

ロープレスエレベータを用いた鉛直輸送システムの
提案と構築方法に関する研究

宮 武 昌 史

学位請求論文



ロープレスエレベータを用いた
鉛直輸送システムの提案と
構築方法に関する研究

1998年12月18日 提出

指導教官 曾根 悟 教授

東京大学 大学院 工学系研究科 電子情報工学専攻

67122 宮武 昌史

内容梗概

ビルのさらなる高層化時に問題となるロープ式エレベータの輸送能力低下に対応して、ロープレスエレベータ構想が生まれた。ロープレスエレベータは、1シャフト複数台ご運転機能と横行機能の2つの特長を持つ。しかし、本論文以前に検討されたロープレスエレベータ構想では、エレベータ設備面や運行面から見た検討が不十分で、ロープレスエレベータの有用性が明らかではなかった。そこで、本論文では、ロープレスエレベータを用いた新しい鉛直輸送システムの提案と構築方法、そしてその輸送性能に関して議論を行い、ロープレスエレベータの導入可能性を明確にすることを目的とした。

論文の中では、まず、ロープ式・ロープレスに共通した解析上の前提を述べる中で、乗降人数から需要OD (Origin-Destination) を推定する方法を提案し、OD からサービスゾーン内でのかごの平均停止階床数を求める式を導き、評価精度を上げた。ロープレスエレベータ特有の前提条件の説明で、推力の計算から加減速度は常に乗り心地の限界まで出せることを示した。また、鉄道との信号システムの相違点をまとめ、細かい信号方式の差に関わらず運行間隔は変わらないことを示した。さらに、鉄道のようなスケジュールの要素を導入した上で従来のエレベータと同様のデマンド運行を行う、セミデマンド運行を提唱した。

本論文での大きな提案の一つに、ロープレスエレベータをビルに取り入れる設計方法がある。まず、3本シャフトを1ユニットとした運行方法を提唱し、エレベータシステムの能力が最も必要な、ピーク時の上下方向需要の不均衡時の輸送能力を高めた。また、前記方式とロープ式エレベータの特徴を考慮して、各方式間の役割分担の重要性を示し、特にローカル需要の多い所ではメインの輸送用と補助的なローカル用のものに分けるべきことを具体的方法とともに示した。

次の大きな提案として、運行計画の作成方法がある。まず、通勤鉄道における地域分離型輸送方式の適用方法を示し、ロープ式に比べ高速度性を損わずに輸送能力を向上させた。また、下り輸送の案内上の特性を利用した下り方向だけに有効な運行方法を提唱し、上りよりもさらに輸送能力を上げた。最後に、3本シャフト1ユニット方式の高い輸送能力を維持するための回送かごのスケジューリングの求め方を確立した。

最後の大きな提案はセミデマンド運行で、まず従来のエレベータ群管理制御をベースとする制御の役割と本研究のスケジューリングとの相互関係を定義して、セミデマンド運行のあるべき具体的制御方法を示した。次に、スケジュールを需要や運行状況に適應させる方法、具体的には運行形態の決定法、サービスゾーンの決定法、複数ユニット間の運行位相の調整方法を提案し、円滑な運行を可能とした。さらに、ロープレスエレベータ向けの群管理制御方法を提唱し、各乗客の待ち時間の増大を防ぎつつスケジュールからの遅延も防げるようにした。

前記の各提案を受け、最後に設備や運行面の評価を行った。まず、70階のビルを想定した事例の設計により、提案方式は現状程度の超高層ビルにおいても占有面積でスカイロビー方式に匹敵し、ロープレスエレベータの有用性が示された。さらに、高層ほど提案方式の優位性が増すこと、30階程度では横行機能を使わない方が輸送力的に有利という結果を得た。提案方式の解析では、速度が100~200m/minの時の輸送力が600 m/minの時の約1割増しになることを示し、水平方向への移動時間が20秒以上ではスケジューリングが難しいことも明らかにした。また、途中階どうしの需要がない条件ならば省面積となる最適定員は10名程度であることも示した。セミデマンド運行における解析的検討を行った結果では、サービスゾーンでの停止階床数の上限値を減らすと、ロープ式に比べて待ち時間の増加を抑えて輸送能力を大きく増やせることを示し、運行制御への積極的適用を提言した。また、シミュレーションでも同様の結果を確認し、時折満員になるような需要に対しても問題なく輸送が可能であることを示した。

全体として、本論文はロープレスエレベータが輸送能力的に現状の超高層ビル程度にも十分適用できることを示すことで、ロープレスエレベータの合理的システム設計とロープレスエレベータ自体の導入可能性の是非を議論する礎となる部分を築き、今後の積極的な議論を促す肯定的な結果を得たと言える。今後の課題は、初期コストや運用コストなどのコスト面の評価を加えることである。また、運用段階で起こり得る大外乱に対して適切な運行が可能かをこれまでのエレベータ運用経験から総合的に判断することも課題である。



目次

目次	i
図一覧	v
表一覧	viii
1. 序論	1
1.1 高層建築物の発展と現状	1
1.2 高層ビル用エレベータの発展と現状	2
1.2.1 エレベータ単体の高速化	2
1.2.2 エレベータの群管理制御	3
1.2.3 エレベータ設備計画	5
1.2.4 その他の特殊な方式	5
1.3 超々高層ビル構想とその問題点	7
1.4 本論文までに検討されたロープレスエレベータ構想の概要	8
1.4.1 ロープレス化の狙い	8
1.4.2 駆動方式	9
1.4.3 運行方式	10
1.5 本論文の目的	11
1.6 本論文で対象とするロープレスエレベータの定義	11
1.7 本論文の構成	12
2. エレベータの検討に必要な基礎的概念	14
2.1 はじめに	14
2.2 ハードウェア性能の制限と走行パターン	14
2.3 ビル内の交通需要	16
2.3.1 ビルの用途による需要の構造	16
2.3.2 乗降人数とOD	16
2.3.3 ODデータの推定	18
2.4 需要の把握と乗客案内方法	21
2.4.1 需要の把握方法	21
2.4.2 乗客の案内方法	21
2.5 エレベータ性能評価の方法と評価量	22
2.5.1 エレベータ性能評価	22
2.5.2 各評価量	26
2.6 まとめ	27
3. ロープレスエレベータ固有のシステム条件	28
3.1 はじめに	28
3.2 ハードウェアの性能	28
3.2.1 加速度の制限と必要推力	28



3.2.2 シャフト間移動方式と移動時間	30
3.3 信号システム	31
3.3.1 ロープレスエレベータの信号システムの特徴	31
3.3.2 数式による信号システムの表現	32
3.3.3 様々な信号システムのロープレスエレベータへの適用性	33
3.4 デマンド運行とスケジュール運行の融合	37
3.5 まとめ	38
4. ロープレスエレベータを利用した鉛直輸送システムの設計	39
4.1 はじめに	39
4.2 前提とするロープレスエレベータのハードウェア	39
4.3 ロープレスエレベータの様々な運行ユニットの構成法とその特徴	40
4.3.1 横行機能を利用しない1シャフトのみの往復運行	40
4.3.2 横行機能を利用した2本シャフト間の循環運行	40
4.3.3 3本シャフト1ユニット方式の提唱	41
4.3.4 各方式の使い分けの目安	41
4.3.5 緩行と急行のシャフトを分離した方式	43
4.4 複数ユニットのロープレスエレベータの併用	44
4.5 ロープレスエレベータ群の平面的配置問題	44
4.6 1つのユニットにおけるシャフト・乗り場面積削減方法	45
4.7 鉛直輸送システム全体から見た複数エレベータの役割分担	46
4.8 メインエレベータの構成論	49
4.8.1 エレベータ方式の選択	49
4.8.2 設置階	51
4.9 ローカルエレベータの構成論	51
4.9.1 エレベータ方式の選択	51
4.9.2 設置階	53
4.10 各エレベータのシャフト本数・ユニット本数等の決定	53
4.11 まとめ	54
5. ロープレスエレベータの運行計画	56
5.1 はじめに	56
5.2 前提条件	56
5.3 1シャフト複数かご運転による地域分離型輸送方式	57
5.3.1 基本パターン	57
5.3.2 サービスゾーンの分割境界決定	57
5.4 1シャフト複数かご運行によるローカル輸送	59
5.5 横行機能がない場合の運行スケジューリング手法	60
5.6 横行機能がある場合のサービススケジュール作成方法	61
5.6.1 上りサービス時	61
5.6.2 下りサービス時	62
5.6.3 スケジュールにおける時刻の決定方法	63
5.6.4 3本シャフト式の場合の2つの乗降用シャフトの位相	63
5.7 回送用スケジュールの作成方法と作成例	63



5.7.1 回送用シャフトのスケジューリング問題とユニット全体のかご数	63
5.7.2 ロビー階における回送用シャフトのかご処理能力	68
5.7.3 回送用シャフトスケジューリング方法	70
5.7.4 速度の最適化の方法	75
5.7.5 実際のスケジュール作成例	76
5.7.6 余剰かごの待機方法	76
5.8 まとめ	78
6. ロープレスエレベータの運行制御	79
6.1 はじめに	79
6.2 運行制御の必要性	79
6.3 運行制御の全体的な構成	80
6.4 各ユニットの運行形態決定とその変更	81
6.5 サービスゾーンの決定とその変更	83
6.5.1 サービスゾーンの決定・変更方法	83
6.5.2 サービスゾーン以外での追加停止の決定方法	85
6.6 運行周期・スケジュールの決定とその変更	86
6.6.1 運行周期・スケジュールの決定	86
6.6.2 かごの順序変更	87
6.6.3 複数ユニット間の協調	87
6.7 群管理制御部	88
6.7.1 呼びの割り付けの制御による運行の円滑化	88
6.7.2 情報収集機能と案内機能の利用による制御の高度化	90
6.8 まとめ	92
7. 提案したシステムの定量的な有効性分析	93
7.1 はじめに	93
7.2 計算方法	93
7.2.1 評価量	93
7.2.2 ロープレスエレベータの計算時の仮定	94
7.2.3 異なるシャフト本数を持つユニットやロープ式エレベータとの比較方法	94
7.2.4 想定する運行条件	94
7.3 様々なエレベータ方式の階床数に対する性能変化	95
7.4 実際のビルを想定した際の諸方式の比較	98
7.4.1 乗客需要の仮定	98
7.4.2 スカイロビーを用いたロープ式エレベータの設計	100
7.4.3 ロープレスエレベータの設計	100
7.4.4 各方式の比較	101
7.5 ハードウェア性能に対する輸送特性の比較評価	104
7.5.1 鉛直方向の定格速度	104
7.5.2 水平方向への移動時間	107
7.6 定員設定に対する輸送特性の変化	109
7.7 ロープレスエレベータに有効な運行制御方法の検証	111
7.7.1 検討する際の前提条件	111



7.7.2 解析的モデルによる検討	112
7.7.3 シミュレーションによる検討	116
7.8 まとめ	119
8. 結論	121
8.1 本論文の成果	121
8.2 今後の課題	123
謝辞	125
参考文献	126
発表論文	129
付録 A 緩行と急行のシャフトを分離した運行方式	132
付録 B 黄金分割比を用いた 1 変数探索法の概要	141
付録 C 様々な場面における運行スケジュールの変化	143
付録 D 運行制御シミュレーションにおける各乗客の動き	149



図一覧

図 1-1: 速度向上による時間短縮効果	3
図 1-2: 群管理制御のベースとなる制御	3
図 1-3: 群管理制御システム全体の概要	4
図 1-4: 効率的エレベータ配置方法の例	6
図 1-5: ダブルデッキエレベータ	6
図 1-6: ODYSSEY システムの概要	6
図 1-7: かご密度の低下による輸送力減少	7
図 1-8: ロープによる制約からの脱却	8
図 1-9: 鉄道とロープレスエレベータの類似点	8
図 1-10: 単純なループ運転	10
図 1-11: 本論文における各章の構造	13
図 2-1: 理想走行曲線	15
図 2-2: オフィスビルにおける利用者数の推移の目安	17
図 2-3: OD と乗降客数のデータ	17
図 2-4: エレベータ利用率の階床数差による特性	19
図 2-5: 想定するサービス形態	22
図 2-6: 出発階・目的階の決定	26
図 3-1: ロープ式エレベータとロープレスエレベータの駆動機構の違い	28
図 3-2: 推力の不足が問題となる場合(上り方向を正として下る時を仮定)	28
図 3-3: 積載量と加速度を変えた時の必要推力	29
図 3-4: 水平移動のための機構	30
図 3-5: 鉄道における閉塞システム	31
図 3-6: h, s, e, L_m の関係	33
図 3-7: 理想走行曲線	34
図 3-8: 閉塞区間の定義	34
図 3-9: 運行周期を決めるクリティカルな場所	34
図 3-10: 上りの場合の時隔の計算例	35
図 3-11: 上りの場合の異常減速度と出発時刻差の関係	35
図 3-12: 下りの場合の時隔の計算例	35
図 3-13: 下りの場合の異常減速度と到着時刻差の関係	35
図 3-14: 信号による速度制限を受けた例	36
図 3-15: セミデマンド運行	37
図 4-1: 想定するロープレスエレベータのハード構成	39
図 4-2: 複数ロビー階を用いた運行	39
図 4-3: 2本シャフトによるユニット構成	41
図 4-4: 3本シャフトによるユニット構成	41
図 4-5: 2本シャフト/3本シャフト式の比較	42
図 4-6: 1本シャフト式と複数シャフト式の運行周期を決める要素の差	43
図 4-7: かご個数と輸送能力の関係	43
図 4-8: 複数ユニットの組み合わせ例	44
図 4-9: シャフトの平面的配置案	45
図 4-10: シャフト・乗り場の削減	46
図 4-11: 途中の一般階間の乗客による停止階床数の変化	48
図 4-12: メインエレベータにおける各方式の使い分け方	49
図 4-13: 観覧車的な高密度運行	52



