

エレベータ群の予測制御システム

— CIP/ICの開発 —

Forecasting Control System for Elevators — Development of CIP/IC System —

In multi-storied buildings which are increasing in number in major cities at a rapid pace, the role of elevators is becoming more and more important. Hitachi has recently developed a new automatic group supervisory control system, CIP/IC. This system has made it possible to equalize and curtail passengers' waiting time by 30% by way of its newly adopted floating service system and at the same time to indicate the service elevators at the call by passengers in the hall. In the computer simulation and field tests, this CIP/IC system, developed based on the theoretical research, proved to have achieved the expected performance.

弓仲武雄* Takeo Yuminaka

岩坂達夫* Tatsuo Iwasaka

1 緒 言

都市再開発に伴い新宿新都心などにおいては50階建ての超高層ビルの計画があいついでいるなど、より立体的な都市が出現し、ビルそのものが小都市化しつつある。これらのビルではエレベータが唯一の縦の交通機関としてビルの機能を左右するため、エレベータ待ち客の待ち時間短縮に代表される全自動群管理制御の追求およびエレベータ設備のプランニングなどエレベータ全自動群管理システムが重要視されてきている。⁽¹⁾

日立製作所はわが国初の超高層ビルである霞が関ビルをはじめ、各種ビルにエレベータ全自動群管理システムを納入した実績と、たゆみない研究開発により、これら外部情勢に対応したより高度で新しいエレベータ全自動群管理システムを開発した。

これは CIP/IC (Computerized Traffic Information Processing with IC) システムと称し、待ち時間短縮など定量的サービス向上とともに、待ち客に対する心理的サービスの飛躍的な向上を目標にしている。CIP/IC システムは世界で初めて実用化したエレベータの予測制御システムであり、新しく採用したフローティング・サービスによる「ホール待ち客の待ち時間短縮と均一化」など迅速なサービスおよび交通需要をリアルタイムで総合的に判断したサービス・エレベータの予報方式「ホール呼び登録時にサービス・エレベータの即時表示」を制御の主たるポイントにしている。

この CIP/IC システムはすでに東京・代々木のNHK放送センタービルに第1号機を納入し、現在好調に稼働しているほか、多数の納入が決定している。

2 エレベータの待ち現象の理論解析

2.1 エレベータ運転状態の解明

エレベータの速度、減速距離から停止可能なホール呼びに順次応答するエレベータの運行状態を解明すると次のようになる。

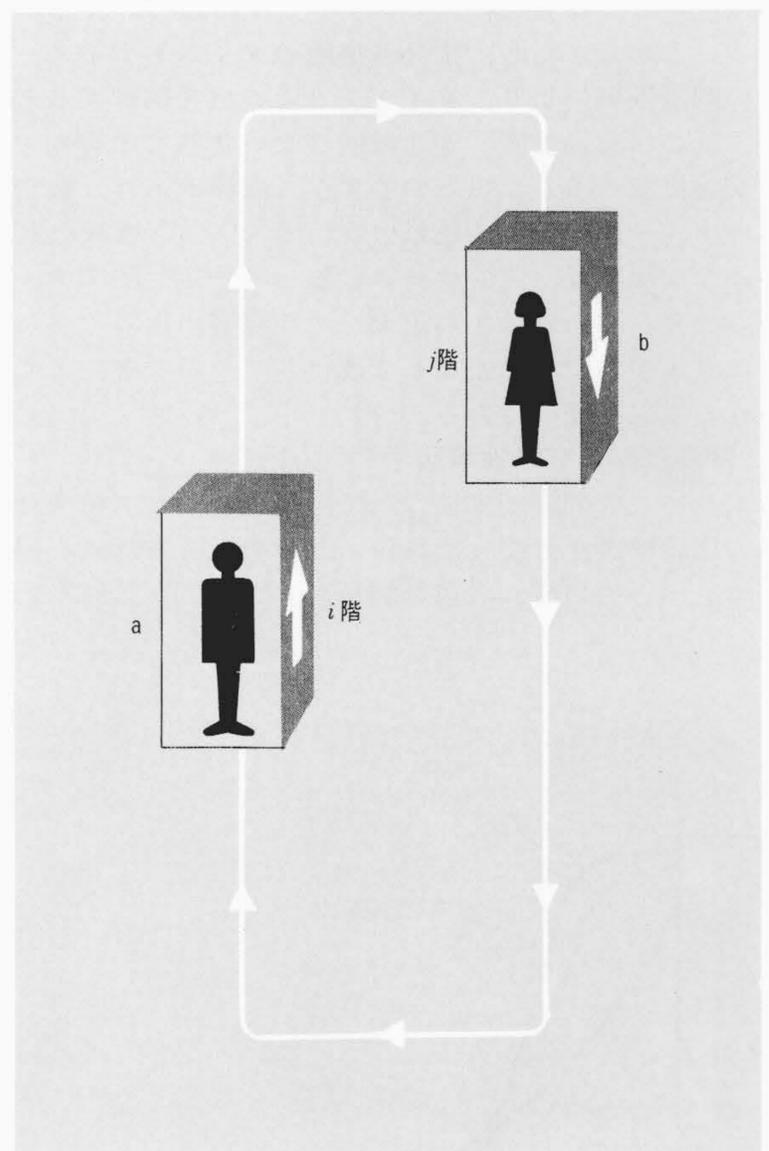


図1 「ダンゴ」運転説明図 エレベータ速度、減速距離より停止可能な呼びに順次応答する制御方式は出発基準階でいかにタイミングよく制御しても、「ダンゴ」運転が生ずる。

Fig. 1 Explanatory Figure of Bunching

* 日立製作所水戸工場

エレベータが進行方向の次の階床に停止する確率は、その階に現在待ち客がいるか否かに依存する。なお、ある階床の待ち客の平均到着率は全階床を通じて λ とし、ポアソン分布に従うものとする。

(1) 説明を簡単にするために、**図1**のようなエレベータ2台のモデルを考え、 i 階にいるエレベータ a の l 階の通過時刻を t_i^a 、 j 階にいるエレベータ b の k 階の通過時刻を t_j^b とすれば($l:i+1 \sim i, j:j+1 \sim j$)、エレベータ a, b が $(i+1), (j+1)$ 階に停止する確率 Pa および Pb は、

$$Pa = 1 - e^{-\lambda(t_{i+1}^a - t_i^a)} \dots\dots\dots(1)$$

$$Pb = 1 - e^{-\lambda(t_{j+1}^b - t_j^b)} \dots\dots\dots(2)$$

となる。エレベータは呼びがあればその階に停止し呼びがなければその階を通過するため、エレベータが等間隔で運行しているような状態はほとんどなく、**図**のような状態が一般的である。この状態では(3)式が成立する。

$$t_{j+1}^b - t_j^b > t_{i+1}^a - t_i^a \dots\dots\dots(3)$$

エレベータ a, b の $(i+1), (j+1)$ 階の停止確率の差 P は、

$$P = Pb - Pa = e^{-\lambda(t_{i+1}^a - t_i^a)} - e^{-\lambda(t_{j+1}^b - t_j^b)} \dots\dots\dots(4)$$

となり、(3)、(4)式から $P > 0$ となる。すなわち、エレベータ b の停止確率が大きく、これが累積されると最終的にはエレベータ a が b に追いつくことになる。

