

待ち行列シミュレーションを用いたロジスティクスセンターの最適バース数に関する分析

A Study on Optimizing the Number of Berths in Logistics Centers

by Queueing Simulation

谷口栄一*・則武通彦**・山田忠史***・泉谷 透****

by Eiichi TANIGUCHI, Michihiko NORITAKE, Tadashi YAMADA, Toru IZUMITANI

1. はじめに

近年、我が国ではロジスティクスセンターと道路ネットワークを一体的に整備することにより、貨物車交通の整序化、道路交通の円滑化を図ることが提案されている。ロジスティクスセンター建設の際には、その適正な規模と配置を検討する必要がある。

著者らはロジスティクスセンターの規模を決定づける要因となるバース数に注目し、待ち行列理論に基づく静的モデルによる最適バース数決定法を構築したり。さらに本研究では、トラックの動態を精緻に扱うことによって静的モデルを補完するために、待ち行列シミュレーションを用いて最適バース数に関する分析を行う。シミュレーションモデルには次のような利点がある。①到着分布・サービス時間分布の分布型に制約を受けない。②トラックの到着台数の時間帯による変動を考慮できる。③平衡条件を満たさない過渡的な状況を考慮できる。

2. モデルの概要

(1) モデルの構造

シミュレーションモデルでは、1日のトラックの動態を次のようにモデル化する。

①ロジスティクスセンター内のバースに到着するトラックを、外生的に与えた到着間隔の分布をもとに乱数を用いて発生させる。

②空きバースがあれば直ちに先着順に荷役サービスを受けるが、空きバースがなければ待ち行列を形成する。

③トラックの荷役サービス時間は、外生的に与えたサービス時間分布より乱数を用いて決定する。

④荷役サービスを終えたトラックは直ちにバースを離れる。

シミュレーションの繰り返し回数は500回とし、各評価値はその平均値を算出する。ただし、待ち行列は全体で1列とし、待ち行列長の制限は設けないものとする。また、到着率、サービス率は時間帯による変動を考慮する。

(2) 評価基準

最適バース数を求める際の評価基準はロジスティクスセンターで発生する総費用の最小化とする。総費用はバースの建設・維持費用とセンターに滞留するトラックの費用の和である。国民経済的視点から、バースについては稼働時と遊休時、トラックについてはバース待ち時と荷役時のいずれにおいても費用が発生していると考えられるので、総費用は次のようになる。

$$C_s = C_b + C_h + C_w = c_b TS + c_t \sum_i (t_{hi} + t_{wi}) \quad (1)$$

C_s : バース数が S の時、期間 T においてロジスティクスセンター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_h : 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、バース待ち中のトラックの総費用(円)

c_b : 1バースの1時間当たりの費用(円/h)

c_t : トラック1台の1時間当たりの費用(円/h)

T : 考察対象期間。ここでは $T=24$ 時間とする。

t_{hi} : i 番目に到着したトラックの荷役時間(h)

key words: 物質流動, ターミナル計画

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

(〒606-01 京都市左京区吉田本町, TEL075-753-5125, FAX075-753-5907)

** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

(〒564 吹田市山手町 3-3-35, TEL/FAX06-368-0905)

*** 正会員 工修 関西大学助手 工学部土木工学科

(〒564 吹田市山手町 3-3-35, TEL/FAX06-368-0964)

**** 正会員 京都大学大学院工学研究科

(〒606-01 京都市左京区吉田本町, TEL075-753-5126, FAX075-753-5907)

t_{wi} : i 番目に到着したトラックの待ち時間(h)

S を順次変化させてシミュレーションを行い、式(1)より C_s を求める。 C_s の値が小さいほど社会的余剰が大きいと考えられるので、この C_s を最小とする S が最適なバース数である。

3. 北大阪トラックターミナルへのモデルの適用

(1) 時間帯毎の到着率とサービス率の変化を考慮した場合の最適バース数

トラックの到着とサービス時間について現地調査を行った北大阪トラックターミナル内のある1社のバースに対して、シミュレーションモデルを適用する(CASE1)。路線車と集配車の1日の中での時間帯毎の実際の到着台数は、図1のように変動が大きい。1日を通しての到着及びサービス時間に関する調査より、路線車はポアソン到着、アーラン2次サービスであり、集配車はポアソン到着、指数サービスであることがわかった。シミュレーション上で現状を再現するにあたっては、各時間帯において到着分布とサービス時間分布は同一と仮定し、表1に示す各時間帯毎の平均到着間隔及び平均サービス時間のパラメータのみを変動させている。シミュレーション上での到着台数を、図1に実際の到着台数と重ねて示す。現実の到着状況を十分に再現できていることがわかる。

