

トラックターミナルの最適バース数 決定法に関する研究

谷口栄一¹・則武通彦²・山田忠史³・泉谷透⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都府京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³正会員 工修 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒606-01 京都府京都市左京区吉田本町)

交通渋滞、大気汚染等の物流問題に対処するための施策の一つとして、高規格幹線道路と一体となったロジスティクスセンターの整備が進められようとしている。本研究は、ロジスティクスセンターが有するトラックターミナルとしての機能に注目し、そのバース数の最適化手法の確立を図るものである。現実稼働しているトラックターミナルでの調査をもとに、待ち行列理論を用いて、トラックターミナルで消費される費用が最小となるような最適バース数決定モデルを構築し、最適バース数に対する諸要因の影響を分析した。さらに、モデルを用いたシミュレーションを行い、トラックターミナルの高機能化がシステム費用と最適バース数に及ぼす影響について、より詳細な検討を加えた。

Key Words : truck terminal, optimum number of berths, queuing theory

1. はじめに

我が国では現在、経済成長が飽和期を迎え、情報化社会が著しく進展し、消費者ニーズの個性化、多様化も進んでいる。そのため、貨物輸送部門にも、ますます高度で多様なサービスが求められ、輸送の小口化・多頻度化を余儀なくされている。このような現象を象徴するのがジャストインタイム輸送(JIT輸送)である。JIT輸送は、消費者が求める高品質のサービスを実現するために、企業の生産部門、販売部門が在庫圧縮を目指した末に、実現されたものである。しかし、その結果、貨物輸送トラックの積載効率は低下し、配送頻度が増加している。さらにJIT輸送では、輸送システムを支援するための施設整備も必要となるため、様々な社会的問題が生じている。都市内における交通渋滞問題、駐車問題、民間企業によるスプロール的な物流施設配置、環境・エネルギー問題等がそれである。これら物流問題を解決するためには、物流拠点の整備を含めた総合的な対策が必要である。

物流拠点の整備については、共同利用できる積み替え拠点の必要性が以前から指摘されており^{1)~3)}、共同物流デポがCO₂削減に効果があることも示され

ている⁴⁾。また、他地域→都市→都市内各地へと移動する物資のフロー特性に合致し、物流機能の整序化・効率化のための各施策と組み合わせた都市計画の一部として、物流拠点を整備するための具体的な方向性についても言及されている^{5)・6)}。

物流拠点と道路ネットワークとの一体的整備が、我が国では既に提案されており⁷⁾、将来的には、都市間及び都市内物流に関する新システムが考えられている^{8)~10)}。そのようなプランの中で、都市間と都市内の輸送システムを有機的に結びつけるのが広域的な物流拠点であり、ロジスティクスセンターがその中核をなす¹¹⁾。ロジスティクスセンターは、調達から販売までの物資の流れを管理する大規模な広域拠点型の物流施設であり、整備した場合にもたらされる社会経済的効果¹²⁾やロジスティクスセンターに属する施設については¹³⁾、これまでに述べられてきている。同時に、ロジスティクスセンターは、トラックターミナルとしての機能も有しており、ロジスティクスセンターの物流拠点としての高度化に伴い、従来のトラックターミナルと比較して、機械化・自動化・情報化・共同化の面で高度化することが予想される。

本研究では、ロジスティクスセンターが現在、整

表-1 調査に関する事項

目的	バースを利用するトラックの到着分布及びサービス時間分布の同定
調査場所	北大阪トラックターミナルA社荷扱場(大阪府茨木市)
日時	平成6年9月6日(24時間)
バース数	路線30バース・集配30バース
調査形態	観測及びヒアリング
調査用紙	連記式
観測項目	到着時刻
	車種
	車両ナンバー
	サービス時間
サービス待ち時間	
ヒアリング項目	出発地・目的地、サービス内容

備検討段階にあることを踏まえ、特にロジスティクスセンターのトラックターミナルとしての機能面に着目し、トラックターミナルの適正なバース数決定法を提示する。そして、トラックターミナルの高機能化と整備すべきバース数との関係について明らかにする。

一般に、トラックターミナルに建設されるべきバース数は取扱貨物量に依存し¹⁴⁾、取扱貨物量は複数のトラックターミナル相互の配置に大きく影響を受ける。すなわち、トラックターミナルの最適な規模と配置は、本来、同時決定されるべきものと考えられる。しかし本研究では、そのうち、対象とするトラックターミナルの取扱貨物量が所与の場合における最適バース数の決定方法に分析の焦点を合わせる。ここで採用される最適化基準はバース費用とトラック費用の和、すなわちトラックターミナルで消費される総費用の最小化である。トラックターミナル内のバース以外の施設の規模については、その整備に要する費用を計算し、最適バース数を求める際に必要となるバース整備費用の中に内部化することで、最適バース数に間接的に反映される。

本研究では、最適バース数を求めるために、まず実際に既存のトラックターミナルで現地調査を行い、トラックの到着分布とサービス時間分布を同定する。得られた分布型をもとに、待ち行列理論を適用して、最適バース数決定モデルを構築する。次に、調査を行ったターミナルにモデルを適用することを試みた後、モデルのパラメータを変化させることによって、トラックターミナルの高機能化が最適バース数に与える影響について分析する。さらに、待ち行列理論に基づくモデルを用いた分析を補完するためにシミュレーションモデルを構築し、トラックターミナルの高機能化と最適バース数との関係についてより詳細な分析を行う。

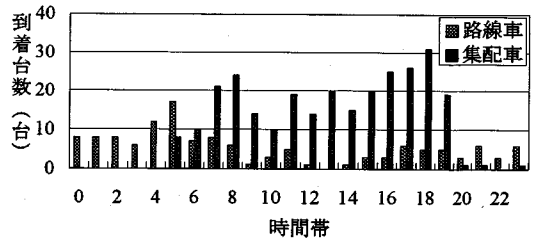


図-1 各時間帯のトラックの到着台数

2. トラックターミナルにおける現地調査

(1) 調査概要

実際にバースを利用するトラックの到着分布とサービス時間分布を同定するためのデータを収集することを目的として、現在稼働している北大阪トラックターミナル内のA社の荷扱場において現地調査を行った。調査に関する事項を、表-1に整理する。ターミナルを利用するトラックは、輸送エリアで分類すれば、路線車と集配車の2種類になる。主に地域間・都市間の貨物輸送を受け持つのが路線車であり、都市内の集配送を行うのが集配車である。