(2) 以上のことは台数の多いエレベータ群についても同様である。これらに対し、出発基準階のタイム・ディスパッチなどの間隔制御により、タイミングよく出発制御する方式はホール呼び(交通需要)が比較的少ない状態では有効であるが、交通需要が多くなるとおのずから限界があり、数台のエレベータが一団となって運転するような「ダンゴ」運転が生ずる。このような現象は、エレベータに限らず一定間隔でターミナルから出発しているはずの定期バスが乗客の込みぐあいによってはじゅずつなぎに連なって運行しているなど、よく見受けられる現象と同様である。

2.2 間隔制御の有効性検討⁽²⁾⁽³⁾

エレベータの間隔制御について、集団サービス待合せプロセスの理論解析を行なったJaiswall形の微分方程式を展開して、エレベータの待ち現象を解析し、その有効性を立証した。

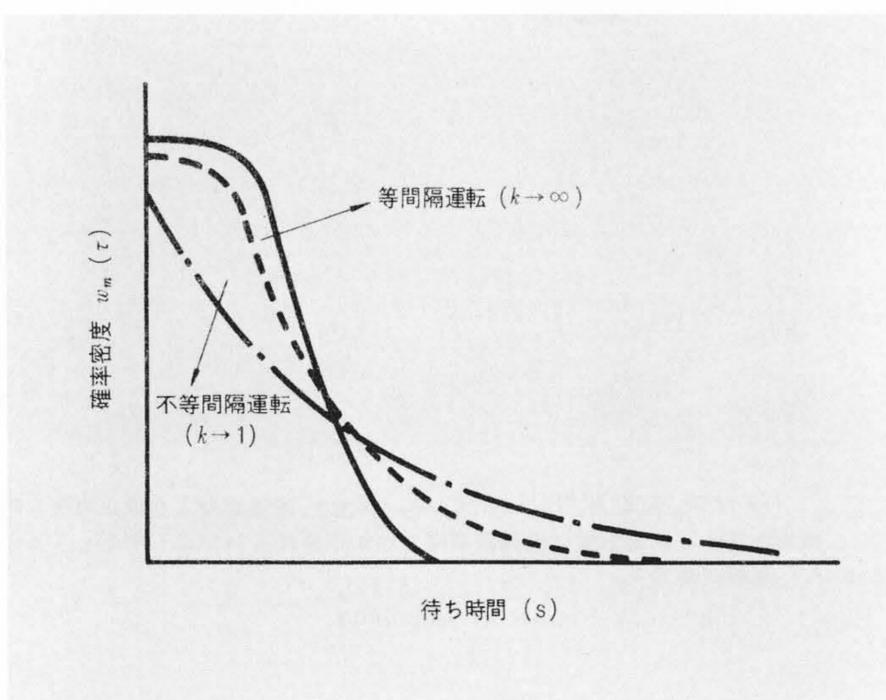


図2 エレベータ待ち現象の理論解析結果 エレベータを等間隔に運転するとホール待ち客の待ち時間が短縮、かつ均一になる。

Fig. 2 Example of Queuing Process for Elevator

すなわち、エレベータ到着間隔の確率密度関数 $x(t)$ と、乗客の待ち時間の確率密度関数 $Wm(\tau)$ との関係は、

$$Wm(\tau) = \frac{1}{M} \int_{\tau}^{\infty} x(t) \cdot dt \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 M :エレベータ平均到着間隔

τ :乗客の平均到着率

で求められることがわかった。

いま、具体的エレベータ到着間隔の密度関数を $x(t)$ として、平均値 $M = k/\mu$ の k アーラン分布をするとすれば、

$$x(t) = \frac{(\mu t)^{k-1} \cdot e^{-\mu t}}{(k-1)!} \cdot \mu \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 k :アーラン分布位相数

を(5)式に代入して、エレベータの平均到着間隔と、乗客の待ち時間との関係が得られる。これを定性的に解析してその要点をまとめると、**図2**に示すようにエレベータ運転が時間的に等間隔運転に近づくほど、

(1) 待ち客の平均待時間が短くなり、

(2) 長待ち呼び発生確率が減少する。

ことがわかる。したがって、有効な間隔制御、すなわち時間的等間隔運転をすれば良好なサービスができる。

3 CIP/ICシステムとその特長

以上のように理論的裏付けをはじめとした、システムズ・アプローチにより開発したCIP/ICシステムは、予測制御を中心に各種制御を採用している。以下、本システムの概要とその特長について述べる。

3.1 予測制御の概要

各エレベータの位置、運転状態などエレベータ運行情報からエレベータの位置間隔をリアルタイムで検出し、これと各エレベータのかご呼び、割り当てられたホール呼びなどの交通情報から停止呼び数を検出する。これらにより、エレベータの位置間隔と停止呼び数を関係づけるなど総合的に判断してエレベータ相互の時間間隔を演算する。すなわち、エレベータがどのような位置にあってもエレベータ相互の時間間隔をリアルタイムで監視している。

このように演算した時間間隔は、平均停止呼び数などを考慮した基準間隔と比較し、時間間隔が基準間隔より小さくなると、その割合に応じて飛び越し信号を発生し、エレベータごとにサービス・ゾーンを決定する。このサービス・ゾーンは固定のものではなく、エレベータの運行状態、交通需要などにより時々刻々変化し、非常に柔軟性に富んでいる。また、複数のエレベータが同一階をサービス・ゾーンとして受け持つことはない。

3.2 フローティング・サービス

このように、サービス・ゾーンはホール呼びが生じることに備えて、エレベータ群としてサービスに最も好都合なエレベータをあらかじめ階床ごとに割り当てているものである。したがって、このサービス・ゾーンを決定することが予測制御であり、生じたホール呼びにエレベータが選択的に応答し、迅速にサービスすることがフローティング・サービスである。

図3はエレベータ運行状態の一断面であり、この図によりフローティング・サービスを簡単に説明する。**同図(a)**はリアルタイムで総合的に判断したエレベータA、Bの時間間隔が接近した状態を示す。この時間間隔が基準間隔より小さいと、その差に応じて飛び越し信号を発生し、飛び越し位置を前方にシフトする。これにより、サービス・ゾーンは**(b)**のように

