

物流センサス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

阿部 柊人¹・平田 輝満²・竹田 郁海³

¹非会員 青森県庁 (前 茨城大学工学部都市システム工学科)

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 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)

近年、物流傾向の変化により、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は明らかになっていないことから、本研究では、物流センサスデータを用いてトラックの動きを考慮した場合のマッチングポテンシャルについて推計方法を検討し、東日本エリアを対象に東北自動車道での隊列走行実現のポテンシャルの推計と、これを高めるための提案を目的として研究を行った。その結果、東北自動車道におけるマッチングのポテンシャルを台数分布から把握し、出荷時刻を調整することでポテンシャルを高められることを定量的に明らかにした。

Key Words : 貨物トラック、隊列自動走行、物流センサス、東北自動車道

1. はじめに

近年、消費者ニーズの高度化や多様化、ネット通販の拡大によって、多頻度小口配送が促進しており、配送車両の増加に伴う道路混雑の悪化、CO₂排出による環境負荷、交通事故のリスク増大など、都市の物流問題の一因となっている。就業者についても、人口減少とともに、トラック運送業界の就業者の高齢化が進んでおり、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。

わが国では、1990年度比で2020年までに温室効果ガスの排出を25%削減することを表明し、2001年7月の新総合物流施策大綱では、2010年までにモーダルシフト化率が50%を超えることを目標とした。今までトラックで輸送していた貨物を鉄道・海運にシフトすること、つまりモーダルシフトを行うことで、温室効果ガス削減や省エネルギー、排気ガス中の有害物質低減、交通渋滞や事故の減少、少人数による大量輸送など、直面している環境問題、社会問題に効果があると期待されていた。しかし、2015年の物流センサス¹⁾によれば、トラックが約85%となり、鉄道・海運へのシフトが拡大してはいるものの、50%という目標には遠く及んでいない。積

み替えに時間がかかる、運送時間や頻度に融通が利かない、輸送速度が遅いなど、現在の貨物輸送のニーズに対応できていないことから、利便性、速達性のあるトラック輸送からのシフトは簡単ではないことが、普及が進んでいない一つの要因として考えられる。

以上のように、目標を掲げた現在でも、トラック輸送が貨物輸送の大部分を担っているのが現状であり、モーダルシフトの普及もなかなか進んでいないことから、現在の環境問題、社会問題を解決するためには、トラック輸送の効率化を図っていく必要がある。その一対策として、隊列走行技術の導入が検討されており、隊列走行が実現することで燃料消費削減や交通の円滑化等の効果があると考えられている。現在までに、隊列走行による燃料削減効果等の分析、隊列走行実現に向けた技術開発が行われているが、実際に隊列走行を導入することになった場合に、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については十分に分析されていない。今後、我が国で隊列走行の本格導入を検討する際に、その導入効果を定量的に把握することが重要と考え、本研究では、物流センサスデータから実際のモノの流れをもとに、隊列走行が可能で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

とを目的とした。具体的には以下の3点を目的とする。

- ① 物流センサデータから、現在の貨物トラック輸送における輸送時間の実態を明らかにする。
- ② 物流センサデータを用いた、現状の貨物トラックの動きを考慮した場合における車両マッチングのポテンシャル推計の方法を検討する。
- ③ 主に東日本エリアのトラック貨物輸送を対象に東北自動車道の区間毎の隊列走行実現のポテンシャルを推計するとともに、ポテンシャルを高めるための方法を検討、提案する。

2. 既存研究の整理

Browand et al.²⁾ は、車間距離の変化による燃費削減について実験を行っており、車間距離を短縮することで燃費が削減されることを示した。また、車両の形によって空気抵抗の影響が変化することから、トラックではより大きな効果が期待できるのではないかと提示している。Kuo et al.³⁾ は、トラックに搭載されているHDVを利用して、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がどのように変化するかを比較を行っている。以上の既存研究より、隊列走行の効果に加えて、計画的に隊列を組むことでその効果は増加することを明らかにしているが、実際の貨物流動を前提に隊列走行を導入した際の効果等に関する研究は進んでおらず、日本を対象とした研究や実際の貨物の輸送形態・時間制約などを考慮した隊列の構成ポテンシャルの推計は筆者が知る限り行われていない。

3. 使用データと分析対象エリア

(1) 物流センサ

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（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、車種毎に所要時間の傾向が異なることから、1つの車種を抽出して用いることが妥当であると考え、①一定量のデータ数を確保でき、②所要時間なるべくトラックの運行時間に近いもの、③データの傾向が予測しやすいもの、という観点から、「一車貸切」のデータを用いた。推計に使用した物流センサデータの主な抽出条件は「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、東北自動車道利用」である。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。