図 4-14: ローカルサービス用エレベータのロープレス化による設備の柔軟性	52
図 4-15: ローカルエレベータを導入する効果の高い場所	53
図 4-16: 設計のためのフローチャート	54
図 5-1: 運行曲線の簡略化	56
図 5-2: 鉄道における地域分離型輸送方式の簡単な一例	57
図 5-3: サービスゾーンの重複による効果の一例	59
図 5-4: 地域分離型輸送を用いた 1 本シャフト内での往復運転	60
図 5-5: 速度を変数としたロビー階への到着時刻の最適化	60
図 5-6: 速度最適化による輸送力向上	61
図 5-7: サービスゾーンのサービス順序	62
図 5-8: 回送用シャフトのスケジューリング問題	64
図 5-9: 写像の特性	65
図 5-10: 最適なロビー階使用順序とその時隔	68
図 5-11: 速度と周期の関係	69
図 5-12: 回送スケジュールの決定方法の概略	70
図 5-13: 回送順序の定義	71
図 5-14: 回送順序と次のサービス順序の関係	72
図 5-15: 上層でのかごの干渉の軽減方法	73
図 5-16: 入替の制限	74
図 5-17: かごが乗降用シャフトに待機できる余地	75
図 5-18: 回送かごの時間調整と速度最適化	75
図 5-19: 作成された運行スケジュール例 その 1	77
図 5-20: 回送用シャフト上部におけるかごの待機	78
図 6-1: 交通システム一般に見られる不安定現象	79
図 6-2: ロープ式エレベータの典型的運行制御の例	80
図 6-3: スケジューリングと群管理制御の融合	81
図 6-4: 運行モード切り替えの遷移図	82
図 6-5: サービスゾーンの変更方法	84
図 6-6: 下り方向におけるサービスゾーン境界変更の効果	84
図 6-7: サービスゾーン以外の追加停止	85
図 6-8: ゾーン内停止階床数の増減による利点と欠点	86
図 6-9: 回送スケジュールの変更	87
図 6-10: 上層でのかごの待機	87
図 6-11: 複数ユニット間の位相調整方法	88
図 6-12: スケジューリングの要素を取り入れたデマンド運行	89
図 6-13: 想定する乗客案内システム	91
図 6-14: 行先階情報の早期取得とその利用	91
図 7-1: 計算時の仮定	95
図 7-2: 各方式における階床数と占有面積の関係	96
図 7-3: 各方式における階床数と乗車時間の関係	96
図 7-4: 想定するエレベータシステム	99
図 7-5: スカイロビーを用いた方式	99
図 7-6: 計算時の運行のモデル化	99
図 7-7: 生成された運行スケジュール	101
図 7-8: ロープレスエレベータのモデル	102
図 7-9: 一般階階床数 60 の場合のかご数と輸送力の関係	105
図 7-10: 一般階階床数 120 の場合のかご数と輸送力の関係	106
図 7-11: 高さ h と最高速度の関係	106



図 7-12: シャフト間移動時間による輸送能力の変化	107
図 7-13: シャフト間移動時間と各方式の輸送能力の関係	108
図 7-14: 定員による輸送能力の変化	109
図 7-15: ロープ式エレベータにおける定員と昇降路面積の関係	110
図 7-16: 定員と単位面積あたり輸送能力の関係	110
図 7-17: 各方式における定員と輸送能力の関係の比較	111
図 7-18: ローカルサービス所要時間と周期の関係	111
図 7-19: モデルでの乗客の流れ	113
図 7-20: 停止階床数上限値と待ち時間の関係 ($s=s_0$ の時を 1)	115
図 7-21: 停止階床数上限値と輸送能力の関係 ($s=s_0$ の時を 1)	115
図 7-22: 行先階による乗客の選別例	116
図 7-23: 各乗客の到着時刻と待ち時間	117
図 7-24: 停止階床数上限値と待ち時間の関係	118
図 a: 鉄道におけるオフライン駅	132
図 b: 緩行と急行の分離	132
図 c: 3 本ユニットでの運行例	132
図 d: 緩行シャフトと回送シャフト間に設けた乗り場スペース	133
図 e: 運行スケジュール	134
図 f: 輸送上制約となる場所	135
図 g: 緩行シャフトにおける干渉を軽減する方法	135
図 h: ゾーン境界でのかご間の干渉	136
図 i: 待避シャフトへの移動位置を 2 階床分ずらした場合のかご間の干渉	137
図 j: ロビー階でのかご間の干渉	137
図 k: 乗り移り階部分のかごの移動による輸送的制約	138
図 l: ゾーンが隣接する場合のサービス開始/終了時刻の制約	138
図 m: 斜行の 2 バターン	139
図 n: 斜行機能が運行周期に与える影響	140
図 o: 一変数探索法のアルゴリズム	141
図 p: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 5 個	143
図 q: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 6 個	144
図 r: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 7 個	144
図 s: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 8 個	145
図 t: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 9 個	145
図 u: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 10 個	146
図 v: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 11 個	146
図 w: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 12 個	147
図 x: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 13 個	147
図 y: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 14 個	148



表一覧

表 1-1: 超々高層ビルの計画例	2
表 1-2: 各リニアモータの方式の比較	10
表 2-1: 加速度とジャークの限界値	14
表 2-2: 計算に用いた OD 表	20
表 2-3: 推定された OD 表	20
表 2-4: かご 1 周時間 RTT を求める手順	24
表 3-1: かごの重さに関する仮定	29
表 7-1: 低層時における占有面積の具体的値	97
表 7-2: 輸送能力の計算結果	98
表 7-3: 各エレベータ方式の比較評価結果	103
表 a: 提案方式と各緩急線分離方式の比較結果	137
表 b: 運行制御シミュレーションにおける各乗客の動き	149



第1章 序論

1.1 高層建築物の発展と現状

現在、東京などに代表される巨大都市は、都心部から郊外への人口流出で都市の平面的広がりが増し、通勤や業務の上で長時間の移動を強いられる都市生活者を多数生んでいる。特に東京では、郊外のかかなり先まで住宅が開発され、文献[1]で指摘されているように、諸外国の大都市よりも郊外から都心へ向かう通勤客が大量に発生する都市構造となっているため、問題は深刻である。

都市の平面的広がりを抑えて交通に要する時間を減らすためには、都市の高層化が必要であるが、それは都市の高層化とはほぼ同義である。もちろん、都市の高層化は水平方向の移動負荷を減らす効果があるものの、鉛直方向の移動負荷は増大する。したがって、水平方向と鉛直方向の移動負荷にはトレードオフの関係があり、全体の移動負荷を考えると最適な都市の高さが存在する[2]。しかし、現状の高層化された大都市であっても、鉛直方向より水平方向の移動負荷が大きく、例えば東京では、水平方向の広がりは数十kmに達するのに対し、都市中心部の建築物の平均高さは高々数十mである。建築物の高さを最高で考えても200～300mにすぎない。このような状況では、都市の高さを高くして都市の広がりを抑えた場合、鉛直方向への移動量が増える効果よりも、水平方向への移動量が減る効果の方が大きいことは明白である。

しかし、鉛直方向の移動時間や所要エネルギーは水平方向よりも大きく、それにより都市の高さは制限される。最も問題となりそうなエネルギーに焦点を当てると、水平交通機関の代表である鉄道の人キロあたりの消費エネルギーは約420kJ[3]で、鉛直交通機関の代表であるエレベーターの人キロあたりの消費エネルギーは文献[4]の実測データから推測して約1800kJで、鉄道の5倍にも満たない。文献[4]のエレベーターのデータは低速のものであるが、大きく見積もっても人キロあたりの鉛直輸送エネルギーは水平輸送エネルギーの10倍程度でしかないと考えられる。都市の高さは都市の水平方向の広がりの数十分の1から百分の1であることを考えると、高層化による輸送エネルギーの増大は考えにくく、高層化の余地はまだ十分残されているといえる。

次に、ビルの高層化の現状に注目する。超高層ビルは、日本ではランドマークタワーの地上296m、71階が最高である。一方、現在の世界の超高層ビルは、主としてアメリカ・中国・台湾・マレーシアに多く、高さのベスト10は全てこれらの国で占められている[5]。それらの高さは350～450m、階床数は70～110階にも達している。

さらに、近年は日本でも将来的な構想として、都市空間の有効利用のために各大手建設会社等により表1-1のような超々高層ビルが検討された経緯もあり、将来的には高さ400m以上のビルが現実に建設される可能性もある[6]。



表 1-1: 超々高層ビルの計画例

計画	A	B	C	D	E
高さ (m)	800	800	800	600	480
階床数	地上 150 階 地下 14 階	地上 200 階 地下 7 階	地上 160 階	地上 106 階 地下 3 階	地上 100 階 地下 6 階
総床面積 (m ²)	9.63×10^5	15.00×10^5	13.20×10^5	6.00×10^5	3.50×10^5

1.2 高層ビル用エレベータの発展と現状

前述のような理由で、今後も都市の高層化が進むと、鉛直方向への人貨の移動はますます増加する。そこで、鉛直方向の交通計画を十分に行なわないと、現在の水平方向の交通で大渋滞・殺人的ラッシュが問題となっているのと同様に、鉛直方向への輸送は破綻してしまう恐れが大きい。

鉛直方向の輸送を担っているものとして、エレベータやエスカレータが挙げられるが、超々高層ビルの鉛直輸送ではエレベータが実質的に唯一の輸送機関となっており、エスカレータはその補助に用いられている。ビルが高層化すればするほど、ビルの内部交通の増加や、高揚程化によってエレベータには厳しい性能が要求される。エレベータは、ビル設計時における自由度が鉄道や道路などに比べて非常に高いのが特長であるが、ビル内に一回り回入でしようと、増設が難しいだけに、綿密な設計が必要となる。

かごの駆動にロープを用いるエレベータでは、原則としてエレベータシャフト 1 本あたりに 1 つのかごしか入ることができない。現在のロープ式エレベータはこの制約に起因する輸送力不足やサービスレベル低下を克服するためにさまざまな技術開発が行なわれており、高速化・配置の効率化・高度なリアルタイム運行制御によって、高効率なシステムを構成している。

1.2.1 エレベータ単体の高速化

エレベータ一台あたりの輸送力を増すにはかごの一周時間を短縮して周期を短くしなくてはならない。また、エレベータに乗車している時間の短縮にも、速度の向上が有効となる。このため、エレベータ単体の速度向上が積極的に行なわれてきた。現在使われている世界最高速エレベータ [7][8] は分速 750m (時速 45km) にも達し、さらに分速 1000m (時速 60km) に向けて開発がなされている [9]。

しかし、一般的に水平方向よりも走行距離の短いエレベータでは、最高速度で走る距離は短く、高速化による時間短縮効果は図 1-1 のように小さい。つまり、高速になるほど最高速で走る時間は加速度的に短くなり、平均速度がほとんど上がらなくなる。



さらに、高揚程でかつ高速になると急激な気圧変化により耳詰まりなどの不快感を与えることになることも含め、輸送力向上のための高速化は限界に達しつつある。

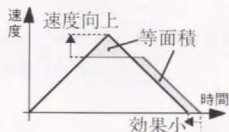


図 1-1: 速度向上による時間短縮効果

1.2.2 エレベータの群管理制御

複数台が並んだエレベータでは、複数台間の協調をとらないと、非常に長く待たされたかと思ったら立て続けに数台が来るといった、いわゆる「ダンゴ運転」が生じ、エレベータの性能を発揮させることができない。したがって、複数台のエレベータを一群として制御し、利用者を迅速かつ快適に目的階まで輸送する技術が重要になってくる。これをエレベータの群管理 [10][11][12][13] と呼んでいる。群管理は、予測制御に基づく評価量予測値の最適化を基本としており、AI (Artificial Intelligence) の応用により、高度な学習機能や推論機能を実現している。

