貨客混載サービスの費用対効果に関する実証分析

谷本　圭志[1]・小川　大輝[2]・馮　文浩[3]

[1]正会員　鳥取大学教授　工学部社会システム土木系学科（〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101）
E-mail: tanimoto@tottori-u.ac.jp (Corresponding Author)

[2]非会員　鳥取大学　工学部社会システム土木系学科（〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101）
E-mail: B19T4023C@edu.tottori-u.ac.jp

[3]学生会員　鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101）
E-mail: D20T4106C@edu.tottori-u.ac.jp

中山間地域では利用者の減少に伴って公共交通サービスの持続可能性が継続的に低下すると考えられる．このため，新たな収入を確保するための取り組みとして，旅客の運送と貨物の配達のサービスをあわせて供給する貨客混載サービスの導入を検討している公共交通事業者が見られる．その検討に際しては，先行している事例を参考として貨客混載サービスにどれほどの費用対効果が期待できるのかを概略的に把握することが重要となるが，そのような情報はほとんど得られない．そこで本研究では，実際に貨客混載サービスを実施している地域を対象として，どれほどの費用対効果が期待できるのかについて，車両の運行を再現する数理モデルを用いて明らかにするとともに，効果に及ぼす影響要因について実証的に検討する．

Key Words : *freight and passenger integration, cost-effectiveness, public transportation, rural areas*

1. はじめに

中山間地域における多くの人々は自家用車を利用しており，公共交通は限られた一部の住民を運送する役割を担っている．地域全体での需要は限定的であり，また，人口減少の進行や自家用車の保有者数の増加によってその需要は減少の一途をたどってきた．このため，公共交通事業者はデマンド型や乗り合い制を導入するといったように運行形態を見直すことで費用を抑え，サービスを維持してきた．しかし，利用者の減少は止まることがないため，事業の持続可能性は低いままであり，行政による補助なしには経営が苦しいという事態に直面している．このような背景のもとで，費用を抑えるのみならず，新たな収入源を増やすための取り組みを模索する公共交通事業者が増えている．収入源となりうる事業には様々なサービスが考えられるが，中でも旅客の運送と貨物の配達のサービスをあわせて供給する貨客混載が一つの有力なサービスとして注目されている．すなわち，旅客を運送するついでに貨物の配達を行うことで，運行費用や新規の投資を抑えつつ，配達に関する委託料を新たな収入として期待することができる．

しかし，公共交通事業者が貨客混載サービスの導入を検討する場合，運行形態や貨物の配達エリアの観点からいくつかの代替案を設定し，そのもとで運行をシミュレーションして有効な案を選択することが求められるが，これらには多くの時間と労力が必要となる．このため自らでシミュレーションをするのではなく，先行の事例に基づいて貨客混載サービスにどれほどの費用対効果が期待できるのかを概略的に把握することが重要となる．しかし，そのような情報はほとんど得られないのが現状である．

そこで本研究では，実際に中山間地域で貨客混載サービスを実施している地域を対象として，現状としてどれほどの費用対効果が得られているのか，また，エリアを拡大することでさらにどれほどまで費用対効果の向上が可能かについて，貨客混載サービスのもとでの車両の運行を再現する数理計画モデルを用いて明らかにする．その上で，費用対効果を発揮するためのメカニズムとして規模の経済性と範囲の経済性に着目し，これらの特性について分析する．

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往の研究

貨客混載に関する研究はまだ初期の段階であるものの，近年は増える傾向にある．これまでの研究の全体像は Cavallaro *et al.*[1]によるレビュー論文に詳しいが，主に都市部に関する研究が蓄積された．Cleophas *et al.* [2]は都市部における貨客混載は公共交通の輸送効率の向上，渋滞，環境汚染などの問題の改善などを目的として導入しており，バス，鉄道，タクシーなどの公共交通機関を用いていることが一般である．

路線バスや鉄道を用いた貨客混載を扱った研究として Ghilas *et al.*[3]がある．ここでは，貨物の配達ルートの一部を路線バスなどの公共交通で配達し，最初と最後の 1 マイルの配達を集配用の車両で配達することを仮定しており，この問題を The Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines (PDPTW-SL)問題として定義し，混合整数計画法でモデルを構築した．これにより，貨客混載により貨物の運行コストならびに CO_2 の削減が可能であるとの結果を示している．また，Ghilas *et al.*[4]は貨物の需要量の不確実性を考慮したモデルを構築し，削減できる運行費用を定量的に示した．Masson *et al.*[5]は都市混合運送問題（The mixed urban transportation：MUTP)を定義した上で，この問題を混合整数計画法でモデル化するとともに，従来の貨物配達システムとの比較分析を行っている．Behiri *et al.*[6] は鉄道を用いた貨客混載について，貨物・鉄道・輸送・スケジュール問題（the Freight-Rail-Transport-Scheduling Problem：FRTSP）に焦点を与え，混合整数計画よりモデルを構築した．貨客混載をすることで鉄道ネットワークの構成要素（車両，駅，鉄道路線）に与える影響を分析した．Li *et al.*[7]は旅客と貨物の共同配送のための車両サービス設計問題を取り上げ，貨物は専用の貨物車両かあるいは貨客混載の車両かで配達することを考慮したモデルを構築した．