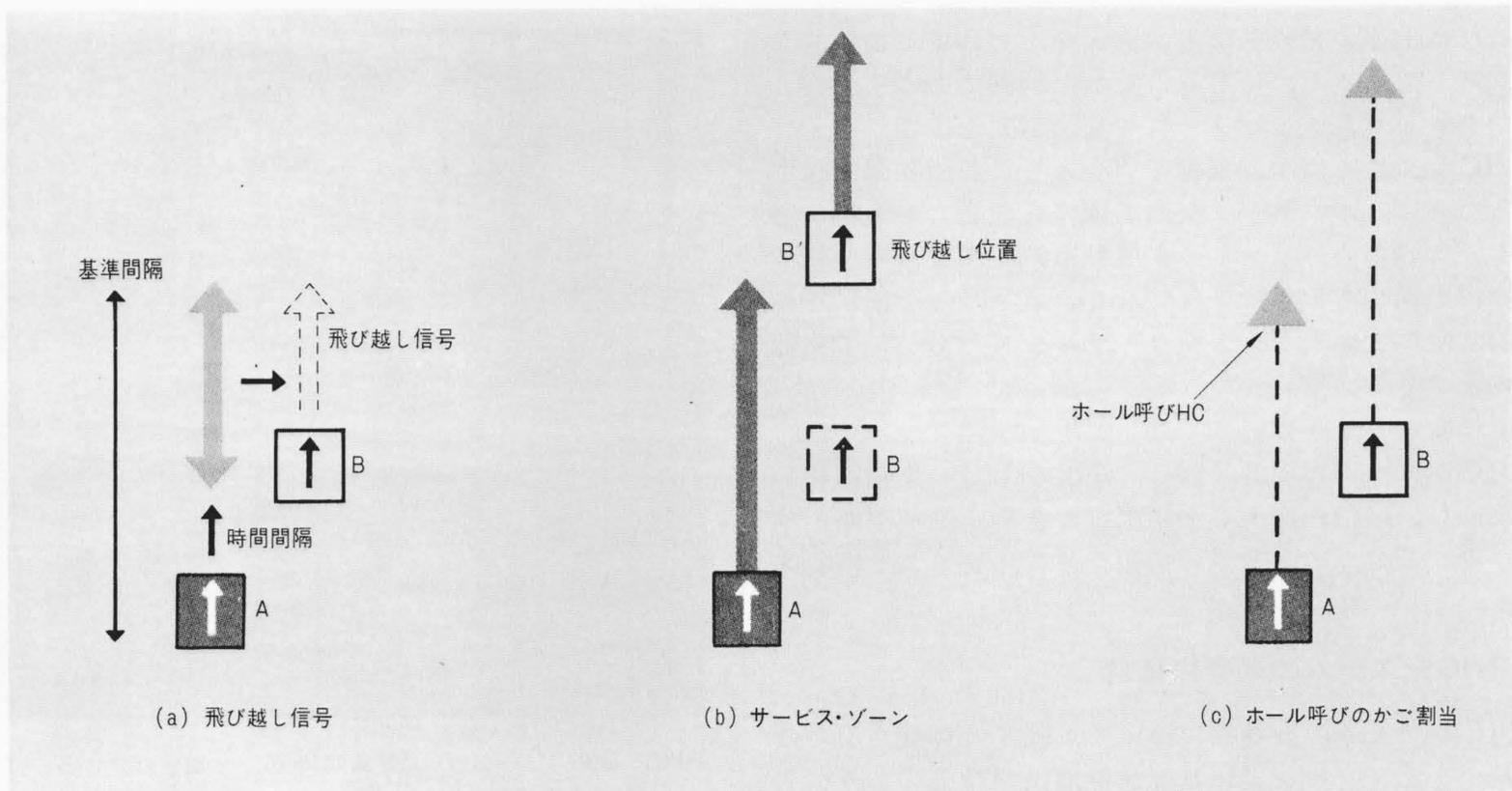


図3 CIP/ICシステム予測制御具体例 エレベータA, Bの時間間隔が小さくなると、基準間隔と比較し、その差に応じて飛び越し信号を発生する(a)。これにより飛び越し位置B'を合成し、サービス・ゾーンを決定する(b)。ホール呼びHCが生ずるとその階をサービス・ゾーンとするエレベータAが案内灯を点灯し、サービスする。

Fig. 3 Example of Forecasting Control in CIP/IC System

なる。この状態で(c)のようなホール呼びHCが生ずると、その階をサービス・ゾーンとするエレベータAがサービス予報灯を点灯し、迅速にサービスする。エレベータBはさらに前方の呼びをサービスするためにホール呼びHCを通過する。このように、交通需要を総合的に判断した予測制御を採り入れてホール呼び応答を制御し、エレベータ群全体として迅速にサービスするので、ホール待ち客に対するサービスは均一かつ短縮することができる。

3.3 サービス予報灯点灯

ホール待ち客にサービス・エレベータを表示し、客を誘導する手段として、エレベータの到着数秒前に動作する到着灯が一般的である。したがって、ホール待ち客は常にエレベータを注視していなければならない、到着灯が動作するとそのエレベータ出入口に急ぐ必要があるなど待ち客の負担も少なくなかった。

これに対してCIP/ICシステムは、ホール呼び登録時にサービス・エレベータを即時に予報し、ホール待ち客をそのエレベータ出入口に誘導するサービス予報方式を採用している。このため、ホール待ち客はサービス・エレベータを捜す必要がないばかりでなく、たとえば、待ち客が荷物を持っている場合、あるいは不慣れた乗客の場合などには特に有効である。また、ホール待ち客はあたかも列車の座席予約システムのように、サービス表示されたエレベータを安心して待つことができる。なお、エレベータが停止態勢になると従来と同様、チャイムおよび到着灯を動作させ、エレベータの到着を報知する。

このように、CIP/ICシステムはホール呼び登録時、エレベータの応答を情報としてフィード・バックする人間とエレベータの高度なマン・マシン・システムを構成し、ホール待ち客の心理的サービスを飛躍的に向上できる画期的なものである。

図4は以上、説明したCIP/ICシステムの制御のフローを

示したものである。

3.4 その他の制御と特長

CIP/ICシステムは上述のような制御のほかに次のような各種の制御を採用している。

(1) サービス完了時間の短縮。

上記のようにエレベータごとにホール呼びを割り当てるため、エレベータは割り当てられた呼びにのみサービスすればよい。したがって、各エレベータのサービス分担が均一なこととあいまって、ホール待ち客がホール呼びを登録してから目的階に達するまでのサービス完了時間が大幅に短縮できる。

(2) 均一なサービス

ホール呼び登録と同時にサービス・エレベータを予報するため、特定のエレベータにサービス分担がかたよらないようにサービス分担を制御できる。したがって、フローティング・サービスとあいまってホール待ち客の待ち時間が均一になり、短縮する。

(3) もよりのエレベータが速応

上述のような制御のほか、常に最短の待ち時間で待ち客サービスを行なうようにエレベータを分散制御する。呼びが間欠的に生ずる閑散時には、エレベータをビル出入口階以外の数個所に待機させ、ホール呼びが生ずると、ホール呼びの位置および方向などにより、もよりのエレベータが迅速にサービスする。

(4) 優先サービスで長待ち呼びの解消

昼食時、退勤時など混雑時には、エレベータの交通需要処理能力の点から長待ち呼びが一時的に発生することがある。このため、ホール呼びの継続時間を直接監視し、優先サービスして長待ち呼びを早期に解消する。

(5) エレベータの効率的制御

たとえば、出発基準階では中間階に比べて優先したサービスをしながら乗客出入りに必要な停止時間で出発するなど、効率的な制御を行ない、エレベータ群全体でサービス向上を

図る。これは上述のフローティング・サービスなど積極的な制御を採用しているために可能になった制御である。

(6) シンクロ・マルチ・パターンで交通需要を処理

CIP/ICシステムは予測制御を中心とした各種制御を採用しているために、エレベータ交通需要の処理能力が大幅に増強される。このため、エレベータ運転系統、すなわち運転パターンは出退勤時あるいは昼食時などの混雑時とそれ以外の平常、閑散時に大別したシンクロ・マルチ・パターンで交通需要を処理できる。

(7) 高信頼度のIC頭脳

CIP/ICシステムの制御頭脳は、高度なIC（集積回路）技術を駆使し、高信頼度ICを使用した全静止論理回路で構成している。このため、多量の情報をリアルタイムで演算処理できる。