北大阪トラックターミナルのバース数は合計424バースであるが、すべてのバースにおいて調査を行うことは、調査員の人数制約上、困難であった。そのため、A社が利用する集配用、路線用各30バースを対象に調査を実施した。調査形態は、各調査項目を調査員が計測、観測あるいはドライバーにヒアリングした後、連記式の調査用紙に記入する形式で行った。また、事前調査の結果、集配車のサービス時間は路線車と比べて短く、特にピーク時にはトラック相互の荷役活動が錯綜して、観測員の安全が確保できないことが予想されたため、集配車の出発地・目的地に関するヒアリング調査は実施していない。

(2) 主要な調査結果

a) 到着トラックの特性

各時間帯のトラックの到着台数を図-1に示す。集配車の方は、5時1分の到着を初めとして、到着台数は全280台である。到着ピークは、8時台と18時台である。20時以降は、ほとんど到着が見られない。集配車の時間帯別の到着台数は、都市内の貨物需要の時間特性をそのまま反映しているものと考えられる。路線車の場合、到着台数は全131台で集配車の約半分である。集配車のケースとは異なり、13時台を除いては、ほぼ全時間帯にわたってトラックの到着が存在する。午前4時台から5時台にかけての時間帯が、到着のピークである。

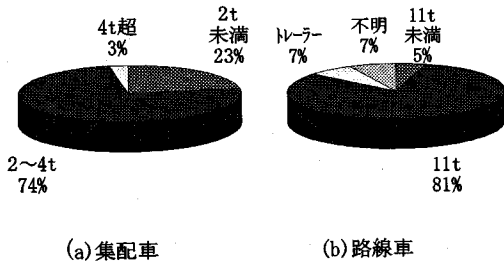


図-2 到着トラックの車種構成

荷役サービスの内容は積み込みと荷卸しの二つに大別できる。集配車の場合、積み込み車両、荷卸し車両とも到着台数はほぼ同数であった。荷受側の貨物需要が午前中あるいは午後の早い時間に集中することを反映し、積み込みは明け方から午前中にかけてと13時前後に集中した。逆に、荷卸しは16時から19時台に集中した。路線車は、1台のトラックが同じ時間帯で荷卸しと積み込みの両方の作業を行ったケースが、多数存在した。そのため、積み込みと荷卸しの車両台数の時間毎の推移が、類似する結果になった。

到着したトラックの車種構成を、集配車、路線車各々、図-2 (a) (b)に示す。集配車は74%が2~4t車で占められている。2t未滿の集配車は、そのほとんどが軽トラックである。路線車の場合、11t車が8割を占める。

A社のバースを利用する路線車は、出発地、目的地ともに近畿、中部地方を中心としている。次いで、関東、九州方面との輸送が多く、北海道を除くすべての地方と物流活動が行われていることが確認できた。ターミナルの勢力圏は北海道を除くすべての地方と考えられるが、その勢力は距離とともに衰える傾向にあることも把握された。集配車については、ターミナル管理者への事前のヒアリング調査により、主に北大阪摂津地方を中心に集配送活動を行っているとの知見が得られた。

到着したトラックの車両ナンバーを照合した結果、特に集配車において、1日に複数回バースに到着し、荷役サービスを受けているトラックが存在した。集配車に関しては、バースへの到着回数が2回と3回の車両が多数観測され、1日に1台あたり平均2.52回の到着となった。到着回数の差異は配送の回数に依存している。路線車は、1台あたり平均1.15回の到着が観測された。

以上のように、集配車と路線車では、その活動特性がかなり異なることがわかった。輸送エリアが異なることが、両者間の差異の主たる原因であると考えられる。そこで以下、路線車と集配車に関して個

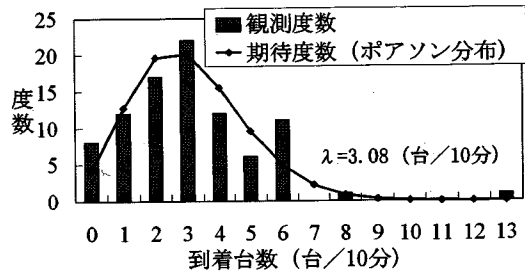


図-3 集配車の到着分布

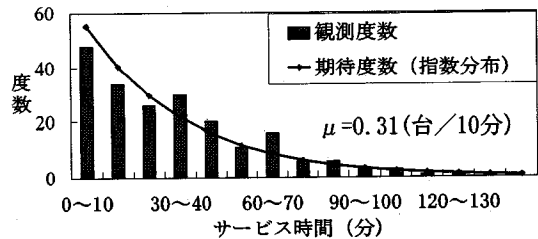


図-4 集配車のサービス時間分布

別に分析を行う。

b) 到着分布及びサービス時間分布の同定

本研究では、トラックターミナルの最適バース数決定モデルを構築する。その際、待ち行列理論を用いる。待ち行列理論の適用にあたっては、トラックの到着分布とサービス時間分布を同定しておく必要がある。

図-1から明らかな通り、集配車の到着台数の99%が5時から20時の間に集中することから、分布型同定対象期間をその時間帯に限定する。図-3、図-4に集配車の到着分布とサービス時間分布を示す。集配車の到着分布に関しては有意水準5%でポアソン分布に適合することが、またサービス時間分布に関しては有意水準5%で指数分布に適合することが確認された。

集配車の場合とは異なり、路線車は調査対象日の全24時間にわたって到着が存在することから、分布型同定対象期間を24時間とする。その結果、図-5、図-6に示すとおり、到着分布は有意水準5%でポアソン分布に適合し、サービス時間分布は有意水準1%で2次アーラン分布に適合することが確認された。

分布型同定に関する結果を表-2にまとめる。到着に関しては、集配車、路線車ともにランダムな到着である。一方、サービス時間については、路線車の方が集配車に比べて、やや規則性が付加されている。