Li *et al.*[8]はタクシーを用いた貨客混載について，シェアライド問題（The share a ride problem：SARP）として貨客混載を定義し，静的な SARP モデルを混合整数計画法に基づいて開発した．また，動的な SARP モデルを開発し，静的な SARP モデルに比べて性能がほぼ同じであり，動的な SARP モデルは静的な SARP モデルで代替できることを示した．Li *et al.*[9]は上記のモデルを拡張し，配送時間や配送場所に関連する不確実性を取り入れたモデルを提案した．Nguyen *et al.*[10]は配送の合間は駐車場で待機することも考慮したモデルを構築した上で，タクシー事業者の運行データを用いて，貨客混載は利益，運行距離，利用台数の面で優位であることを実証的に示した．その他，Do *et al.*[11]，Ronald *et al.*[12]，Linares *et al.*[13]などもタクシーによる貨客混載を検討している．Schlenther *et al.*[14]はバス，鉄道やタクシー以外にも，自動運転車を用いた貨客混載の研究を行っている．

都市部を対象とした研究に対して，山間地域を対象とした研究は少ないものの，いくつかの蓄積はある．Qu *et al.*[15]は農村部と都市地域を結ぶ交通機関に着目し，バスで貨客混載をする仕組みを概説している．Van Duin *et al.*[16]は，オランダで実施した Cargo Hitching プロジェクトを紹介している．このプロジェクトでは，CO_2 削減による環境的な利益の獲得と雇用の促進などの効果があることを示している．また，データ分析のアプローチで貨客混載の実行可能性や貨客混載の効果を評価する研究もある．例えば，Mazzarino *et al.*[17]は貨物の配達の需要量と旅客に関する余剰運送量を比較し，公共交通による貨客混載の実行可能性を評価した．Bruzzone *et al.*[18]は旅客と貨物の配送を統合した前後のデータを用いて，車両の運用，環境，社会的な側面から統合の効果を評価した．

わが国においても，土屋ら [19]は貨客混載に限らずタクシー事業者が本業の傍らに集落を巡回して何らかの生活支援サービスを行うことを想定して，本職に付随した生活支援サービスがどの程度供給可能であるのかを簡単に分析するための方法論を構築した．白石ら [20]は過疎地域における自家用有償旅客配送の村営バスに宅配，郵便事業者 3 社の共同集配を導入し，人流・物流サービスの統合化を目指す地域での実証運行を通じ，その実現にあたっての制度的・運用面での課題を網羅的に調査し，その解決策を検討した．吉武ら [21]は過疎地域において自家用有償旅客配送による貨客混載の実現によるバスの運行維持に加え，地域組織が集落拠点を活用して末端輸送を集約的に担う複合輸送システムによって持続可能な物流・人流サービスの構築の実現可能性を検討した．谷本ら [22]や Feng and Tanimoto[23]タクシー事業者が貨客混載システムの導入を検討している地域において，導入によって車両の運行がどのように変わるのか，また，その結果として利益がどの程度変わるのかを分析するための基礎的な手法を整数計画法により構築している．

以上より，貨客混載サービスの運行に関するモデルの構築，サービスの実現可能性や現状の問題点に焦点を当てた研究はあるが，実際に貨客混載サービスを導入している事例を対象として，その効果を実証的に検証した研究は見当たらない．

(2) 分析の対象とする地域とサービスの概要

鳥取県大山町を対象とする．大山町は鳥取県の西部に位置する面積 189.93 ㎢の町である．令和 4 年 12 月 1 日現在，世帯数が 5,650 世帯，人口が 15,364 人，高齢化率は 40.3%である．

