

超高層ビル用エレベータの輸送能力検討

—— 出勤時における分割急行運転の効果 ——

Transportation Capacity of Elevators for the Multistoried Building

—— Effect of Express Service for Divided Floors in Up-Peak Pattern ——

犬 塚 績* 越 智 利 夫**
Isao Inuzuka Toshio Ochi

内 容 梗 概

超高層ビルではビルの運営上エレベータ群の輸送能力が従来のビル以上に重要な問題になる。これは、ビルの規模が増大するとともに基準階ロビーにおける乗客群の到着状態も混雑し、乗客の到着密度に適した効率的な輸送能力を必要とするからである。したがって、筆者らは実際に代表的な大事務所ビル内におけるエレベータの運転状態や乗客の到着分布状況などを実態調査し、計画上の共通性や交通需要の普遍性などを分析したほか、エレベータの待ち合わせ問題について発表⁽¹⁾したが、今回さらにこれらの結果を発展させ、超高層ビルにおける出勤時の輸送能力について検討したので、その概要について述べた。要約すると次のとおりである。

- (1) 超高層ビルにおいても、出勤時のラッシュを自動的に検出して指令する分割急行運転は輸送能力を増強し、かつ基準階ロビーにおける平均待時間を短縮するうえで明らかに効果がある。
- (2) 超高層ビル用エレベータはサービス階層、サービス階床数、収容人口のほか乗客の平均到着分布を考慮してエレベータ仕様をきめるべきである。
- (3) 超高層ビルの高階層エレベータは定格速度を上げると同時に、サービス階床数、収容人口、1バンク台数などを総合的に検討して、低階層とほぼ同等のサービス状態すなわち平均待時間にすることが望ましい。

1. 緒 言

20 階以上の超高層ビル用エレベータはアメリカにはすでに古くから多数の例があるとおり、おおよそ 10 階床程度のサービス階層に区分し、それぞれの階層別に独立した効率的な運転を行なう必要がある。しかし、これらのエレベータ群の計画にあたって、たとえば定格速度、かご内定員、台数などの設計仕様をいかに選ぶのが合理的か、また、出勤時のラッシュを自動的に検出して指令する分割急行運転の効果が従来のビルと同程度に期待できるかなど、あらかじめ検討すべき事項が非常に多いにかかわらずこれらについて具体的に発表された文献は無い。

一方、基準階ロビーにおける混雑はエレベータの本質的な輸送能力すなわち性能や設計仕様に起因することもあるが、そのほか使用上の管理方法、収容人口、外部交通機関、建築計画上の諸条件などが乗客群の到着状態に直接関係し、その混雑状態を誘発した重要な要因となるが、これらの諸条件をあらかじめ考慮して解決すべき最適条件を理論的に求めることは困難である。しかし、実際に代表的な大事務所ビルを選んで詳細に調査してみると、エレベータの交通需要は一般に定性的な普遍性を有するものである。したがって、乗客の到着密度が高いビルを選定し、そのビルにおける交通需要を参考にして 50 階の超高層ビルをモデルとして作成した。さらに、このモデルビルを対象として、さきに発表したモンテ・カルロ・シミュレーションによる検討方法を適用し、超高層ビルにおける出勤時のエレベータ輸送能力について待ち合わせ問題を主体にして分析してみた。なお、現状におけるわが国の超高層化計画は大半が 30 階程度のものであるが、本稿では特に検討範囲を拡張して 50 階のビルをモデルにしてみた。

2. エレベータ乗客の到着状態

エレベータの輸送能力の解析をモンテ・カルロ・シミュレーション

* 日立製作所水戸工場

** 日立製作所日立研究所

ンで行なうには乗客の到着モデルを定める必要がある。特に出勤時にはビル外の交通機関を利用して基準階ロビーに乗客群が集中することになるが、一日中の交通需要の中では最も単純な到着分布である。しかも、これらの値が結果として得られる輸送能力、待時間分布、サービス完了時間分布やかご内乗客数などの運転条件に直接影響することになるから、運転条件の決定や乗客到着のモデル作成上重要な要素となるわけである。

2.1 調査の目的

乗客到着分布の調査目的を具体的に述べると次のとおりである。

- (1) 出勤時における 1 階乗客の到着分布は Poisson 分布に従うと考えることができるか？
- (2) ほかに適当な分布を当てはめる必要があるか？
- (3) 出勤時以外における各階の乗客到着分布との違いはどうか？

2.2 調査方法

出勤時における乗客の集中度合いが外部の環境に左右されることはすでに述べたが、運転条件として最も過酷な条件は到着密度が特に密になった場合で、これは交通機関や横断道路上の交通信号などによって乗客が集団的に到着するようになることが考えられる。したがって、国鉄、私鉄、国電のほか都電や多数のバスターミナルが集中している Y ビルはビルに通じる主要道路上に数箇所の交通信号もあるから、長時間実測した場合、他のビルに比べて割合に過酷な集団到着が予想されるので調査の対象として最も適当であると考えた。

一方、具体的な調査方法としては、出勤時に全員が利用する出入口を選んで特定の通過点を設定し、撮影機によって乗客の通過状態を連続的に撮影した。しかも、この調査は連続 2 日間行なって両日の差も検討することにしたものである。

2.3 結 果

出勤時に相当する午前 8 時 30 分から 9 時ごろまでの Up Peak が指令された約 30 分間における乗客の到着間隔 $Z_1, \dots, Z_n$ (秒単位であらわす) は全コマ数 X 、到着間隔のコマ数を $y_1, \dots, y_n$ とすると、

第1表 到 着 間 隔 実 測 デ ー タ

日	区間(s) min	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	3.0	5.0	7.0	9.0	∞	合 計	平 均
28日	30 ~ 35	18	13	10	12	11	3	4	1	2	1	4	6	3	14	8	2	3	115	1.93
	35 ~ 40	60	26	19	16	23	8	7	13	11	9	3	4	8	20	4	1	1	233	1.21
	40 ~ 45	69	33	36	26	17	22	15	6	7	8	1	7	2	4	0	1	0	254	0.78
	45 ~ 50	63	26	28	15	20	21	2	8	5	4	1	2	5	2	0	0	0	202	0.69
	50 ~ 55	119	54	56	37	33	21	18	12	6	7	7	6	7	4	0	1	0	388	0.70
	55 ~ 60	56	36	17	10	21	20	6	9	8	6	8	8	15	15	6	2	0	242	1.26
29日	30 ~ 35	10	12	11	9	4	10	4	11	4	5	2	3	11	14	7	4	0	121	1.97
	35 ~ 40	17	12	11	13	18	8	8	6	9	6	7	5	9	13	2	0	6	150	1.78
	40 ~ 45	57	50	27	14	30	14	11	10	14	3	8	2	9	12	6	1	0	268	1.06
	45 ~ 50	74	39	39	32	25	28	10	7	14	7	2	3	7	4	2	0	0	293	0.79
	50 ~ 55	49	29	15	17	23	8	9	4	10	7	5	2	4	4	0	0	0	186	0.81
	55 ~ 60	59	55	35	28	19	12	13	10	12	4	6	3	6	12	2	0	0	276	0.89

注：区間の度数は、前の区間の値より大きく、その区間の値より小さいものの度数を表わす。

次のように変換される。

$$Z_i = T \frac{y_i}{X} \quad (\text{秒})$$

ここに、 T ：全調査時間（秒）

X ：全コマ数

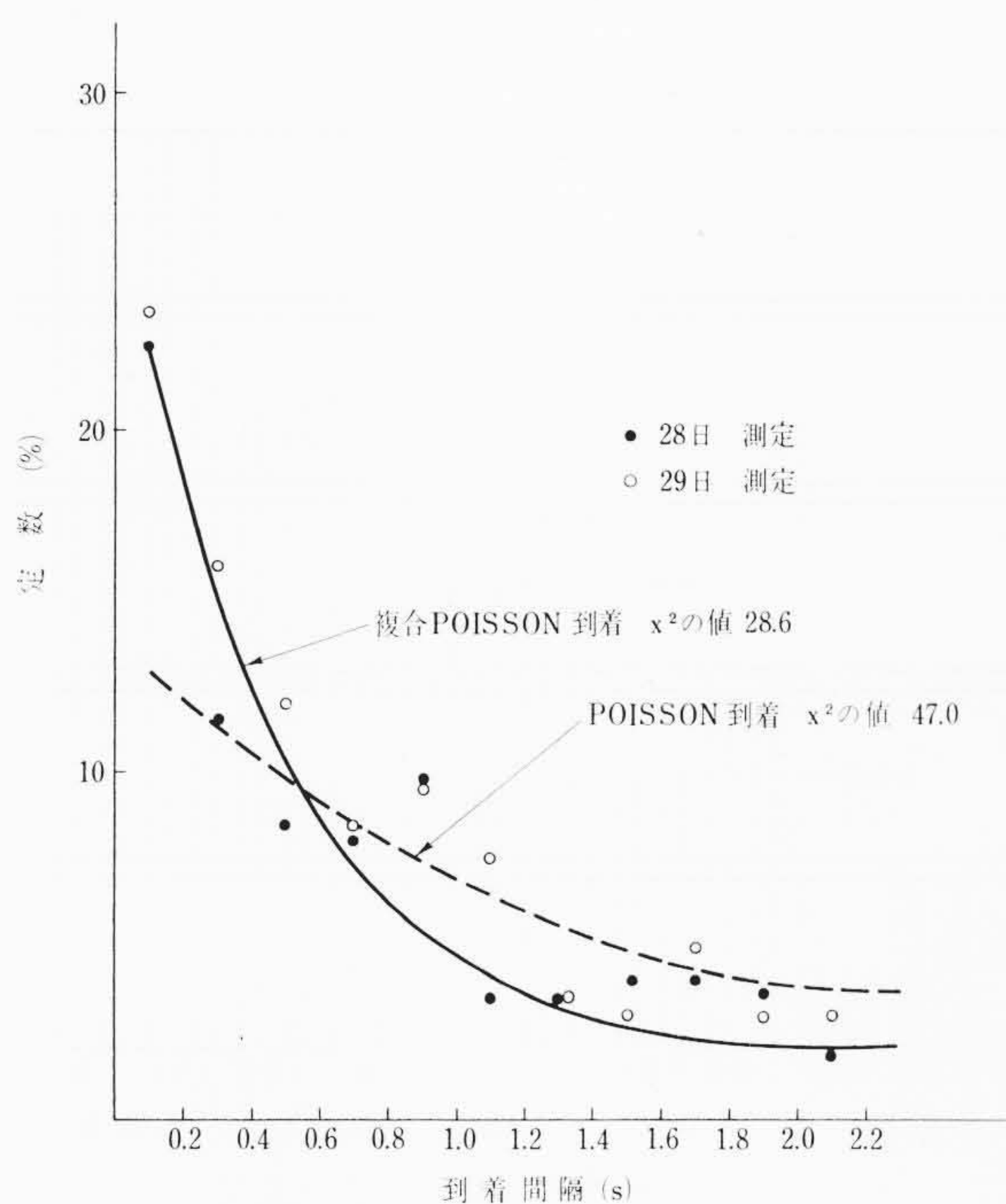
以上の結果を5分単位で到着人数としてまとめると、第1表のとおりであって、適合度の検定を行なった結果を要約すると、次のとおりである。

(1) 出勤時における1階の到着分布は Poisson 到着と見なせないことはないが、適合性はあまり良好でない。ちなみに、他のパターンに相当する各階における乗客の到着分布はさらに適合性が悪いことがわかった。