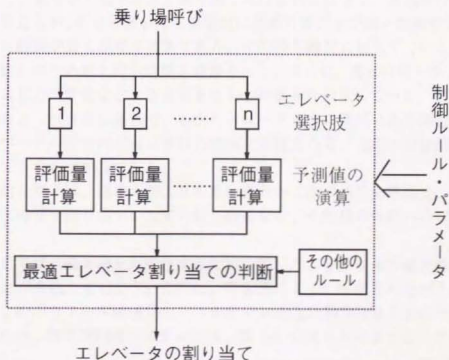


図 1-2: 群管理制御のベースとなる制御

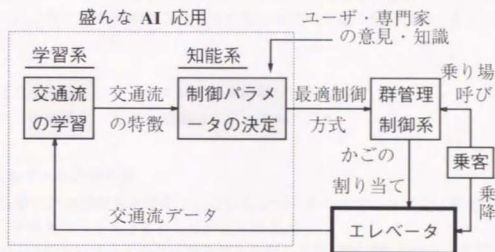


図 1-3: 群管理制御システム全体の概要

かご内にある行先ボタンを押すことによる「かご呼び」は乗っているかごのみに有効であるが、乗り場にある呼びボタンを押すことによる「乗り場呼び」は群をなしているエレベータすべてが対象である。したがって、乗り場呼びに対するかごの割り当てに制御の必要が生じる。そこで、群管理制御では図 1-2 のように、各階からの乗り場呼びが生じると、群をなしているエレベータ台数分の選択肢の中から最も評価量が良くなるようなかごの割り当てを行なう。最も早く来るかごが割り当てられる訳ではなく、乗場呼びのある階を通過することも生じるが、都合の悪い階を実質的に通過することで高い制御効果を得ている。

評価量は待ち時間が最も重要な要素であり、平均待ち時間に加えて「いらいら」の大きな長待ち防止のため最大待ち時間も考慮される。さらに、乗車時間・かごの混雑度や、閑散時における電力消費量など、さまざまなものが組み合わされている。

評価量はこのように非常に多彩で、しかもトレードオフの関係にある項目も多い。したがって、エレベータの群管理制御は多目的最適化問題となる。実際の評価関数は、各評価量の線形結合で表すのが普通である。

また、その他に例えば、乗車人数よりも多数のかご内での行先階指定、すなわちかご呼びが生ずると呼びを取り消すいたずら防止機能など、予想外の外乱への対応策も施されている。

群管理制御系では、時々刻々と変化する交通に対して、各評価量の結合係数などのパラメータの最適点に変化してしまう。以前は、時間帯によって固定されたパラメータを切替えていたが、このパラメータ最適化もリアルタイムに近い形で行なえるようになった。これに対応するため、群管理制御システムには、図 1-3 に見られるようなさまざまな機能が付け加えられた。

かごの割当を行なう前述の群管理制御系の根本的機能に加え、交通流を学習する学習系・最適な制御パラメータを選択する知能系を備えているのが大きな特徴である。また、エレ

ペータ自身にシミュレーション機能を備えているものもあり、高度な制御を可能としている。これらにより、群管理制御システム全体では次の2重の最適化が行なわれていると言える。

1. ミクロな最適化：最適なエレベータの割り当ての選択
2. マクロな最適化：最適な制御パラメータへの調整

1.2.3 エレベータ設備計画

高層建築物の有効床面積を増やすためにエレベータの省スペース化は重要で、配置方法にも、図1-4のようにさまざまな工夫が見られる。

図1-4(a)は、各エレベータのサービス階を分割し急行運転区間を設ける方式である。サービスするゾーンを細分化することにより、かご一周時間を削減し、輸送力を稼いでいる。少なくとも地上のロビー階からは乗り換えなしで目的階へ行くことが可能である。10～15階を1つのサービスゾーンにすると効率的であるとされている。現在の超高層ビルでは最も標準的な構成であるが、後述の(b),(c)の方式に比べて、エレベータ占有面積が大きくなることが問題となる。

図1-4(b)は、一つのビルを見かけ上複数のビルに分割し、下のロビーと上のロビー（スカイロビー）の間をシャトルエレベータでつないだ方式である。シャトルエレベータは途中で停止しないため、かご1周時間が小さくでき、少ないエレベータ台数で大きな輸送力を出ることができる。上層へ行く場合、シャトルエレベータとローカルエレベータを乗り継ぐ不便はあるものの、エレベータシャフトの占有面積を削減する効果的な方法である。

図1-4(c)は、トップダウン方式[14]と言われているもので、(b)の変形である。この方式では、さらに省スペースが可能であるが、目的階によっては一回スカイロビーに上がってからローカルエレベータで下方に降りることが必要で、案内を充実させる必要性が指摘されている。

乗客にとっての利便性では(a)が勝るが、スペース効率を重視しようとなると、どうしても(b),(c)のような複雑な方式を取らざるを得ない。今後のさらなる高層化では、エレベータの台数もさることながら、構成の複雑さがネックとなる可能性もある。

1.2.4 その他の特殊な方式

大きな輸送力を小さい占有面積で発揮するための直接的なハードウェアによる対策として、図1-5のようなダブルデッキエレベータがある。客室を上下2層にするのがこの方式であるが、通常のサービスエレベータに使用すると、1つの客室の降車のためにもう一つの客室の乗客が用もなく待たされるなど、無駄も生じる。停止階を1階おきにするなど、需要逼迫時には運用の工夫がなされている[15]。

図1-4(b),(c)のような方式では、地上階とスカイロビーを結ぶシャトルエレベータを有しているが、これにダブルデッキエレベータのような大量輸送可能なエレベータを持って

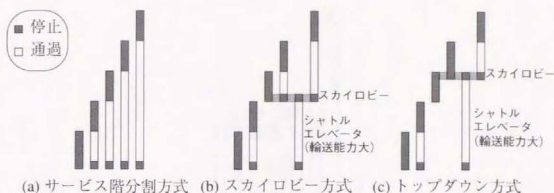


図1-4：効率的エレベータ配置方法の例

くことで、さらなる輸送能力向上と省スペースが可能となる。このような停止階が限定された用途には、ダブルデッキエレベータが有効となる。

さらに、これとは別に、特殊でかつ斬新なアイデアとして、ODYSSEY™ というシステム [16] が考案されている。簡単な概要を図示したのが図1-6で、かごはロープに吊るされた部分と、水平方向に自走可能で乗客を乗せる部分に分けられているのが特徴である。これにより、鉛直方向にいくつも分断されたシャフトの間を縫って走らせることができ、ロープ式エレベータの技術の利用、高層化時の輸送力確保、乗客の乗換抵抗の低減を同時に達成できる。

このシステムは図1-6に見るように、完全同期運転を原則とするため、現段階ではダブルデッキエレベータと同様に、シャトルエレベータへの適用を中心に考えられている。また、これとは別の用途として、水平方向への機動力の高さを利用して空港などの水平方向の移動が多い場所への適用も目的とされている。



図1-5：ダブルデッキエレベータ

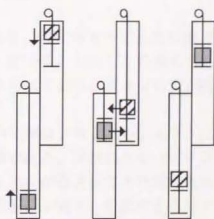


図1-6：ODYSSEY システムの概要



図 1-7: かご密度の低下による輸送力減少

1.3 超々高層ビル構想とその問題点

1.1 節でも説明したように、日本の大手建設会社により高さ 800m で 200 階にもなるビルの構想がなされている。しかし、その計画で一番問題とされているのが、ビル内の交通を担うエレベータである。それほどの高さを持つ超々高層ビルに従来型のロープ式エレベータを適用しようとすると、次のような問題が生じることが指摘されている。

1. ロープ自重増大によってロープそのものが持ち上げられなくなる
2. ロープ長増大によって振動抑制が困難になる
3. 単位シャフト長あたりのかご数の減少に伴いエレベータ占有総床面積が増大する
4. かご 1 周時間増大に伴いエレベータ輸送力が減少する

1, 2 はロープの使用そのものに起因した問題である。現在のビルの高さ程度では多慣性制御技術の進歩により乗り心地のよい制御を実現している。しかし、今後のさらなる高層化において特に 1 が本質的問題となってくると考えられており、ロープ自重が持ち上がらなくなるのは大体 800m 以上であるとされている。

一方で、3, 4 は、図 1-7 に示したように、ロープの使用により 1 本のシャフトに一つのかごしか入れないという、かご数制約に起因した問題である。現状のエレベータは、この制約を減らそうとして前節で述べたようなさまざまな工夫がなされてきた訳であるが、それも限界に近い。無理にエレベータの省スペース性を重視すると、前記のようにエレベータの構造はますます複雑になり、不便な乗り換えを何回も強いるなど乗客が利用しにくいシステムになってしまう恐れがある。

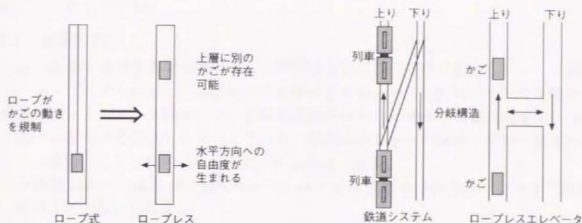


図 1-8: ロープによる制約からの脱却 図 1-9: 鉄道とロープレスエレベータの類似点

これらの問題は、前述の通りロープの使用に起因している。したがって、この解決には、ロープをなくしてかごを直接駆動するロープレスエレベータ方式[6][17][18][19][20]が有効であるとされ、近年この方式が注目されている。

1.4 本論文までに検討されたロープレスエレベータ構想の概要

1.4.1 ロープレス化の狙い

ロープの使用に起因する前記の問題を解決するのが、ロープをなくしてかごを直接駆動するロープレスエレベータ方式である。ロープレスエレベータは、超々高層ビルにおける高密度鉛直輸送を担う有力な候補と位置付けられている。

ロープレスエレベータは、ロープをなくしたことにより、図 1-8 のような運行の自由度が生まれる。したがって、次の2つの特徴的機能が実現可能となる。

1. 1本のエレベータシャフト内における複数かごの運転
2. シャフト間を乗り移る横行機能

これらの機能を利用することによって、従来型エレベータの苦手とされる超々高層ビルにおいても大きな輸送力を得られる可能性を持っている。

ところで、エレベータシャフトは鉄道でいえば線路に対応する。鉄道には1本の線路内に複数の列車が存在できるのと同じように、ロープレスエレベータの1本のシャフト内には複数のかごが存在できる。また、鉄道には異なる線路の間には渡り線が設けられているが、ロープレスエレベータでも横行機能で実現可能である。したがって、図 1-9 のように、

ロープレスエレベータはロープ式エレベータとは違った特性を持ち、それはむしろ鉄道に類似していると言える。

1.4.2 駆動方式

上記の機能を実現する駆動方式として現実的なものに、前節で紹介したロープ機構を工夫したロープ式のものや、工事現場用に見受けられる、かごに回転式モータを積みかご側の歯車とラックレールを噛み合わせる歯車駆動式のものがある。前者は高層化への対応という面では本質的な解決をもたらさないし、後者は歯車からの騒音や機械的保守の面からビル内の乗物として一般的になるかどうかは疑問である。

超々高層ビルへの適用が可能なロープレス方式に必要とされるハードウェア性能として、次のものが挙げられる。

1. かごを直接駆動できる高い推力と、高い推力対重量比（ペイロード比）
2. 高速なかごの駆動
3. 高い安全性の確保

これらを満たす駆動源として、現在リニアモータの適用が有力視されている。鉛直輸送に適切なリニアモータ方式は、表 1-2 のように推力や安全性、かごの発熱などの面を総合的に考慮して、昇降路一次型永久磁石式リニア同期モータ（PM-LSM）が現状では最も適当であるとされており [21]、すでにハードウェアの実験的検討も文献 [22] に見られるように、いくつかなされている。これは、二次側の励磁方法が異なるものの、現在開発が進められている超高速磁気浮上式鉄道であるドイツの Transrapid [23]、日本の JR-Maglev [24] と同様のものである。