2012 年 3 月 31 日に廃止された路線バスと巡回バスに代わって，同年 4 月 1 日より予約制（デマンド方式）の

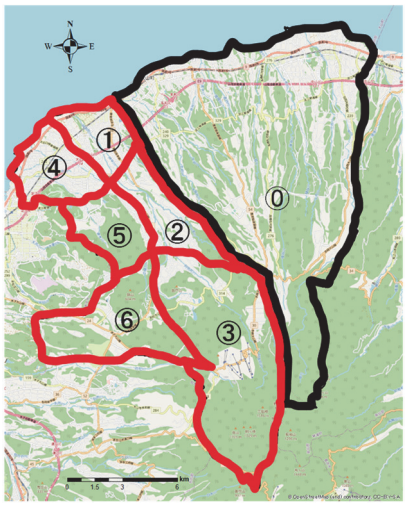


図-1　大山町のエリア分け

乗り合いタクシーである「スマイル大山号」が運行している．スマイル大山号は，町内のすべての集落に設置された乗降場所から，町が定めた目的地までの往復や目的地間の移動に利用でき，目的地には医療機関，商店，金融機関，役場，駅などが設定されている．運賃は，町内を 4 つのゾーンに分け，ゾーン内の移動は片道 500 円，区間をまたぐ場合は別途料金が加算されるシステムを基本としており，利用に当たっては出発の 1 時間前までに予約が必要である．

また，2020 年 11 月 24 日よりスマイル大山号による貨客混載が導入された．貨客混載が導入された背景は，自動車運送業の担い手不足とマイカーの普及や人口減少等に伴う旅客の運送需要の減少により，人流および物流サービスの維持が重要な課題となっていたため，旅客または貨物の運用に特化してきた従来の輸送のあり方を転換する必要があったためである．実際の運用は，スマイル大山号の荷室に宅配業者の貨物を積み込み，旅客事業を行わない時間帯等などに貨物の配達を行っている．

(3)　実証分析の考え方

実証分析では，タクシー事業者が貨客混載を導入することによってどのような条件で費用対効果が高まるのかを検証する．大山町では一部の地域を対象として貨客混載を導入している．そこで，現在貨客混載が導入されている地域（この地域を「現エリア」と呼ぶ．**図-1** の⓪のエリア）のみならず貨物を配達していないエリア（**図-1** に示す①～⑥のエリア）を現エリアに追加し，貨物量やエリアという条件を変化させた場合の費用対効果を分析する．

その際，新たにエリアを追加した場合に貨客混載サービスを担う車両がどのように運行するのか再現が必要となるため，そのための数理計画モデルを用いる．このモデルによって，条件を変えた運行を再現して得られた結果から費用対効果やその大きさに影響を与える要因を規模の経済性と範囲の経済性の観点から分析する．

3.　貨客混載サービスを再現する数理計画モデル

以下では，Feng and Tanimoto[23]が開発した混合整数計画法に基づく数理計画モデルを用いて，貨客混載における車両の運行を再現する．このモデルは以下の前提に基づいている．

1) 運転手は，車庫がある拠点（以下，「営業所」という）で仕事を開始し，営業所にもどって仕事を終える．
2) 運転手は，営業所において所定の時間帯の中で所定の時間の休憩をとる．
3) 運転手は，所定の勤務時間以内で仕事をする．
4) 旅客の運送や貨物の配達を終えた時点で，その次の運送，配達が決まっていない場合，運転手は営業所に戻って待機する．
5) 物流会社は，運転手の仕事が始まる前に貨物を営業所に持ちこむ．
6) 運転手は，所定の時間帯の中で貨物を配達する．配達した貨物は必ず受け取ってもらえる．
7) 旅客の運送は旅客が希望する時刻通りに運送する．希望とは異なる時刻に変更することはない．このため，貨物は旅客の運送の合間に配達される．
8) 旅客の乗り合いはない．
9) 旅客を運送している最中に貨物を同時に運送することはあるが，届け先に貨物を受け渡すことはない．
10) 旅客の配車の予約は，希望する出発時刻の一定の時間前に行う（以下では 1 時間前とする）．
11) 運転手は，旅客と貨物の運送，配達を断らない．
12) 同一の集落に複数の貨物を配達する場合は，それらをまとめて配達する．
13) タクシーの車両は小型であるため小型の貨物のみを扱うことになる，中山間地域では貨物の数が少ないとの理由から車両における貨物の収容能力は考慮しない．
14) 事業者は走行時間が最小となるように車両を運用する．ただし，収入は車両の運用と関係がなく，また，走行時間は走行距離，走行距離は燃料費と比例関係にあり，人件費は固定費であることから，この仮定は利益の最大化と同じである．

4.　実証分析

4.1　分析データ

(1)　用いるデータ

旅客については，スマイル大山号の運行履歴データを

用いる．運行履歴データには「日付」，「乗車時刻」，「乗降車地」が記録されている．以下では，2022年10月4日～10月9日の1週間（ただし，日曜は運休のため除外）を分析の対象期間とし，この期間における6日間分のデータを用いる．

貨物については，スマイル大山号で配達した貨物輸送のデータを用いる．このデータには，「日付」，「配達先の集落」，「貨物の配達量」などが記録されている．以下では，旅客のデータと同様の期間のデータを用いる．