4 CIP/ICシステムの効果の確認

CIP/ICシステムの有効性について、電子計算機を用いたシステム・シミュレーションおよび現地試験結果により検討する。

4.1 シミュレーション

超高層ビル計画上非常に重要な要因となるエレベータ設備はすべてシミュレーションにより、エレベータ台数の決定および平常時の待ち時間を計算し、サービス状態の良否を確認している。このシミュレーション結果により、CIP/ICシス

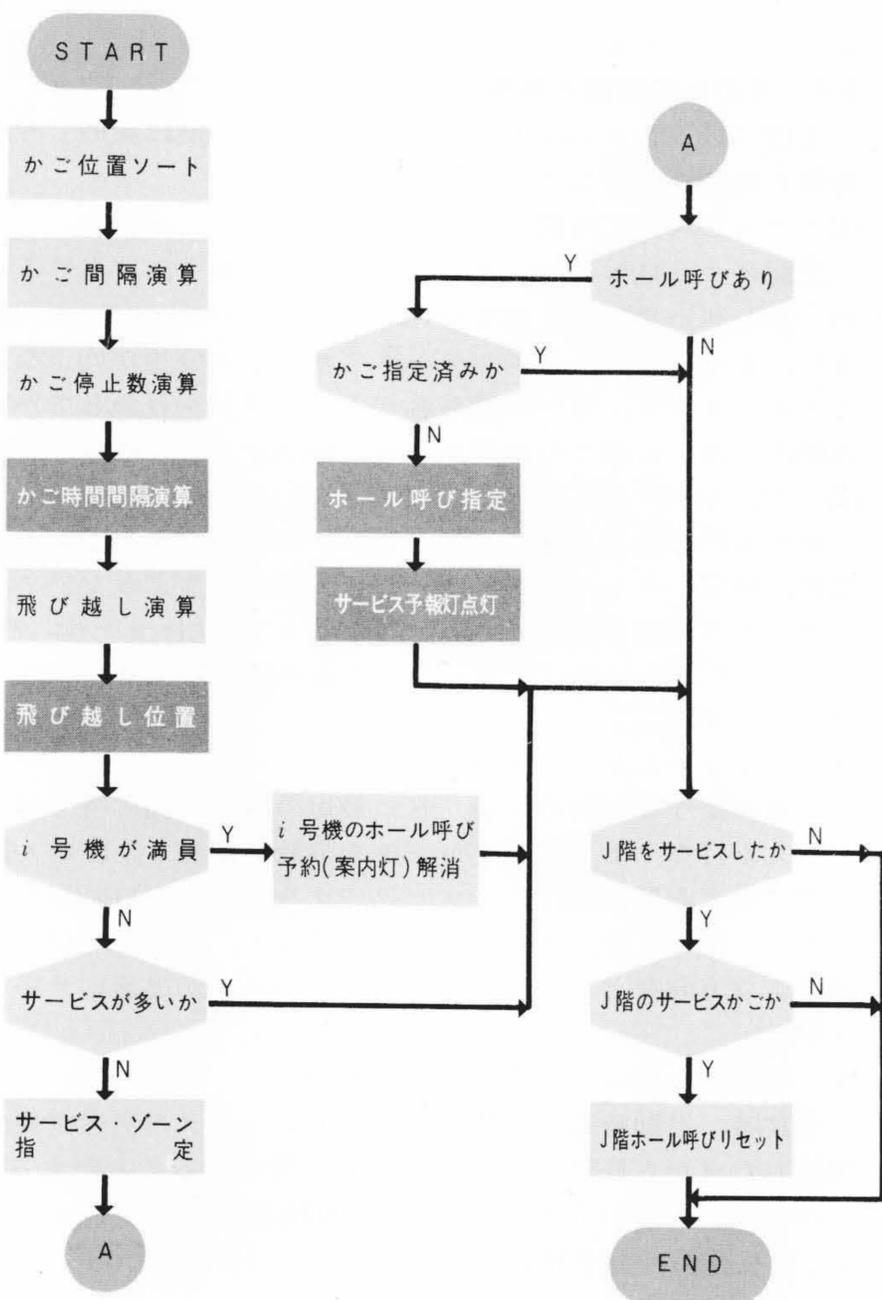


図4 CIP/ICシステム制御フロー 制御フローの詳細を示す。
Fig. 4 Flow Chart of the Control in CIP/IC System