(2) NITAS(総合交通分析システム)

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。

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

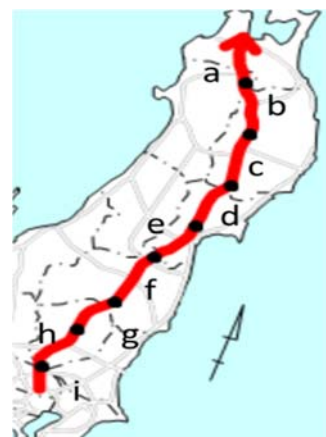


図-1 区間設定の詳細

(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に近くなるように東北自動車道の上りを基準にして表-1、図-1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-2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-1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。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。

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)を変化させた複数の時間に各区間に存在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いる。これらを集計することで、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。その結果を図-3、図-4に示す。これより、東北自動車道において、上りでは15時~翌3時頃に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-3の各セルに該当)で集計
- 3) 上記2)の重み付き台数の最も大きいセルを選択し、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すべての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-2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)、③調整あり(一部制約緩和:+3時間)、④調整あり(一部制約緩和:+6時間)。

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-5、図-6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。

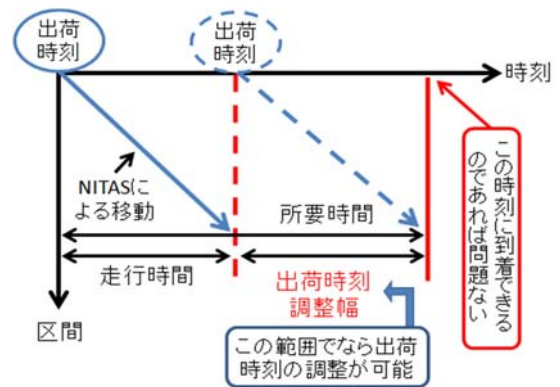


図-2 走行時間と出荷時刻調整幅の定義

上り	時刻													
	20日							21日						
区間	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	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	659	950	986	1031	1007	949	884	761	631	507	

図-3 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																															
区間	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24													
a	10	20	20	17	19	22	23	22	17	17	18	15	13	12	12	10	18	15	13	12	11	11	9	5	20	20	17	19	21	19	19	15	15	16	14	12	11	11	9	5				
b	29	32	41	48	45	34	35	38	45	46	42	42	40	28	24	15	42	42	40	28	24	15	29	32	41	48	45	34	35	38	45	46	42	42	40	28	24	15						
c	41	45	54	52	39	38	41	49	49	46	45	43	31	26	17	16	49	49	46	45	43	31	26	17	16	41	45	54	52	39	38	41	49	49	46	45	43	31	26	17	16			
d	71	72	90	81	96	109	125	135	135	129	101	91	77	66	61	125	135	135	129	101	91	77	66	61	71	72	90	81	96	109	125	135	135	129	101	91	77	66	61					
e	66	91	83	102	124	152	163	165	169	165	143	135	119	106	84	68	169	165	143	135	119	106	84	68	66	91	83	102	124	152	163	165	169	165	143	135	119	106	84	68				
f	81	74	83	100	125	129	131	128	123	103	97	81	75	59	45	32	129	131	128	123	103	97	81	75	59	45	32	81	74	83	100	125	129	131	128	123	103	97	81	75	59	45	32	
g	81	112	134	164	164	169	165	165	156	151	131	135	119	95	82	58	169	165	156	151	131	135	119	95	82	58	81	112	134	164	164	169	165	165	156	151	131	135	119	95	82	58		
h	75	77	96	93	88	85	80	68	66	53	64	59	47	40	20	15	88	85	80	68	66	53	64	59	47	40	20	15	75	77	96	93	88	85	80	68	66	53	64	59	47	40	20	15
i	474	543	618	676	721	757	792	785	775	732	683	623	546	454	359	280	785	775	732	683	623	546	454	359	280	474	543	618	676	721	757	792	785	775	732	683	623	546	454	359	280			
総計	474	543	618	676	721	757	792	785	775	732	683	623	546	454	359	280	785	775	732	683	623	546	454	359	280	474	543	618	676	721	757	792	785	775	732	683	623	546	454	359	280			