(2) 貨客混載サービスにおける運送・配達の時間帯

対象期間における，1 時間ごとの旅客の運送量と貨物の配達量の平均値を**図-2** に示す．この図より，旅客の運送は多くとも 1 時間当たりに 5 人程度であること，貨物の配達については 11～14 時台に集中していることが分かる．

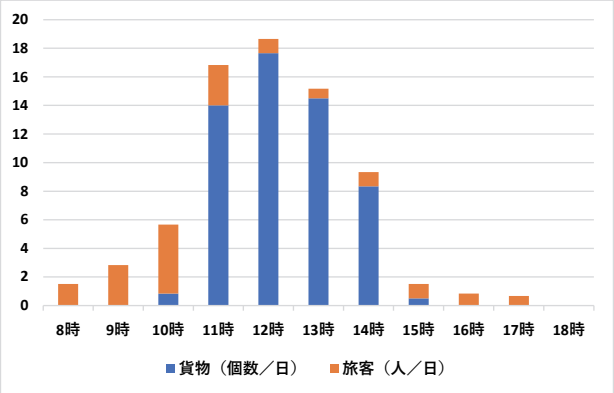


図-2 1時間ごとの旅客の運送量と貨物の配達量

表-1 各エリアにおける貨物の配達量

日付	エリア						
	⓪	①	②	③	④	⑤	⑥
10/4	43	18	4	5	24	10	6
10/5	69	19	2	6	26	7	12
10/6	97	15	3	5	20	4	7
10/7	75	23	3	5	30	12	6
10/8	57	23	3	7	25	13	6
10/9	81	15	4	5	27	6	7

4.2 分析の準備

現在，貨客混載における旅客の運送が大山町全域で行われているのに対して，貨物の配達は大山町の一部の地域となっている．**図-2** に示すように，夕方近くにより多くの貨物を配達できる余地があると考えられるため，配達のエリアを拡大することで現状より費用対効果を高められる可能性がある．

そこで，**図-1** に示す現エリア⓪に加えて①～⑥のエリアを部分的に配達先に組み込んだ場合の費用対効果を分析する．①～⑥への配達量については，現エリアに関するデータに基づいて与える．具体的には，現エリアに関する人口一人当たりの配達量ならびに事業所一つ当たりの配達量を求め，これらを①～⑥のエリアの人口や事業所数に乗じて平均的な配達量を求める．その上で，この平均をもつポアソン乱数を用いて計算の対象となっている日の配達量を算出する．現エリアとそれ以外のエリアへの貨物量を**表-1** に示す．配達先の単位を集落とし，個々の集落は 1 つの地点で代表する．この地点で旅客の乗降，貨物の受け渡しが行われると仮定する．代表的な地点は集落の中心座標とし，集落間の距離，時間は道路ネットワーク上での最短距離を ArcGIS によって算出された値を用いる．

貨物の配達の時間帯は 8～21 時とする．貨物の受け渡しに要する時間を 1 つの貨物当たり 2 分と設定する．昼休憩は11～14時の間に1時間とるものとする．運転手の勤務時間は 9 時間以内とする．運転手の人数は現在と同様の 5 人とし，運転手の一日当たりの人件費は一定であると考える．中国運輸局より，運転手一人当たりの人件費を 6,769（円／日）とする．また，時間当たりの燃料費θ_1は 480（円／時間）とする．

4.3 費用対効果の算出方法

費用対効果は収益と費用の差，すなわち，利益に着目する．収益は旅客の運賃収入と貨物の収入の合計である．旅客の収入はスマイル大山号の運行履歴データより直ちに知ることができ，以下では対象期間における任意の日pにおける運賃収入を$E_1(p)$で表す．貨物の収入についても貨物の配達のデータより直ちに知ることができ，貨物一個当たりの売り上げ単価をw，任意の日pにおける貨物の配達量を$E_2(p)$で表すと，$wE_2(p)$で表される．したがって，収入は$E_1(p)+wE_2(p)$で求めることができる．なお，貨客混載を導入する前の収入は$E_1(p)$のみである．

費用は，前章のモデルによりそれぞれの日ごとに走行時間が導出されるため，任意の日の走行時間を$C(p)$，走行時間当たりの燃料費をλとすると，燃料費は$\lambda C(p)$で求めることができる．これに人件費$\beta(p)$を加えたものが費用となる．以上より，利益πは以下のように表される．

$$\pi = \{E_1(p) + wE_2(p)\} - \{\lambda C(p) + \beta(p)\} \qquad (1)$$

4.4 計算結果

対象期間におけるそれぞれの日に関して，貨客混載の導入前，現エリア，エリアを追加した場合における一日当たりの収入，費用を算出した．その上で，これらの結果を対象期間に関して平均をとった．その結果を**図-3, 4** に示す．