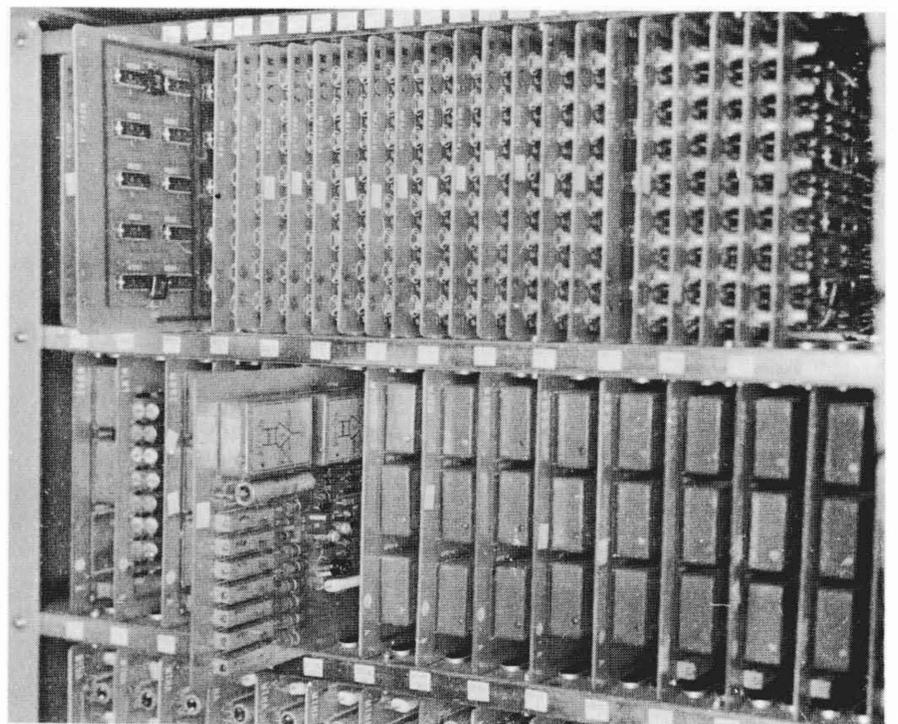


図5 CIP/ICシステム演算処理部 高信頼度ICによりCIP/ICシステムの頭脳部を構成している。

Fig. 5 Operation and Arithmetic Unit in CIP/IC System

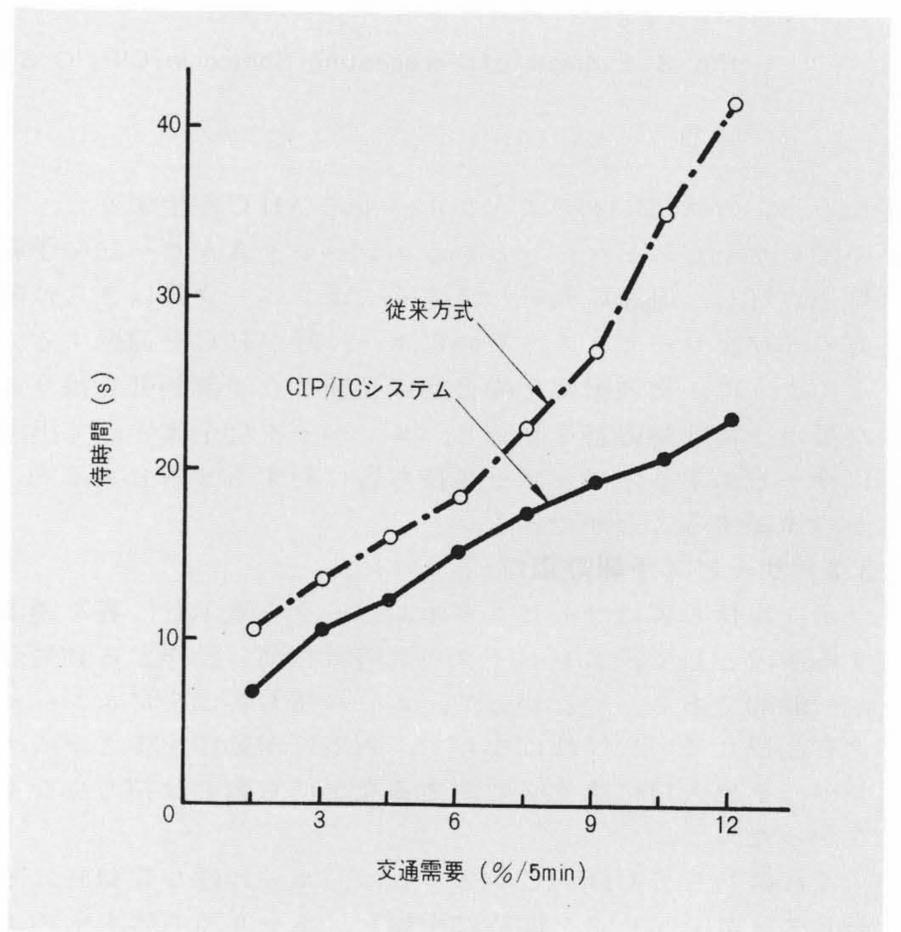


図6 平均待ち時間(シミュレーション結果) 交通需要が混雑してくると、CIP/ICシステムのフローティング・サービスが効果を発揮し、待ち時間が短縮する。

Fig. 6 Average Waiting Time (Result of Simulation)

テムと従来方式を比較検討する。なお、シミュレーションに使用するプログラムHIESP-IVについては別稿を参照されたい。シミュレーション設定条件のおもなものを表1に示す。図6～9はシミュレーションの結果を示すものである。

(1) 平均待ち時間(図6)は交通需要が混雑してくるとCIP/ICシステムと従来方式との間にかなりの差が生ずる。これは、CIP/ICシステムのフローティング・サービスが有効に動作し、効果を発揮するためである。

(2) ホール待ち客の待ち時間が60秒以上の長待ち確率(図7)

表1 シミュレーション条件 エレベータ・シミュレーションプログラム(HIESP-IV)によるシミュレーション解析条件を示す。これらの条件は、一般的なビル諸元を用いた。

Table 1 Simulation Specification

項目	設定値
エレベータ速度	150m/min
定員	17人
エレベータ台数	6台
サービス階床	13(1~13)
ビル収容人員	200人/階

はCIP/ICシステムでは激減している。

(3) 交通需要9%/5minにおける待ち時間の度数分布(図8)において、CIP/ICシステムは従来方式よりも待ち時間の短い割合が多く、待ち時間の長い割合 たとえば、60秒以上の長待ち確率が従来の13.4%から2.7%へ大幅に少なくなっている。これは待ち時間が短く、その分布が均一であることを示し、図2の理論解析結果を裏付けている。

(4) エレベータ・サービスの定量的評価として、待ち時間が短いこととともに、サービス完了時間が短いことも重要な要因である。このサービス完了時間は実測が困難であるため、シミュレーション結果の一評価要素として用いている。

シミュレーションによるサービス完了時間(図9)は全交通需要範囲においてCIP/ICシステムが20~30%短縮している。

4.2 実地試験

CIP/ICシステムはハード各部の各種過酷試験および現地

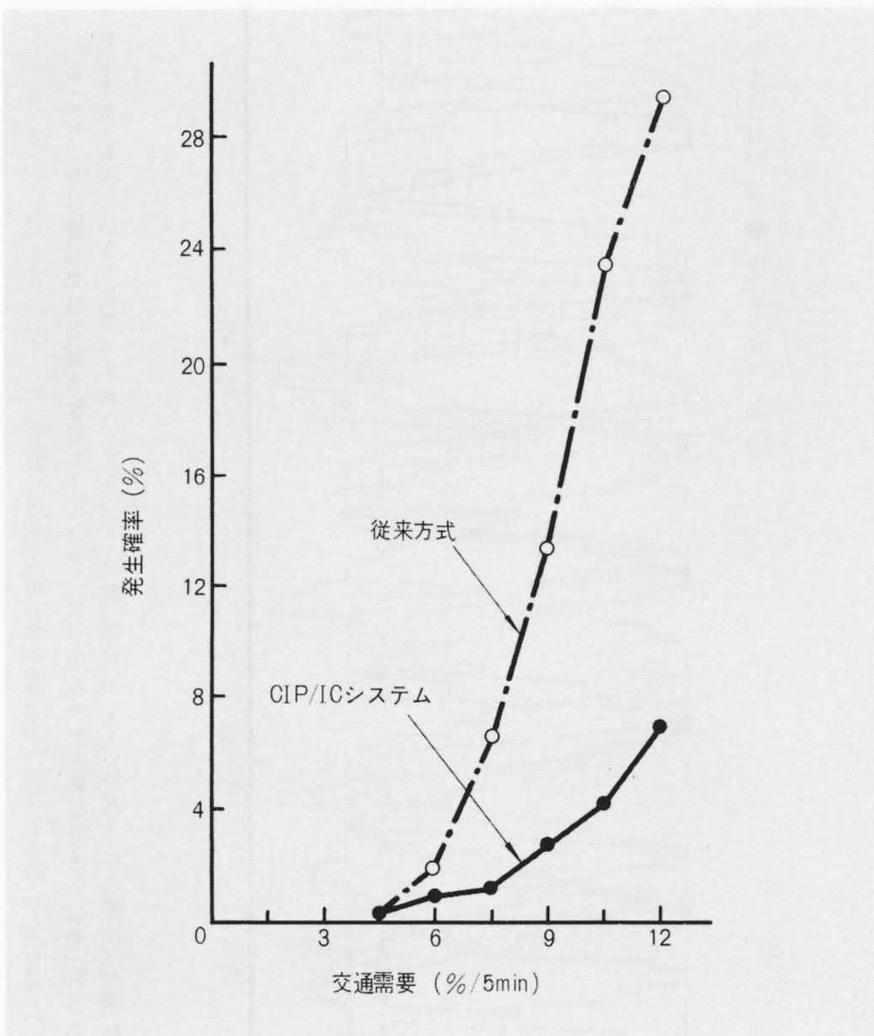


図7 長待ち確率 $Pr(>60)$, (シミュレーション結果) CIP/ICシステムは60秒以上の長待ち呼びが激減する。

Fig. 7 Probability of Long Waiting Time $Pr(>60)$, (Result of Simulation)