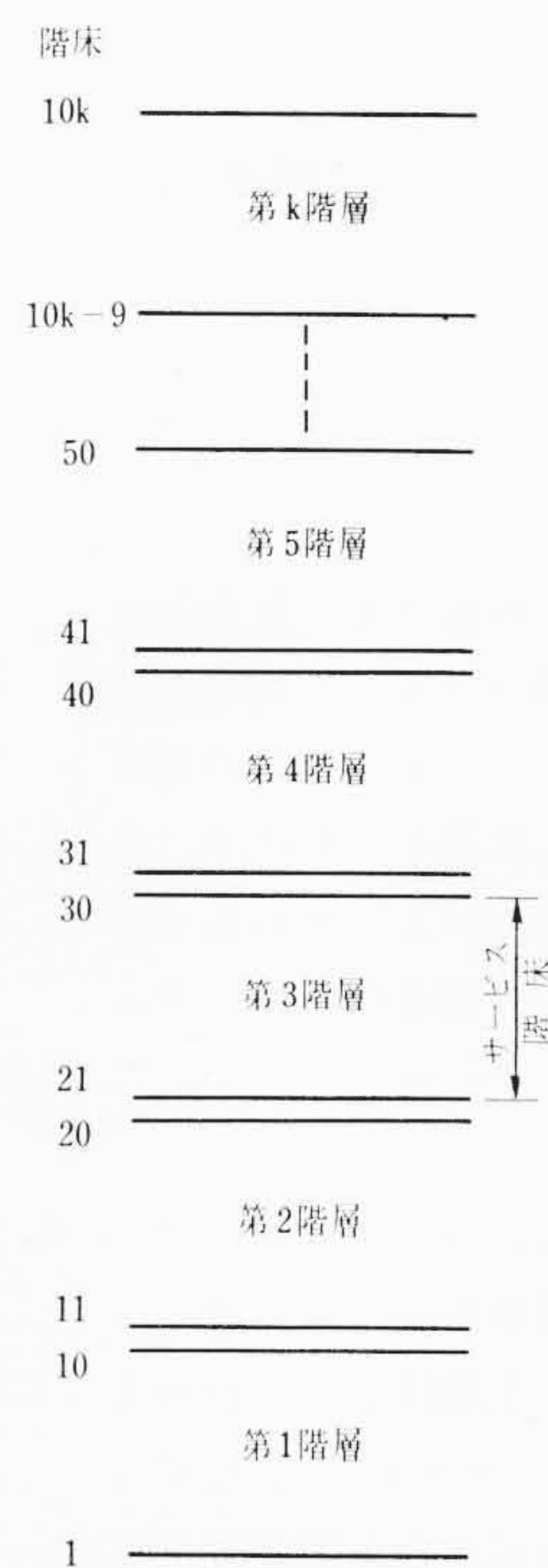
(2) 乗客は平均値の異なる二つの Poisson 分布の合成された複合 Poisson 分布に従って到着するという仮定をおき、 χ^2 Minimum Method を用いてパラメータを定めたところ、到着間隔確率密度関数 $g(t)$ は平均到着間隔を β として、次のように表わすことができた。

$$g(t) = \frac{1}{2} (\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t})$$

ここで、



第1図 乗客到着分布の比較



第2図 階層の定義

$$\lambda_1 = \frac{(0.0388\beta + 1.65)}{\beta(0.776\beta + 2.3)}$$

$$\lambda_2 = 0.0388 + 1.65\beta$$

この式の特長は実測データに対して Poisson 分布よりもよく適合しており、Poisson 分布と同様に平均到着間隔を与えれば定まる点が便利である。第1図に平均到着間隔が最も過密な1秒の場合の例を示したが、複合 Poisson 到着が Poisson 到着より実測値に対して適合性がよいことを表わしている。

(3) Yビルにおける乗客の平均到着間隔は出勤時の最も混雑している状態で約1.5秒、ピークが過ぎると2~2.5秒であって、さきに発表したKビルの例よりも過密な到着分布である。

3. モデルの設定

3.1 モデルビルの構成

超高層ビル内の交通需要を検討するためには当然ビルのモデルプランが必要である。アメリカには現在わが国で計画されている程度の超高層ビルは非常に多くこれらを例にとることも考えられるが、10階床程度の既設ビルを例にとっても、建築計画やビルの運営上などの面から国情の違いがうかがえるので、アメリカの例に従うのは必ずしも良策とはいえない。したがって、今回は前述したYビルのほかに数種の代表的なビルを参考とし、各階床ごとの収容人口を現実に即した分布になるよう特に考慮してみた。モデルビルに対して仮定した事項は次のとおりである。

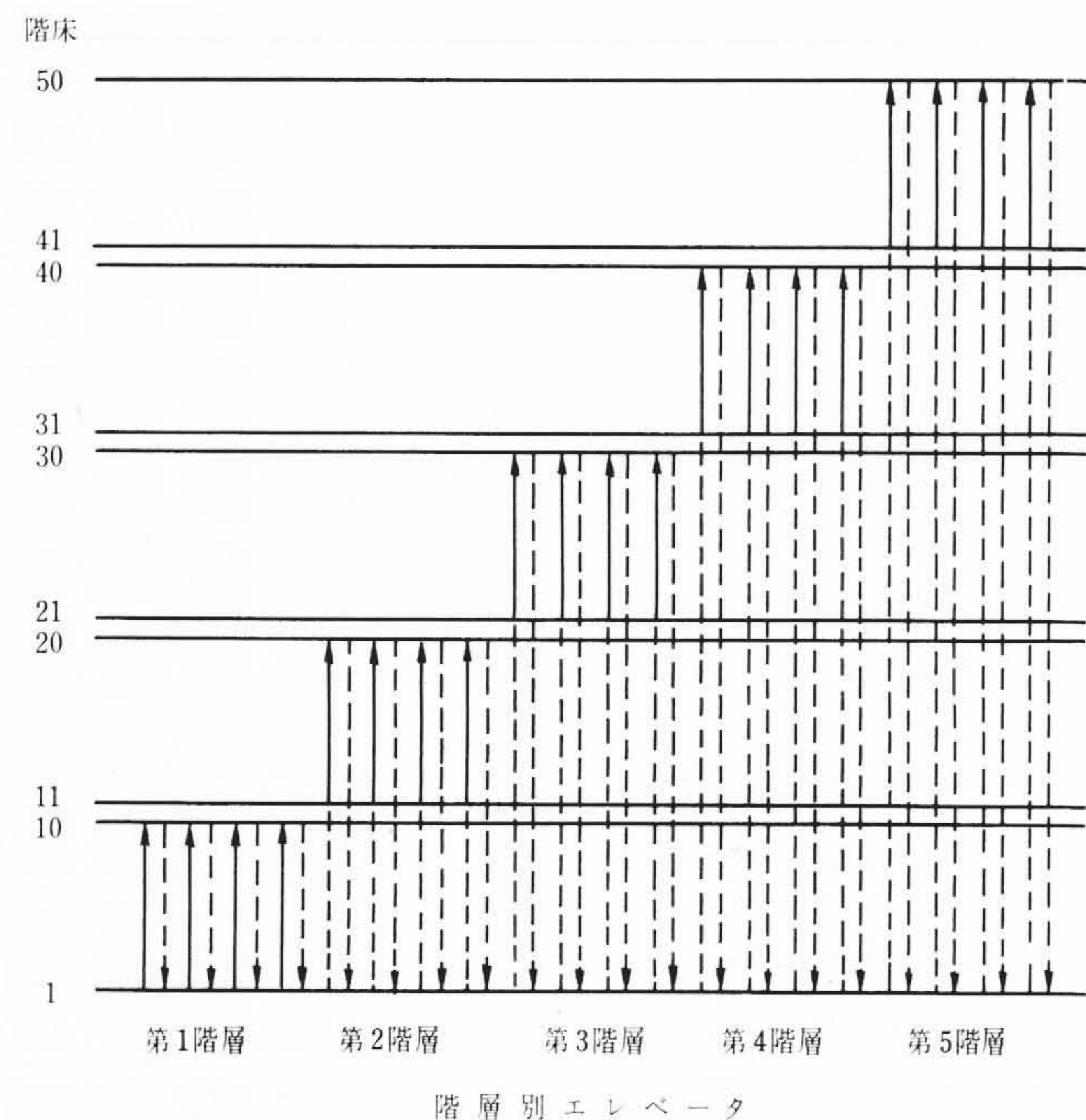
(1) 現在、わが国で計画されている超高層ビルは30階床程度のものが多いようであるが、参考のために検討範囲を拡大し50階床のビルをモデルにすることにした。

(2) サービス階層は10階床単位で構成するものとし、第2図に示すように1~10階を第1階層、11~20階を第2階層、一般に $(10k-9) \sim 10k$ 階を第 k 階層と呼ぶ。

(3) 各階層のエレベータ群は第3図に示すとおり、基準階である1階からそれぞれ独立して各階層に運転するものとする。

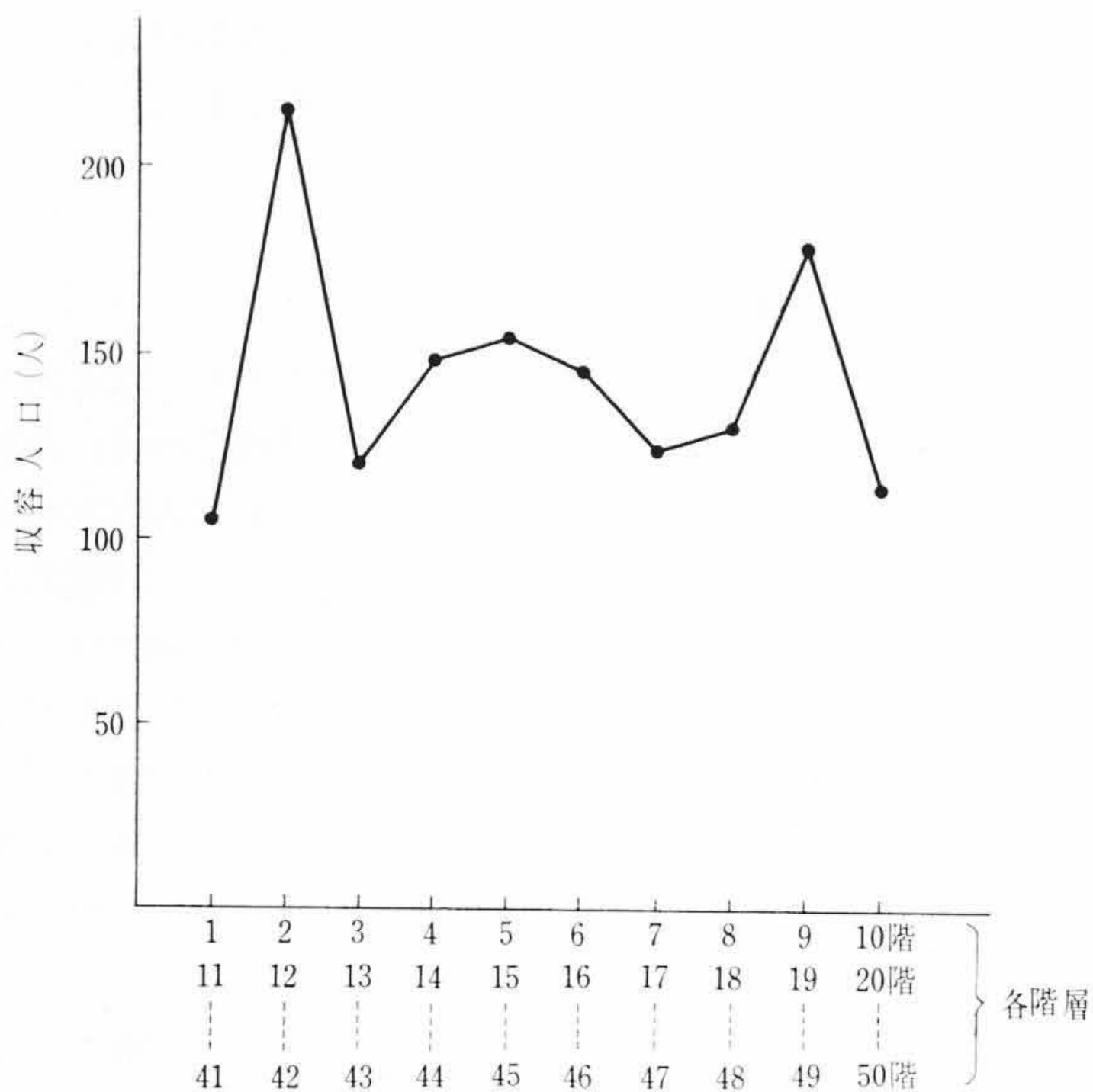
(4) 各階層の収容人口はまったく同一であって、その分布は第4図に従うものとする。