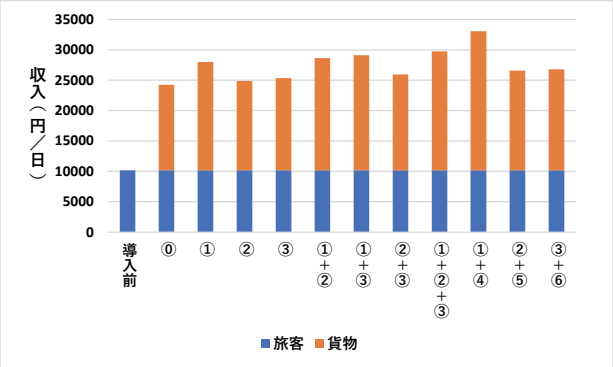


図-3　一日当たりの収入

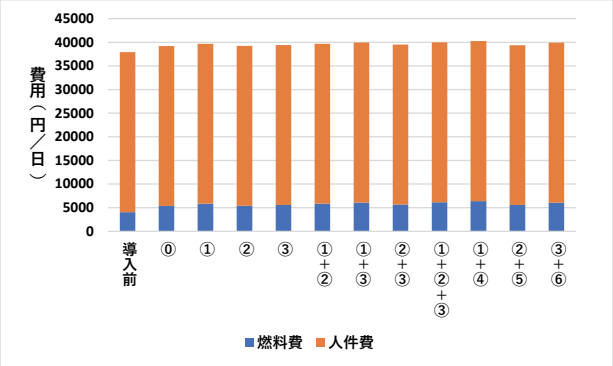


図-4　一日当たりの費用

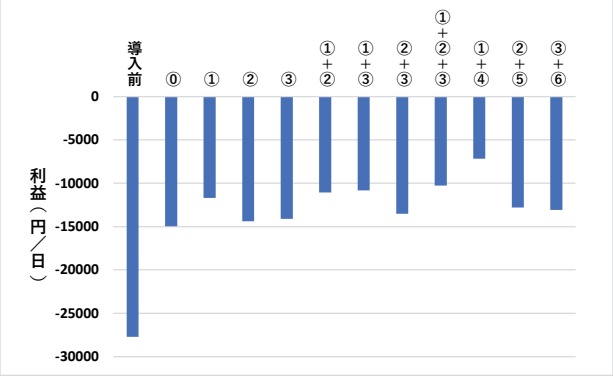


図-5　一日当たりの利益

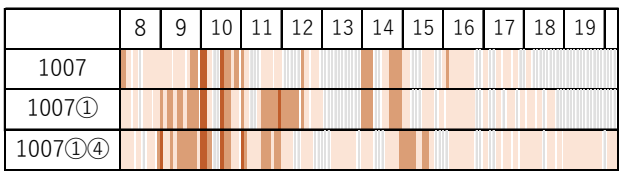


図-6　作業に従事している運転手の人数
（薄い色：1 人，濃い色：3 人，その中間：2 人）

これらの結果に基づいて利益を算出する．その結果を図-5 に示す．これにより，すべてのパターンにおいて利益は赤字であり，行政からの補助が必要ではあるが，貨客混載を行うことで赤字が改善されることが分かる．特に，配達量の多い①と④を追加した場合に，黒字に最も近くなっている．また，ある 1 日において現エリア，①，①④の 3 つのパターンのもとで作業に従事している運転手の人数を図-6 に示す．ただし，回送中の運転手は人数のカウントに含めていない．これにより利益が増えるエリアを追加すると運転手の遊休時間が減少していることが分かる．

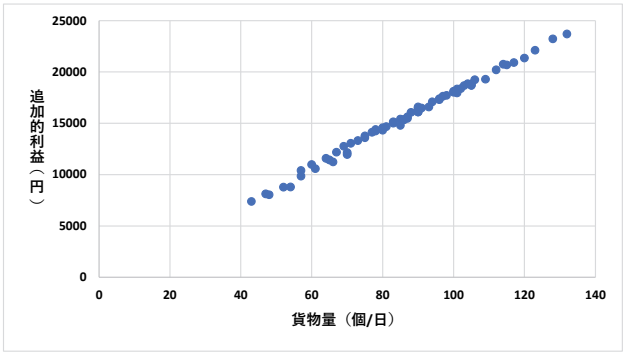


図-7　貨物量と追加的利益

次いで，貨客混載の導入前と比べて利益がどれほど増えたかについて検討する．すなわち，貨客混載の導入後の利益と導入前の利益の差（以後，これを「追加的利益」と呼ぶ）に着目する．ただし，貨客混載の導入前後の費用からは人件費を除いて追加的利益を算出する．貨物量と追加的利益の関係を図-7 に示す．この図より，貨物量が増えると追加的利益も増えることが分かる．

