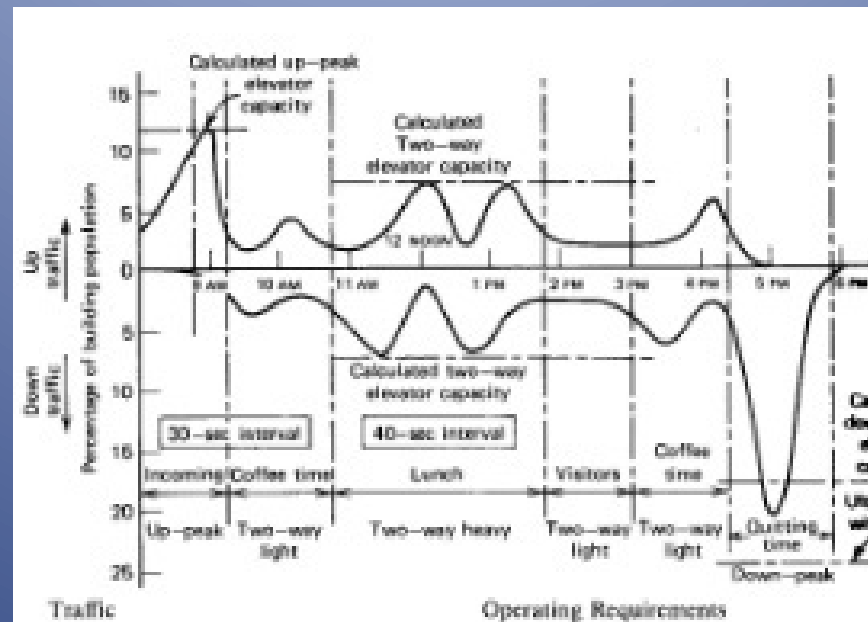


高層オフィスビルのエレベータ設置計画

(何故、
高層オフィスビルのエレベータシステムが複合群管理システムになるのか?)

株式会社エレベータ研究所

1960年代初期



従来の設置計画

、出勤時のアップピークに適用できる交通計算があったので、出勤時のアップピーク(incoming traffic)の交通量を輸送するのに十分なエレベータの主仕様(定員、定格速度、サービス階、台数)を交通計算等に基づいて決定する方法で設置計画が行われてきた。

ここで、出勤時のアップピークや退勤時のダウンピークは主として一方向の交通だけがあるピークであり、

一方向の乗客だけが乗合できる制御方式(セレクトィブ・コレクティブ)を用いている従来のエレベータシステムが最も得意とする交通パターンである。そのため、5分間輸送能力が不足気味の場合、出勤時や退勤時よりも、交通量の多い二方向の交通がある昼食時にクレームが発生するので、設置台数を削減する場合は注意が必要である。

従来の交通計算

基準階で定員の80%の乗客が乗車し、
一般階で順次降車して全員降車後に基準階に直行
で戻るという確率モデルを用いて、

- (1) 予想停止数を確率計算し、
- (2) 平均一周時間(RTT)を求め、
- (3) 平均運転間隔(AI) = $RTT / \text{台数}$ を求め、
- (4) 5分間輸送人数 = $\text{定員} \times 0.8 \times 300 / AI$ を求め、
- (5) その居住人口に対する百分率である5分間輸送能力を求める。

ところが、

(1)フレックスタイム制の普及

(2)ファーストフードの出現

(3)レストランのテイクアウトの開始

等によって現代のオフィスビルの交通パターンは、
1960代初期からは大きく変化してしまい、
2方向のピークが共存するために、

エレベータシステムにとってシビアな交通パターンで
ある昼食時の比重が大きくなったことが、
1993—1997に世界各地で実施された
交通調査で明らかになった。

昼食時の交通量

Incoming traffic 45%

Outgoing Traffic 45%

Interfloor Traffic 10%

上昇・下降交通量共出勤時のIncoming trafficと同規模であり、21階建てオフィスビル(居住人口2000人)の場合、一方向当たりの平均乗客到着率は、5分間集中率が12%として、 $2000 \times 12 / 30000 = 0.8$ 人/秒となる。

昼食時のRTTが240秒以上になると、AIが30秒以上になり、平均待ち人数が定員以上となって平衡条件が満たせず、積み残しが頻発するので注意が必要である。

従来のエレベータ設置計画の問題点

- (1) 1方向の交通の輸送能力しか評価していないので2方向の交通がある昼食時に輸送能力が不足する主仕様を決定してしまう。
- (2) 一般階間交通の影響を評価できる確率モデルに基づく交通計算法が必要である。
- (3) 平均運転間隔を用いて平均待ち時間を推定する時は、積み残しを考慮しなければならないが、積み残しを考慮した平均待ち時間の計算法がまだ一般化していない。