バース数 S を順次変化させてシミュレーションを行い、式(1)より求めた費用の変動を路線車、集配車それぞれについて図2、図3に示す。この結果、最適バース数は路線車が6、集配車が13となった。待ち行列理論に基づく静的モデルでは、最適バース数が路線車で4、集配車で12という結果が得られているが、シミュレーションモデルでは到着台数とサービス時間の時間変動を考慮して、ピーク時の待ち行列を厳密に算定しているため、バース数が増加する結果になったものと考えられる。

図4に、路線車について最適バース数(6バース)のもとでの時間帯毎の平均待ち台数、最大待ち台数、平均待ち時間を示す。時間帯毎の到着台数の変動を反映して、5時台ならびに18, 19時台に長い待ち行列が発生している。18, 19時台は、到着台数は多くないが、1台当たりのサービス時間が相対的に大きいために、待ち時間が5時台のそれを大きく上回っている。また、20時台は

到着台数が少ないにもかかわらず待ち行列が発生しているが、それは20時までにサービスを受けられず待ち行列を形成したトラックの影響と考えられる。

表1 シミュレーションに用いるパラメータ

時間帯	路線車			集配車		
	到着台数 (台)	平均到着間隔 (分)	平均サービス 時間(分)	到着台数 (台)	平均到着間隔 (分)	平均サービス 時間(分)
0~1時	8	7.50	18.08			
1~2	8	7.50	18.08			
2~3	8	7.50	18.08			
3~4	6	10.00	23.23			
4~5	12	5.00	23.23			
5~6	17	3.53	23.23	8	7.50	68.00
6~7	7	8.57	18.65	10	6.00	68.00
7~8	8	7.50	18.65	21	2.86	68.00
8~9	6	10.00	18.65	23	2.61	29.00
9~10	1	60.00	26.25	15	4.00	29.00
10~11	3	20.00	26.25	10	6.00	29.00
11~12	5	12.00	26.25	19	3.16	35.00
12~13	1	60.00	59.50	14	4.29	35.00
13~14	0		59.50	20	3.00	35.00
14~15	1	60.00	59.50	14	4.29	21.35
15~16	3	20.00	95.00	21	2.86	21.35
16~17	3	20.00	95.00	25	2.40	21.35
17~18	6	10.00	95.00	25	2.40	28.32
18~19	5	12.00	49.60	32	1.88	28.32
19~20	5	12.00	49.60	20	3.00	28.32
20~21	3	20.00	49.60			
21~22	6	10.00	16.35			
22~23	3	20.00	16.35			
23~24	6	10.00	16.35			

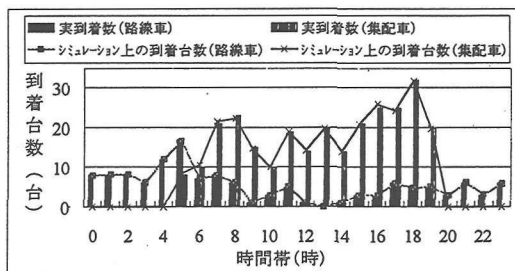


図1 時間帯毎の路線車・集配車の到着台数

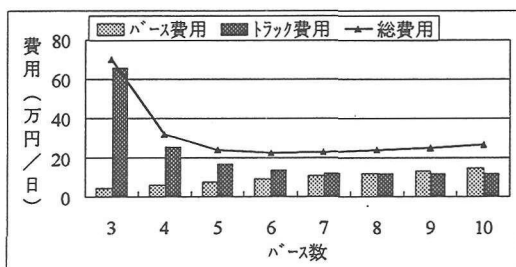


図2 バース数による費用の変動(路線車)

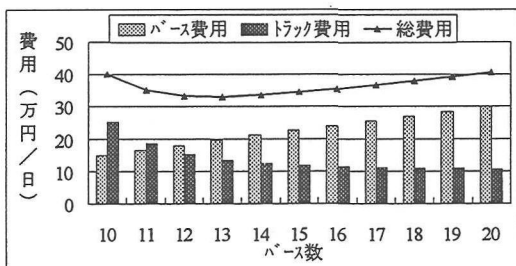


図3 バース数による費用の変動(集配車)