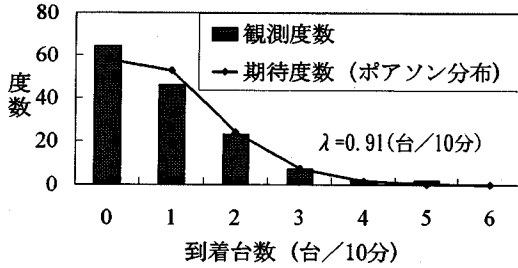


図-5 路線車の到着分布

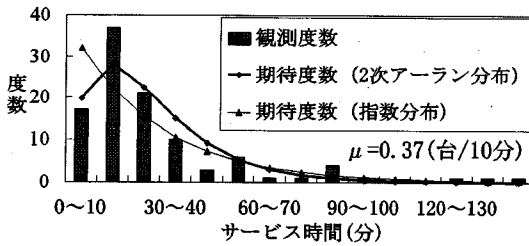


図-6 路線車のサービス時間分布

表-2 トラックの到着とサービスの状況

	集配車	路線車
期間	15時間 (5:00~20:00)	24時間 (0:00~24:00)
到着率	3.08(台/10分)	0.91(台/10分)
サービス率	0.31(台/10分)	0.37(台/10分)
トラフィック密度	9.94	2.46
到着分布	ポアソン分布	ポアソン分布
サービス時間分布	指数分布	2次アーラン分布

注) トラフィック密度=到着率/サービス率

3. 最適バース数決定モデル

(1) モデルの構築

本研究では、港湾の公共埠頭における最適バース数決定手法をもとに^{15)・16)}、トラックバースとの互換性を考慮しながら最適バース数決定モデルを構築する。このモデルは、ある貨物需要量に対して、トラックターミナルで消費される総費用が最小となるようなバース数を決定しようとするものである。

考察対象期間においてトラックターミナルで消費される総費用は、ターミナルに建設・整備されるバースに関する費用と、ターミナルに滞留するトラックに関する費用の和である。そして、それらは稼働時と遊休時の双方で発生するので、次のように表さ

れる。

$$C_s = C_b + C_t = c_b TS + c_t T \bar{n}_s \quad (1)$$

ここに、

C_s : バース数が S の時、期間 T においてトラックターミナルで消費される総費用(円)

C_b : 期間 T における総バース費用(円)

C_t : 期間 T における、トラックターミナルでの総トラック費用(円)

c_b : 1バースの1時間当たり費用(円/時)

c_t : トラック1台の1時間当たり費用(円/時)

\bar{n}_s : バース数が S の時、期間 T におけるトラックターミナル内のトラックの平均滞留台数

T : 考察対象期間。ここでは $T=24$ 時間とする。

式(1)の C_s を最小にするバース数が、最適バース数である。バース費用には、トラックターミナルの建設費、修繕費、管理費、人件費等が含まれる。また、トラック費用には、車両費、燃料費、人件費等が含まれる。パラメータの数を減らすために、式(1)の両辺を $c_t T$ で割れば、

$$r_s = \frac{C_s}{c_t T} = \frac{c_b}{c_t} S + \bar{n}_s = r_b S + \bar{n}_s \quad (2)$$

ここに、

r_s : バース数が S の時、期間 T におけるトラック1台当たりの費用とトラックターミナルで消費される総費用との比率

r_b : バース・トラック費用比率(= c_b / c_t)

となる。 $c_t T$ の値は既知であるので、総費用比率 r_s を最適バース数決定のための評価基準として採用できる。式(2)において、 r_b は別途に費用計算より求められることを考えると、バース数 S を固定すれば、総費用比率 r_s は平均滞留台数 \bar{n}_s の関数となる。

到着分布がポアソン分布、サービス時間分布がアーラン分布の場合 (Kendall の記号で、 $M/E_k/S(\infty)$ の場合)、 \bar{n}_s に Cosmetatos¹⁷⁾ の近似式を用いると、総費用比率 r_s は、

$$r_s = r_b S + \frac{a^{S+1}}{(S-1)!(S-a)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1} \\ \times \left\{ \frac{1+(1/k)}{2} + \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left(1 - \frac{a}{S}\right) (S-1) \right. \\ \left. \times \frac{\sqrt{4+5S-2}}{32a} \right\} + a \quad (3)$$

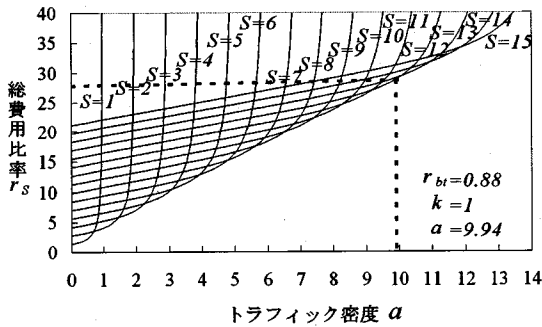


図-7 最適バース数決定曲線 (集配車)

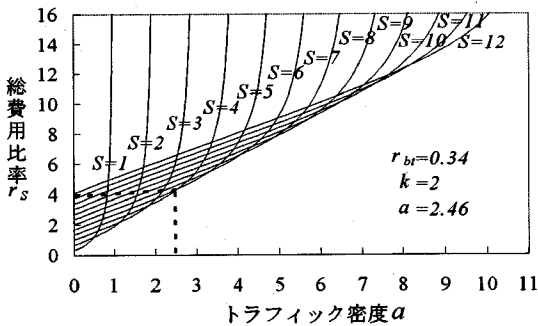


図-8 最適バース数決定曲線 (路線車)

ここに、

a : トラフィック密度

k : サービス時間分布のアーラン次数

となり、バース・トラック費用比率 r_{bt} 、バース数 S およびアーラン次数 k の値が決まると、トラフィック密度 a のみの関数となる。北大阪トラックターミナル内のA社を対象に計算を行った結果、集配車の場合、 $r_{bt}=626(\text{円/時})/712(\text{円/時})=0.88$ 、 $k=1$ 、路線車の場合、 $r_{bt}=626(\text{円/時})/1828(\text{円/時})=0.34$ 、 $k=2$ となり、 r_s と a の間の関係は、 S をパラメータとして各々図-7、図-8のように描かれる。