この方式では、1つのシャフトで多くのかごを運転することと、効率・力率の問題から、1次側の巻線を多数の区間に分割し、かごのいる所だけに電流を流すようにする。この区間をセクションという。各かごに供給すべき電圧・位相・周波数は全く異なっているため、1つのかごが存在するセクションには独立した1つの変換器を割り当てる必要がある。すなわち、1つのセクションには1つのかごしか入れないことになり、これが、運行上の制約の一つとなり得る。しかし、この制約は JR-Maglev や Transrapid で用いられている技術、特に JR-Maglev の変換器境界区分を可変とする技術 [25] を利用することで制約を小さくすることが可能であり、本研究では制約として取り扱わないこととする。

鉛直駆動用には昇降路一次型リニア同期モータが適切だが、ロープレス方式の重要な機能の一つである水平駆動用に何を用いるかはまだ確定していない。機械的な支持によるものが一般的に考えられ、試作されているが、新たな試みとして鉛直方向と水平方向の駆動を同時に2次元のリニア同期モータで行うという検討 [26] も行われている。

表 1-2：各リニアモータの方式の比較

Type		かご重量	kVA	かご発熱	かご電力供給	安全装置	評価
ロープ式エレベータ		1.0 (unit)	100	極小	テールコード	—	—
LIM	昇降路一次	1.5	5700	大	バッテリー	現状+ α	×
	かご一次	∞	∞	—	車載インバータ	—	×
	かご一次	7	18000	大	集電	超強大	×
永久磁石式 LSM	昇降路一次	1.5	890	小	バッテリー	現状+ α	○
	かご一次	2.5	1500	中	集電	強大	△
超電導磁石式 LSM	昇降路一次	2	1200	小	バッテリー	強大	×

LIM：リニア誘導モータ LSM：リニア同期モータ



図 1-10：単純なループ運転

1.4.3 運行方式

現状では、前述のハードウェア的な興味が先行しているのに対し、運行方式などのソフトウェア面の検討はまだこれからの段階である。現在の所、横行機能を利用して図 1-10 に示されるようなループ運転を基本とすることが想定されているが、まだ詳細が詰められた段階ではない。

ロープレスエレベータの検討を行っている産業界の動向を見ると、運行方式の具体的検討例は限られており、体系的な検討例はなされてこなかったのが現状である。しかし、運行方式を検討することは、次に挙げるような重要性を持っている。

1. 想定されるハードウェアの能力のもとでは、どのような運行方式が適切で、それによりどのような輸送能力が得られるかを検討することで、ロープレスエレベータの有効性が明らかにされる。
2. 逆に、所望の輸送能力を得るためにどのようなハードウェアや性能が必要かは、運行方法の議論によって初めて明らかになる。

1.5 本論文の目的

将来技術として大きな期待を担っているロープレスエレベータも実用には程遠い中でも、ロープレスエレベータの運行を実現するための必要条件といえる、駆動用のリニアモータの性能向上に関してはさまざまな研究例が見られる。

一方、十分な性能が確保された時点での運行方式についての議論は、まだ本格的になされていないのが現状である。ロープレス方式の特長を生かすには、従来型エレベータとは全く違う運行が必要で、重要性とともに興味深い研究課題となり得る。

そこで、本論文では次のような目的を掲げている。

1. ロープレスエレベータの特長を生かした設備の設計方法の提案
2. ロープレスエレベータを核とし、その特長を生かすために補助的にロープ式エレベータやエスカレータを組み合わせた鉛直輸送システム全体の設計指針の提案
3. ロープレスエレベータの特長を生かした運行計画方法の提案
4. 大まかに計画された運行スケジュールに従いながらランダムな乗客発生に対応するセミデマンド運行制御システムの提案
5. 現状程度の高さのビルに適用することも含めて、提案したロープレスエレベータシステムの有効性の評価
6. ハードウェア開発に必要な要求性能の評価

本論文で提案するシステムは、現在までに例のない全く新しい鉛直輸送システムであり、他分野の技術を転用する提案も含めて、本論文の内容はすべてオリジナルの成果である。

ロープレスエレベータが元々適用対象とするビルは、最低でも高さ400m、100階以上の超々高層ビルであると考えられている。しかし、本論文では、このシステムの輸送効率の高さに着目しているので、適用可能な限界に近いと考えられる現状の40～50階程度以上の超高層ビルも積極的に対象とした議論を行う。提案するシステムの一部分は中低層のビルにも限定的に利用できるものとなる。

1.6 本論文で対象とするロープレスエレベータの定義

ここで、本論文においてロープレスエレベータと呼ぶ対象を定義する。

従来のロープ式エレベータでも、前述したロープレスエレベータの特長である1本シャフト複数かご運転機能と横行機能を、複雑なロープ機構によって実現する方法が提案され



ている [27][28]。この方式は、高層化への対応は難しいものの、上記のロープレスエレベータの特長を持ち合わせているという点で、運行特性はロープレスエレベータに類似する。

本論文では、運行特性に重点をおいた議論を行うため、言葉の使い方が正確ではないことを承知で、これらもロープレスエレベータの仲間として含め、上記の2つの機能を備えるエレベータをロープレスエレベータとして扱う。以後も、ハードウェアの議論や超高層への応用を考える場合以外では、ロープレスエレベータをこの意味で使用するものとする。

逆の意味で、機械的にはロープレスエレベータである油圧エレベータは、上記のロープレスエレベータの機能を持たないため、ここではロープレスエレベータではないとする。

1.7 本論文の構成

本論文は、現存しない新しいシステムを取り扱っている。そこで、論文の構成は、前提条件を述べた後、ロープレスエレベータのために行った様々な新しい提案をまとめて述べ、システムの全貌の説明を終えてから、解析結果を後でまとめて述べるものとした。以下に、各章の構成とその概要を示す。各章の構成を模式的に示したのが図 1-11 である。

第2章：エレベータの検討に必要な基礎的概念

ロープ式・ロープレスに共通するエレベータ解析のための前提条件をまとめる。具体的には、基本となる加減速パターン、ビルの需要構造の表現・把握・解析、乗客の案内方法、エレベータ性能の評価手法の説明を行う。

第3章：ロープレスエレベータ固有のシステム条件

ロープレスエレベータ特有の機能に依存した解析上の前提条件を取り扱う。ここでは、かごを直接駆動する装置に依存した推力の問題、複数かご協調運転に不可欠な信号システムの鉄道との相違点とその解析、スケジュール運行とデマンド運行を融合したセミデマンド運行という概念について述べる。

第4章：ロープレスエレベータを利用した鉛直輸送システムの設計

ロープレスエレベータを中心にした鉛直輸送システム全体の設備計画の指針を説明する。横行機能を生かして複数シャフト内を1つの運行ユニットとする方法を提唱し、それをロープ式や1本シャフトのみの往復運転のロープレスエレベータなど、他の方式と組み合わせ、全体として効率的な鉛直輸送システムを構築する方法を述べる。

第5章：ロープレスエレベータの運行計画

ロープレスエレベータのセミデマンド運行の要素の一つであり、第4章の設備計画の段階でも仮定として必要となる、運行スケジュールの作成方法について述べる。鉄道における地域分離型輸送方式を導入した運行方法や、上下方向の輸送の差異により異なった運行形態を構成する方法や、回送時のスケジューリング方法とその効果について述べる。

第6章：ロープレスエレベータの運行制御



ロープレスエレベータの円滑な運行に欠かせない、セミデマンド運行制御方法について説明する。第5章をベースにしたスケジューリング部による大まかな制御と、従来のエレベータ群管理制御をベースとした群管理制御部による細かい制御の2つの役割と相互関係について述べる。

第7章：提案したシステムの定量的な有効性分析

4, 5, 6章の議論で提案したロープレスエレベータの設備面や運行面での評価を行う。ロープ式エレベータなどの他方式との比較、階床数に対する各方式の特性、また、提案方式における、駆動装置や定員といったハードウェアの要素に対する輸送能力の変化、運行制御の効果について述べる。この章には、論文中の大部分の定量的評価結果が含まれており、論文全体の最も重要な成果が述べられている。

第8章：結論

本論文における研究成果を各章毎にまとめ、さらに、論文の最後として、本論文では解決できなかった課題を述べる。

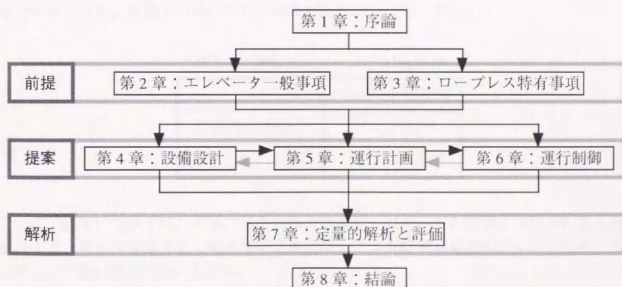


図 1-11：本論文における各章の構造



第2章 エレベータの検討に必要な基礎的概念

2.1 はじめに

本章では、今後の議論の前提となる条件の一つとして、ロープ式・ロープレスに共通する事柄をまとめる。具体的には、基本となる加減速パターン、ビルの需要構造の表現・把握・解析、乗客の案内方法、エレベータ性能の評価手法の説明を行う。ロープレスエレベータ固有の前提条件に関しては、第3章で議論する。

2.2 ハードウェア性能の制限と走行パターン

起動から停止までのかごの運動では、乗り心地の良さを確保するため最大加速度と最大ジャーク（加速度の微分）が表2-1の限界に示す値に制限されている。実際は乗り心地と時間短縮のトレードオフ関係を考慮して、表2-1の実際例という所に示した値が一般的に用いられている。本論文の検討でもこの値を採用することとする。

表2-1: 加速度とジャークの限界値

	限界	実際例
加速度 a_m (m/s^2)	1.5	0.8
ジャーク k_m (m/s^3)	1.5	1.0

一方、速度については、上記で与えられた加速度・ジャークと揚程から出せる最大速度が決まる。現実には限界近くでの速度では速度向上による時間短縮効果が小さいため、それよりも若干低い速度で用いられる。

ところが、揚程が400m以上になると、耳詰まりなどの生理的影響が大きくなることが予想される。生理的影響はエレベータの速さより揚程の方に強く依存するが、文献[36]では、速度が約7 m/s (420 m/min) 以下であれば揚程に依存せずに耳詰まり等の不快感を生じないことが述べられている。

最大速度、最大加速度、最大ジャークの条件を満たしつつ、なるべく速く走ろうとすると、かごの加速度 a ・速度 v ・位置 h は図2-1のように変化させることになる。距離が長く、最高速度に達する場合は図2-1(a)のように運転するが、距離が短くて最高速度に達しない時は、図2-1(b)のように加速度・ジャークの制限により、定格速度 v_0 まで到達しない。

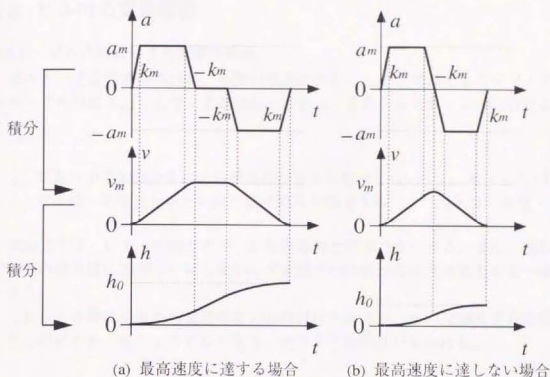


図 2-1：理想走行曲線

最後に、図 2-1 の通りにかごが走る場合の、所要時間 t 、移動距離（高さ） h 、定格速度 v_m 等の関係を示す。まず、定格速度無限大の場合に移動距離（高さ） h を走る時に出来る速度 v_∞ は、(2-1) 式ようになる。

$$v_\infty = -\frac{a_m}{2k_m} + \sqrt{\left(\frac{a_m}{2k_m}\right)^2 + a_m H} \quad (2-1)$$

もちろん、 v_∞ が v_m より大きいとこの速度は出せない。したがって、実際に出す速度 v_0 は (2-2) 式ようになる。ただし、 \min は 2 つのうち小さい値を取るとする。

$$v_0 = \min(v_\infty, v_m) \quad (2-2)$$

そして、この v_0 を用いると、所要時間 t と移動距離（高さ） h の関係は (2-3) 式ようになる。

$$t = \frac{a_m}{k_m} + \frac{v_0}{a_m} + \frac{H}{v_0} \quad (2-3)$$



2.3 ビル内の交通需要

2.3.1 ビルの用途による需要の構造

ビル内の交通需要の特性は、各階の用途に依存し、主な用途としてオフィス・住居・ホテル・ビルの出入口・食堂・会議室などがある。これらを大きく2つに分けると、次のようになる。

1. ビルの中で大部分を占めるが乗客があまり集中しない : オフィス・住居・ホテル
2. ビルの一部分にしかないが大量の乗客が集中する : 出入口・食堂・会議室など