図-4 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

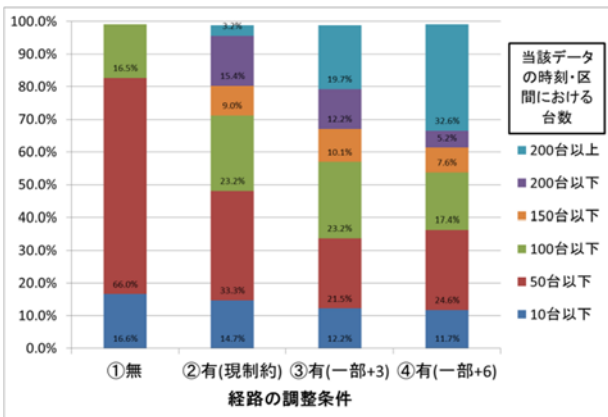


図-5 到着時刻指定条件ごとの存在可能台数割合(東北自動車道上り, 2台以上対象)

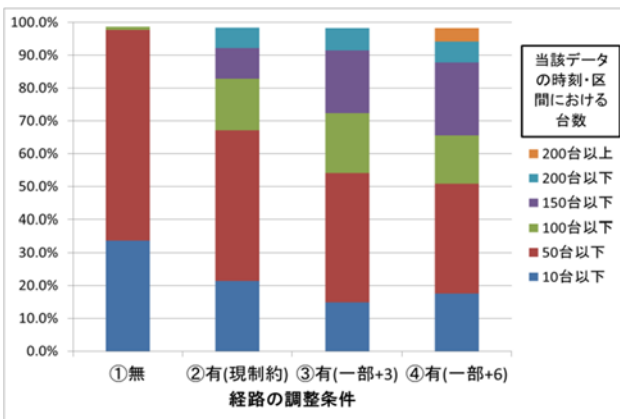


図-6 到着時刻指定条件ごとの存在可能台数割合(東北自動車道下り, 2台以上対象)

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む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-7に示すが、上流区間から順番に、与えられた隊列台数から(乱数を用いて)ランダムに隊列を組む車両を選択し、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-8)、次の区間での総台数を更新して、再度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長と到着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-9、図-10に示す。

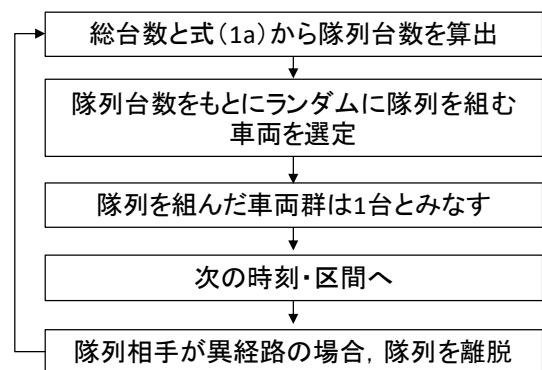


図-7 隊列編成状況の推計のフロー

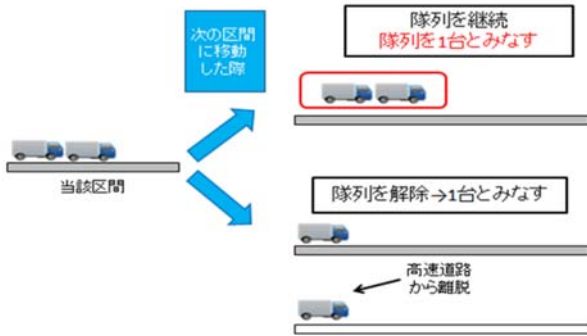


図-8 隊列が次の区間に移動した際の挙動

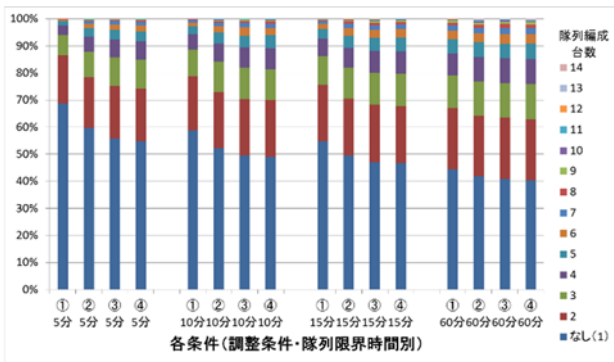


図-9 隊列編成台数別シェア（東北道上り）

（到着時刻指定条件別：①～④，隊列限界長別：5,10,15,60分）

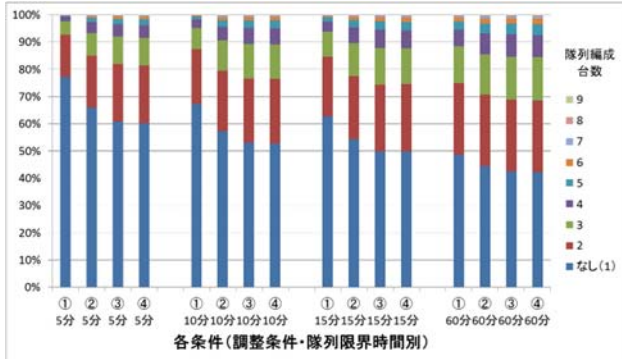


図-10 隊列編成台数別シェア（東北道下り）

（到着時刻指定条件別：①～④，隊列限界長別：5,10,15,60分）

隊列限界長が大きいほど，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率が算出でき，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率が高くなっていることが示された。