式(3)においては、計画目標となるトラックターミナルの取扱貨物量が総費用比率 r_s と明示的に関係づけられていない。よって、それらの関係を導くと、

$$a = \lambda / \mu = Q / RT \quad (4)$$

ここに、

λ : トラックの平均到着率(台/10分)

μ : トラックの平均サービス率(台/10分)

Q : 期間 T の間にトラックターミナルで取扱う貨物量(t)

表-3 最適バース数決定モデルの適用結果

	路線車	集配車
バース費用 c_b	626 (円/時)	626 (円/時)
トラック費用 c_t	1828 (円/時)	712 (円/時)
最適バース数	4	12

R : バース1時間当たりの平均荷役率(t/時)

となる。式(4)より a の値が決まれば、図-7ならびに図-8において、その a の値を通る鉛直線を上方向に引き、それと最初に交わる曲線が示す S の値が最適バース数になる。また、その交点の縦軸の値が総費用比率 r_s になる。

(2) 調査対象ターミナルへのモデルの適用

上記のモデルを用いて、調査を行った北大阪トラックターミナルのA社の最適バース数を、路線車と集配車各々について算定した(CASE1)。その結果、表-3に示すように、集配が12バース、路線が4バースとなった。現在、A社のバースは路線車、集配車共に30バースずつであるが、すべてのバースが必ずしも荷役サービスに使用されているわけではなく、時間帯によってはその大部分が路線車の駐車スペースとして使われている。そのことを考慮すれば、算定された最適バース数は妥当な結果であると考えられる。ただし、ここで、現実のバース数と、本論文で定義されている最適バース数との相違について注意しなければならない。すなわち、現実には、トラックターミナルのバース数はプラットホームの規模(縦・横の長さ、面積など)と関連して決定される場合もある。A社の場合は、長方形のプラットホームの長辺部が全てバースとして使用されており、この場合のターミナルの貨物取扱能力は、バース数よりもむしろ、プラットホーム上での荷役処理能力によって制約されている。本研究で最適バース数を決定する際には、このようなプラットホーム上での荷捌き能力を表す変数としてサービス時間の平均値($1/\mu$)とその分布型パラメータ(k)を考慮しているので、上述の計算によって得られた最適バース数とは、ターミナルの荷扱実態とシステム費用の最小化を反映した意味での数値であることに注意する必要がある。

また、 $T=1$ (時間) の場合、すなわち時間帯毎に最適バース数を算定した結果(CASE2)、到着のピーク時には路線車が11バース、集配車が23バース必要になることがわかった。このバース数で一日稼

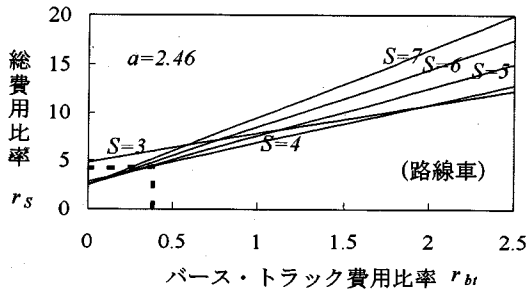


図-9 バス・トラック費用比率と最適バス数との関係

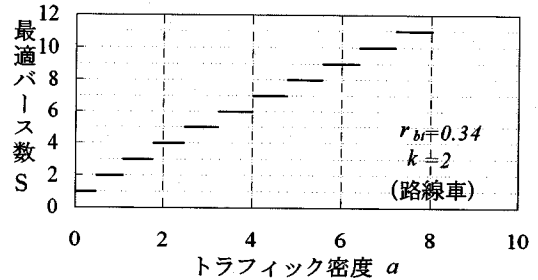


図-10 トラフィック密度と最適バス数との関係

働した場合、トラックターミナルで消費される総費用はCASE1と比べて5割程度増加する。現在のピーク時の物流ニーズを満足させるバス数(CASE2)と、ピーク特性が考慮されておらず、利用台数が平準化されている場合のバス数(CASE1)との隔たりは、現状の物流構造がもたらす不経済性を示唆している。

(3) 最適バス数に対する諸要因の影響

a) バス費用及びトラック費用の変化

表-3に示される費用を算定する際、バス費用に関して、北大阪トラックターミナル建設時のデータを用いた。しかし、将来的にトラックターミナルを整備する場合には、今回用いた費用とはかなり異なった数値になるものと考えられる。よって式(3)において、バス・トラック費用比率 r_{bt} が変化した場合の、最適バス数 S の変動について分析を行う(CASE3)。図-9は、 r_{bt} の変化についてみた最適バス数決定曲線である。これは図-8と同様に、横軸 r_{bt} の値に対して縦距が最小となるような S と r_s を決定するものである。この図より、費用比率の変動がバス数に与える影響はあまり大きくないことがわかる。特に、バス費用が相対的に増加、すなわち r_{bt} の値が増加する場合は、バス数にさほど影響を及ぼさない。図-9において、 r_{bt} が現在の0.34から1.96まで増加しても最適バス数は4のままである。一方、トラック費用が相対的に増加する場合、すなわち r_{bt} が0.34から減少する場合は、最適バス数が r_{bt} の値に対して敏感に反応する傾向がある。

b) 荷役の機械化・自動化がもたらす効果

調査を行ったA社バスの荷役業務では、フォークリフト、ロールボックスの利用はされているものの、大部分がトラックの運転手自らの人力で行われている。今後建設が予想されるロジスティクスセンター等では、荷姿の規格統一とともに、荷役の機械化・自動化が進展することが予想される。そのことが現在のトラックターミナルの機能を向上させる効

果は主として2つ考えられる。第一に荷役時間に規則性が加えられること、第二に荷役速度が向上し、サービス率が上がることである。これらが最適バス数に与える影響については、前者はサービス時間分布のアーラン次数を上げることにより、後者はトラフィック密度を小さくすることにより分析できる。