(5) 1階床の階床距離はすべて3.3mとする。



注： 実線はサービスする階床，点線は通過階を示す。

第3図 普通運転



第4図 各階収容人口分布

3.2 乗客の到着分布

エレベータの輸送能力を論ずる場合，乗客の到着分布が基本的な基準条件となる。もちろん，環境その他変動要因の多い交通条件がすべてのビルにまったく同じとは考えられないが，集団到着の確率が高いビルの過密乗客到着分布を調査対象として選んでおけば，当然一般ビル向けとしても輸送能力を検討する資料として有益である。したがって，前述したYビルにおける乗客の到着分布をモデルとして今回のシミュレーションに適用することにした。

3.3 乗客の行先階別分布

出勤時にエレベータを利用する乗客はその大部分がこのビル内の人たちであるから，もし2階以上に行く客で階段を利用する者がいないと仮定すると，到着客が*j*階に行く確率は2階以上の全収容人口に対する*j*階の収容人口の比と考えることができる。したがって，この仮定において，乗客の行先階別分布はビルの各階収容人口の作る分布に等しいものとなる。全階層のこの分布を同一にしたの

第2表 日立エレベータ諸元

エレベータ速度 (m/min)	加 速 時 間 (s)	ドア開き時間 (s)	ドア閉め時間 (s)
150	4.0	1	2
180	4.8	1	2
210	5.6	1	2
240	6.4	1	2
300	8.0	1	2

は問題を単純化するためである。

3.4 エレベータ運転諸元

エレベータ運転上の諸元は第2表に示すものを用いたが，さらに詳細な運転上の条件および計算に使用したフローチャートはすでに発表したとおりなので本稿では割愛した。

4. 分割急行運転の検討

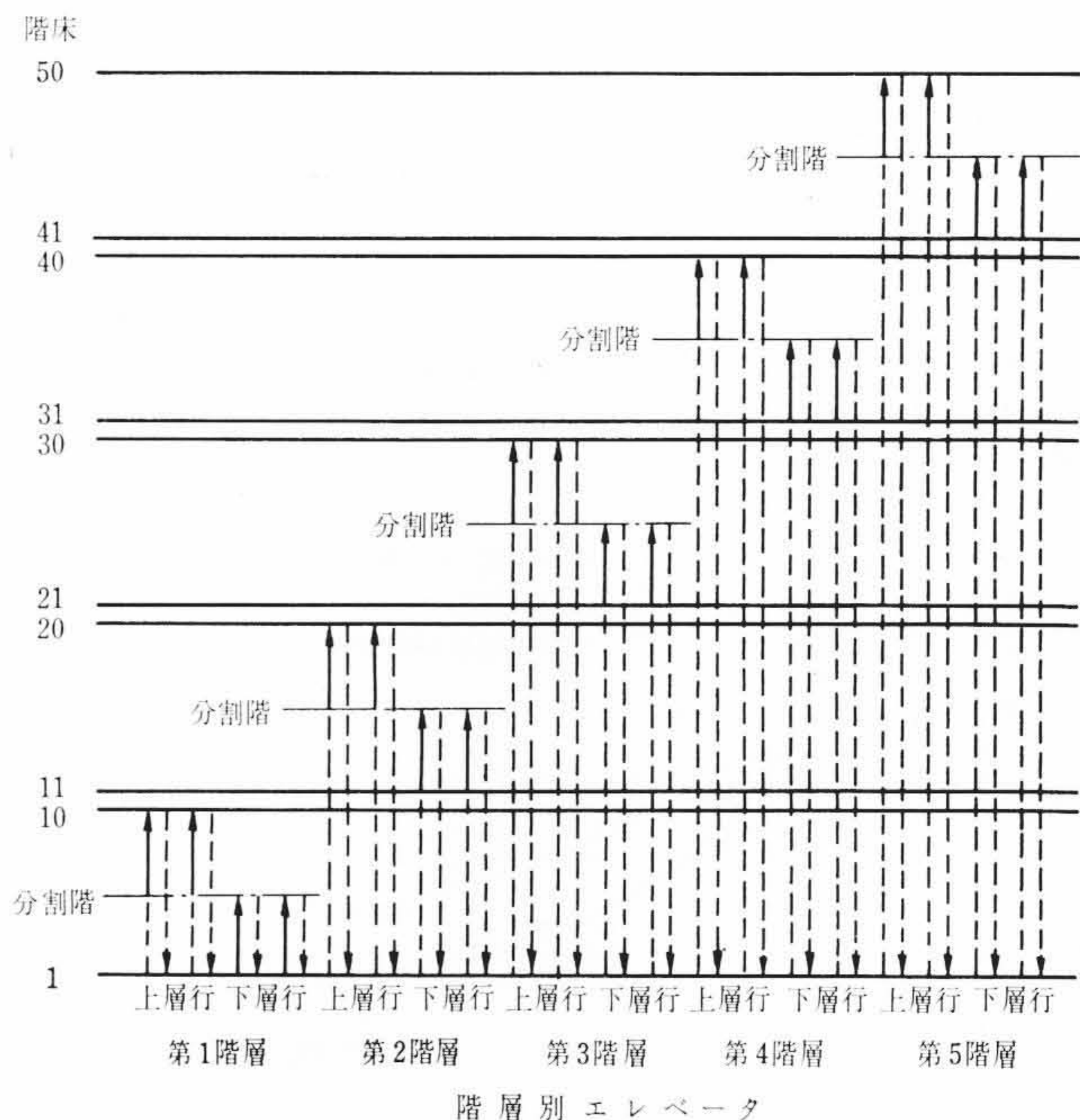
10階床程度のビルで出勤時に1バンクのエレベータ群を上，下2層に分割して自動的に輸送能力を強化することが有効であることはすでに発表した。また，実際にも実態調査⁽²⁾⁽³⁾して数種のビルで確認してみたが，今後の起高層ビルにおいても同程度の効果が得られるとはいえない。特に，高階層用エレベータは当然高速化することになるが，定格速度におのずから限度があるから，サービス階床数やその階層内の収容人口が同じであれば，一般に高階層は低階層に比べて一周時間が長くなる。したがって，高階層では特に分割急行運転による効果をシミュレートして確認する必要があるわけである。次に，起高層ビルにおける普通運転と分割急行運転の定義を下記のように定める。

(1) 普通運転

1バンクのエレベータ群が定められたサービス階層内において，必要な階のすべてに運転し，最後の客がおりた階から1階まで直通運転で復帰して，第3図に示すような運転を行なう方式をいう。

(2) 分割急行運転

1バンクのエレベータ群が定められたサービス階層を上，下2層に分割し，それぞれ上，下層行の2群に分かれて独立して運転するもので，第5図に示すような運転を行なう方式をいう。この上，下2層に分割した階を分割階と称する。



第5図 分割急行運転

4.1 エレベータ仕様

従来のビルの例と比較して、解析結果から超高層ビル用エレベータの望ましい仕様を検討するために、10階床程度のビルで使用されているエレベータの仕様を適用してみよう。

(1) 台 数

超高層ビルでは一般に1バンク6台以上でサービスしている例が多いが、まずYビルの例に準じて1バンク4台とする。したがって、普通運転の場合は1バンク4台で各階層にそれぞれサービスし、分割急行運転の場合はこのうちの2台を上層行、他の2台を下層行とする。

(2) 定 員

従来のビルで最も例の多い17名を定員とする。

(3) 速 度

各階層への急行運転は基準階から最初にサービスする任意の階まであらかじめ定められた高速運転を行ない、各階層内の運転はサービスする階床間隔に応じてそれぞれ90~150 m/minの階床運転速度を自動的に選ぶものとする。下記は実際の標準速度である。

- (a) 各 階 層 内 の 運 転 90, 120, 150 m/min
- (b) 第2階層への急行運転 210 または 240 m/min
- (c) 第3階層への急行運転 240 または 300 m/min
- (d) 第4, 5階層への急行運転 300 m/min