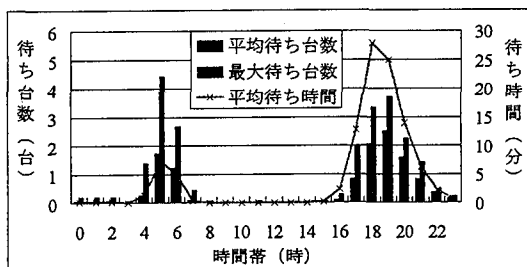


図4 最適バース数の下での平均待ち台数、最大待ち台数、平均待ち時間（路線車）

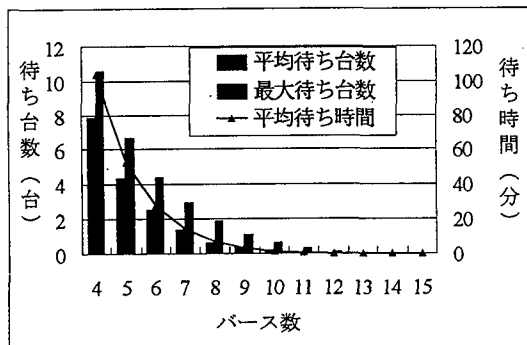


図5 バース数別にみた平均待ち台数、最大待ち台数、平均待ち時間の変動（路線車・到着ピーク時間帯）

路線車に関して、バース数を変動させた場合の到着ピーク時の平均待ち台数、最大待ち台数、平均待ち時間を示すと図5のようになる。バース数が4のときは最大で約10台の待ち行列が発生しており、その結果、平均待ち時間も100分程度となるので、静的モデルより得られる最適バース数ではかなりの待ち行列が発生することになる。一方、バース数が6のときは、ピーク時には待ち行列が発生するものの、その大きさはかなり減少している。

図5より、待ち行列がほぼ完全になるためには13バース以上必要となる。現在の物流では、リードタイムを短縮させるためにこの待ち時間を極力小さくすることが要求されるが、その要求を満足させるバース数は国民経済的には必ずしも最適であるとはいえない。ただし、トラックの単位時間当たり費用 c_t が相対的に大きくなると、待ち時間による費用の損失を小さくするために最適バース数は増加する。

(2) 情報システムによる到着制御がもたらす効果

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うので、ランダムに到着していることに

なる。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、物流業者、ロジスティクスセンター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想定される。

最も効率的なバースの利用状態は、トラックのバース待ちが全く無く、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。この状態は、バースの空き時刻を随時トラックに知らせ、その時刻にトラックが確実に到着できれば達成可能となる。このような状態をシミュレーションで再現したところ(CASE2)、最適バース数は路線車が3、集配車が11となり、CASE1の場合と比べて削減された。しかし、トラックの荷役時間やロジスティクスセンターまでの所要時間にはかなりの不確定要素が含まれており、バースの空き時刻とトラック到着時刻を合致させることは現実にはかなり困難である。その場合、ロジスティクスセンターの駐車用スペースにトラックを待機させ、無線などの通信システムを使ってバースに誘導するという方式をとらざるを得ないが、この方式でも実質的にはバース待ちが発生していることになる。

次に、比較的实现可能性の高い情報提供として、トラックの到着間隔が可能な限り均等になるようなケースを想定する。シミュレーションでは、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することで再現できる。図6に、5台時の到着分布をもとに、シミュレーションで得られる到着状況を示す。50次のアーラン分布になると到着間隔がほぼ均等となっているので、50次までシミュレーションを行った(CASE3)。

路線車の場合、最適バース数はCASE1と同じ6のままであった。そこで、バース数、到着トラック台数及び時間帯毎のサービス率が同一であれば、総費用 C_s はトラックのバース待ち費用 C_w のみに依存することを利用し