従来の設置計画の実態

- (1) 定員の80%が1階で乗車し、
- (2) 予想停止数12.5停止で乗客全員を輸送し終わり、
- (3) 反転して1階に直行するモデルで計算されるRTTは、定格速度を分速210mとして、320.6秒となる。
- (4) 望ましい平均運転間隔は30秒であると言われており、設置台数はできれば、 $320.6 / 30 = 10.7$ 台以上にしたいところであるが、
- (5) 乗客の移動距離の制限から設置台数の上限が8台であるために、やむを得ず設置台数は8台とする。
- (6) 平均運転間隔 $AI = 320.6 / 8 = 40.1$ 秒となり、5分間輸送能力は7.2%と不足気味であるが、特に問題は無いとして、主仕様は定員24人、定格速度210m サービス階1-21階、設置台数8台と決定される。

積み残しを考慮した平均待ち時間

- 平均運転間隔に平均32.8人が到着するから、恒常的に8.8人が積み残される。従って、運転間隔毎に15.2人が前の運転間隔に積み残された8.8人と一緒に1台目のかごに乗車し、8.8人が2台目のかごに乗車することになるから、出勤時には、

$$n = 1 * 15.2 / 24 + 2 * 8.8 / 24 = 1.36$$

$$\begin{aligned} \text{AWT} &= \text{AI} / 2 + (n - 1) \text{AI} = 0.86 \text{AI} \\ &= 34.5 \text{秒となる。} \end{aligned}$$

昼食時の輸送性能

従来の基準で設置計画されたUP/DN釦方式のエレベータシステムは、上昇方向・下降方向共に出勤時のincoming trafficと同規模の交通量がある昼食時には輸送能力が不足する(半分以下しかない)ため、上昇運転・下降運転共に各階に停止しながら運転することになり、

$RTT = 41 * 13.9 + 24 * 1.6 = 594.4$ 秒、

$AI = 74.3$ 秒となり、1方向当たりの平均乗客到着率は0.8人/秒であるから、

AIに到着する乗客数は59.4人で、1台目に12.6人が乗車し、2台目に24人が乗車し、3台目に11.4人が乗車するので、 $n = 1.6$ となり、

$AWT = AI / 2 + (n - 1) AI = 1.1 AI = 81.7$ 秒となる。

DCSによる改善

昼食時には輸送能力を向上させる必要があり、RTTを短縮して輸送能力を向上させる乗場行先階登録釦を用いたDCS (Destination Control System) が採用されることになる。昼食時の各行先階の乗客の平均到着率 $\lambda=0.8/20=0.04$ 人/秒であり、RTTは200秒以上になるため、RTTの間に各行先階の乗客が到着しない確率は0.0003以下になり、RTTの間には全ての行先階の乗客が到着してかごの到着を待っていると考えられる。DCSはそれらの行先階をRTTが最短になるように8台分に均等に分割して1~8台目に出発するかごに分担させる。

従来のDCSの昼食時の予想停止数(その1)

乗客数が確率的に変動し、

一般階での乗車もある場合の予想停止数の計算方法

基準階を除くサービス階床数をN、平均乗客数を r 、

基準階で乗降する確率を α 、

1台1方向当たりの平均乗客到着率を λ 、

着目している階で1人の乗客が乗降する確率を p とする。

t の間に乗客が n 人到着する確率は、 $\frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$ である。

1人の乗客が着目している階で乗降しない確率は $(1-p)$ で

あり、着目している階で停止しない確率は、乗客 n 人全員が

乗降しない確率 $(1-p)^n$ であり、乗客数が n 人である確率は、

$\frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$ であり、乗客数が定員を超える確率は0とすれば、

着目している階で停止しない確率は、

$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1-p)^n (\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda t(1-p))^n}{n!} e^{-\lambda t}$ であり、 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = e^x$ であるから、

着目している階で停止しない確率は、 $e^{\lambda t(1-p)} \times e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t p}$ となる。

このように、 p が求まれば、着目している階に停止する確率

が $1 - e^{-\lambda t p}$ と求まり、予想停止数を求めることができる。

従来のDCSの昼食時の予想停止数(その2)