先述のように，運転手一人当たりの人件費は 6,769（円／日）であることから，貨客混載を導入し，貨物の配達量が 50（個／日）ほどあれば，新規に 1 人の運転手を雇用できるだけの追加的利益が得られることが分かる．また，表-1 より現在では平均で 70（個／日）の配達量があり，図-7 より平均的な追加的利益は 13,000（円／日）ほどである．ここで，配達エリアを拡大して配達量が 110（個／日）ほど確保すれば追加的利益は 20,000（円／日）ほどとなって利益が 7,000（円／日）増えることから，新規に 1 人の運転手を雇用しても現在と同等の利益を確保することができる．

今回の計算において，運転手の不足は生じなかったが，エリアが拡大して貨物量が増え，運転手が不足する場合には追加的利益から新規に運転手を雇用しても利益が見込めるか判断できる．よって，基本的にはエリアを拡大して配達量を増やすことで費用対効果の改善が期待できる．ただし，エリアには配達量が少ないエリアもあれば遠方であるエリアもある．そこで次節では，費用対効果の改善の要因を明らかにする．

4.5　費用対効果の改善の要因

利益は収入と費用から算出されることから，貨物量が増えることで利益が増える要因は収入と費用の 2 点が考

表-2　回帰分析の結果（規模の経済性）

説明変数	回帰係数 (t 値)
貨物の配達量	−1.01 (−20.713)**
平均時間	0.41 (2.930)**
旅客数	0.44 (7.304)**
切片	8.15 (23.380)**
重決定係数	0.925

注）**p<0.01 *p<0.05

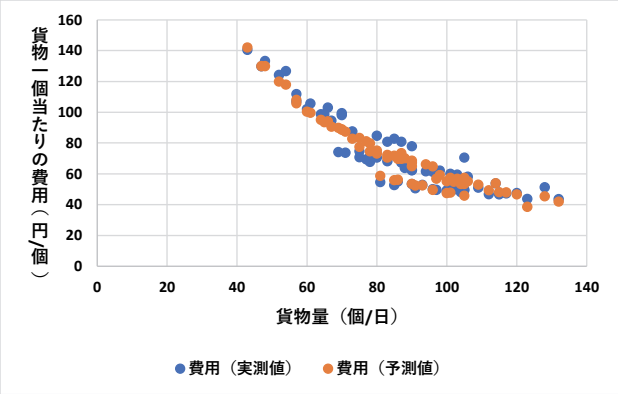


図-8　貨物量と実測値，予測値との関係の比較

えられる．収入については，貨物量が増えることで収入が増えることは自明である．そこで以下では，費用に着目して検討する．費用については貨物量が増えることで基本的には費用も増えるが，その増え方について着目する．具体的には，貨物一個当たりの費用を被説明変数，貨物の配達量を説明変数として回帰分析を行う．その際，今回はどの計算においても人件費が一定の額であるため，燃料費のみに着目する．

貨物の配達量のみが費用に影響を及ぼすわけではないため，以下の二つの説明変数を加えて分析する．一つ目は，旅客の運送先や貨物の配達先がどれほど遠方に位置しているのかを表す変数である．具体的には，旅客の乗降地点（つまり，乗車と降車の 2 点）ならびに貨物の配達先は必ず立ち寄らなければならない地点であることから，事業者の営業所からこれらとの間の所要時間を求めて平均した値（以下では，「平均時間」と言う）を用いる．この値が大きいほど遠方への運送，配達があることを意味することから，平均時間が大きいほど費用には悪い影響が生じると考えられる．二つ目が，旅客の多さである．旅客が多いと走行時間が増えるため平均時間と同様に旅客が多くなるほど費用に悪い影響が生じると考えられる．

回帰分析の結果を**表-2** に示す．なお，回帰分析は両対数モデルとした．決定係数が 0.925 と高く，すべての説明変数は 1%の水準でいずれも有意である．貨物の配達量との実測値と予測値を**図-8** に示す．この図より，予測値は実測値を十分に再現できていることが分かる．

表-3　回帰分析の結果（範囲の経済性）

説明変数	回帰係数 (t 値)
貨物の配達量	0.001 (0.077)
平均時間	0.225 (8.024)**
旅客数	−0.041 (−3.469)**
切片	0.606 (8.719)**
重決定係数	0.637