4.2 分割階の選定

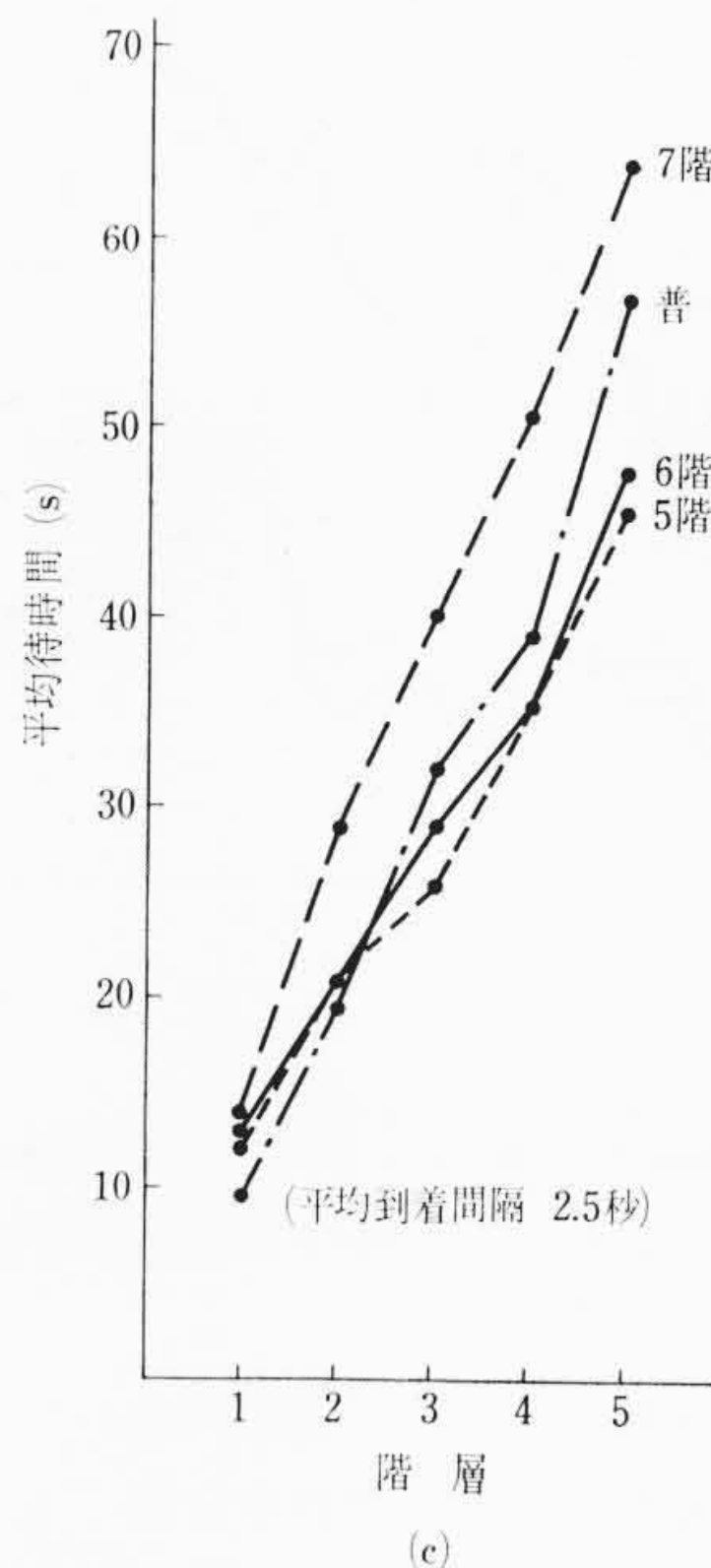
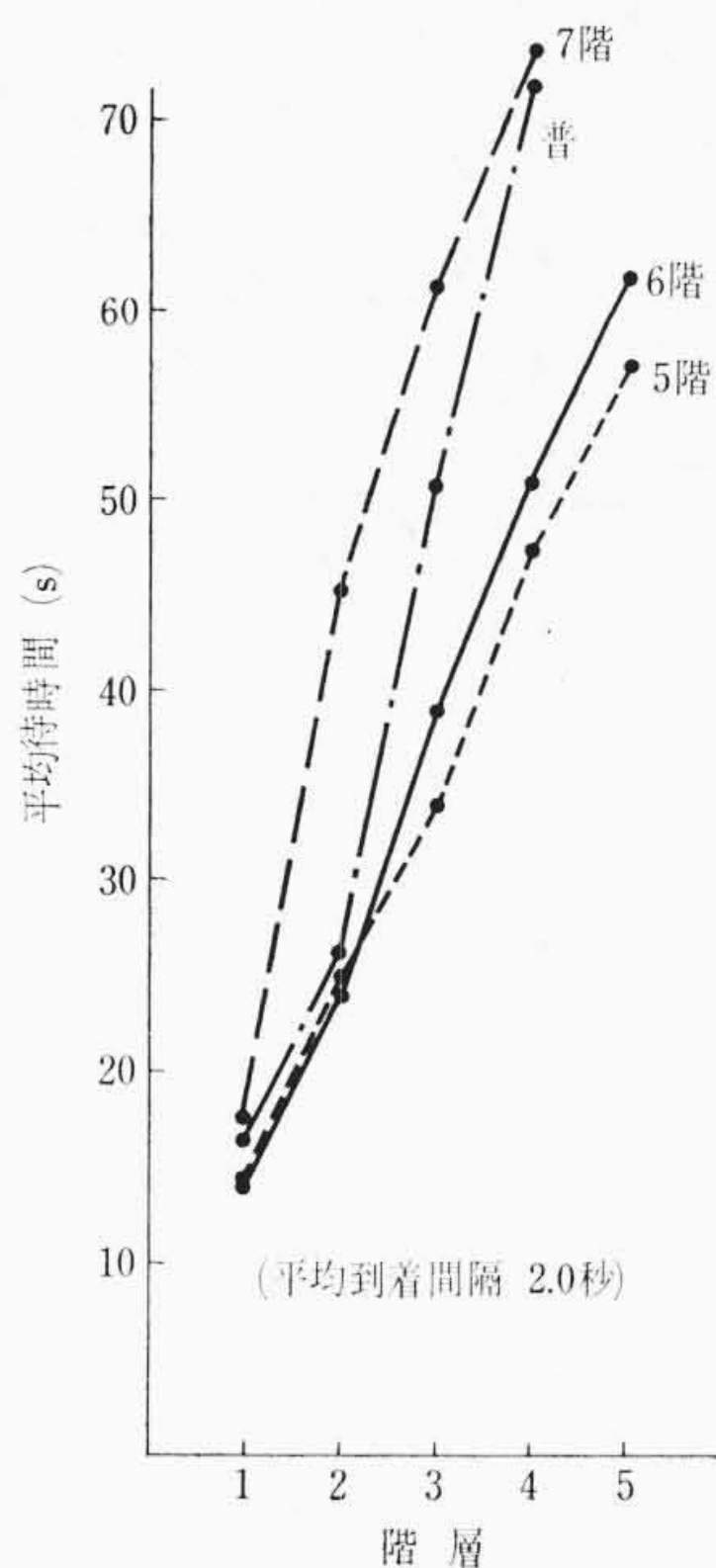
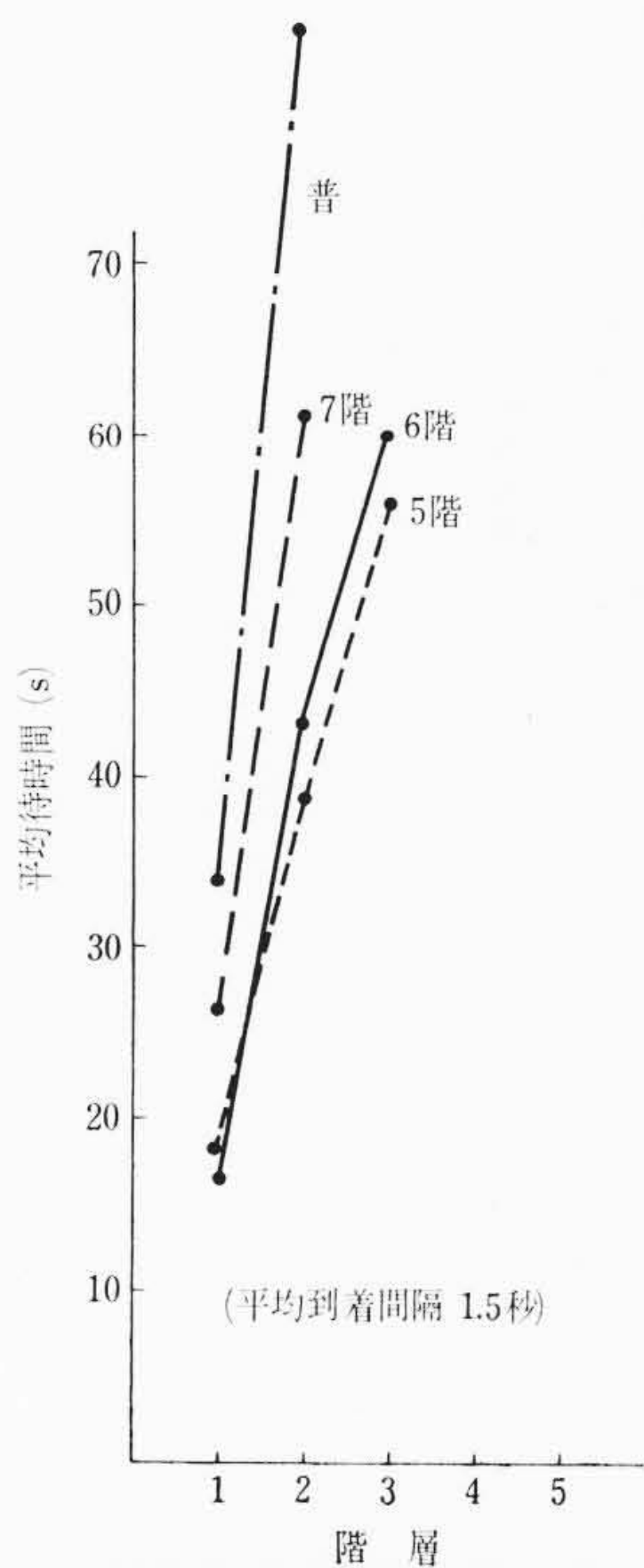
各階層における種々の分割階に対する分割急行運転の効果について検討し、最も望ましい分割階を選定してみよう。分割急行運転の効果は乗客の到着密度が密になるほどその良否が基準階における平均待時間のうえで明確になる。したがって、第6図(a)~(c)にそれぞれ1.5, 2, 2.5秒の平均到着間隔の場合を示した。図中5~7階と注記してある分割階はそれぞれ各階層の分割階を示すものであって、たとえば横軸に示す第1階層では5~7階、第2階層では15~17階、……、第5階層では45~47階を示すものである。また、各階

層の定格速度は計算の都合上第1階層 150 m/min, 第2階層 210 m/min, 第3階層 240 m/min, 第4, 5階層 300 m/minを採用した。

まず、普通運転では乗客の到着密度が高くなるにつれて第2階層以上へ行く乗客の平均待時間が増大し、(a)図に示す平均到着間隔1.5秒のピーク時には全然さばききれなくなることを表わしている。次に、分割急行運転の場合でも7階を分割階に選んだときは(b), (c)図に示すとおり、到着間隔が粗になると普通運転よりも平均待時間が長くなり望ましい状態とはいえない。したがって、これらの図から5, 6階のいずれかを分割階に選ぶと、分割急行運転が普通運転よりもサービスが向上する。特にピーク時には平均待時間が非常に短いことがわかる。一般に、ピーク前や過ぎた後で乗客の到着間隔が3秒をこえる非常に閑散な状態では普通運転のほうが分割急行運転よりも平均待時間が短くなる。この主因は、分割急行運転が指令されると、1バンクのエレベータ群が上, 下層行に分かれて各階のサービス台数が半減するために待時間が長くなるからである。日立製作所では、この見地から出勤時のラッシュの状態に応じてUp Peak Patternの開始時点とその継続時間を自動的に指令する方式を開発しているが、この効果による待時間の差は超高層ビルの高階層用エレベータでさらに明白になる。また、モデルビルの収容人口分布が下層階にかたよっていることも分割階の決定に対して大きな影響があるが、実際にも計画上、ある程度のかたよりは当然考えられるから、できるだけ実例に基づいたモデル作成を行なうためにYビルの人口分布を選んだものである。

次に、各階層における上, 下層のサービス状態はほぼ均等にする必要があるので、第7図(a)~(c)に平均到着間隔2秒の場合の平均待時間および平均サービス完了時間を上, 下層別に示した。これらの図から、(a)図に示すとおり5階の場合はいずれも上層のほうが下層に比べて全般的に長く、逆に7階の場合は(c)図に示すとおり下層のほうが極端に長くなっていて、結論として分割階は6階が最も適当であることがわかる。さらに、6階を分割階にした場合の各階の平均待時間と平均サービス完了時間を調べてみると、第8図

に示すとおり、普通運転に比べて各階層の上層階が全般的に短縮されることがわかるが、高階層ほどその差が大きく約1分程度短縮されることを示している。これは、台数、速度、定員が同じでも分割急行運転を行なうと、1階における平均待時間および乗客が1階から目的階へ到着するまでの平均サービス完了時間が両者とも普通運転よりも短く、超高層ビルにおいても分割急行運転の効果が大きいことを立証しているわけである。また、その運転内容を分析するために、第2階層における階床運転数の百分率と各階層の平均一周時間を第9, 10図に示してみた。この両図から、分割急行運転の場合は普通運転に比べてサービス階床数が半減するため、全運転回数に対して一般に長階床運転数の割合が増加し、必然的に平均一周時間が短縮されて輸送能力強化と平均待時間短縮の両者が果たされることがわかる。