1. 分担している領域 (N/c 階) 内の i 階に着目する。

(1) 最初に、基準階で乗車する αr 人について考える。

1人の乗客が i 階で降車する確率は、 $p = 1 / (N/c) = c/N$ であり、
 $\lambda t = \alpha r$ であるから、

着目する階に停止しない確率は、 $e^{-\frac{c\alpha r}{N}}$ となる。

(2) 次に、一般階で乗車する $(1-\alpha)r$ 人について考える。

1人の乗客が i 階で降車する確率は c/N であり、乗車する確率は $1/N$ であるから、
乗降車する確率 $p = (c+1)/N$ であり、 $\lambda t = (1-\alpha)r$ であるから、

着目する階に停止しない確率は、 $e^{-\frac{(c+1)(1-\alpha)r}{N}}$ となる。

(3) これらから、着目する階に停止しない確率は、

$$e^{-\frac{c\alpha r}{N}} \times e^{-\frac{(c+1)(1-\alpha)r}{N}} = e^{-\frac{(c+1-\alpha)r}{N}}$$
 となる。

従って、分担している領域内の予想停止数は、 $\frac{N}{c} \left(1 - e^{-\frac{(c+1-\alpha)r}{N}} \right)$ となる。

従来のDCSの昼食時の予想停止数(その3)

2. 分担している領域外の i 階に着目する。

1人の乗客が i 階で降車する確率は0であり、乗車する確率は $1/N$ であるから、
 $p = 1/N$ であり、 $\lambda t = (1 - \alpha)r$ であるから、着目している階に停止しない確率は

$e^{-\frac{(1-\alpha)r}{N}}$ であり、分担している領域外の予想停止数は、 $\left(N - \frac{N}{c}\right) \left(1 - e^{-\frac{(1-\alpha)r}{N}}\right)$ となる。

3. 一般階内の予想停止数

以上をまとめると、一般階内の予想停止数は、

$\frac{N}{c} \left(1 - e^{-\frac{(c+1)\alpha r}{N}}\right) + \left(N - \frac{N}{c}\right) \left(1 - e^{-\frac{(1-\alpha)r}{N}}\right)$ となる。

従来のDCSのRTT

N(階)	20
階高(m)	3.5
c(台)	8
α	0.9
平均乗客数 r (人)	23.9
予想停止回数 $S(r)$	4.47
$S(r)$ 第1項(分担階内)	2.50
$S(r)$ 第2項(分担階外)	1.97
平均走行距離 S (m)	15.66
定格走行加減速距離 S_a (m)	18.1
加速度(m/s/s)	1
加速度変化率(m/s/s/s)	1
平均走行時間 T_r (s)	11.83
戸開閉時間 D (s)	6.3
乗降時間 T_{io} (s)	38.24
RTT/2 (s)	119.30
RTT (s)	238.59

従来のDCSでは分担かごが固定化する

- 8台のかごが繰り返し基準階を出発するが、出発順に#1～#8と呼び、#8が出発した後#1が出発するまでの運転間隔をINT1、#1が出発した後#2が出発するまでの運転間隔をINT2、その後順次INT3～INT8とすると、各かごが分担する交通量は、0.1人/秒であり、各かごのRTT内の平均待ち人数は、 $0.1 \times 238.59 = 23.86$ 人であり、24人以下の確率が0.565で、積み残しが発生する確率が0.435ある。また、各かごが分担する行先階の乗客が平均運転間隔($238.59 / 8 = 29.86$)内に発生しない確率は0.05と小さく、各かごが出発する時(運転間隔の終了時)には基準階では全ての行先階の乗客が待っている状態になる。INT1にそれぞれのかごが分担した行先階をC1～C8とすると、INT2では、#1出発後に積み残されたC1の乗客と#2が出発するまでのINT2に新たに到着したC1の乗客と一緒に、#2～#8は、まだ基準階を出発していないが、既に発生済のC2～C8の乗客を分担しているために、C1を分担することができないので、8台目に出発する#1がC1を分担せざるを得ない。このようにして、行先階がC1の乗客は、INT1に到着した場合は#1に1台目のかごとして乗車し、INT2に到着した場合は8台目のかごとして#1に乗車し、INT3に到着した場合は、7台目のかごとして#1に乗車し、INT4に到着した場合は、6台目のかごとして#1に乗車し、INT5に到着した場合は、5台目のかごとして#1に乗車し、INT6に到着した場合は、4台目のかごとして#1に乗車し、INT7に到着した場合は、3台目のかごとして#1に乗車し、INT8に到着した場合は、2台目のかごとして#1に乗車する。同様にしてC2～C8も#2～#8が固定的に分担する。従って、C1～C8の分担かごは、それぞれ#1～#8に固定する。また、時刻表のない交通機関であるから、乗客の到着とエレベータの運転は独立であり、乗客がどの運転間隔に到着する確率も等しい。従って、乗客が1～8台目のエレベータに乗車する確率は等しく $1/8$ ずつになる。