注）**p<0.01 *p<0.05

回帰分析の結果より，貨物の配達量に関する係数の符号は負である．したがって，貨物の配達量が多いほど，貨物一個当たりの費用は小さくなる．すなわち，規模の経済が働いている．このことは**図-8** からも確認できる．平均時間に関する係数の符号は正であり，配送や配達が遠方であるほど貨物一個当たりの費用は大きくなることが確認できる．これについては上述の仮説の通りであり，自然な結果である．一方，旅客数に関する係数の符号は正であり，旅客が多いほど貨物一個当たりの費用は大きい．これは，旅客数が多いほど費用は大きくなるという自明の結果である．以上をまとめると，費用の観点で見た費用対効果の改善の要因は貨物の配達量が増えることにあるが，その改善の度合いは遠方への配送や配達が増える，また，旅客が多いと小さくなることが明らかとなった．

4.6　範囲の経済性

費用について範囲の経済性の観点から分析を行う．旅客運送のみに要する費用を$C_1(p)$，貨物の配達のみに要する費用を$C_2(p)$，貨客混載に要する費用を$C_{12}(p)$とすると，任意の日pにおける範囲の経済性$S(p)$は次式で表される．この値が大きいほど範囲の経済性が成り立っている．

ただし，規模の経済性と同様，費用は燃料費のみに着目する．また，貨物の配達のみに要する費用は，本来は貨物の輸送事業者のデータを用いることになが，そのデータがないため，タクシー事業者のデータを用いた．

$$S(p) = \frac{C_1(p)+C_2(p) - C_{12}(p)}{C_{12}(p)} \qquad (2)$$

範囲の経済性を求めた上で，範囲の経済性を被説明変数，貨物量，平均時間，旅客数を説明変数として回帰分析を行った．その結果を**表-3** に示す．なお，回帰分析において説明変数に対数をとった片対数モデルとした．決定係数は 0.637 であり，必ずしも高い値ではないものの，平均時間と旅客数は 1%の水準でいずれも有意であった．

平均時間に関する係数の符号は正であった．すなわち，平均時間が大きいほど範囲の経済性が大きい．これは，平均時間が大きいほど遠方に運送や配達をする状況であ

るが，そこへの往来のついでに近隣の場所への貨物の配達が可能であることに伴って費用が削減できるためと考えられる．一方，旅客に関する符号は負であった．つまり，旅客数の多いほど範囲の経済性は小さい．これは，旅客数が多いと，貨物を配達する上での時空間的な制約が厳しくなることに伴って効率的に貨物を配達できなくなるためと考えられる．

貨客混載は，旅客のついでに貨物を運送できるため効率的と考えられてきたが，その効率性は旅客数が多いことに伴う非効率性と遠方への運送，配達のついでに近隣への配達に寄れることで生じる効率性のバランスで決まるものであり，常に効率的ということではないことが明らかになった．

5. おわりに

本研究では，中山間地域を対象として，貨客混載の導入によって利益がどれほど増加するか，導入エリアを広げることによって，どのような条件で利益が増加するのかを把握するために実際に貨客混載を導入している地域の運行データを基に数理計画モデルを用いて分析を行った．具体的には，混合整数計画法を用いたモデルを構築し，そのモデルによってタクシーによる旅客の運送と貨物の配達を再現するとともに，その結果に基づいて，利益の観点で費用対効果がどれほど実現できるのかを明らかにした．その結果，貨物の配送による収入が旅客からのそれを上回り，事業性の改善に大きく貢献しうることが判明した．また，規模の経済性と範囲の経済性の視点より，どのような条件で利益が向上するのかを実証的に明らかにした．

貨客混載を導入してもうまくいかない地域があるとも聞く．今回の対象事例は，貨物の配送によって多くの収入を得ており，比較的条件がよい地域である可能性がある．今後は，地域の特性，旅客や運転手の人数などが異なる地域を対象として同様の検討をするとともに，その結果を比較することで，貨客混載の費用対効果が高くなる条件を特定する必要がある．