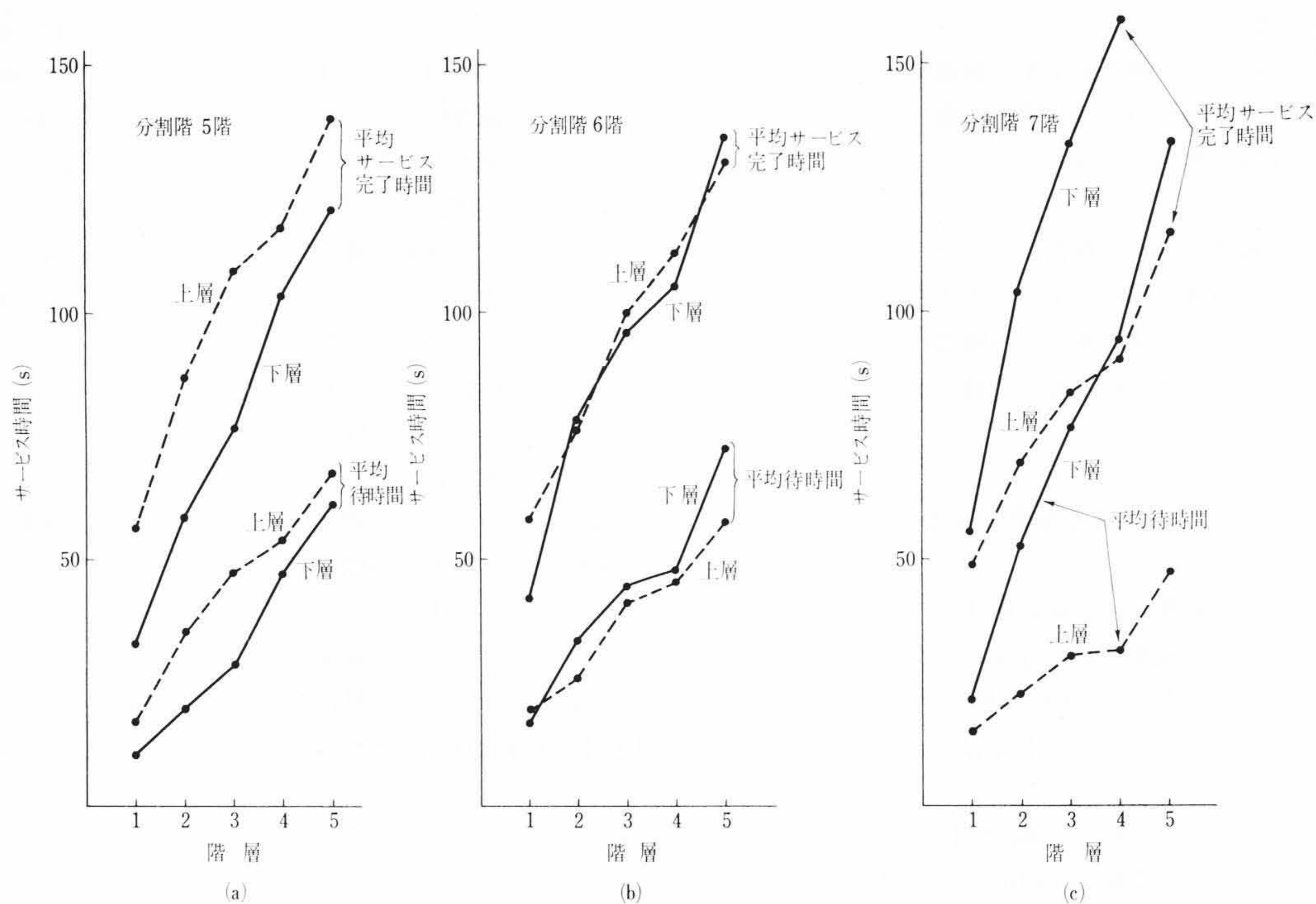


注: (1) 図中階床を付記してあるのは分割急行運転の分割階, 普通は普通運転を示す。
(2) 平均待時間はサービスする全階の平均値である。

第6図 普通運転と分割運転の比較

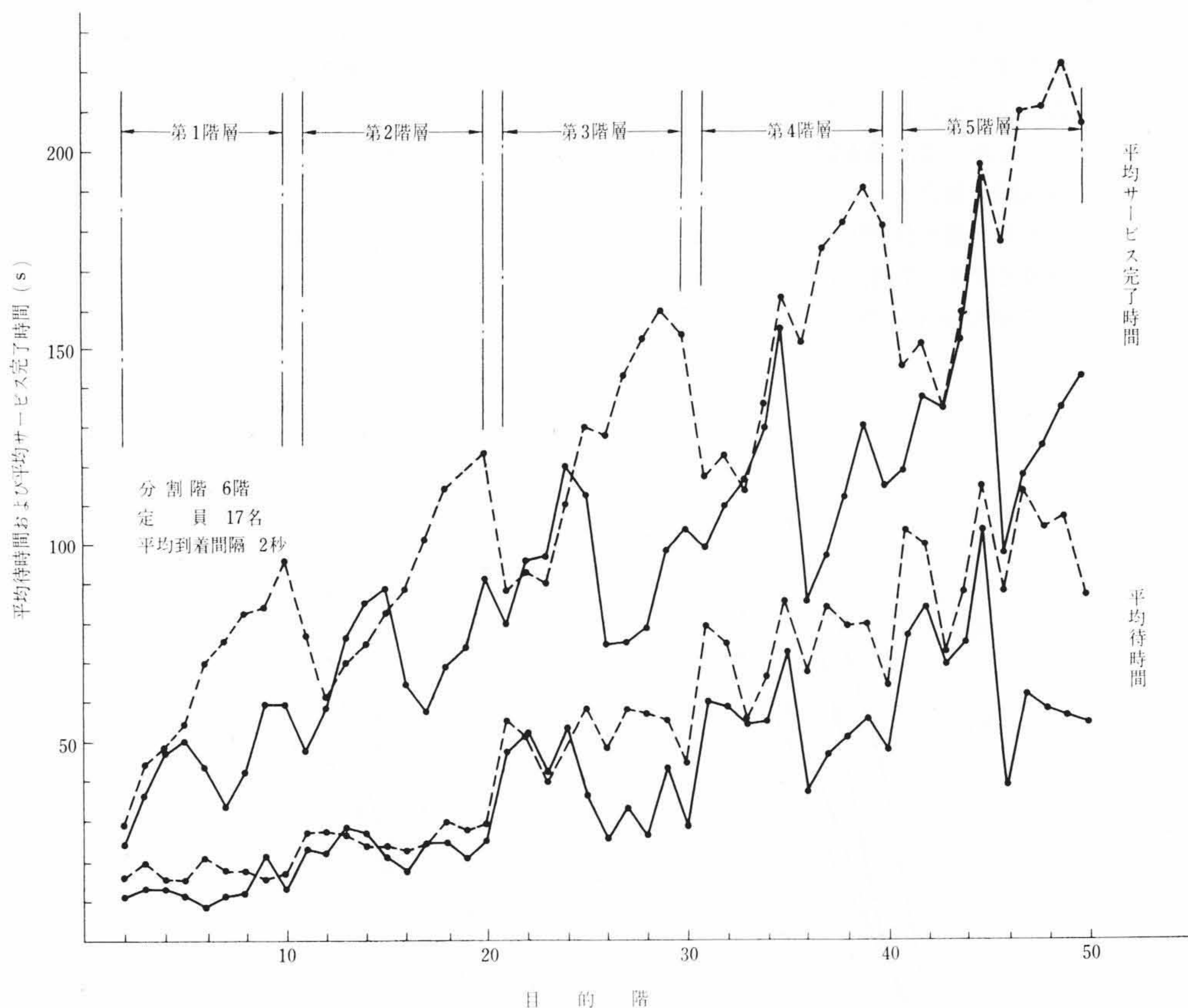
5. 計画上の問題

いままでは、従来のビルに準じた場



注：平均到着間隔 2秒

第7図 分割急行運転サービス時間



注：(1) 実線は分割急行運転，点線は普通運転を示す。

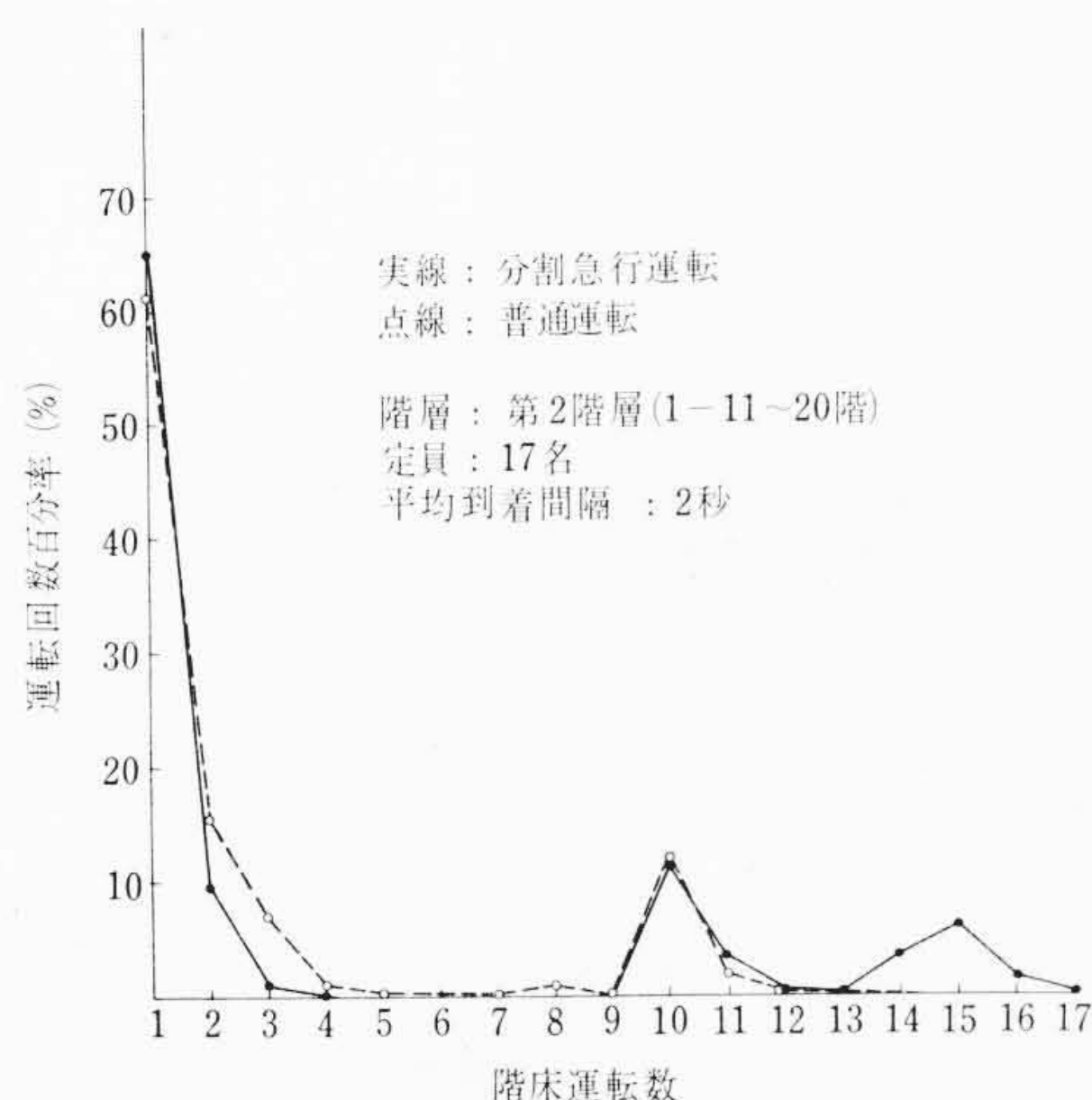
(2) 各階の平均待時間は1階における平均待時間を待客の行先別に区分し，横軸の目的階として示したものである。

第8図 各階の平均待時間と平均サービス完了時間

合における各階層のエレベータ仕様を対象とし，分割急行運転の効果について述べたが，さらにこれらの計算結果からその内容を分析して，エレベータ計画上必要な諸条件を検討してみよう。以下，この章で述べる分割急行運転はすべて6階を分割階にしたものである。

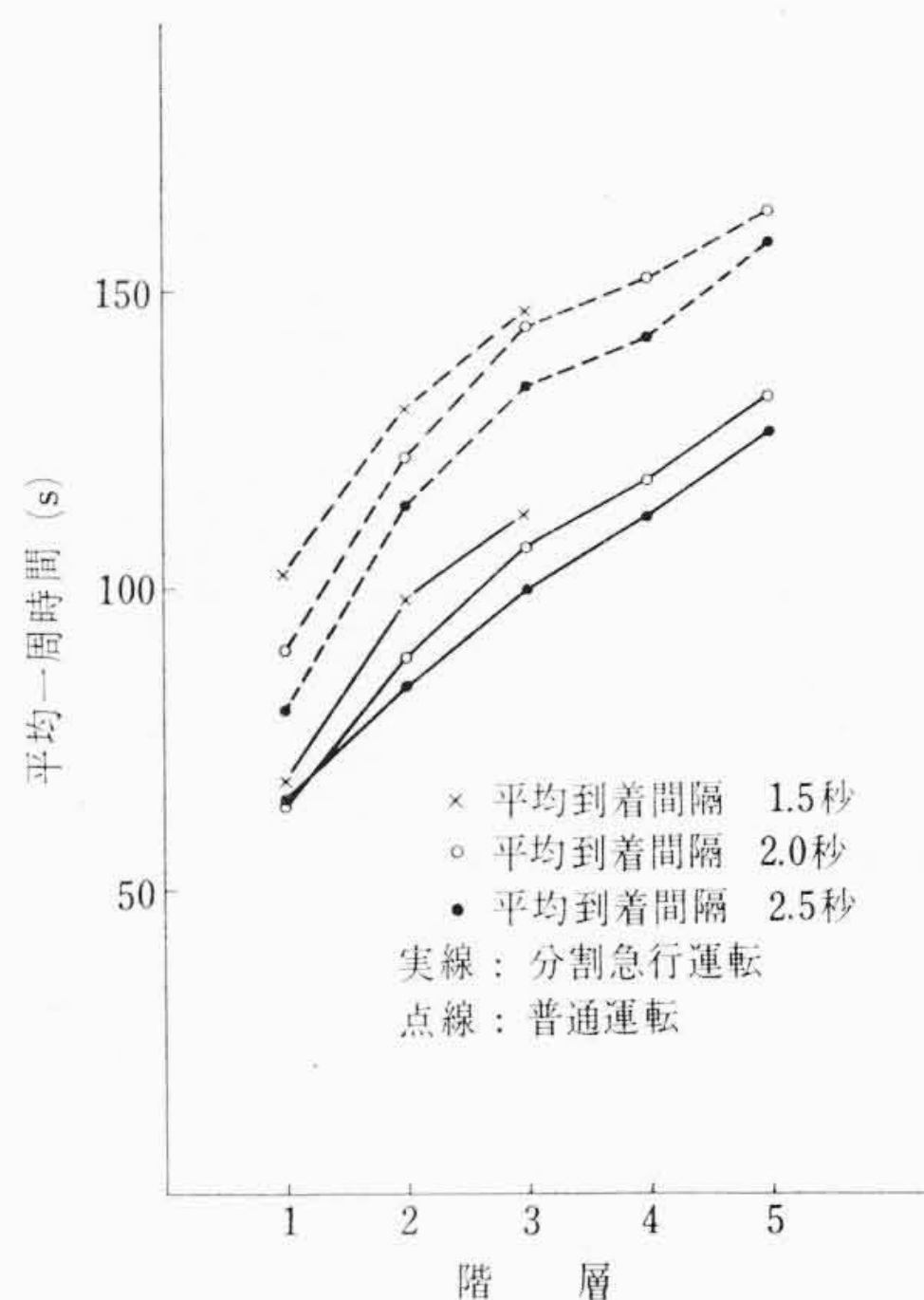
5.1 台数

第11図にサービスする1バンクの台数を変えた場合の各階層における平均待時間を示した。定員25名，乗客の平均到着間隔1.5秒に対する第1階層の平均待時間は18秒であるが，これは1バンク6台のときの第3階層，1バンク8台のときの第5階層のサービス