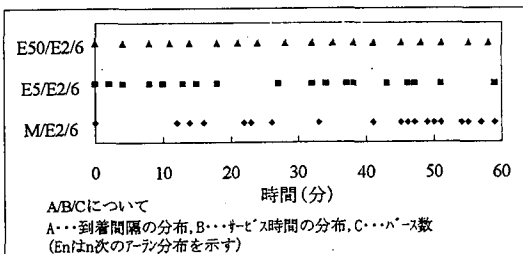


図6 種々の到着分布での到着状況

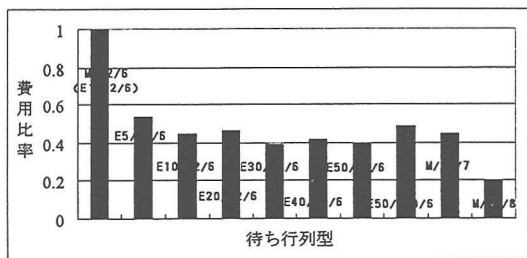


図7 待ち行列型と費用との関係（路線車）

て、 C_w を用いて到着間隔制御の効果を検討する。図7では、CASE1、すなわち Kendall の記号で待ち行列型が M/E2/6 の場合の C_w の値を 1 として、トラックの到着間隔に規則性が加わった 7 通りの場合ならびに CASE1 でバース数が増加した場合の C_w の大きさを比較している。図7より、アーラン次数が 5 次に変化しただけでも C_w が半減しており、バース数が 1 つ増加した場合 (M/E2/7) の C_w の値と同程度となることがわかる。E5/E2/6 の場合の到着状況は、図6に示されるように、M/E2/6 と比較すると多少規則的であるが、E50/E2/6 ほど到着間隔が均等にはなっていない。ロジスティクスセンターを利用するトラックに、到着間隔が均等になるような時刻情報をあらかじめ与えた場合、各トラックは指定の時刻に到着しようとするが、各道路の交通量などの影響により到着間隔にばらつきが生じる。しかし、到着間隔が 5 次程度のアーラン分布に従えば、費用の大幅な削減効果が得られることが図7よりわかる。

情報利用等のロジスティクスセンターの運用によってトラックのバース待ち費用の発生を抑制できるということは、ロジスティクスセンター建設の際に用地等の制約がある現状を考慮すると極めて意義がある。

(3) 到着時刻制約を緩和することによる効果

トラックの到着が特定の時間帯に集中することにより、バース待ち時間が増加していることは(1)に示した。今後、ロジスティクスセンター内に合理的な在庫システムが確立され、JIT 輸送におけるリードタイムの短縮、時間指定納品などの厳しい物流条件が緩和されれば、時間帯毎の到着台数が平準化される可能性がある。

路線車のケースで、到着台数を 24 時間にわたり平準化した場合 (CASE4) のシミュレーションでは、最適バース数は 4 バースに減少し、静的モデルによる算定値と一致する。しかし、24 時間にわたって到着台数を平準化する

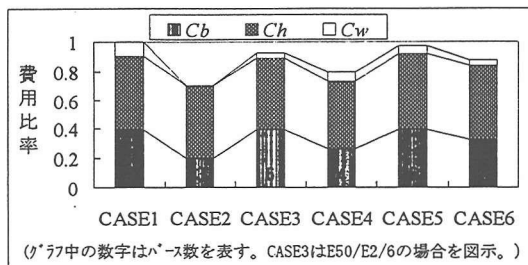


図8 各ケースの費用比率の比較（路線車）

ることは、現実の取引形態を考慮すると実現が難しい。そこで、ピーク時間帯のみに着目して、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 17～22 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 (CASE5)、さらにそれに加えて到着間隔が均等になった場合 (CASE6) の効果について検討する。図8より、CASE5 では最適バース数は 6 バースのままであるが、バース待ち費用 C_w は削減されている。CASE6 では最適バース数は 5 バースとなり、さらにバース待ち費用 C_w も削減されている。従って、CASE5, 6 ともに総費用 C_s も減少し、特に CASE6 ではその効果が大きいことがわかる。

4. おわりに

本研究では、時間帯毎に変化するトラックの到着特性を考慮できる待ち行列シミュレーションによる最適バース数決定モデルを構築した。そのモデルを用いた分析を通して、情報システムの導入、到着時刻制約の緩和はロジスティクスセンターにおいて生じる費用と整備すべきバース数の削減に寄与することが明らかになった。特に、情報を用いて到着間隔を均等に近づけ、JIT 輸送などに起因するピーク時の混雑を緩和するような実現可能性の高い施策によって、整備すべきバース数の削減が十分に可能であるという知見が得られた。

参考文献

- 1) 石井克尚, 山田忠史, 谷口栄一, 則武通彦: ロジスティクスセンターの最適バース数に関する研究: 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, 1995