謝辞：本研究はJSPS科研費20H02276, 23H00197の助成を受けた．付して謝辞と致します．

参考文献

1) Cavallaro, F., and Nocera, S.: Integration of passenger and freight transport: A concept-centric literature review, Research in Transportation Business and Management, Vol. 43, 100718, 2021.
2) Cleophas, C., Cottrill, C., Ehmke, J. F., and Tierney, K.: Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice, European Journal of Operational Research, Vol. 273, No. 3, pp. 801-816, 2019.
3) Ghilas, V., Demir, E., and Van Woensel, T.: An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines, Computers and Operations Research, Vol. 72, pp. 12-30, 2016.
4) Ghilas, V., Demir, E., and Woensel, T. Van.: A scenario-based planning for the pickup and delivery problem with time windows, scheduled lines and stochastic demands, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 91, pp. 34-51, 2016.
5) Masson, R., Trentini, A., Lehuédé, F., Malhéné, N., Péton, O., and Tlahig, H.: Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods, EURO Journal on Transportation and Logistics, Vol. 6, No. 1, pp. 81-109, 2017.
6) Behiri, W., Belmokhtar-Berraf, S., and Chu, C.: Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 115, pp. 227-245, 2018.
7) Li, Z., Shalaby, A., Roorda, M. J., and Mao, B.: Urban rail service design for collaborative passenger and freight transport, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 147, 102205, 2021.
8) Li, B., Krushinsky, D., Reijers, H. A., and Van Woensel, T.: The Share-A-Ride Problem: People and parcels sharing taxis, European Journal of Operational Research, Vol. 238, No. 1, pp. 31-40, 2014.
9) Li, B., Krushinsky, D., Van Woensel, T., and Reijers, H. A.: The Share-a-Ride problem with stochastic travel times and stochastic delivery locations, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 67, pp. 95-108, 2016.
10) Nguyen, N. Q., Tuan, K. L. E., Nghiem, N. V. D., Nguyen, M. S., Thuan, P. D. O., and Mukai, N.: People and parcels sharing a taxi for Tokyo city, ACM International Conference Proceeding Series, 03-04-December-2015, pp. 90-97, 2015.
11) Do, P., Nghiem, N., Nguyen, N., and Nguyen, D.: A practical dynamic share-a-ride problem with speed windows for Tokyo city, 2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering, pp. 55-60, 2016.
12) Ronald, N., Yang, J., and Thompson, R. G.: Exploring Co-Modality Using On-Demand Transport Systems, Transportation Research Procedia, Vol. 12, pp. 203-212, 2016.
13) Linares, P, M., Montero, L., Barceló, J., and Carmona, C.: A simulation framework for real-time assessment of dynamic ride sharing demand responsive transportation models, 2016 Winter Simulation Conference, pp. 2216-2227, 2016.
14) Schlenther, T., Martins-Turner, K., Bischoff, J. F., and Nagel, K.: Potential of Private Autonomous Vehicles for Parcel Delivery, Transportation Research Record, Vol. 2674, No. 11, pp. 520-531, 2020.
15) Qu, X., Wang, S., and Niemeier, D.: On the urban-rural bus transit system with passenger-freight mixed flow, Communications in Transportation Research, Vol. 2,

100054, 2022.
16) Van Duin, R., Wiegmans, B., Tavasszy, L., Hendriks, B., and He, Y.: Evaluating new participative city logistics concepts: The case of cargo hitching, Transportation Research Procedia, Vol. 39, pp. 565-575, 2019.
17) Mazzarino, M., and Rubini, L.: Smart urban planning: Evaluating urban logistics performance of innovative solutions and sustainable policies in the Venice Lagoon-The results of a case study, Sustainability, Vol. 11, No. 17, 4580, 2019.
18) Bruzzone, F., Cavallaro, F., and Nocera, S.: The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations, Transport Policy, Vol. 100, pp. 31-48, 2021.
19) 土屋哲，谷本圭志：過疎地域のタクシー事業者による付随的サービスの供給可能性に関する概略分析，交通工学論文集，第3巻，pp. A_280-A_286, 2017.
20) 白石悦二，牧幸洋，吉武哲信：過疎地域における自家用有償旅客運送車両を用いた人流・物流サービス統合化に向けた事業者間調整に関する事例研究，交通工学論文集，第5巻，pp. 11-19, 2019.
21) 吉武哲信，明石千鶴，濱砂亨，白石悦二：過疎地域での自家用有償旅客運送での貨客混載と地域組織による末端集配を組み合わせた共同輸送システムの構築に向けた課題整理-宮崎県西米良村小川地区を対象として-，交通工学論文集，第3巻，pp. A_28-A_36, 2017.
22) 谷本圭志，小澤陽，タクシーを利用した貨客混載システムの導入可能性の評価に関する基礎的手法の構築，都市計画論文集，第54巻，pp. 665-671, 2019.
23) Feng, W. and Tanimoto, K.: Feasibility analysis of freight-passenger integration using taxis in rural areas by a mixed-integer programming model, Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 87, Part A, 101539, 2022.

EMPIRICAL ANALYSIS ON COST-EFFECTIVENESS OF FREIGHT AND PASSENGER INTEGRATION

Keishi TANIMOTO, Daiki OGAWA and Wenhao FENG

In mountainous areas, the sustainability of public transportation services will continue to decline as the number of users decreases in the future. For this reason, an increasing number of public transport operators are considering introduction of the freight-passenger integration services that provide both passenger transport and cargo delivery services in order to earn new revenues. When considering its introduction, it is important to have a general understanding of the cost-effectiveness that can be expected from integrated freight and passenger services by referring to previous cases, but such information is rarely available. In this study, we use a mathematical model that reproduces vehicle operation to clarify how much cost-effectiveness can be expected in areas where freight-passenger integration services are actually being implemented in mountainous areas.