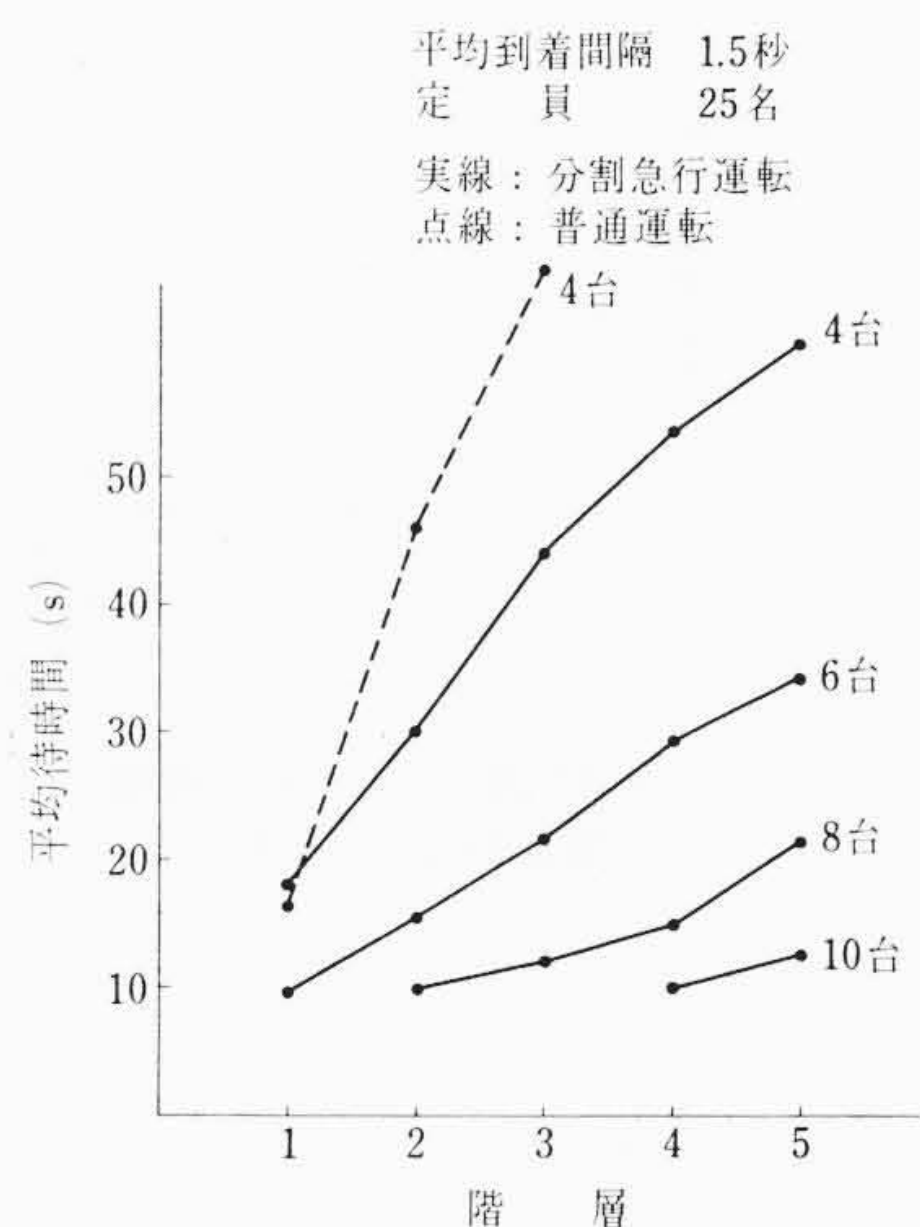
注: 階床運転とは直通して運転した階床間隔を称し, たとえば1→2, 1→3をそれぞれ1階床運転, 2階床運転という。