従来のDCSの平均待ち時間

- 乗客の到着は、エレベータの運転とは独立であるから、乗客がどの運転間隔に到着する確率も等しいため、従来のDCSでは、乗客は平均 $n = (c + 1) / 2$ 台目のかごに乗車することになる。従って、

$AWT = AI / 2 + (n - 1) AI = (c / 2) AI = RTT / 2 = 119.3$ 秒となる。

また、C1～C8を分担するかごがそれぞれ1台のかごに固定され、他のかごが応答しないことから、 $AWT = RTT / 2$ が導かれる。

このように、従来のDCSでは、昼食時に良好な平均待ち時間を得ることは不可能である。ただし、昼食時に良好な平均待ち時間を実現するための重要なヒントを含んでいる。

従来のDCSから学べること

(1) 交通を予め固定的に分割してそれぞれ2台の群で応答するようにすれば、必ず1台目のかごに乗車できるので、

$$AWT = AI / 2 = RTT / 4$$

と短縮できる。

また、以下に記すようにすることでRTTを短縮し、超高層ビルの昼食時でもRTTを120秒以下にできるので、良好な平均待ち時間を実現できる。

(2) 基準階と分担階間の交通と一般階間の交通を予め分割しておけば予想停止数を一周当たり9回から5回に削減でき、RTTを短縮できる。

(3) セレクティブ・コレクティブを採用すると、RTT内での分担階での停止回数が分担階数×2(2.5×2=5.0)であるが、逆呼びにも応答できるポストセレコレを採用すれば停止回数を削減でき、RTTを短縮できる。

(4) 貫通2方向型出入口を採用すると、ポストセレコレとの組み合わせで、逆方向呼びの乗降を同時に行えるようになり、分担階内での停止回数の半減と乗降時間の短縮を実現でき、RTTを短縮できる。

(5) 乗車案内装置を設けて乗客の乗車順序を制御すれば、最初に乗車した乗客が最初に降車するようになり、乗客の乗降がスムーズになって、車椅子兼用エレベータを実現できる。

複合群管理システムの特長

複合群管理システム(CGCS: Complex Group Control System)は、従来のDCSの欠点を解決するために、ビル内の交通をエレベータの乗り換え無しで輸送できるように、トータル台数/2で分割して、分割された全ての交通をそれぞれ分担する2台群管理システムで構成するエレベータシステムである。

その中で、NUCLEUS(L+A方式)は、高層オフィスビルや超高層ビルの昼食時に良好な平均待ち時間を実現するために、交通を基準階・一般階間の交通と一般階間の交通に大別し、前者を輸送するA(アクセス)システムと後者を輸送するL(ローカル)システムで構成したエレベータシステムである。

(1)Aシステムは、ビル内交通の90%を輸送し、RTTがビルの高さに依存するので、ポストセレコレと貫通2方向型エレベータやそのダブルデッキを採用して、超高層ビルでもRTTが120秒以下になるように各群のサービス階数を抑えている。

(2)LシステムのRTTはビルの高さに依存せず、分担する交通量が少なく、昇降行程も短いので、超高層ビルに適用した場合でも電動機容量は標準型エレベータ並みになり、RTTも120秒未満にできる。

NUCLEUS(L+A方式)

21						1		12-21		2-11
20						1		12-21		2-11
19					1			12-21		2-11
18					1			12-21		2-11
17					1			12-21		2-11
16				1				12-21	2-11	
15				1				12-21	2-11	
14				1				12-21	2-11	
13			1					12-21	2-11	
12			1					12-21	2-11	
11			1				2-11		12-16	17-21
10		1					2-11		12-16	17-21
9		1					2-11		12-16	17-21
8		1					2-11		12-16	17-21
7		1					2-11		12-16	17-21
6	1						2-11		12-16	17-21
5	1						2-11		12-16	17-21
4	1						2-11		12-16	17-21
3	1						2-11		12-16	17-21
2	1						2-11		12-16	17-21
1	2-6	7-10	11-13	14-16	17-19	20, 21				
type	A	A	A	A	A	A	L6	L7	L8	L9
group	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10