本論文では、1. を一般階と呼び、2. を特殊階と呼ぶことにする。また、建物の出入口など、その階自体に用がないにも関わらず大部分の乗客が利用する階をロビー階と呼ぶことにする。

これらの各階の用途から交通需要が特徴付けられるが、その交通需要も時間帯によって大きく推移する。オフィスビルの場合、次のような特徴が見られる。

1. 出勤時 : ロビー階からオフィス階へ
2. 退勤時 : オフィス階からロビー階へ
3. 昼間時 : ロビー階とオフィス階の間、オフィス間
4. 昼食時 : オフィス階やロビー階と食堂階の間、オフィス階とロビー階の間

これらの需要の定量的な目安は図2-2に示す通りである。

2.3.2 乗降人数とOD

ビルの交通需要データとして一般的に採取され用いられているのが、各階における上下方向別の乗車人数・降車人数データである。これは、エレベータ内のロードセルで容易に推定可能である。ビル建設時の推定需要も同様の形で出されることが多い。

しかし、そのデータだけでは需要を正確に把握できない。真の交通需要の把握には、どの階で乗った乗客がどの階で何人降りるかという情報が重要である。それを表したのが、OD (Origin-Destination) と呼ばれるもので、図2-3に示すように行列の形態で表され、交通の特徴を容易に掴むことができる。さらに、需要は一日の中で大きく変化するので、全日平均のデータではなく、最低でも出勤・退勤・昼食(前半・後半)・昼間時の5時間帯のデータが必要である。

実際にODデータを得るには全利用者の追跡調査を行う必要があり、ODデータの実測は極めて困難であるので、乗降客数をデータとして用いることとなる。図2-3に示したデータ数を見ると、出発/目的地が5以上なら $n(n-1) > 4(n-1)$ となり、通常は乗降客数からODは一意に求めることはできないため、乗降人数データからODを推定する方法が必要とな

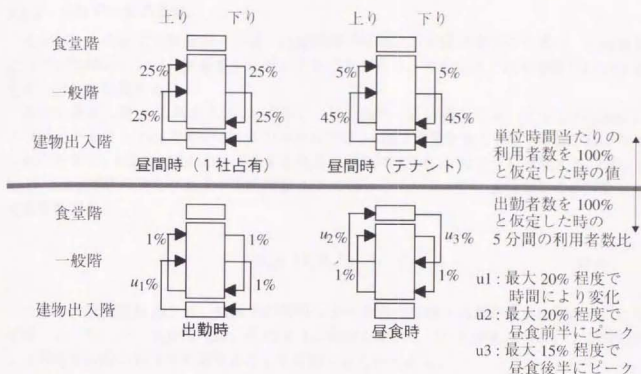


図 2-2: オフィスビルにおける利用者数の推移の目安

る。出勤パターン・昼食パターンなど、OD データの傾向を、ニューラルネットワークを用いて乗降客数から判定する方法 [29] なども提案されているが、ここでは OD データそのものの推定値を導出することを考えた。

その方法には、対象とするシステムによっていくつか提案がなされているが、本論文では、ビルシステムに適した OD の推定方法を提唱している。それを次節で説明する。

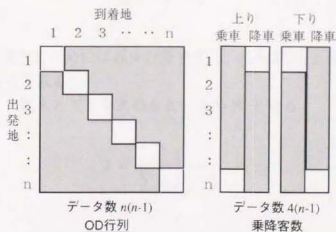


図 2-3: OD と乗降客数のデータ



2.3.3 OD データの推定

エレベータの需要の特徴の一つは、近接階間では階段等を使う乗客のために、交通需要に対する実際のエレベータ需要が目減りすることである。本節ではこれを考慮した OD 推定の方法を提案する。

各階の乗車人数 R_i と降車人数 D_j が与えられた時の OD の推定には、土木工学におけるグラビティモデル [30] を用いる。そのモデルでは、 i 階での発生量と j 階での集中量が与えられたときに、 i 階と j 階の OD に生ずる交通量 OD_{ij} を (2-4) 式のように推定する。 OD_{ij} は R_i , D_j と i, j 階間の隔たりを表す抵抗関数 $f(i, j)$ の積としている。また、 k は全体の合計を合わせる係数である。

$$OD_{ij} = k R_i D_j f(i, j) \quad (2-4)$$

ここで、抵抗関数 $f(i, j)$ を、階段等の利用による乗客の目減り効果の補正に用いることを考案した。そこで、 $f(i, j)$ を (2-5) 式のように仮定した。2つの式があるのは、上り方向と下り方向で階段の利用率が異なることを考慮するためである。

$$f(i, j) = \begin{cases} 1 - \alpha_u e^{-\lambda_u(j-i)} & \dots\dots\dots (i < j) \\ 1 - \alpha_d e^{-\lambda_d(i-j)} & \dots\dots\dots (i > j) \end{cases} \quad (2-5)$$

また OD_{ij} は (2-6), (2-7) 式を満足する必要がある。

$$\sum_j OD_{ij} = R_i \quad (2-6)$$

$$\sum_i OD_{ij} = D_j \quad (2-7)$$

この2式を同時に満たすためには収束計算を要し、(2-6)式を正確に合わせた上で、(2-7)式を合わせにいく方法を取る。

(2-4)式を(2-6)式に代入して k を求めると、(2-8)式となる。

$$k = \frac{1}{\sum_j D_j f(i, j)} \quad (2-8)$$

(2-8)式を(2-4)式に代入して k を消去すると、(2-9)式となる。

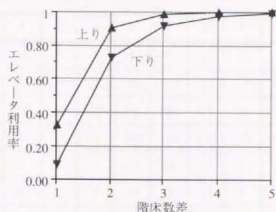


図 2-4：エレベータ利用率の階床数差による特性

$$OD_{ij} = R_i \frac{D_j f(i, j)}{\sum_j D_j f(i, j)} \quad (2-9)$$

この式をもとに収束計算を行う。具体的には、 n ステップ目の OD_{ij} を $OD_{ij}^{(n)}$ とおき、さらに n ステップ目の D_j を $D_j^{(n)}$ とおく。このとき、(2-10) 式 と (2-11) 式 とを再帰的に解き、 $D_j / D_j^{(n)} \rightarrow 1$ になれば収束したとみなす。

$$OD_{ij}^{(n+1)} = R_i \frac{D_j^{(n)} f(i, j)}{\sum_j D_j^{(n)} f(i, j)} \quad (2-10)$$

$$D_j^{(n)} = D_j \frac{D_j}{\sum_i OD_{ij}^{(n)}} \quad (2-11)$$

(2-5) 式の $\alpha_u, \lambda_u, \alpha_d, \lambda_d$ は数少ない OD 実測値の一つ [31] から推定し、それぞれ 5, 2, 3, 1.2 と定めた。文献 [31] で昼間の平常時において実測した OD を示す表 2-2 を乗降人数に変換し、その乗降人数から本方法を適用して推定したものが表 2-3 である。表 2-3 は、階床数差の小さい所で人数が小さくなるという特徴を再現できており、表 2-2 と表 2-3 を比較すると、推定誤差も実用的であるといえる。 $f(i, j)$ は交通需要に対してエレベータ利用者がどの程度あるかという、エレベータ利用率を表すが、これをプロットしたものを図 2-4 に示す。



表 2-2：計算に用いた OD 表

O \ D	B3	B2	B1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
B3	0	3	36	15	5	5	2	4	2	2	0	6	9	2
B2	1	0	8	37	36	25	22	22	15	11	12	25	22	3
B1	3	5	0	21	28	100	78	56	65	58	67	57	102	11
1	9	9	10	0	13	113	203	104	253	170	182	114	143	11
2	1	26	20	8	0	11	12	65	73	0	0	2	46	7
3	5	27	80	85	3	0	12	23	53	3	4	4	21	9
4	0	13	56	147	7	0	0	11	10	5	15	7	30	2
5	3	18	44	109	42	15	0	0	6	1	2	6	20	1
6	0	18	75	210	71	33	8	2	0	0	2	2	16	1
7	0	4	48	176	0	5	5	2	0	0	4	30	9	1
8	0	10	45	205	0	5	19	1	7	0	0	0	0	0
9	4	27	37	102	1	2	13	9	0	17	1	0	0	0
10	0	28	91	121	56	26	23	27	20	4	3	0	0	5
R	3	2	3	9	5	3	5	1	0	4	0	0	0	0

表 2-3：推定された OD 表

O \ D	B3	B2	B1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
B3	0	0.2	5.4	5.1	3.4	8.4	10.2	8.6	14	7.2	8.2	7.1	11.7	1.4
B2	0	0	5.3	13	9.2	23	28.1	23.4	38.3	19.8	22.5	19.4	32	3.9
B1	0.5	0.4	0	13.3	24.5	65.5	80.6	67.5	110.4	57.1	64.7	56	92.3	11.2
1	1	5.5	2.1	0	18.7	129.4	171.5	144.8	237.2	122.7	139.1	120.3	198.3	24.1
2	1.1	7.1	16	5.2	0	8.4	28.7	26	43.1	22.3	25.3	21.9	36	4.4
3	2.8	18.1	48.6	94.4	2.2	0	7.1	16.6	29.4	15.4	17.5	15.1	24.9	3
4	2.8	18.7	52.2	120.4	16.9	1.2	0	4.3	19.9	11.2	12.8	11.1	18.3	2.2
5	2.8	18.5	52.3	125.9	20.9	9.2	1.2	0	4.1	6	7.4	6.5	10.7	1.3
6	4.9	32.2	91.5	223	38.7	20.1	15.6	1.6	0	1.6	5.2	4.9	8.2	1
7	2.7	18.1	51.5	125.9	22.1	12	11.1	6.7	0.8	0	5.3	12.8	23	2.8
8	3.3	21.6	61.5	150.6	26.6	14.6	14	10.1	6.8	1.2	0	0	0	0
9	2.3	15.5	44.1	108.1	19.1	10.5	10.2	7.7	6.2	6.7	0.2	0	0	0
10	4.3	28.8	82	200.9	35.5	19.6	19.1	14.6	12.2	15.6	3.4	0	0	5
R	0.4	2.5	7.2	17.6	3.1	1.7	1.7	1.3	1.1	1.5	0.4	0	0	0

2.4 需要の把握と乗客案内方法

2.4.1 需要の把握方法

エレベータでは、リアルタイムの需要を把握し、それをもとに群管理制御系が各ごの停止階を決定して運行を行っている。需要は、かごや乗り場に備えられたボタンを乗客が押すことで把握することが可能となっている。

現在の通常のエレベータでは、乗り場のボタンで方向のみ指定し、行先はかご内のボタンで指定するという方法が採られているが、情報の早期取得による制御の効率化のために乗り場で行先階を指定するエレベータも少数ながら存在する[32]。

ボタンの情報は、ある階から乗る、あるいは降りる需要があるかないかを把握するだけで、その人数までは分からない。人数まで把握するには、かご内ではロードセルの重量情報から推定できるが、乗り場では画像処理により頭の数进行する方法[33]が最も現実的となっている。

ここで、将来の需要把握方法について考えてみると、今後急速な普及が予想される非接触ICカードや通信が可能な携帯情報端末の利用が考えられる。これらを用いて各利用者が呼び登録を行うことで、リアルタイムの需要がODレベルで把握できる上、出勤時には何もしなくてもビルに入っただけで目的のオフィス階への呼びを登録するなど、高級なサービスが可能となる。このようなシステムは、IPASS (Intelligent Passenger ASSistance) [34]と名付けられた鉄道などの公共交通利用のためのシステムと基本的には同じで、IPASSの技術がそのまま利用できる。しかも、IPASSで大きな課題である運賃徴集機能が不要であることや、ビル内のオフィスでは社員証等と兼用できることなど、導入は簡単である。

2.4.2 乗客の案内方法

現在のエレベータシステムでは、各エレベータのサービスする階は固定されている。通常数台のエレベータを群として同じ階をサービスするようにし、例えば21階～35階のようにゾーンとして分割されている。そのため、現在のほとんどのエレベータの行先階案内は固定になっている。

しかし、出勤時の性能を上げるために同じエレベータ群の中でさらにサービス階を分担するものもある。また、ロープレスエレベータの場合は、後述するように同じエレベータが上り専用になったり下り専用になったりと、サービス形態は大きく変わる。その場合、現在のエレベータでは各ドアに設けた案内表示板で可変の行先表示を行っている。

このようなサービス階の変更は、乗り場が同じ場所であれば頻繁に行ってもよいが、ある階へのかごが色々な乗り場から出るような運用はできない。原則的に乗り場が異なる所へサービス階を移動させるのは1日に数回程度が限度で、しかも案内が周知徹底されるまで両方の乗り場からでも目的階へ行けるような配慮が必要となる。