トラフィック密度の変化に対する最適バス数の変化(CASE4)を図-10に示す。図-10より、サービス率の改善は最適バス数に与える影響が顕著である。一方、サービス時間の規則性向上の影響は非常に小さく、アーラン次数を上げて1バス程度削減されるに止まるということが確認された。実際には、サービスの規則性向上とサービス時間の短縮が同時にもたらされることが予想され、荷役サービスの改善は整備すべきバス数の削減に大きな効果をもたらすものと考えられる。

c) 共同化がもたらす効果

種々の物流問題を解決するうえで、一つの鍵となるのが「共同化」である。ロジスティクスセンターの各機能にも、可能な限りの共同化が施されるべきである。物流部門での共同化に関しては、様々な種類と効果が考えられるが^{18)~25)}、ここでは道路交通問題に直接影響を及ぼす、貨物輸送の共同化について考える。貨物共同輸送システムの導入による効果としては、積載率のアップや輸送コストの削減などが挙げられる。しかし、CASE3にみられるように、輸送コストの削減は、整備すべきバス数にあまり敏感に影響を及ぼさない。よって以下では、貨物輸送共同化による積載率向上が最適バス数に及ぼす影響について分析する(CASE5)。

共同化の形態としては、複数の企業間でバスとトラックの双方を共同利用するものと仮定する。トラックを共同利用すると、積載率が上がって一度に扱う貨物量が多くなり、トラック台数の削減につながる。その結果、到着率とサービス率の双方が変動する。到着率は、トラック台数が削減されることにより減少することが予想される。一方サービス率の

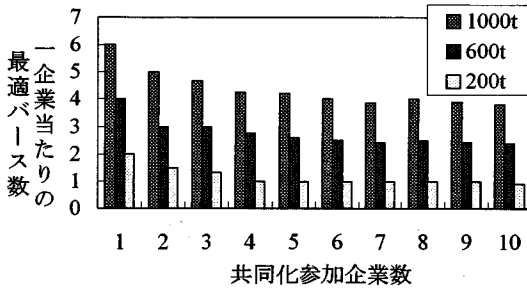


図-1-1 共同化参加企業の規模と共同化の効果

方は、トラック一台あたりの貨物量が増加することから、大きくなることが予想されるが、貨物量の増加とサービス時間の増加との間の関係は明確ではない。よって、貨物量とサービス時間の間には線形の関係が成り立っているものと仮定し、北大阪トラックターミナルにおける調査結果を利用して回帰分析を行った。その結果、貨物量とサービス時間の間には次の関係が成り立つことがわかった。

$$t_s = 4q + 8 \quad (5)$$

ここに、

t_s : サービス時間 (分/台)

q : 取扱貨物量 (t/台)

である。いま、共同化に参加する各企業の一日の総取扱貨物量を既知とする。そして、共同化実施以前のサービス率とバース・トラック費用比率は、共同化参加企業間で等しいものと仮定した状況下で、共同化の効果について分析する。共同化実施後、トラックの到着率は変化し、サービス率も式(5)に従って変化する。しかし、上述の通り、バース・トラック費用比率は最適バース数に与える影響が比較的小さいため、共同化実施前後で変化しないものとする。また、共同化に参加している企業は同業種、同規模(取扱貨物量が等しい)であるとする。さらに、使用するトラックの最大積載量は10tと仮定し、共同化以前の積載率を30%に設定する。共同化に参加する企業数が増加するほど、積載率向上の傾向が顕著になること、並びに積載率向上に関する効果は概ね5%~20%程度であるとの知見から^{26), 27)}、共同化参加企業が1社増える毎に5%ずつ積載率が向上するものと仮定する。以上の仮定のもとに、取扱貨物量が一日あたり1000t, 600t, 200tの各企業について、共同化参加企業数と参加企業1社あたりの最適バース数との関係を図-1-1に示す。図-1-1より、参加企業数が多くなるほど最適バース数は削減される傾向にあるのがわかる。しかし、参加企業数の増

加とともに削減効果は小さくなる。共同化参加企業数が1社と10社の場合について比較すると、取扱貨物量が1000tの企業で2バース、600tの企業で1.5バース、200tの企業で1バース、それぞれ最適バース数が削減されており、取扱貨物量の大きい企業ほどバース数を削減できることが明らかである。また、総費用については、いずれの場合も30%前後の削減効果が得られた。

4. 待ち行列シミュレーションによる最適バース数に関する分析

(1) シミュレーションモデルの概要

式(1)もしくは式(2)に示された、待ち行列理論に基づく最適バース数決定モデルは、バース費用、トラック費用及びトラフィック密度が与えられれば、図-7、図-8に示されるような図を描いて、容易に最適バース数と総費用が求められ、実用的であることが特徴である。しかし、到着分布がポアソン分布でない場合や、時間帯毎の到着率やサービス率の変化を考慮したうえで、一日あたりの最適バース数の算定を行う場合には、シミュレーションに頼らざるを得ない。また、待ち行列シミュレーションを用いれば、トラックターミナルの高機能化が、整備すべきバース数にもたらす効果について、さらなる知見を得ることも可能となる。

シミュレーションモデルでは、到着分布、サービス分布ともに様々な分布型を外生的に与えることが可能である。その分布型をもとに乱数を発生させて、トラック間の到着間隔と各トラックのサービス時間を決定する。シミュレーションモデルでは、式(1)は式(6)のように変形される。

$$C_s = C_b + C_w + C_v = c_b TS + c_v \sum (t_{hi} + t_{wi}) \quad (6)$$

ここに、

C_b : 期間 T における、バースで荷役中のトラックの総費用(円)

C_w : 期間 T における、バース利用待ち中のトラックの総費用(円)

t_{hi} : i 番目に到着したトラックの荷役時間(時)

t_{wi} : i 番目に到着したトラックの待ち時間(時)

式(6)においてバース数 S を順次変化させ、そのときの C_s を計算し、 C_s を最小にする S が最適なバース数となる。シミュレーションモデルを用いれば、システムが平衡条件を満たさない到着ピーク時