サービス階と各群・各階の乗り場に設置される行先階登録釦

Aシステム

1. ポストセレコレを採用
2. 貫通2方向型出入り口を採用(背面側から乗車し正面側から降車する)
3. 乗車案内装置を設置して乗車順序を制御

例えばG3では、

(1) 基準階で、

- ① 11→1の降車と1→11の乗車を同時に行う
- ② 12→1の降車と1→12の乗車を同時に行う
- ③ 13→1の降車と1→13の乗車を同時に行う

この結果、かご内には正面側から順に、1→11、1→12、1→13が乗っている。

(2) 11階に移動して、1→11の降車と11→1の乗車を同時に行う。

この結果、かご内には正面側から順に、1→12、1→13、11→1が乗っている。

(3) 12階に移動して、1→12の降車と12→1の乗車を同時に行う。

かご内には正面側から順に、1→13、11→1、12→1が乗っている。

(4) 13階に移動して、1→13の降車と13→1の乗車を同時に行う。

この結果、かご内には正面側から順に、11→1、12→1、13→1が乗っている。

(5) 基準階に移動して(1)から繰り返す。

4. 1台当たりの平均乗客到着率は、 $0.8 * 0.9 / 12$ であり、 $RTT = 120$ 秒の場合の平均待ち客数は7.2人であり、13人以下である確率は0.984099となる。従って、定員は13人で十分と考えられる。

乗車順序制御

階床	降り客	(かご正面) 乗客 (かご背面)			待ち客	応答順序	乗降制御		
13階		1→13	11→1	12→1	13→1	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	1→13の降車と同時に13→1が乗車		
			1→13	11→1	12→1		13→1	1→12の降車と同時に12→1が乗車	
12階		1→12	1→13	11→1	12→1			1→11の降車と同時に11→1が乗車	
			1→12	1→13	11→1		12→1		
11階		1→11	1→12	1→13	11→1				
			1→11	1→12	1→13		11→1		
1階	11→1	12→1	13→1	1→11	1→12	1→13	13→1の降車と同時に1→13が乗車		
		11→1	12→1	13→1	1→11	1→12	1→13	12→1の降車と同時に1→12が乗車	
			11→1	12→1	13→1	1→11	1→12	1→13	11→1の降車と同時に1→11が乗車
				11→1	12→1	13→1	1→11	1→12	1→13

Lシステム

- 1台当たりの乗客の平均到着率は $0.8 * 0.1 / 8 = 0.01$ 人/秒であり、仮にRTTが120秒になっても、平均待ち人数は1.2人であり、乗客数が6人以下である確率は0.99749である。また、乗車案内装置を用いて乗車人数が6人以下になるように制御する。従って、CW重量はかご自重+225kgとして、車椅子利用者も利用するので、定員13人のかごを適用して、標準型(13人乗り)で適用されている電動機を倍速で適用する。

複合群管理システムの仕様

Group no.	Type	Speed[m/min]	Service floors	Capacity	Quantity	RTT[s]	AWT[s]
G1	A	90	1,2-6	13	2	116.6	29.2
G2	A	105	1,7-10	13	2	114.4	28.6
G3	A	150	1,11-13	13	2	97.2	24.3
G4	A	180	1,14-16	13	2	100.0	25.0
G5	A	210	1,17-19	13	2	82.4	20.6
G6	A	210	1,20,21	13	2	77.6	19.4
G7	L6	105	2-11	13	2	115.0	15.3
G8	L7	105	12-21	13	2	115.0	15.3
G9	L8	150	2-16	13	2	98.4	24.6
G10	L9	210	2-11,17-21	13	2	98.8	24.7
T0tal					20		24.1

複合群管理システムの価値

Item	Total quantity of cars	Estimated price [billion yen]	AWT during lunch-time[s]	Space occupied by elevator[square meter]	Total motor capacity[kW]
Conventional GCS	8	1.6	119.3	1700.5	272.0
Conventional GCSx2	16	3.2	36.4	3401.0	544.0
Complex GCS	20	1.4	24.1	1314.9	241.6

複合群管理システムは高層オフィスビルの昼食時に良好な平均待ち時間を実現できる唯一のエレベータシステムである。また、交通の最適な分割によって顧客の要求仕様にフィットしたエレベータ設置計画を行うことができるという特長も備えている。