このような場合、IPASSのような双方向通信が可能な端末を持つシステムがあれば、各乗客の持つ端末に向かって個別に案内することが可能となり、運用上の制約はなくなることになる。

2.5 エレベータ性能評価の方法と評価量

2.5.1 エレベータ性能評価

2.5.1.1 基本性能の簡易計算法： 従来型のエレベータの設計では、実際には確率的な分布を持っている乗客の到着分布を、理論と経験を元にして平均的に処理するエレベータ性能の簡易計算方法 [37] が確立されており、それが用いられている。この方法では、実際には確率的な分布を持っている乗客の到着分布を、理論と経験を元にして平均的に処理している。

エレベータの一周時間は、問題の大きい出勤時を対象にして、普通図 2-5 ような前提条件をおいて計算する。この場合、エレベータのサービス形態は次のようになる。

1. 地上の出入階で乗客が一斉に乗車する
2. サービスゾーンの開始階まで途中停止なしで走行する
3. サービスゾーンの中のいくつかの階で乗客が徐々に降りてゆく
4. 全乗客が降りたら地上までノンストップで回送される

1. では乗客数に依存した乗り込み時間を求め、3. では乗客数 r とサービスゾーンの階床数 n から平均的な停止階床数 f を求めている。停止階床数 f は (2-12) 式のようになるとされている。

$$f = 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^r \quad (2-12)$$

そして、かごが1周して同じ場所に戻ってくる所要時間を表す、一周時間 RTT (Round Trip Time) は表 2-4 のような手順で求められる。以下にその補足説明を付す。

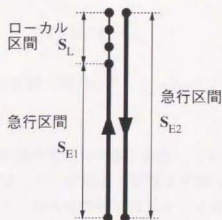


図 2-5：想定するサービス形態

1. 計算上の前提条件

1.1 朝の出勤時を仮定

1.2 客はロビーから各階へ向かう

1.3 一般階間交通および下りの交通はないものと仮定

1.4 かごに乗り込む客は定員の8割

2. 走行時間

ローカル区間では、階に関係なく等間隔に停止すると仮定して平均走行距離 S というものを定義している。加減速時間が長い場合、等間隔停車だと最高速度が低く抑えられ、高速性を生かさないため最も時間損失が大きいため、これは安全側の仮定である。また、ここで、急行運転区間は最高速 V に達するものと仮定している。

3. 戸開閉時間

戸開閉時間 T_d は、1 回分の時間と停止階数の積でよい。

4. 乗客出入時間

乗車時間は一人あたり 0.8 秒とする。また、降車時間（各階での合計）は、乗客が定員の 80% 以下の場合、近似的に (2-13) 式で求められる。

$$t_e = kr \cdot \sqrt[3]{fn} \quad (2-13)$$

ただし、 f は (2-14) 式の関係を満たす。

$$f = 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^r \quad (2-14)$$

なお、 k は出入口幅による係数で、代表的な扉の幅に対する値が文献 [37] に記されている。大まかには 1 程度としてよいと、本論文では 1 として検討を行なう。

結局、乗客出入時間 T_p は (2-15) 式のようになる。

$$T_p = 0.8r + t_e \quad (2-15)$$

5. 余裕時間

乗客の出入りには不確定要素が多いので、 $T_d + T_p$ の 1 割を余裕時間^Aとして見込む。

しかし、この方法では一般階間の需要の影響を考慮しておらず、不十分な面があるため、この計算を OD の利用を前提として一般階間の需要を考慮した形に変更した。以下では上り方向のみで議論するが、下り方向も基本的に同じように考えればよい。

A. 文献 [37] では損失時間と定義されている



表2-4：かご1周時間 RTT を求める手順

エレベータ速度			V	仕様による
エレベータ乗客人数			r	普通は定員の8割
ローカル区間内サービス階床数 (始発階を除く)			n	建物階床数・エレベータ サービス形態による
ローカル区間内予想停止数			f_L	$n\left\{1-\left(\frac{n-1}{n}\right)^r\right\}-1$
急行区間内停止数			f_E	2
全予想停止数			F	f_L+f_E
ローカル運転1平均走行距離			S	S_L/f_L
走行 時間	ローカル区間	最高速に達しない	T_r	$t_r f_L$ (t_r : 起動から停止までの時刻)
		最高速に達する		$\frac{S_L}{V}+t_a f_L$ (t_a : 加速時間)
	急行区間			$\frac{S_{E1}+S_{E2}}{V}+t_a f_E$
戸開閉時間			T_d	$t_d F$
乗客出入時間			T_p	$0.8r+t_c$ ($t_c=k r \sqrt[n]{f n}$: $f=1-\left(\frac{n-1}{n}\right)^r$)
損失時間			T_l	$0.1(T_d+T_p)$
一周時間			RTT	$T_r+T_d+T_p+T_l$

図13のようなモデルを仮定し、各OD行列要素を全利用者で規格化した値 p_{ij} を $i=0$ とそれ以外の2通りに分けて、それぞれ(2-16)式と(2-17)式のように計算する。

$$p_{0j} = \frac{OD_{0j}}{\sum_{k=1}^n OD_{0k}} \quad (2-16)$$

$$p_{ij} = \frac{OD_{ij}}{\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n OD_{kl}} \quad (2-17)$$

ローカルな部分で1人の乗客が生じた場合に、 i 階で止まらない確率は(2-18)式で表される。第1項は乗車、第2項は降車に関する式を意味する。

$$1 - \sum_{k=i+1}^n p_{ik} - \sum_{k=1}^{i-1} p_{ki} \quad (2-18)$$

$i=0$ で示される基準階から1人の乗客が生じた場合に、 i 階で止まらない確率は(2-19)式で表される。

$$1 - p_{0i} \quad (2-19)$$

さらに、基準階からの乗客が r_0 人と、一般階間の乗客が r_1 人のとき、 i 階で止まらない確率は(2-18)式と(2-19)式により(2-20)式で表される。

$$(1 - p_{0i})^{r_0} \left(1 - \sum_{k=i+1}^n p_{ik} - \sum_{k=1}^{i-1} p_{ki} \right)^{r_1} \quad (2-20)$$

i 階で止まる確率は1から(2-20)式を引けば良く、ローカル区間のサービス階床数を n とすると、結局ゾーン内の予想停止数はそれを i について和をとり、(2-21)式のようにになる。

$$f = \sum_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_{0i})^{r_0} \left(1 - \sum_{k=i+1}^n p_{ik} - \sum_{k=1}^{i-1} p_{ki} \right)^{r_1} \right] \quad (2-21)$$

(2-21)式で、(2-16)式をすべての j について等しい、すなわち $1/n$ とし、(2-17)式をすべての i, j について0としたら、(2-12)式が導かれる。

2.5.1.2 シミュレーション: エレベータは、ランダムな乗客の発生の影響を受けるシステムのため、確率的要素が大きい。ところが、実際のエレベータの運行状態や運行制御は複雑であり、確率論的な議論は難しい。そのため、運行制御の効果を評価するには、乗客をランダムに発生させて実現現象や制御を模擬するシミュレーションが一般的に用いられている。

制御部分は基本的にエレベータ本体に実装する制御装置と同じアルゴリズムを用いればよいが、乗客の発生に関してはデータ計測が困難なため、乱数を用いて目的にあったデータを自分で作る必要がある。乗客データに必要なものは、発生時刻・出発階・目的階の3つである。

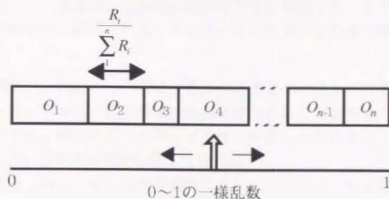


図 2-6：出発階・目的階の決定

乗客の到着間隔の分布関数 $p(t)$ は、(2-22) 式の指数分布関数に従うとされている。(2-22) 式を t について 0 から ∞ まで積分すると 1 になる。

$$p(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2-22)$$

ここで、 λ は単位時間あたりの（全階床への）到着人数を入れることになる。これは、到着間隔の平均値を計算すると (2-23) 式になることから導かれる。

$$\int_0^{\infty} t p(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2-23)$$

実際に乗客を発生させる場合、(2-22) 式の逆関数を取り、(2-24) 式の p に区間 $[0, \lambda]$ の間の一樣乱数を入力して各乗客間の発生時刻差を求めていく。

$$t = -\frac{\ln(p/\lambda)}{\lambda} \quad (2-24)$$

あと、出発階・目的階についても一樣乱数を利用する。各出発階の需要 R_i が与えられたとき、図 2-6 のように R_i の大きさに応じた長さを持つ区間を用意する。発生させた各乗客ごとに一樣乱数を発生し、図 2-6 のように発生した乱数に対応した階を出発階とする。目的階についても同様で、各目的階の需要 D_i が与えられたとして処理すればよい。

なお、より現実に近いモデルとして、乗客が集団で到着することを考慮し、その集団の人数から 1 を減じた値がポアソン分布に従うとするモデル [38] もあるが、今回の論文では使用しなかったため、説明は省略する。

2.5.2 各評価量



2.5.2.1 輸送能力： 通常は、設備の計画段階で主に考慮され、需要に対して必要なエレベータ設備を求めるのに利用される。エレベータの場合、5分間の輸送能力で表されることが多い。

2.5.2.2 待ち時間： エレベータでは、乗客が到着してからかごに乗り込むまでの待ち時間が重要視される。通常は、設計段階で直接考慮されることは少なく、運行制御の場合に最重要評価量となる。乗客の発生のランダム性に対応した制御を行い、待ち時間を減らすために、これまでの群管理制御が発展してきた。

待ち時間に対する「いらいら」は加速度的に大きくなるので、本来待たずに乗れる乗客を待たせてでも、長く待つ乗客をなくさねばならない。そこで、例えば最大待ち時間や、長待ちの「いらいら」の効果を補正した心理的待ち時間 [39] を評価量にしている。

2.5.2.3 乗車時間： ここでは、乗客がかごに乗り込んでからかごを降りるまでの時間とする。通常は待ち時間ほど重視されないが、運行制御の高度化とともに副次的に用いられるようになった。

なお、ドアが開いてから乗客がかごに乗り込む時間は、「乗り込み時間」と呼ぶ。

2.5.2.4 サービス完了時間： 待ち時間+乗車時間のことを表し、乗客が鉛直移動に費やした時間となる。ただし、前記のように待ち時間の方が重視されるため、待ち時間と乗車時間に重み係数をかけて和をとることも考えられる。

2.5.2.5 かご内混雑度： かご内の混雑度はオフィスビルではあまり重視されないが、ホテルでは重視される。混雑の平均を減らすことは輸送能力的に難しいため、混雑を平均化して各かごを一樣な混雑にするための指標として用いられている。

2.6 まとめ

本章では、ハードウェア性能面、交通需要、乗客案内や、エレベータ性能の評価方法など、エレベータ一般の概念をまとめた。その中で、1,2階床差程度の近接階を階段等で移動する乗客の効果を考慮した上で、各階方向別の乗降人数から運行計画や制御に必要な OD (Origin-Destination) そのものを推定する方法を提案した。さらに、輸送能力評価に必要なサービスゾーン内でのかごの停止階床数の平均値を、これまで一般的に考慮されていなかった一般階間の需要も含めた形で OD から求める式として導出した。



第3章 ロープレスエレベータ固有のシステム条件

3.1 はじめに

本章では、第2章に引き続き、もう一つの前提条件となる、ロープレスエレベータ特有の事項を取り扱う。ここでは、かごを直接駆動する装置に依存した推力の問題、複数かご協調運転に不可欠な信号システムの鉄道との相違点とその解析、スケジュール運行とデマンド運行を融合したセミデマンド運行という概念について述べる。

3.2 ハードウェアの性能

3.2.1 加速度の制限と必要推力

ロープ式エレベータの駆動機構は、かごを単にロープで吊るしているだけではなく、図3-1左のように釣り合いおもりを用いることで、必要な駆動力を小さくしている。 m_w をかごに定員の半分が乗った時の重量にすると、支持するための駆動力は最大で定員の半分だけでよい。

駆動装置の出せる推力が不足していると加速度は制限を受ける上、ロープレスエレベータのような自走式の鉛直輸送用駆動装置には、図3-2のように常に自重を支えるというバイアスがあり、必要な駆動力はロープ式エレベータに比べてはるかに高い。このため、上りで加速するときと下りで減速するときに加速度の制限を受ける可能性がある。