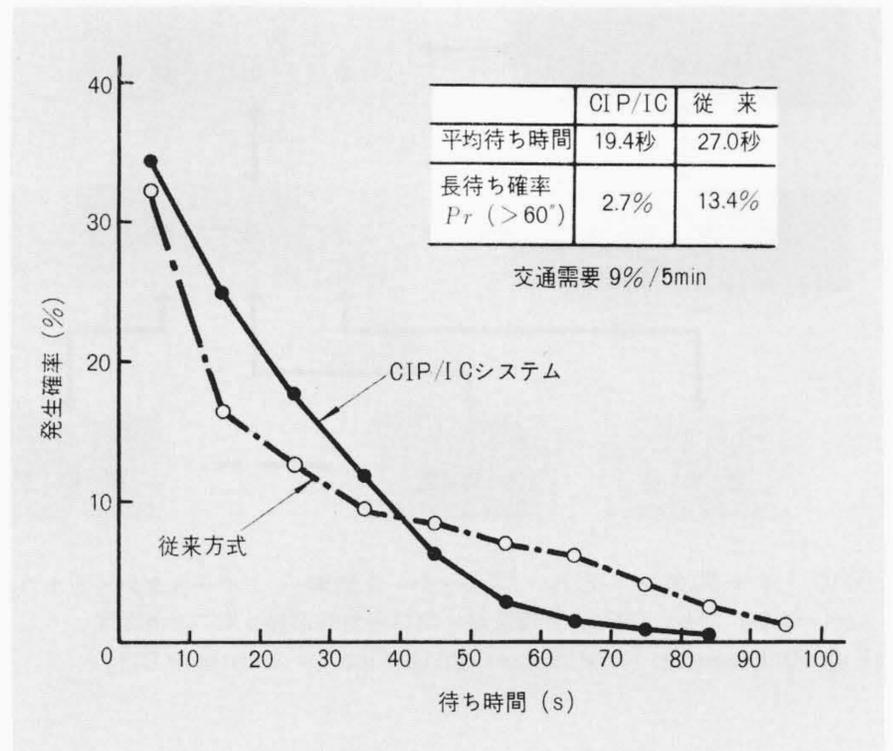


図8 待ち時間度数分布(シミュレーション結果) CIP/ICシステムは従来方式よりも、待ち時間の短い割合が多く、長い割合が少ない。これは待ち時間が短く、均一であることを示している。

Fig. 8 Distribution of Waiting Time (Result of Simulation)

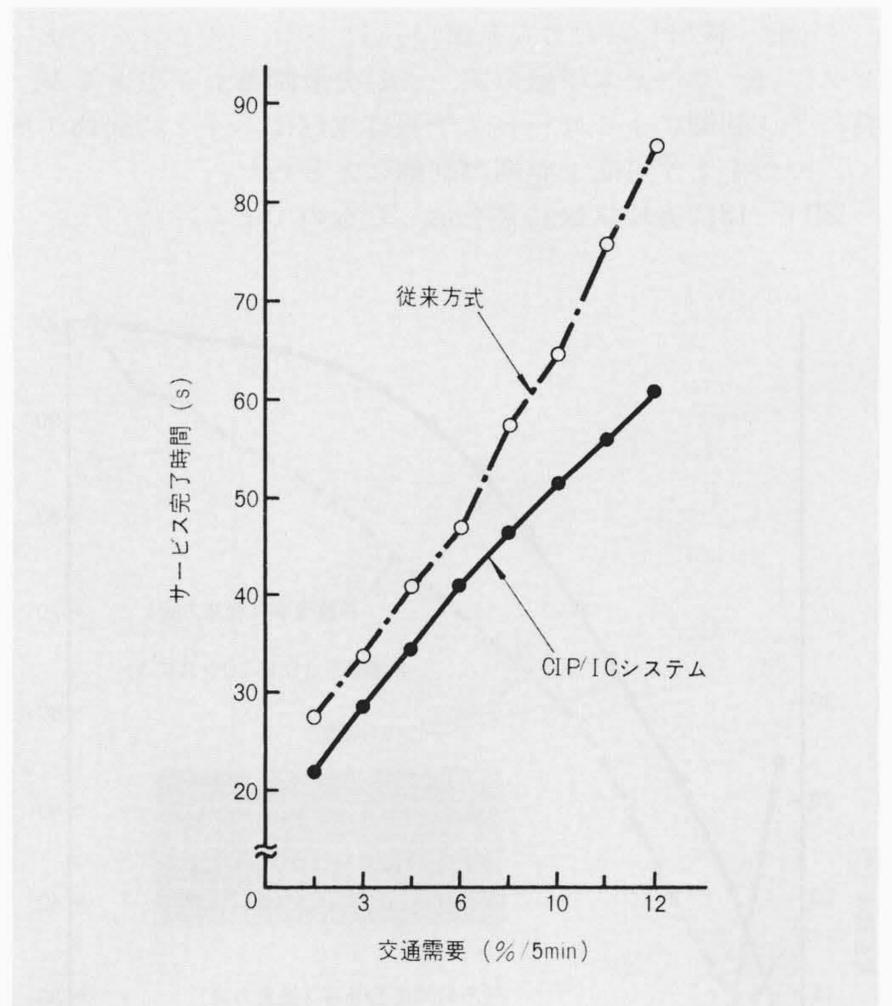


図9 平均サービス完了時間(シミュレーション結果) CIP/ICシステムは従来方式より20~30%短縮する。

Fig. 9 Average Overall Service Time (Result of Simulation)

の稼動状態と同様な等価試験を行ないシステム・チェックを行なうとともに、東京・日立愛宕別館(以下、イースタン・ビルと別称する)に納入し、実機により性態を確認した。以下、実地試験結果について述べる。

イースタン・ビルは約10年前に完工したが、その後、ビル在館人員が約20%増加したなどの理由によりエレベータ処理

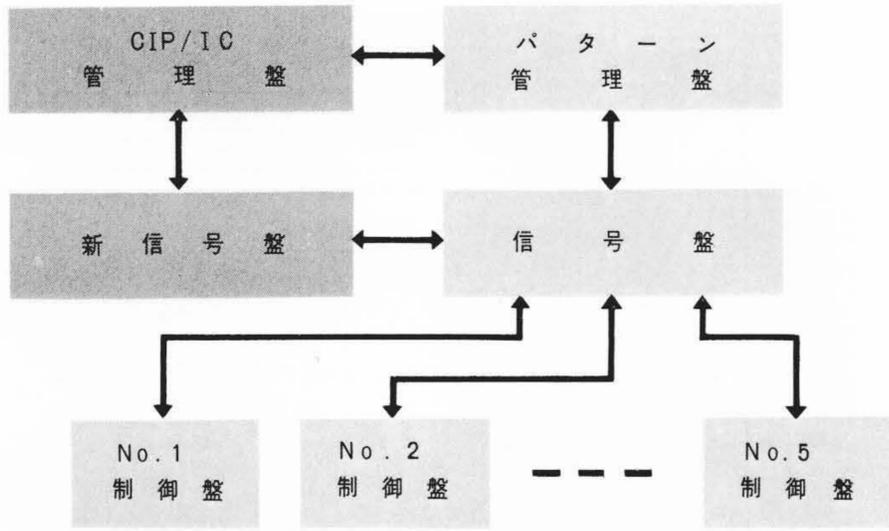


図10 イースタン・ビル・エレベータ概略 イースタン・ビルのエレベータ群に対し、CIP/IC管理盤および信号盤を追加したことを示す。
Fig. 10 Elevator Reorganization Outline of Eastern Bldg.