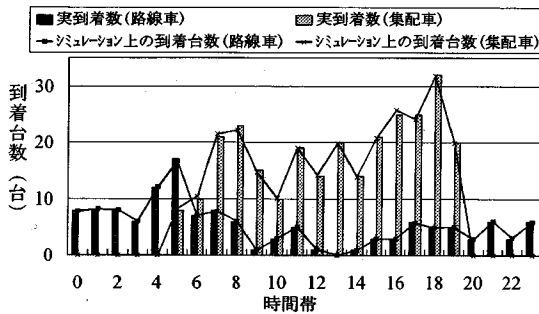


図-1 2 シミュレーションによる到着状況の再現

の待ち行列を考慮することも可能となる。

(2) 時間帯毎の到着率及びサービス率の変化を考慮した場合の最適バース数

JIT輸送に代表される現在の貨物輸送情勢を反映して、ターミナルに到着するトラックの時間特性は、図-1に示す通り、時間帯毎に大きく変動する。よって、実状に合わせて、時間帯毎の到着率とサービス率を考慮した場合の、北大阪トラックターミナル内にあるA社荷扱場の一日あたりの最適バース数を求める(CASE6)。ただし、到着分布とサービス時間分布は各時間帯で同じであると仮定する。

路線車及び集配車の時間帯別の到着台数は、シミュレーション上で図-12に示されるように再現された。この図から、シミュレーションで実際の到着状況を十分再現できていることが確認できる。

バース数 S を順次変化させた場合の一日あたりの総費用 C_s の変化を、路線車について図-13に、集配車について図-14に示す。総費用を最小にするバース数が最適であるから、最適バース数は、路線車が6バース、集配車が13バースとなる。時間帯毎の到着率及びサービス率の変化を考慮して、最適バース数を算定した場合、最適バース数はCASE1の結果と比べて、路線車が2バース、集配車が1バース増加する結果になった。実際、ピーク時間帯では、システムの平衡条件を満たさない到着状況が発生しており、それによる待ち行列の解消のためにバース数が増加したものと考えられる。

(3) 情報システムによる到着制御がもたらす効果

図-3、図-5より、現状のトラックターミナルでのトラックの到着はポアソン分布に従い、よってトラックはランダムに到着することがわかる。しかし将来的には、EDI(Electronic Data Interchange)、道路地図データベース、位置評定システム、双方向通信システム等を利用して、貨物輸送トラック、荷主、

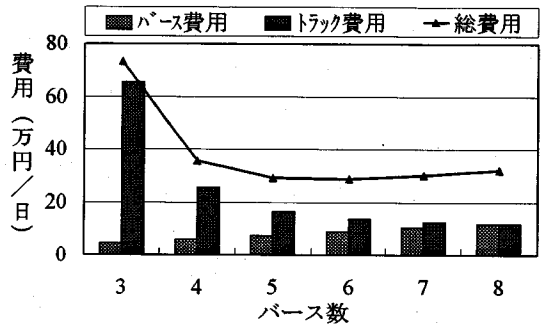


図-1 3 バース数と費用との関係(路線車)

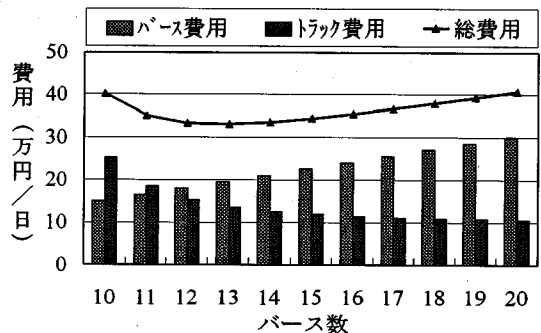


図-1 4 バース数と費用との関係(集配車)

物流業者、トラックターミナル間をオンライン化することによって、トラックの到着時刻が、ある程度制御可能になる状況が予想される。

最も効率的なバース利用状態は、トラックのバース利用待ちがまったく無く、かつバースの遊休時間が最小になるバース数のもとで実現する(CASE7)。このようないわば理想状態は、バースの空き時刻をトラックに知らせ、その時刻にトラックが確実に到着することができれば達成可能になる。こうしたケースを想定して、サービスが終了すれば順次トラックが到着するという条件下でシミュレーションを行った結果、最適バース数は路線車が3、集配車が11となり、確かにバース数は削減される。

このような状態は一見、トラックターミナル内あるいは近辺の駐車用スペースにトラックをあらかじめ待機させ、無線等の通信システムを使って順次バースに誘導するという方式で、実現できるように思える。しかし、それではバースが空くの待つ場所が変わっただけに過ぎず、結局バース利用待ちの状態と同じである。一日にトラックターミナルに到着するトラックの台数、各トラックの積載貨物量ならびに正確な荷役時間を把握することによって、指定到着時刻を配送ルートなどとともにトラックに対して出発前情報として与え、加えて、走行途中でのリ

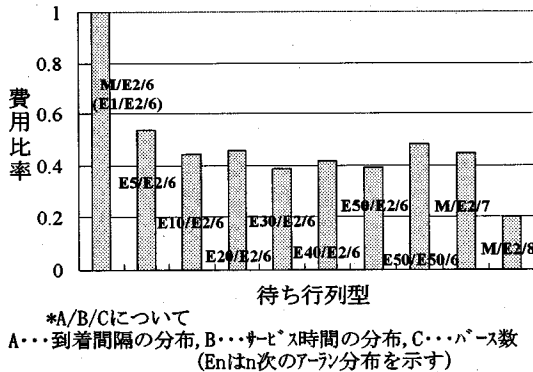


図-15 待ち行列型と費用との関係 (路線車)

アルタイムの経路情報が的確に知らされれば、このような理想状態が実現可能になると考えられる。

次に、トラックの到着間隔が可能な限り均等になるように、情報提供されたケースについて考える。この状態は、理想状態であるCASE7と比較して、各トラックの荷役時間を把握しなくて済むだけ、実現可能性が高いと思われる。ここでは、到着間隔の分布をアーラン分布とし、アーラン次数を高次にしてシミュレーションを行い、その効果について検討する (CASE8)。