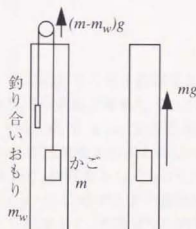


図3-1：ロープ式エレベータとロープレスエレベータの駆動機構の違い

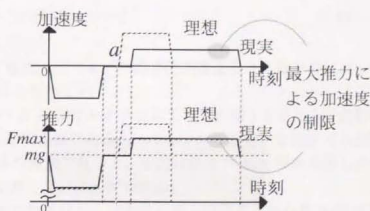


図3-2：推力の不足が問題となる場合（上り方向を正として下る時を仮定）



表 3-1：かごの重さに関する仮定

項目	重さ (kg)
かご枠	2000
積載量 (30 人)	2000
LSM 2 次側	1000
バッテリー	500
非常装置	2500
合計	8000

注) バッテリーはかご内で消費される 1 日 25kWh の電力を供給するための重量とし、非常装置はかご全体重量の 0.3 倍程度が目安とされている。

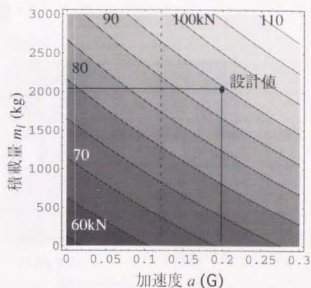


図 3-3：積載量と加速度を変えた時の必要推力

ここで、かごの駆動に必要な推力について、鉛直輸送用のリニアモータについての比較検討を行っている文献 [6] を参考に議論する。[6] では、かご定員 30 人、積載量 m_l を 2000kg とし、その時のかごの重さを表 3-1 のように仮定し、空車のかご全体の重量 m_c を 6000kg としている。

加速度 a (単位 G) に対する推力 F は (3-1) 式のように書ける。

$$F = (a + 1)g(m_c + m_l) \quad (3-1)$$

かごに乗り心地上の限界とされる 0.1G (約 1m/s^2) 相当の加速度を与えるためには、走行抗力や余裕を考慮して 0.2 G が必要とされている。

(3-1) 式で a , m_l を変化した時の F の変化をグラフにしたのが図 3-3 である。実際に 0.1G の加速度を出すために $a = 0.2\text{G}$ 程度必要であることから、かごを何と動かせる限度は $a = 0.1\text{G}$ 程度として $a = 0.1 \sim 0.2\text{G}$ の範囲で見ると、推力には 5 ～ 8kN 程度の差しかなく、 a , m_l に対する F の感度はあまり高くないことが分かる。

したがって、本論文では自重を支えられる位ならば乗り心地上の限界とされる 0.1G までの理想的な加減速度が常に得られると仮定する。これは、リニアモータを使わなくとも、かご直接駆動による自走式輸送システムならば、自重を支えられればあとは少しの推力の増加で問題なく加減速ができる、という同様の結論が得られる。

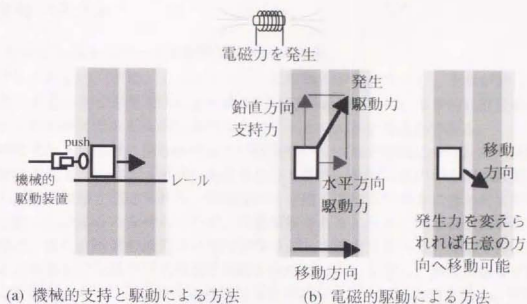


図 3-4：水平移動のための機構

3.2.2 シャフト間移動方式と移動時間

シャフト間を移動するために必要な時間はロープレスエレベータの性能上重要な要素である。水平移動を実現する機構として、図 3-4 (a) のようにレール等で支持して機械的な駆動装置を用いる方法が実現性が高いとされている。しかし、水平移動の際の機械的な切替等に時間を要することが予想されるため、短い距離の速やかな水平移動には適さないと考えられる。したがって、図 3-4 (b) のような電磁的な駆動装置が実現できれば速やかな水平移動が可能となる。水平方向の推力は、鉛直方向のように自重を支える必要がなく、小さな推力でよい。さらに、図 3-4 (b) のような方式では、斜めに移動させることも不可能ではなく、運行の形態によっては時間短縮の効果がある。このような観点から、二次元駆動を可能とするリニアモータの開発がなされている [26]。

次に移動時間そのものの見積もりを行う。文献 [37] によると、現在のエレベータのシャフト間隔は、定員 20 人以上の大形のものでも 3m 程度である。シャフト間を乗り移る時間は、鉛直方向と同程度の加減速度とジャークにするととして 4 秒程度となる。ハード的な制御装置の切替え時間等も 1 秒ほど見ても、理想的には 5 秒あればシャフト移動が可能だと考えられる。

しかし、それはハードウェアの能力に大きく依存するため、5 秒よりも時間が長くなる可能性もある。逆に、横行時に乗客を載せないという前提にすれば、横方向の加減速度を高く取って移動時間を短縮することも可能となる。したがって、シャフト間の移動時間はいくつかの場合を想定して議論する必要がある。



3.3 信号システム

3.3.1 ロープレスエレベータの信号システムの特徴

ロープレスエレベータは、1つのシャフトに複数のかごが存在し、それが独立に動けるのが特色である。かごを無秩序に走らせると衝突が起きるため、本質的に鉄道のような信号システムが不可欠である点が従来のエレベータとの大きな相違点である。

鉄道の信号システムは、図3-5のように線路をいくつもの区間に分け、ある区間内を1つの列車のみに占有させる「閉塞」を基本としており、先行列車のいる閉塞区間に侵入しないよう、速度制限が課せられる。閉塞長が十分短くて列車の動きに合わせて閉塞区間が連続的に動いているとみなせるものが、移動閉塞である。なお、閉塞長が長い場合を固定閉塞と呼ぶ。また、通常の鉄道では先行列車はどんな速度で走っていてもその位置で停止しているとみなして後続の列車の速度制限を決めている。しかし、高速道路で車間を詰めて走ると同じように、先行列車の速度情報を利用すればもっと時隔を詰められる。

次に、その信号システムをロープレスエレベータに適用する場合の、性能を決める要素を鉄道と比較しながら列挙すると下のようになる。ロープレスエレベータは高度な移動閉塞を実現する可能性を持ち合わせる反面、固定閉塞に縛られる面も持っているのが特徴と言える。

1. 高い位置検知精度とそれに基づく高度な着床精度やジャーク制御
エレベータの高い制御性に必要な高度なセンサや無線通信技術などを利用して高度な移動閉塞システムを容易に構築できる。
2. かごの高さ
かごの高さは、かごそのものに加え、ドア閉閉装置や、高速エレベータの場合流線形カバーがあり、1階床分以上ある。したがって2つのかごは2階床分以上近づくことは不可能と考えられる。なお、通常はかごの高さは同じであり、列車によって長さが異なる場合のある鉄道とは異なっている。

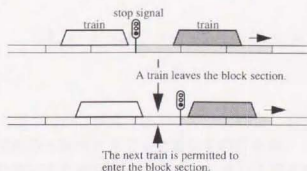


図 3-5：鉄道における閉塞システム



3. 閉塞長

移動閉塞の場合は閉塞長が無限に小さいとみなせる。2つのかごを2階床分まで近付ける場合、閉塞長は1階床分以下である必要がある。

4. リニアモータのセクション長

1つのき電セクション内に1つのかごしか入れず、固定閉塞と同じ性質を持つ大きな制約がある。上記と同様の理由によりセクション長は1階床分以下の必要があるが、かごの接近するロビー階付近だけセクション長を短くすることも可能である。

5. 走行距離(揚程)に対する停止位置(階)の数

エレベータは鉄道に比べて非常に多い。そのため、階間停止しないような思想で固定閉塞にすることも考えられる。

6. ジャーク・加速度

起動から停止にかかる時間に対する加減速に要する時間が、鉄道に比べて大きいのが特徴である。これらの制限値が小さいとブレーキ距離が増し、かごの間隔を詰められない。いずれも乗り心地の限界値まで出せるとしてよい。

7. 速度

駆動装置の定格電力に依存する。運行面では、輸送能力や乗車時間、耳詰まりなどの人間への生理的影響を総合的に考慮して定められる。

8. 先行かごの異常減速度

先行かごの速度情報を用い、異常時の減速度を計算に入れると、後続かごは先行かごの現在の位置ではなくその先の異常停止した地点を基準にして走行できるため、高速走行時のかごの時隔が詰められる。異常減速度を無限大とすると先行かごの速度情報は使わずに、先行かごを brick wall とみなすことになる。

3.3.2 数式による信号システムの表現

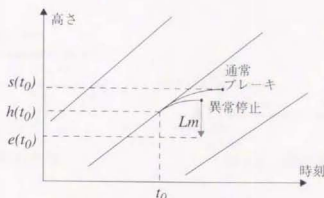
ここでは、上り方向を正とした上り方向の場合で議論する。

ある時点でのかごの位置が h 、速度が v 、加速度が a だった場合、その時点から停止した場合のかごの停止位置 s は加減速度とジャークの制限値 a_m, k_m に依存し、(3-2) 式のような。(3-2) 式は、その時点までの加速度曲線など、過去の履歴には依存しない式である。

$$s = h + \frac{(2k_m v + a^2)(2k_m v + a^2 + 2a_m(2a + a_m))}{8k_m^2 a_m} \quad (3-2)$$

このような演算は、走行中のかごが乗り場呼びやかご呼びに応答して目的階に停止できるかを判定するために従来のエレベータでも必要なものである。

また、先行のかごが異常により減速度 a_e で停止した場合の停止距離は、ジャークを無視すると $v^2/(2a_e)$ である。かごの大きさから定められるかご間の接近限界距離 L_m がどのかご

図 3-6: h, s, e, L_m の関係

についても同じであることを考慮すると、移動閉塞の場合後続かごは (3-3) 式の位置までに停止できれば安全だとみなせる。

$$e = h + \frac{v^2}{2a_e} - L_m \quad (3-3)$$

なお、 h, s, e, L_m の関係を図 3-6 に示す。

固定閉塞の場合は、(3-3) 式の値が閉塞位置によって量子化され、位置が e 以下で位置 e に最も近い閉塞境界になる。

3.3.3 様々な信号システムのロープレスエレベータへの適用性

ここでは単純な解析方法として、運行スケジュールを組み立場から、定格速度・閉塞長（最大は 1 階床差分）・異常停止時の減速度・先行かごと後続かごの出発／停止階が与えられた時のかごの時隔を解析することとし、閉塞システムのもとで図 3-7 のような理想走行曲線を保てるような先行かごと後続かごの出発時刻の差の最小値を求める。

すべてのかごの大きさは均一なため、大きさを見捨て、単に質点が 2 階床差分よりも接近できないとした。また、閉塞区間は 1 階床差分を同じ長さの整数個の区間に区切ることにし、停止位置の誤差を見捨てて閉塞を数学的に図 3-8 のように定義して、各階が閉塞の先端になるようにした。一方、ブレーキ面の仮定では、後続かごは常に常用減速度で停止することとした。そして、かごは加減速度・ジャークの制限値 $0.8 \text{ m/s}^2, 1.0 \text{ m/s}^3$ を守りながら進入できる閉塞の先端までに通常のブレーキでぎりぎり止まれる速度まで常に出すことができると仮定した。

ここでは、後述の 5.3.1 節のような運行を仮定し、スケジュールの運行周期を決めるクリティカルな所は、図 3-9 の 4 つの部分であると想定した。その中で、No.2, 4 は片方のかごが隣のシャフトとの間を移動する場合で、この場合は少なくとも図 3-8 のような閉塞設定ではかごの接近限界が 2 階床という条件にのみ依存し、基本的に信号システムに依存しな

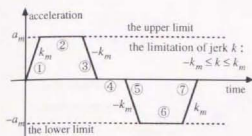


図 3-7：理想走行曲線

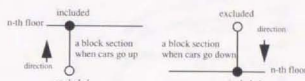


図 3-8：閉塞区間の定義

い。したがって、信号システムに依存するのは図 3-9 の No.1, 3 である。以下、順にこれらを解析する。

まず No.1 に焦点を当て、先行かごは 3F から 54F へ、後続かごは 1F から 34F へ行くこととした。この時の先行かごの e と後続かごの s を書かせたものを図 3-10 に示す。

s の曲線において途中の水平な部分は、図 3-7 の③の部分に相当しており、この部分が最も制約が厳しいことが分かる。後続かごを早発させると、ここの部分で干渉が起き、速度制限により加速を緩める時のジャークの大きさが実効的に小さくなることが予想される。

また、図 3-11 には閉塞長や定格速度を変えた場合における先行かごの異常減速度と出発時刻差の関係を示した。これから、異常減速度は通常の減速度 (0.8m/s^2) 程度に見積もらないと brick wall 想定時に比べてほとんど時隔を短縮できないことや、閉塞長は 1 階床差程度でも移動閉塞に近い 0.01 階の場合に比べ大幅に性能が悪化しないことが分かった。これは、元々閉塞長 1 階でも十分短い長さであることも影響している。