能力が不足したため処理能力増強などを目的に、CIP/ICシステムを設備したものである。したがって、エレベータ制御機器のハード面からの制約も含まれているため、CIP/ICシステムの全制御を織り込むことはできなかった。図10には、今回のエレベータシステムの概略を示した。

今回、採用したおもな制御は、(i)フローティング・サービス、(ii)サービス予報方式、(iii)分散制御などであるが、特に予測制御によるサービス予報灯点灯はハード的制約が多く、やむをえず可能な範囲の制御にとどめた。

図11～13は実地試験結果を示したものである。

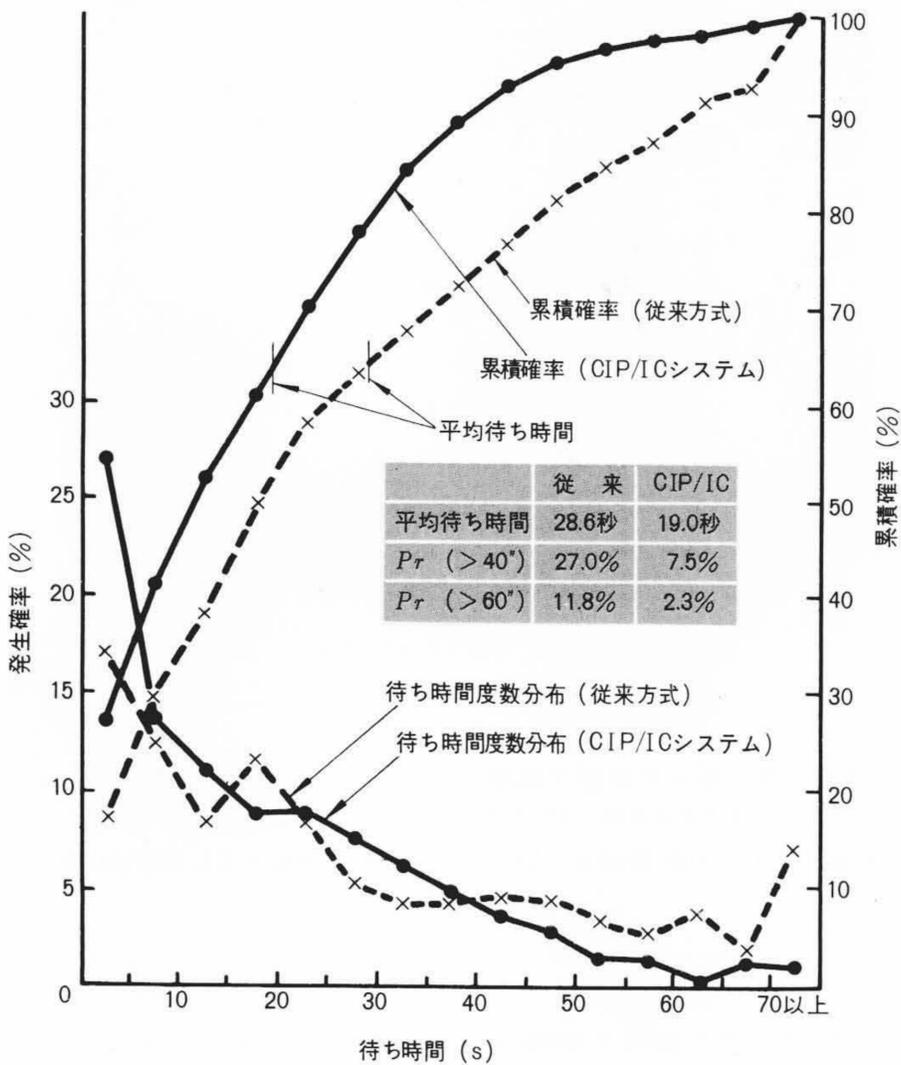


図11 待ち時間度数分布(イースタン・ビル実測) CIP/ICシステムは従来方式より平均待ち時間が33%減少し、60秒以上の長待ち確率も1/5になった。統計的検定の結果、信頼度99.9%においてCIP/ICシステムが有効であることが判明した。

Fig. 12 Distribution of Waiting Time (Survey at Eastern Bldg.)

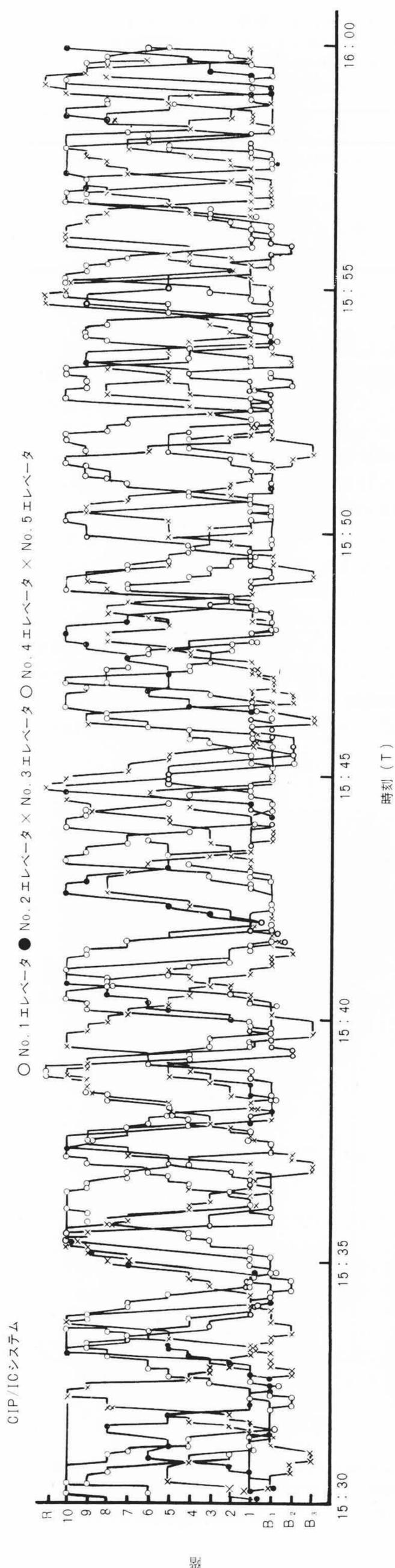


図12 エレベータ運転曲線(イースタン・ビル実測) CIP/ICシステムはフローティング・サービスが有効に動作し、「ダンゴ」運転が早期に解消するとともに、エレベータの停止数がほぼ均等になっている。

Fig. 11 Elevator Travelling Diagram (Survey at Eastern Bldg.)