路線車を対象にシミュレーションを行った結果、到着間隔分布のアーラン次数を50次まで増加させても、最適バス数はCASE6と同じ6バスのままであった。バス数、到着トラックの台数及び時間帯毎のサービス率が同じであれば、総費用 C_s はバス利用待ち費用 C_w に大きく依存する。よって、 C_w を用いて、到着間隔制御の効果について検討する。図-15では、CASE6、すなわち待ち行列型がM/E₂/6の場合の C_w の値を1として、到着間隔に規則性が加わった7通りの場合の C_w の大きさを比較している。同時に、CASE6と同条件でバス数を増やした場合の C_w の大きさも図示している。図-15より、到着間隔分布のアーラン次数が1次から5次に変化しただけでも、 C_w が5割程度に減少していることがわかる。その効果は、バス数を1つ増やした場合とほぼ等価な程、大きなものである。到着間隔分布のアーラン次数については、5次以上になってもさほど効果が大きくないことがわかる。トラックの到着時刻とそれ以前に到着した車両のサービス終了時刻がうまく合致しなければ、到着間隔に厳密な規則性を付加する必要はさして無いものと考えられる。特に路線車に関しては、出発地が遠方である場合が多いので、到着間隔を遵守するのは困難であるが、

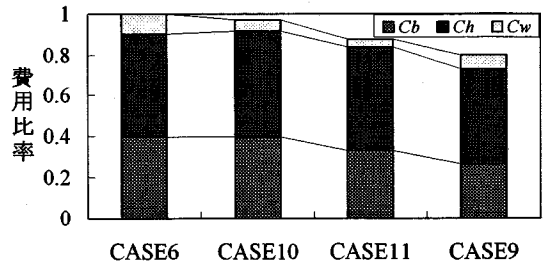


図-16 到着時刻制約の各ケースと費用との関係

CASE6・・・時間帯毎の到着率とサービス率を考慮した場合
CASE10・・・ピーク時の到着台数を平準化した場合
CASE11・・・CASE10で到着間隔を規則的にした場合
CASE9・・・全時間帯で到着台数を平準化した場合

厳密な到着間隔制御を行う必要はなく、若干でも到着間隔に規則性が加われば、バスの利用待ちをしているトラックに生じる費用の抑制に多大な効果がある。

(4) 到着時刻制約を緩和することによる効果

北大阪トラックターミナルで行った現地調査24時間での、平均到着率 (台/10分) と平均サービス率 (台/10分) を用いてシミュレーションを行った結果 (CASE9)、最適バス数は路線車、集配車各々4バス、12バスとなった。これは、CASE1の算定値と一致する。時間帯毎の到着台数が平準化されれば、バス数が削減されることがわかる。

現実問題として、到着率が24時間で一定な状態を実現することはかなり難しいと思われる。そこで到着ピーク時間帯のみに着目して、到着台数を平準化することによるバス数削減効果を、路線車に関して分析する。図-16は各CASEにおいて、ロジスティクスセンターで発生する総費用とその内訳を表す。ただし、CASE6の総費用を1とする。CASE10は、遠方からの到着台数が多い22時～9時と遠方への出発便の多い17時から22時について、各時間セグメント内で到着台数を平準化した場合に相当する。CASE11はCASE10の操作に加え、到着間隔が規則的になった場合、すなわち到着間隔分布が50次のアーラン分布の場合である。

CASE6とCASE10では最適バス数が6となったが、CASE11では5バスになり、CASE9は上述の通り4バスである。よって、図-16に示されているように、CASE9とCASE11のバス費用 C_b は、CASE6とCASE10のもの比べて小さくなり、総費用も削減されている。ピーク時の到着台数を平準化したCASE10

では、平準化を施さないCASE6と比べて、バース利用待ちの費用 C_w が削減されている。さらに、全時間帯で到着台数を平準化した場合に相当するCASE9では、総費用が現状の場合のCASE6に比べて8割程度に減少している。

JIT輸送による配送時刻の制約は、トラックターミナルへのトラックの到着ピーク現象を生じさせ、トラックターミナルで発生する総費用を増加させる原因になっていることが明らかである。

5. 結論

本研究では、トラックターミナルの最適バース数決定モデルを構築し、今後のトラックターミナルの高機能化と最適なバース数との関係について種々の分析を行った。分析を通して得られた知見は、以下の通りである。

- (1) バースへのトラックの到着とサービス時間については、到着分布がポアソン分布になり、サービス時間分布は、路線車については2次のアーラン分布、集配車については指数分布になった。
- (2) トラックターミナルで消費される費用の最小化という評価基準のもとに、待ち行列理論を用いて、最適バース数決定モデルを構築することができた。バースとトラックの費用、計画取扱貨物量、および平均荷役率が与えられれば、モデルを用いて最適バース数を容易に算定することができる。
- (3) このモデルを北大阪トラックターミナルのA社バースに適用した結果、ほぼ妥当な最適バース数が得られた。
- (4) シミュレーション手法により、各時間帯ごとの到着率とサービス率の変動を考慮した最適バース数決定モデルを構築した。
- (5) トラックターミナルの高機能化、すなわち荷役システムの機械化、自動化、輸送共同化及び情報システムによるトラックの到着制御は、トラックターミナルで発生する費用を削減し、整備すべきバース数を削減する効果がある。
- (6) ピーク時のトラックの到着を分散させ、到着台数を平準化することは、トラックターミナルにおいて生じる費用と整備すべきバース数の削減につながる。

本研究では、トラックターミナルにおけるトラックの到着と荷役の動態を記述するために2種類のモデル、すなわち待ち行列理論を適用したモデルと待

ち行列シミュレーションを用いたモデルを構築した。待ち行列シミュレーションによるモデルは到着率とサービス率の時間変動を考慮できるなど、待ち行列理論によるモデルと比較して厳密性に優れる。しかし、トラックターミナルの整備計画を策定する場合には、必要となるパラメータ値の設定が待ち行列理論によるモデルと比較して困難である。シミュレーションモデルの持つ高いパラメータ操作性は、建設されたトラックターミナルの効率的な運用を計画する場合に、特に有効になると考えられる。

今後の課題として、長期的な視点からの最適バース数の妥当性の問題がある。すなわち、取扱貨物量の日変動や月変動を考慮する場合、モデルの考察対象期間をどの程度に設定するべきかについて、検討する必要がある。また、本研究で調査対象としたトラックターミナルは雑多な品目を扱う一般トラックターミナルであり、より広範なタイプのトラックターミナルにモデルを適用して比較しなければならない。さらに、トラックターミナルが大規模になった場合に発生する可能性がある新たな不経済性についても、今後考えていく必要がある。

