編成状況の推計のフロー

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

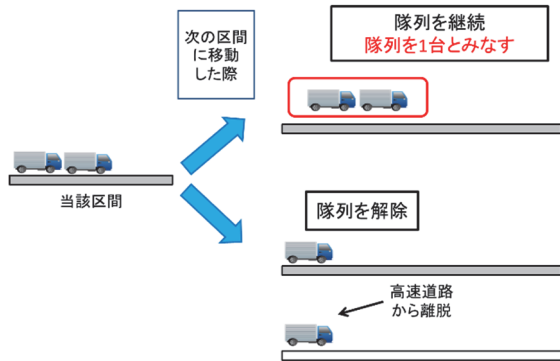


図 1 1 隊列が次の区間に移動した際の挙動

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.

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.

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

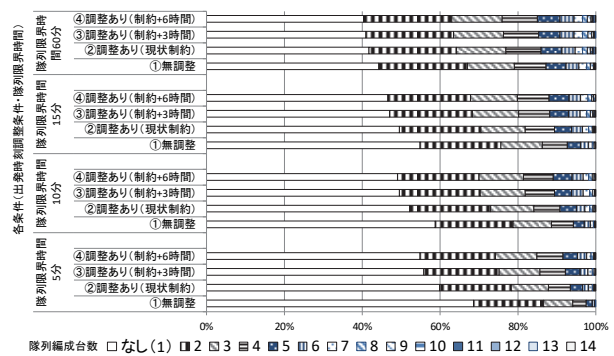


図 1 2 隊列編成台数別シェア(東北道上路)

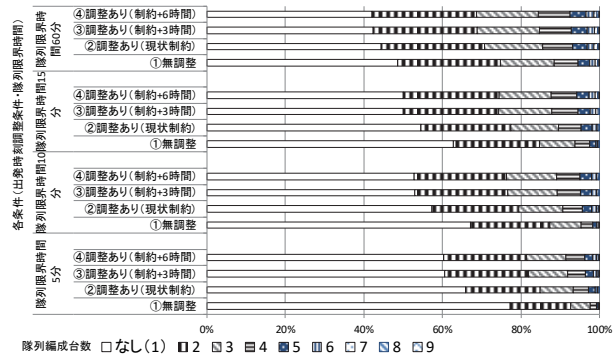


図 1 3 隊列編成台数別シェア(東北道下り)

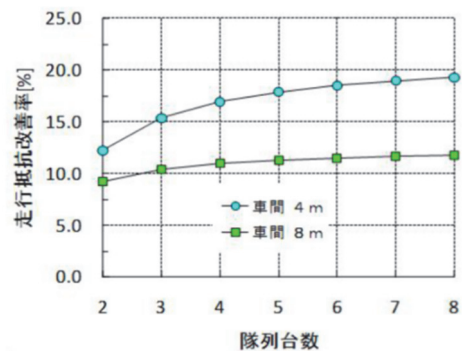


図 1 4 隊列台数と走行抵抗改善率(出典: 青木⁽⁵⁾)

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.

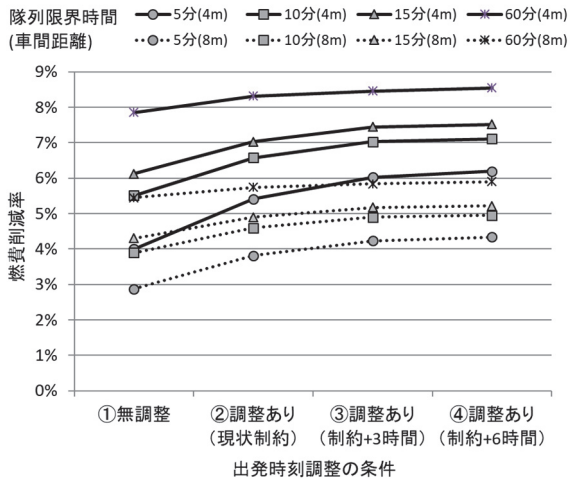


図 15 燃費削減率の変化(東北道上路)

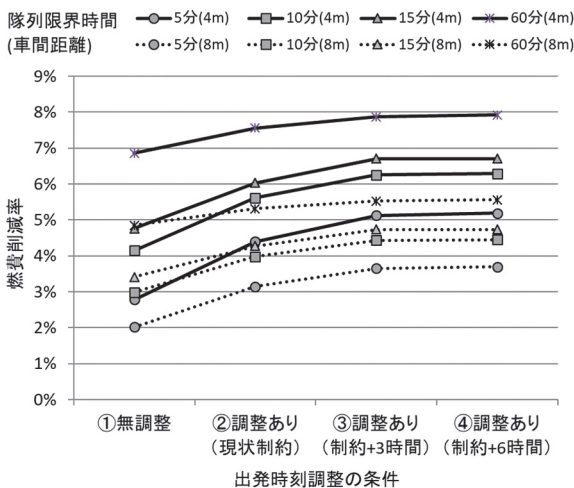


図 16 燃費削減率の変化(東北道下路)

6. おわりに

本研究では、物流センサを用いて、東北自動車道を対象に、貨物 OD データから区間別車両存在台数の推計・隊列マッチングのポテンシャルの推計を行うとともに、隊列走行導入による燃費削減効果について定量的に把握した。その結果、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。最後に、推計した隊列マッチングポテンシャルを活用して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と考えられる。一方で、センサデータの出荷データと輸送車両数との関連、車両移動の仮定、隊列編成の確率的な仮定など、分析の精緻化のために改善すべき点も残されており、それらを含め、今後の課題としたい。

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。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 国土交通省：第 10 回 2015 年調査 物流センサ, 2017.
- (2) 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.
- (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/2012/09/1-2-1aoki.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)