最後に，推計した隊列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-11）。結果を図-12，図-13に示しているが，東北自動車道下りでは車間距離4mで約4～8%，車間距離8mで約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。

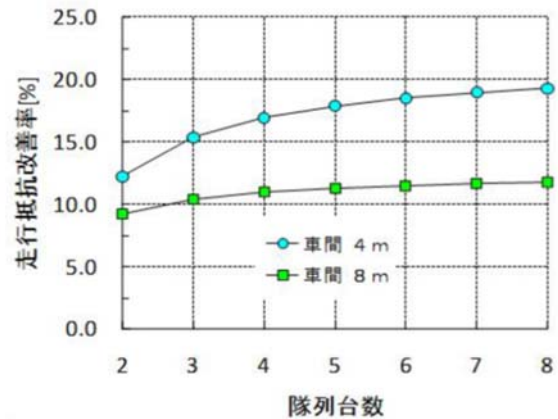


図-11 隊列台数と走行抵抗改善率(出典:青木⁵⁾)

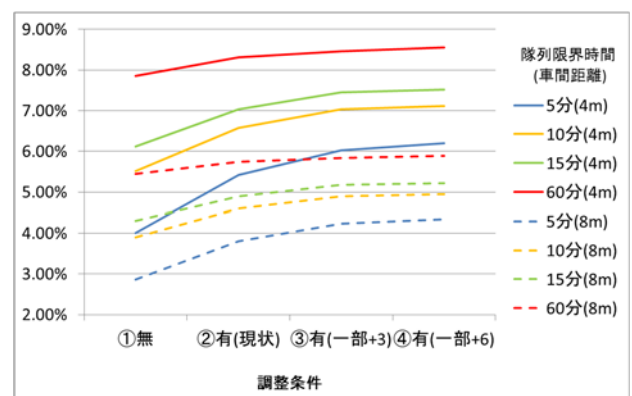


図-12 燃費削減率の変化(東北道上り)

（到着時刻指定条件別：①～④，隊列限界長別：5,10,15,60分，隊列車間別：4,8m）

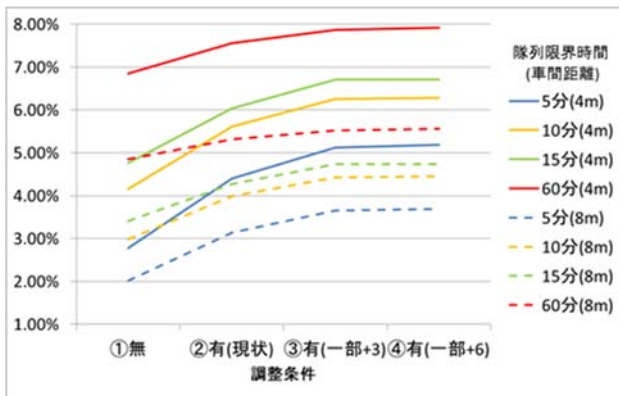


図-13 燃費削減率の変化 (東北道下り)

(到着時刻指定条件別：①～④， 隊列限界長別：5,10,15,60分，
隊列車間別：4,8m)

6. おわりに

本研究では，物流センサスを用いて，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い，隊列走行導入の効果について定量的に把握した．一方で，センサス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，多くの検討

課題も残されており，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スデータの提供を受けた．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) Browand et al. : Platoon Travel Saves Fuel-How Much?, Intellimotion, Volume 9 No.2,2000.
- 3) Kuo et al. : Fuel-Saving Potential of Platooning Evaluated through Sparse Heavy-Duty Vehicle Position Data, IEEE Intelligent vehicles Symposium, June 8-11 2014
- 4) JAFナビ：高速道路案内図
<http://www.jaf.or.jp/member/dguide/exway/index.php>(2017年12月26日閲覧)
- 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)

(2018.7.31)

ANALYSIS OF VEHICLE MATCHING POTENTIAL FOR TRUCK PLATOONING

Syuto ABE, Terumitsu HIRATA, Ikumi TAKEDA