実際に高機能化されたトラックターミナルを整備することを想定すると、個々の規模とともに、それらの配置も適切なものでなければならない。今後は、本研究で行った最適バース数の算出法をベースに、ある地域内での最適配置についても検討する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたって数々の御助言を賜りました。京都大学工学部飯田恭敬教授に、ここに記して深謝いたします。また、調査を進めるにあたって御尽力賜りました。建設省近畿地方建設局浪速国道工事事務所、大阪府都市開発株式会社の各位に心より感謝いたします。最後に、データの収集・整理に御協力を得ました。京都大学工学部石井克尚氏、関西大学工学部井上健一氏、家藤健氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) McDermott, D.R. and Robeson, J.F. : The Role of Terminal Consolidation in Urban Goods Distribution, *TRB, TRR*, No.496, pp.36-42, 1974.
- 2) de Neufville, R., Wilson, N.H.M. and Fuenes, L. : Consolidation of Urban Goods Movements - A Critical Analysis, *TRB, TRR*, No.496, pp.16-27, 1974.
- 3) Clark, G.M. and Ashton, W.B. : Urban Goods

- Consolidation of Terminal Investment and Location Decisions, *TRB, TRR*, No.668, pp.4-6, 1978.
- 4) Deng, Y.P., 高田邦道, 岐美宗: 都市内物流の削減と円滑化のための共同物流デポ計画 - 特に二酸化炭素排出の少ない交通体系形成の観点から -, 日本都市計画学会学術論文集, pp.73-78, 1994.
 - 5) 菅沼忠嗣: 都市圏内の段階的物流計画, 土木計画学研究・講演集, No. 16(2), pp.9-12, 1993.
 - 6) 高橋洋二, 望月明彦, 柴武男: 広域物流拠点及び集配拠点の整備の方向, 土木計画学研究・講演集, No. 16(2), pp.25-28, 1993.
 - 7) 藤井健: ロジスティクス - 新しい道路交通政策への展開, 道路交通経済, No. 56, pp.17-36, 1991.
 - 8) 高橋秀喜, 石橋善明: 都市間物流の現況と将来, 土木計画学研究・講演集, No. 14(2), pp.149-156, 1991.
 - 9) 越正毅, 谷口栄一, 河野辰男: 地下物流システムに関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 13, pp.727-734, 1990.
 - 10) 山田晴利, 大下武志, 今西芳一, 村山明生: 物流システムの需要予測と財務分析, 土木計画学研究・講演集, No. 16(1), pp.865-872, 1993.
 - 11) 建設省道路局道路交通管理課, 建設省道路局企画課道路経済調査室, 建設省道路局有料道路課: 道路審議会中間答申および参考資料-その2-, 道路交通経済, No. 65, pp.40-74, 1993.
 - 12) 吉本隆一: 物流施設整備と道路交通システム, 土木計画学研究・講演集, No. 16(2), pp.17-20, 1993.
 - 13) Ruske W. : City-Logistics - Solutions for Urban Commercial Transport by Cooperative Operations Management, *Proceedings of Seminar on Advanced Road Transport Technologies*, OECD, 1994.
 - 14) 定井喜明: 公共トラックターミナルの配置および施設規模の合理化に関する研究, 土木学会論文集, No. 206, pp.85-94, 1972.
 - 15) 則武通彦: 公共埠頭における最適バース数の決定に関する研究, 土木学会論文集, No. 278, pp.113-122, 1978.
 - 16) 則武通彦, 木村作郎: 公共埠頭における最適バース容量の決定に関する研究, 土木学会論文集, No. 301, pp.115-123, 1980.
 - 17) Cosmetatos, G.P. : Some approximate equilibrium results for the multi-server queue (M/G/r), *Operational Research Quarterly*, Vol.27, No.3, i, pp.615-620, 1976.
 - 18) 塚口博司, 毛利正光, 松井三思呂: 都心商業地区における物資共同輸送システムの導入に関する一考察, 土木学会論文集, No. 401/IV-10, pp.23-31, 1989.
 - 19) 苦瀬博仁: 都市内物流における共同化の課題, 土木計画学研究・講演集, No. 15(2), pp.1-4, 1992.
 - 20) 高橋洋二: 共同化推進のための民間施設と施策, 土木計画学研究・講演集, No. 15(2), pp.15-16, 1992.
 - 21) 高田邦道: 共同化推進のための公共施設整備, 土木計画学研究・講演集, No. 15(2), pp.17-18, 1992.
 - 22) 橋本雅隆: 共同物流システムの経営的効果に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 15(2), pp.19-24, 1992.
 - 23) 松本昌二: 土木計画からみた都市内物流共同化の効果, 土木計画学研究・講演集, No. 15(2), pp.25-28, 1992.
 - 24) 家田仁, 佐野可寸志, 常山修治: マクロ集配輸送計画モデルの構築とその「地区型共同集配送」評価への適用, 土木計画学研究・論文集, No. 10, pp.247-254, 1992.
 - 25) Ogden, K.W. : *Urban goods movement - A guide to policy and planning*, Ashgate, pp.239-248, 1992.
 - 26) 西野賢治, 谷口栄一, 大矢正樹: 貨物の共同輸送の実態に関する調査, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, pp.264-265, 1994.
 - 27) Taniguchi, E., Yamada, T. and Yanagisawa, T.: Issues and Views on Cooperative Freight Transportation Systems, *Seventh World Conference on Transport Research*, 1995.

(1995. 6. 20 受付)

A STUDY ON OPTIMIZING NUMBER OF BERTHS IN TRUCK TERMINALS

Eiichi TANIGUCHI, Michihiko NORITAKE, Tadashi YAMADA
and Toru IZUMITANI

Freight transportation generates external diseconomies, such as traffic congestion and air pollution. Logistics centers interconnected with expressways could contribute to alleviating these problems. This study aims to develop analytical models and simulation models in order to optimize the number of berths in a truck terminal, which is constructed in logistics centers. At first we determine the arrival and service-time distributions of trucks in a truck terminal. Then the models are built up based on queuing theory. We apply them to the berth-planning in an existing truck terminal, and finally the effects of various factors on the number of berths are examined by using the models.