第9図 平均到着間隔2秒の場合の第2階層における階床運転数

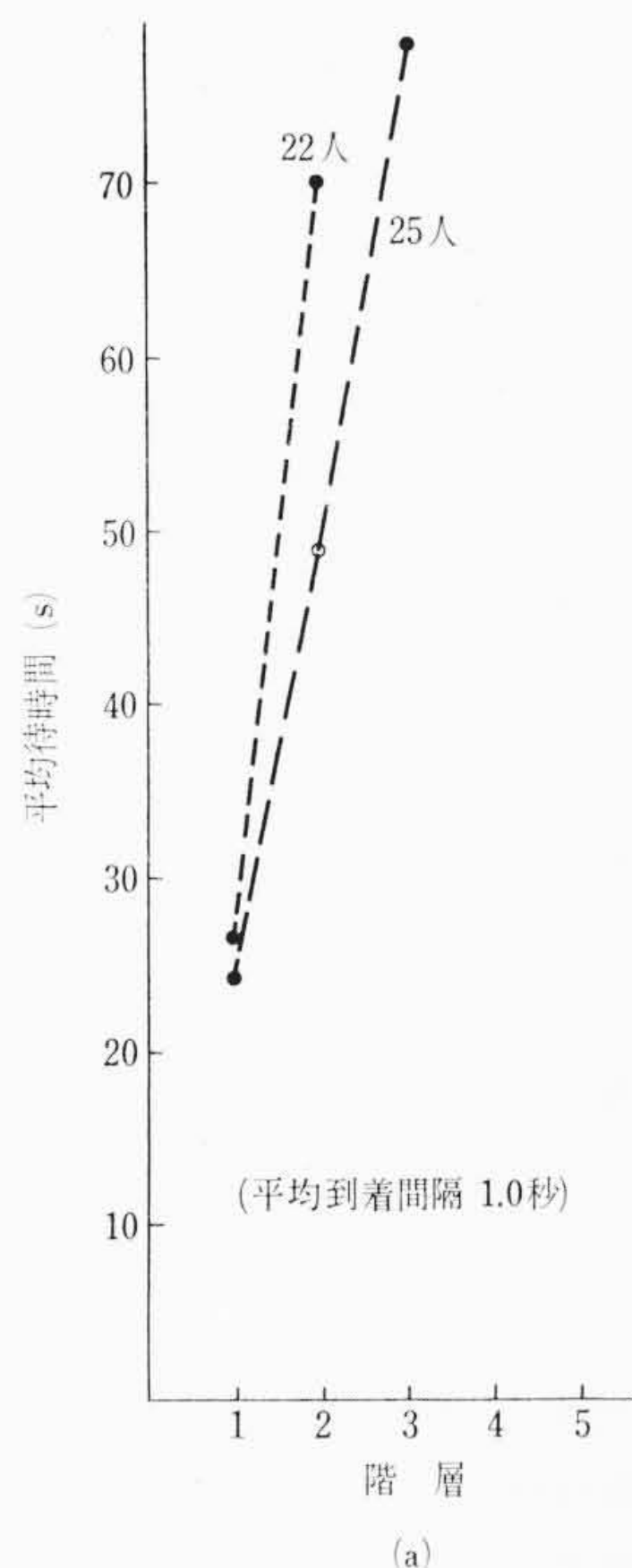


注: 一周時間とは1階を出発したエレベータが必要なサービスを終えて1階へ戻るまでの時間をいう。

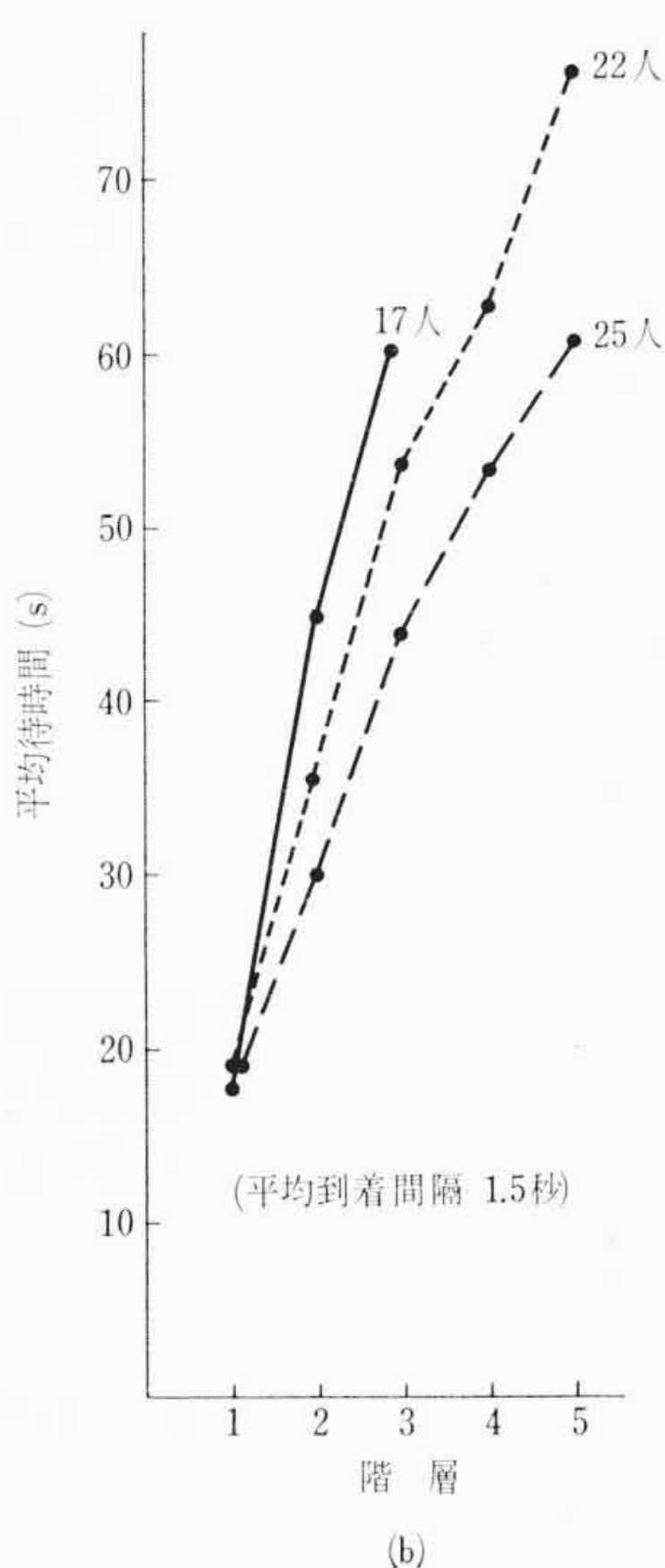
第10図 各階層の平均一周時間



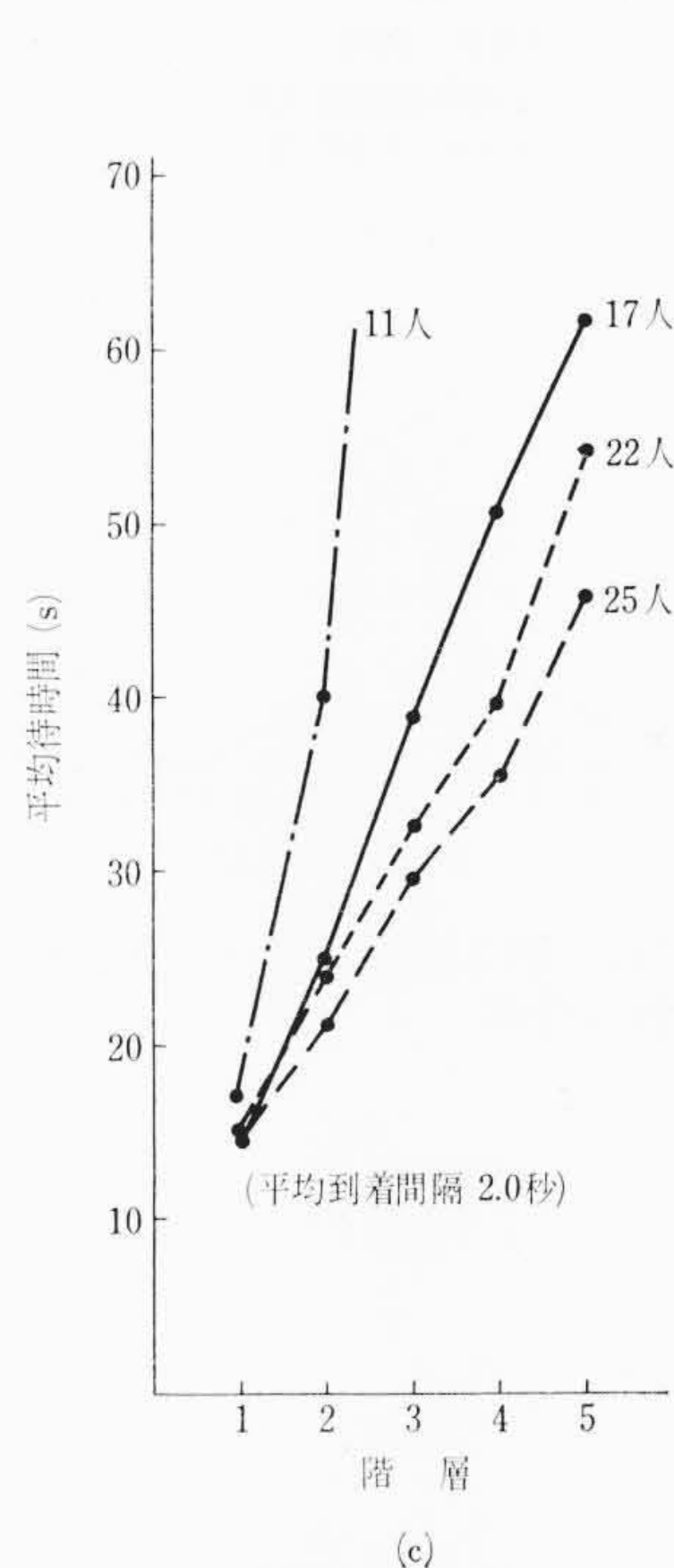
第11図 台数と平均待時間の関係



(a)



(b)



(c)

第12図 定員と平均待時間の関係

状態とほぼ同等であることを示している。また、同一条件で1バンク4台の普通運転の例を点線で示したが、第2階層以上のサービス状態は分割急行運転に比べて非常に悪く、一般に高階層用としてより多くの設置台数を必要とすることを明示している。

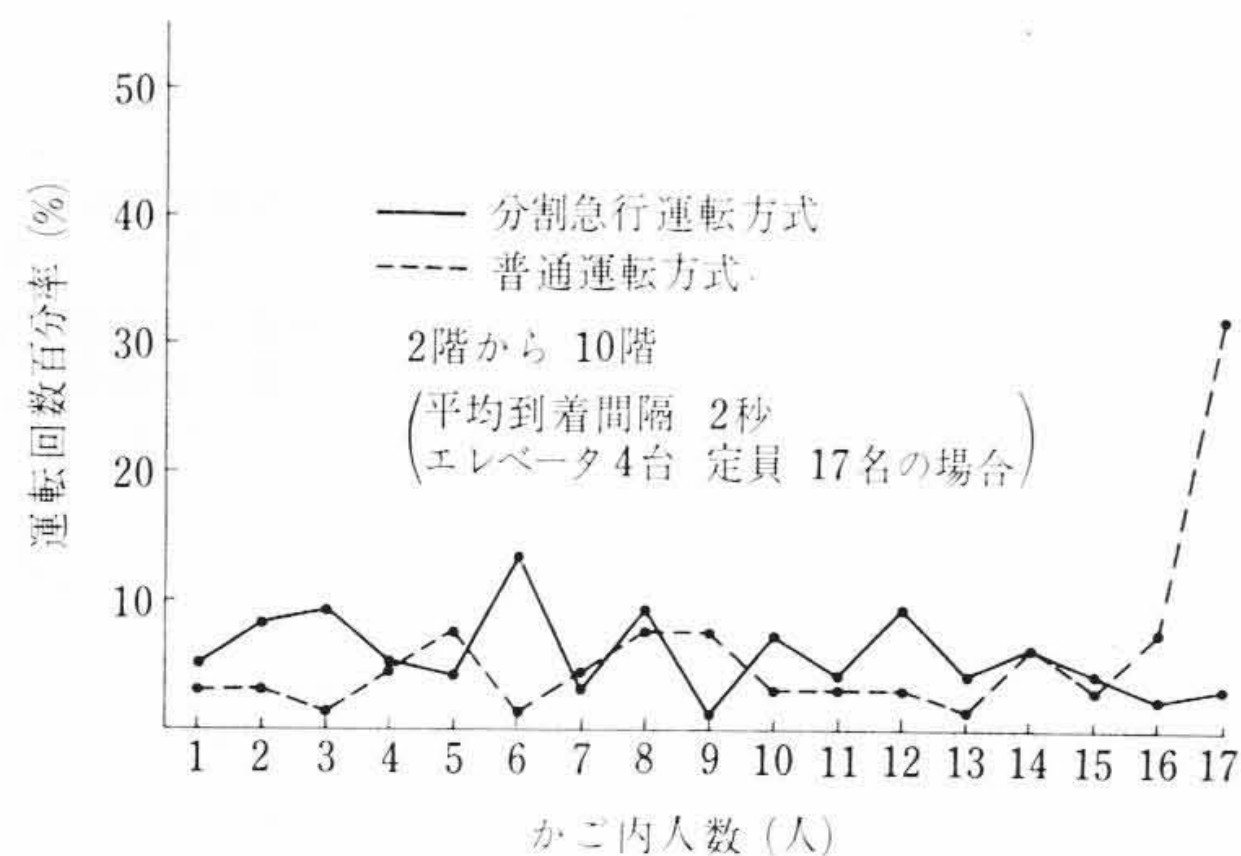
5.2 定 員

第12図(a)～(c)にかご内定員と乗客の平均到着間隔を変えた場合の平均待時間を調べてみた。平均到着間隔が1秒程度に極端に混雑すると、22名以下の定員では第2階層以上の高階層のサービス状態が非常に悪く、また、実際のピークに相当する1.5, 2秒の到着間隔の場合は(b), (c)図に示すとおり少なくとも22～25名程度に選ぶ必要がある。一方、かご内定員を大きくとり過ぎると、今回の計算に含まれていない乗客の乗り込みに関する問題が生ずるので、この点についてはさらに検討しなければならない。これらの運転内容を第13図(a)～(c)、第14図にかご内乗客数ごとの運転回数百

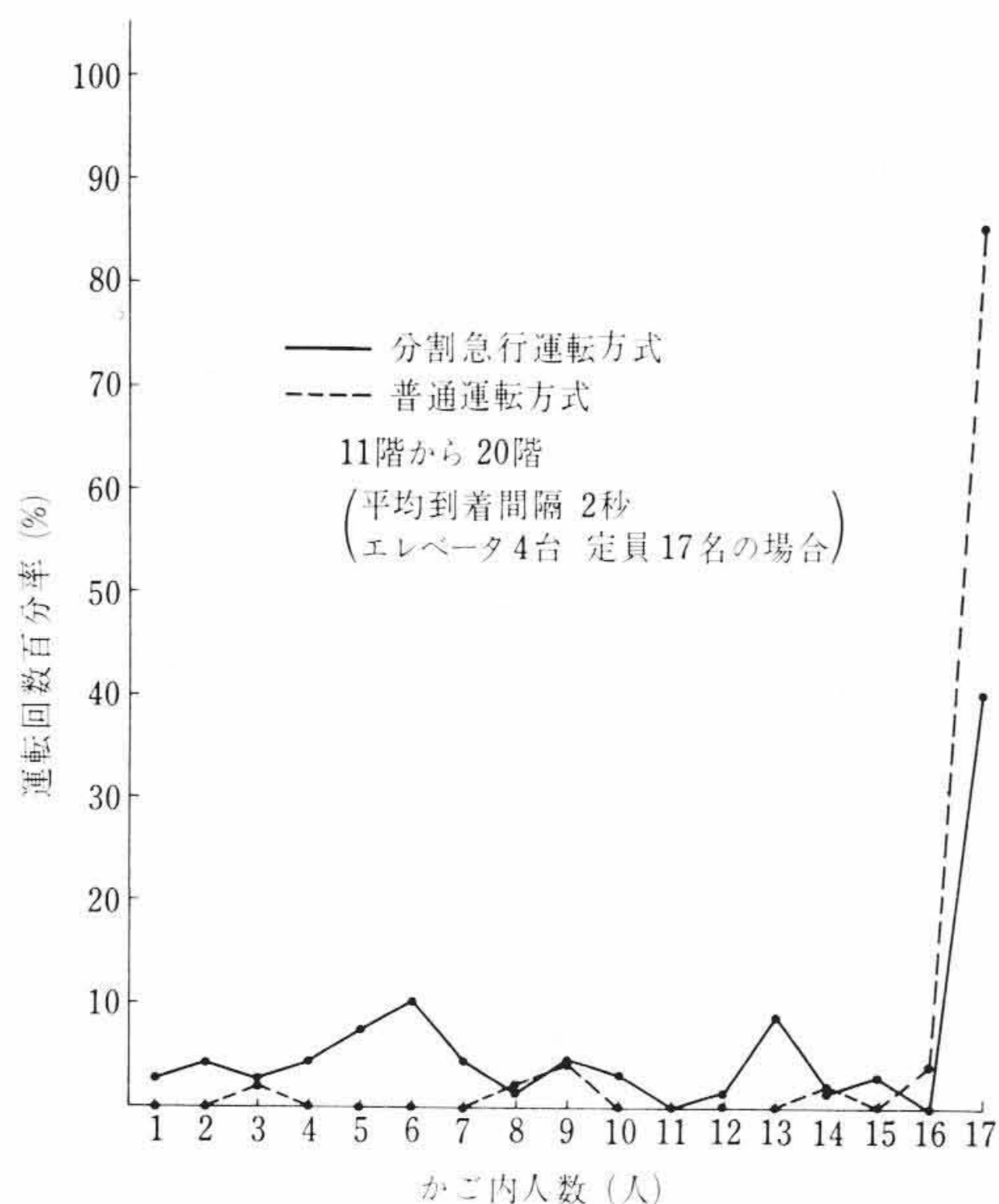
分率に関する代表階層として第1～3階層の例を示したが、普通運転、高階層サービスや定員が少ない場合は満員のため積み残される確率が高くなり、高階層ほどその影響が大きいことなどもわかった。