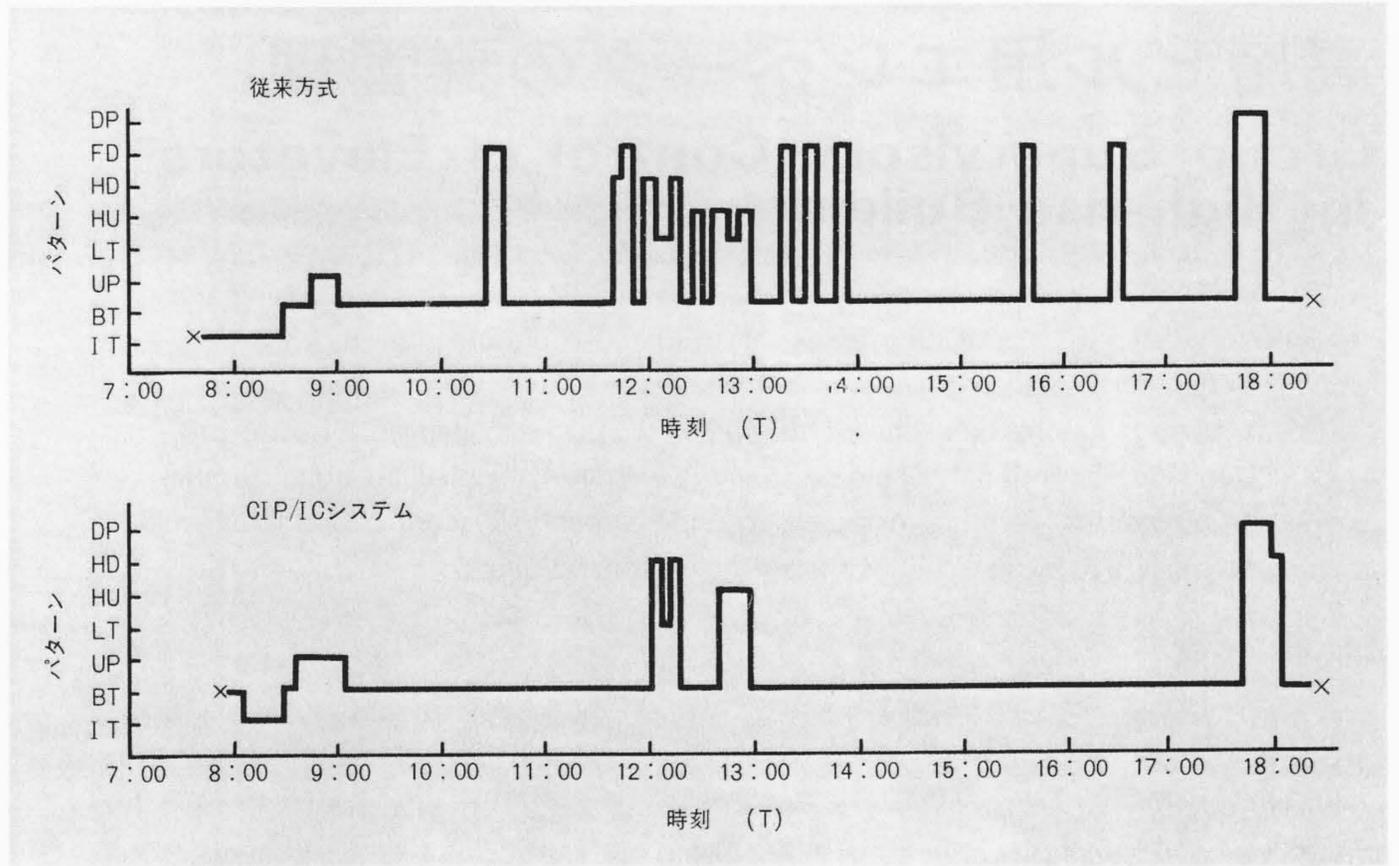


図13 パターン移行状況(イースタン・ビル実測)

CIP/ICシステムは輸送能力が増大し、短時間で交通需要を処理するため、エレベータの運転モードは出退勤・昼食など混雑時と、それ以外の平常・閑散時に大別したシンクロ・マルチ・パターンで処理できる。

Fig. 13 Removing Diagram of Traffic Pattern (Survey at Eastern Bldg.)

表2 イースタン・ビル・エレベータ仕様 イースタンビルに設置されている、エレベータ群の代表的な仕様を示した。

Table 2 Elevator Specification of Eastern Bldg.

項目	仕様
製作年	昭和38年
エレベータ速度	150m/min
台数	5台
エレベータ定員	{ No. 1~3 : 13人 No. 4, 5 : 16人
サービス階床	{ No. 1~3 : 12(B ₂ , B ₁ , 1~10) No. 4 : 13(B ₂ , B ₁ , 1~10R) No. 5 : 14(B ₃ ~B ₁ , 1~10R)
運転方式	8パターン
ビル収容人員	2,200人
ビル用途	本社ビル

(1) CIP/ICシステムの最大の特長であるサービス予報灯点灯に関して、エレベータ利用者の意見をまとめたところ、以前より便利になったという意見が80%以上あり、また、他のビルのエレベータにも広く採用すればよいという意見が大半を占めている。

これはサービス予報灯のようなサービス・エレベータの即時表示が、エレベータ・サービスを向上させるうえで非常に有効であることおよびCIP/ICシステムの機能のすべてを織り込むことができないなどの制約があるにもかかわらず、サービス予報灯点灯による心理的な効果に好結果が得られることを裏付けている。

(2) エレベータ運転曲線(図12)において、CIP/ICシステムは「ダンゴ」運転が減少(「ダンゴ」運転が生じても早期に解消)し、エレベータの停止数がほぼ均等になっていることがわかる。これは前述のようなフローティング・サービスなどが有効に動作しているためである。

(3) ホール待ち客の待ち時間は平均待ち時間が28.6秒から19秒と33%短縮し、60秒以上の長待ち確率も11.8%から2.3%と1/5に減少した(図11)。この点からも明白であるが、信頼度99.9%で両者に有意差があり、CIP/ICシステムの制御が非常に有効であることを裏付けている。

(4) 図13はエレベータが交通需要を処理する過程において、呼び、かご乗客数などの交通情報により識別したエレベータ運転パターン⁽⁴⁾の移行状態を示すものである。図9でも明白な

ように、CIP/ICシステムは短時間で交通需要を処理(すなわち、エレベータの処理能力が大幅に増加)するために、エレベータの運転モードとして出退勤時、昼食時などの混雑時とそれ以外の平常・閑散時に大別したシンクロ・マルチ・パターンで処理できることがわかる。

5 結 言

CIP/ICシステムは理論解析の裏付けをもとに開発されたもので、電子計算機のシミュレーションおよび実地試験などにより有効性の検討を行なった。その結果、

- (1) 世界で初めてエレベータに予測制御を採用し、「ホール呼び登録時にサービス・エレベータを即時表示」することに関し、エレベータ利用者に好評を博し、実用化に対する実証も得られた。
- (2) フローティング・サービスなどが有効に動作するため待ち時間が従来と比べて30%短縮するとともに、60秒以上の長待ち確率も1/5と大幅に減少した。
- (3) ホール呼びのかご割当て、フローティング・サービスなどによりエレベータのサービス分担が均一化し、サービス完了時間が大幅に短縮できた。
- (4) 待ち時間、サービス完了時間短縮などエレベータの交通需要の処理能力が向上するために、シンクロ・マルチ・パターンにより非常に広範囲の交通需要を同一運転パターンで処理できた。

などを確認し、定量的なサービス向上のほか、サービス・エレベータの即時表示という質的サービスの充実を図ることができ、人間とエレベータのより高度なマン・マシン・システムとしてさらに一歩前進させることができた。

このCIP/ICシステムはNHK放送センタービルをはじめ各種ビルに採用され、いっせいに稼働開始の予定である。

参考文献

- (1) 犬塚、弓仲：日立評論 50 829 (昭43-9)
- (2) 平沢：電学誌 91 299 (昭46-2)
- (3) 平沢：電学誌 91 492 (昭46-3)
- (4) 平沢、河竹、弓仲、岩坂：電学誌 90 1568 (昭45-8)