5.3 定 格 速 度

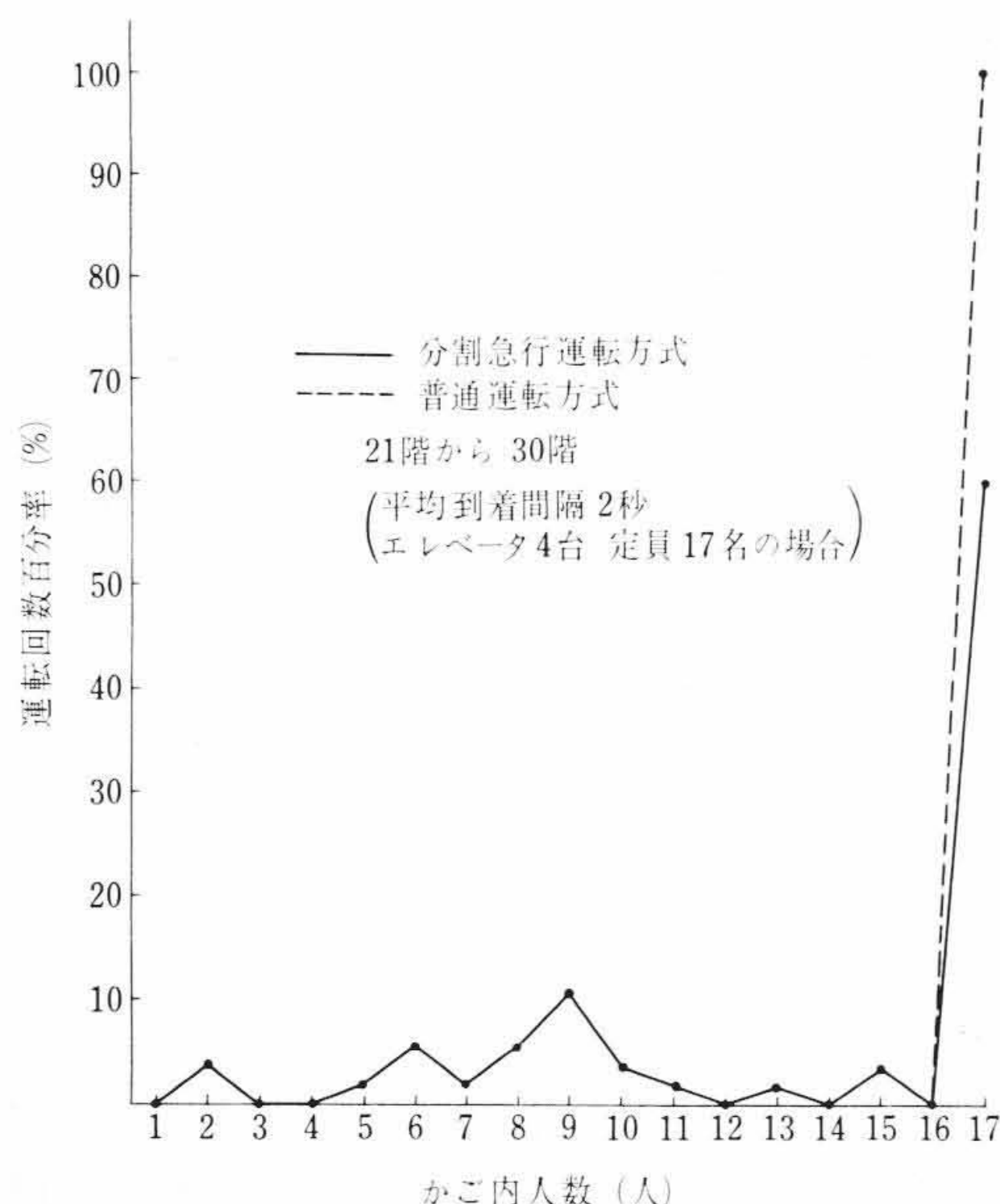
第15図に1バンク4台の場合と8台の場合をそれぞれ各階層ごとに種々の速度でサービスしたときの平均待時間を示した。出勤時における1階の平均待時間は、たとえ300 m/minの高速で分割急行運転を行なっても第5階層で61秒になる。これは、同じ到着分布の乗客を消化するために他の階層よりも高い階、すなわち40階程度の直通運転時間が加算されるからであって、今回のモデルビルのように高階層の負荷条件が低階層とまったく同じ場合は高速化とともに台数増加を特に必要とすることを示している。また、第2階層用は180 m/minよりも210または240 m/minに高速化したほう



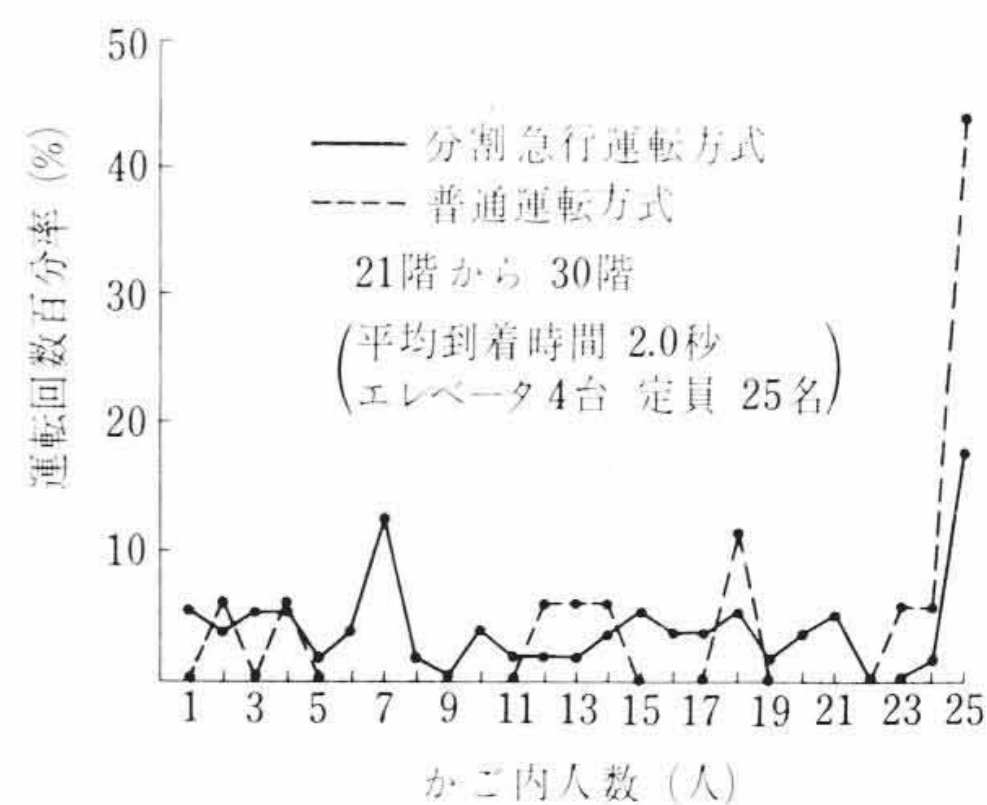
第 13 図(a) 第 1 階層における乗客数ごとの
運転回数百分率



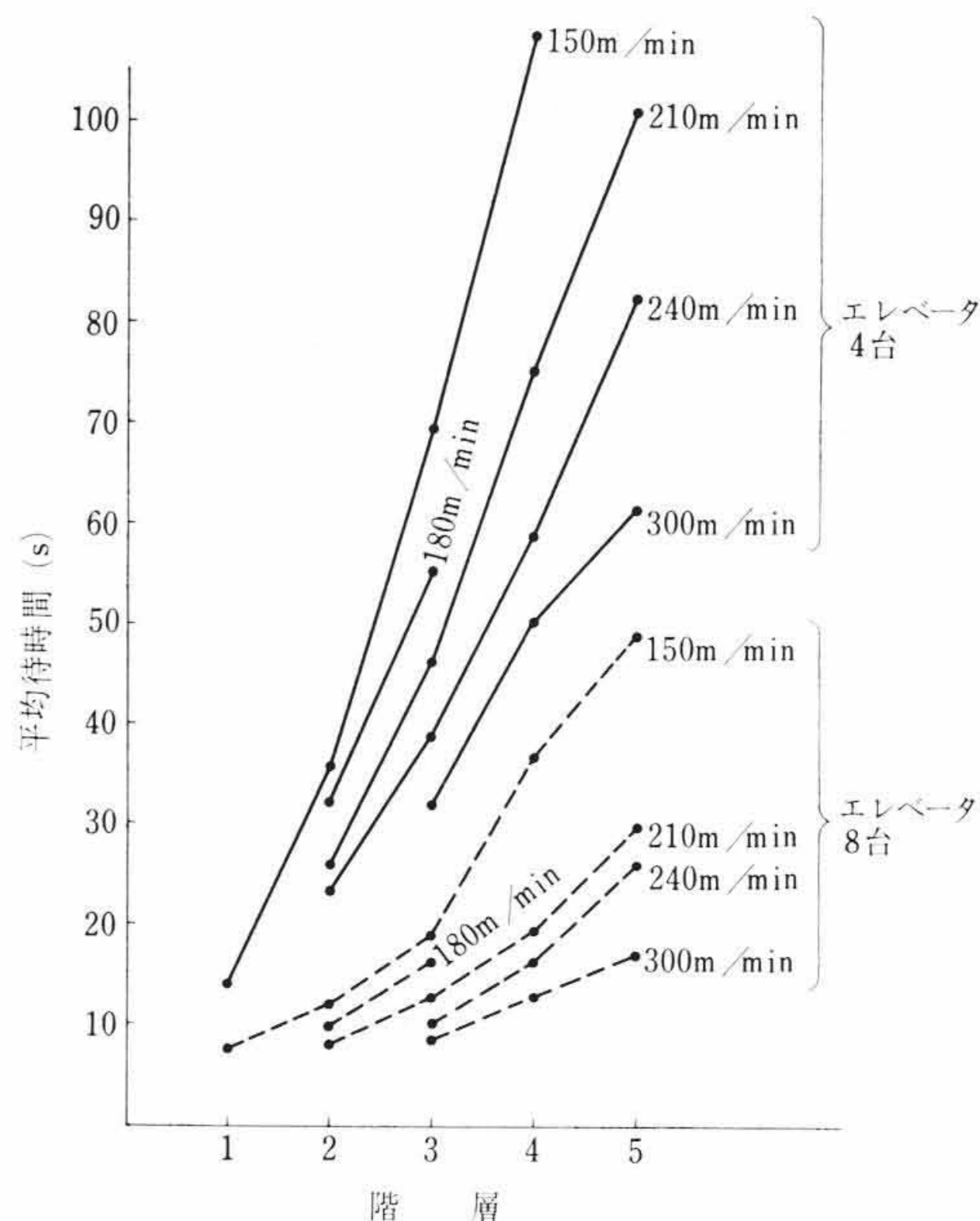
第 13 図(b) 第 2 階層における乗客数ごとの
運転回数百分率



第 13 図(c) 第 3 階層における乗客数ごとの
運転回数百分率



第 14 図 第 3 階層における乗客数ごとの
運転回数百分率



第 15 図 速度と平均待時間の関係

が効果が顕著であることや、現在わが国で行なわれている 30 階程度の超高層化計画では少なくとも 300 m/min の高速化が必要であることなども示している。

6. 結 言

現在、わが国でも 20 階以上の超高層化計画が具体的に進展しつつあるが、この超高層ビル内に設置されるエレベータ群はビル施設として中核的な機能を果たすものであり、当然、根本的な検討を加えて計画する必要がある。しかも、わが国ではアメリカに比べてビル運営上本質的な国情の違いがうかがえるから、エレベータ輸送能力に関して独自の検討を行なうべきである。したがって、今回、最も過密到着分布を予想される交通需要のビルを参考にしてモデルビルを作り、統計的手法を応用して分割急行運転の効果や超高層ビル用エレベータとして具備すべき基本的な設計上の二、三の項目について具体的に解析してみた。もちろん、実際上は種々の条件がこのほかにも複雑に関連するので、今後さらに超高層ビルにおける実態調査の結果を織り込み他のパターンとの関連性や望ましい設計条件などを引き続き検討する予定である。

参 考 文 献

- (1) 越智、犬塚ほか：日立評論 45, 1447 (昭 38-9)
- (2) 犬塚：日立評論 43, 1204 (昭 36-10)
- (3) 犬塚、渡部ほか：日立評論 46, 1438 (昭 39-9)