次に、No.3 に焦点を当て、先行かごは 34F から 1F へ、後続かごは 54F から 3F へ行くこととした。この時の先行かごの e と後続かごの s を書かせたものを図 3-12 に示す。この場合、下のロビー階での制約が最も厳しくなっていることがわかる。

また、図 3-13 には閉塞長や定格速度を変えた場合における先行かごの異常減速度と到着時刻差の関係を示した。この場合は、制約となるのが先行かごが停止直後の所であるため、異常減速度には全く依存しない。閉塞長に対しても 1 秒程度の差しがなく、一番大きく効くのは後続かごの速度である。

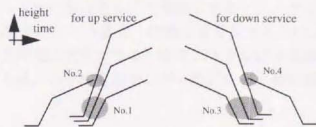


図 3-9：運行周期を決めるクリティカルな場所

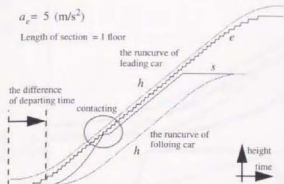


図 3-10：上りの場合の時隔の計算例

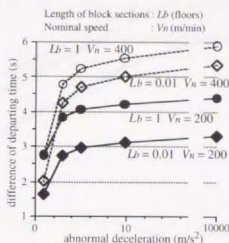


図 3-11：上りの場合の異常減速度と出発時刻差の関係

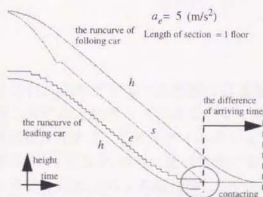


図 3-12：下りの場合の時隔の計算例

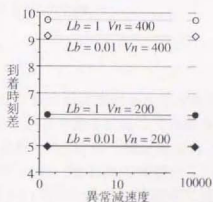


図 3-13：下りの場合の異常減速度と到着時刻差の関係

ここでの議論では、理想的な走行曲線を保てるように運行スケジュールを作成するという立場で議論してきたが、実際のエレベータの運行はデマンド性が強い。ここで議論するシステムでは、スケジュールは目安としての機能しかなく、スケジュールから多少運行が外れることは頻繁に発生する。この場合、頻繁に信号システムによる速度制限がかかり、本質的に信号システムの役割は大きくなる。特に、下り時には不確定要素の大きいローカル階のサービスを終えた後、いくつものかごが一斉にロビー階に降りてくるため、それが顕著である。

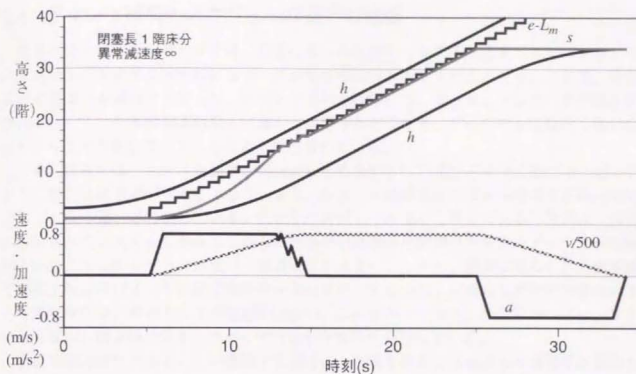


図 3-14：信号による速度制限を受けた例

さらに、これまで述べた解析では速度制限がかかった場面の評価が不十分であるため、運行システムと信号システムを明確に切り離して、先行かごの動きに応じて後続かごの加速度曲線が変わる、リアルタイムのシミュレーションも行った。その一例が図 3-14 である。

図 3-14 は図 3-10 の例に比べてかごを 1 秒早発させている。図 3-10 で後続かごの s 曲線が一点で先行かごの e 曲線に接しているのに対し、図 3-14 ではそれらが連続的に接している。結果的に、理想走行曲線をわずかに崩すだけで、1 秒早発させた結果としてはほぼ 1 秒の早着が可能となっている。このように、ここで議論した信号システムには、特に性能に悪影響を及ぼす要素はないものと考えられる。

また、閉塞区間を図 3-8 のように厳密に定義するのは実際問題としては困難で、実際は着床精度の誤差を含めた定義にする必要があり、考え方を発展させれば、鉄道のように停止階付近の閉塞長を短くすることも考えられる。しかし、これは実質的に実装時の問題であり、閉塞長 1 階床分以下であれば特に大きな差異は生じないと考えてよい。

以上の議論から、信号システムの方式による差異は小さいと考え、今後の議論では、扱いが最も簡単な先行かごの速度情報を用いない移動閉塞方式を前提とする。



3.4 デマンド運行とスケジュール運行の融合

従来のロープ式エレベータでは、乗客は乗ったり降りたりする意志をボタンによりシステムに伝え、システムはそれに基づいて必要な階にのみかごを停止させる。これは、乗客需要に基づいた運行システムで、デマンド運行と呼ばれる。これは、エレベータの輸送単位が小さくて、乗客の確率的発生に運行が影響されることと、すべてのかごは全く独立に別のシャフトで動いていることにより採用されている。

一方、鉄道では、マクロな需要の傾向から予め決められた運行ダイヤに基づいて走っており、乗客は意思表示することなく、また、システムは現在生じている需要を正確に把握することなく運行が行われている。これをスケジュール運行と呼んでいる。鉄道は、信号に制約されたシステムであることから、列車の前後関係を明確に規定するダイヤとの相性がよい。さらにエレベータに比べて輸送単位が大きいことから、列車は定められた停車駅で停車すればほぼすべての駅で乗降客が存在する。すなわち、停車はしたが乗降客がいなくて無駄な停車に終わることが極めて少ない。これらのことから、鉄道においては、マクロな需要から固定的に定まったダイヤでも十分実用性を持っている。

鉄道を輸送需要の少ない所に適用する場合は、時隔を長くして輸送力を調整する結果として、乗客にとって不便なシステムとなる。この場合の理想は、時隔は短く保った上で輸送単位を小さくして輸送力を調整することである。しかし、この場合は、停止しても乗降客のいない可能性が大きくなり、予め定められたダイヤ通り停車駅を守ると無駄な停車が増えたり、逆に必要な駅を通過してしまったりして非効率である。

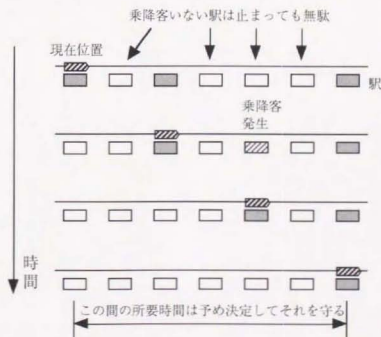


図 3-15: セミデマンド運行



ローブレスエレベータは、このような状況に近い運行を行うことになる。すなわち、輸送単位は従来のエレベータと同程度で、信号システムの制約を受ける点は鉄道に類似しているからである。したがって、停止階を鉄道のダイヤのように厳密に定めるのは無駄であり、ローブレスエレベータではかごの前後関係とその大まかな位置・時刻のみを定めるスケジュール運行を基本にしながら、需要に応じて停止階をリアルタイムで定める、図3-15のようなセミデマンド運行が効率的である。

もっとも、図3-15で示したような基本的な運行自体はバスで日常的に行われている。しかし、バスは目的地まで行く最も早く着いたものに乗車できる（満員でなければ）のに対し、群管理制御のなされたエレベータでは最も近くにいたかごが通過することもある点に大きな違いがある。また、バスは完全な一次元システムではなく、必要があれば追い越しも可能である点も異なる。したがって、本論文ではバスとは異なった新しい議論が必要となる。

3.5 まとめ

本章では、自走式のかごに必要な推力特性の計算から加減速度は常に乗り心地の限界まで出せるとみなしてよいことを示した。また、ローブレスエレベータに不可欠な信号システムの鉄道との相違点をまとめ、閉塞長1階床分以下という現実的な仮定なら、閉塞長や先行かごの速度情報の有無に関わらずかごの運行間隔がほとんど変わらないことを定量的に示した。さらに、信号システムのもとでは鉄道のようにスケジュールに従った運行がよいことから、運行スケジュールを取り入れた上で従来のエレベータと同様のデマンド運行を行うセミデマンド運行を提唱した。



第4章 ロープレスエレベータを利用した鉛直輸送システムの設計

4.1 はじめに

本章では、まずロープレエレベータそのものの設備のあり方を考え、いくつかの提案を行い、それらの長短所を明確にしている。次に、数台のエレベータを1つの運行ユニットとし、異なるゾーンをサービスするユニットをいくつも組み合わせることで全体のシステムが構成されているロープ式エレベータの設備的階層構造を踏襲することとし、ロープレエレベータを中心にした鉛直輸送システム全体の設備計画の指針について説明する。

これらの議論では、乗客の需要に対して適切な設備を用意することが必要である。設備の設計段階は、通常はビルが建てられる前であり、需要データは各階の用途から推測した需要予測値を用いることになる。

4.2 前提とするロープレエレベータのハードウェア

まず、ロープレエレベータに関しては図4-1のようなハード構成を仮定する。かごの両面にリニアモータを配置することで、片面の2倍の推力を得ながら1次側と2次側の間の強い吸引力を打ち消すことを想定している。この構造では、かご自体に上記の吸引力が作用するためかごの強度を強くする必要はあるものの、両面モータを用いながら分岐にも対応しやすいのが特長となっている。

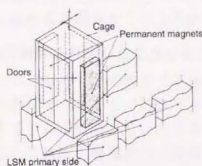


図4-1：想定するロープレエレベータのハード構成



図4-2：複数ロビー階を用いた運行



乗降のためのドアは、リニアモータのない面を2つ使用する。シャフトがドアの方向に2つ並んだ時でも両方のシャフトで乗降が可能だが、3本以上シャフトがドアの方向に並んだ時は、真中のシャフトへの乗降は不可能となる。

また、建物の出入口があるロビー階など、大量の乗客をさばく必要がある場合は、乗り場の数が不足することが考えられる。図4-1のような構成では、両脇のシャフトにしか乗客はアクセスできないため、複数のかごにアクセスしようとすると図4-2のように鉛直方向にかごを並べて待機することになる。しかし、鉛直方向の人の移動を考えるとアクセス可能なかごは3つ位が限度であり、2つのかごの接近限界が2階床差分という3.3.1節の仮定により、例えば図4-2のようにB2F、1F、3Fといった一階おきのロビー配置を想定する。このように、エスカレータを補助的に用いることでロープレスエレベータの輸送力を確保できる。

4.3 ロープレスエレベータの様々な運行ユニットの構成法とその特徴

4.3.1 横行機能を利用しない1シャフトのみの往復運行

これは、複数のかごを1本シャフト内で往復運転させる方法である。以下では、この方式を1本シャフト式と呼ぶ。この方式であると、横行機能のための装置が不要となり、機器構成が容易で、安価にできるのが特長である。

しかし、これには大きな問題点がある。かごの順序の入れ換えが不可能なため、かご数を増やすと各かごのサービスできる階に制約が生じる。特にロビー階と各一般階の間の乗客の多い出勤時には、ロビー階数以上にかごを増やすと、最も上のかごがロビー階に着くことができず、輸送に貢献しない。したがって、かご数はロビー階数以下にするのが普通の使い方となる。

ロビー階は前述の通り3つ程度が現実的であり、かご数は1シャフトに3つが限界となる。これにより、シャフトが長くなると単位シャフト長当りのかご数が減少するという、従来型エレベータの欠点は根本的には解消されない。しかし、ロープ式エレベータよりもかご密度が高いことはロープ式エレベータよりは優れた運行性能を持ち得ることになる。横行機能を切り捨てたことでハードの構成が簡単になるのは一つの大きな利点であるので、主に低揚程の用途でこの方式が適切な場合もあると考えられる。

4.3.2 横行機能を利用した2本シャフト間の循環運行

ロープレスエレベータの特長である横行機能を生かし、図4-3のように鉄道の複線に見立て、2本のシャフトを1つのユニットとして循環運行する方式は、本質的に高密度輸送を可能とする。以下では、この方式を2本シャフト1ユニット方式（略して2本シャフト式）と呼ぶ。これは、複線鉄道が単線鉄道の2倍よりもはるかに高い輸送力を持ち得ることから言って明らかである。

しかし、出勤時等のピーク時は上りと下りの乗客需要は著しく異なり、例えば朝出勤時の図4-3の例では上りに乗客が集中して停止階が多く時間を要す反面、下りは回送

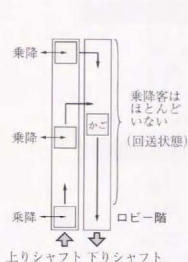


図 4-3：2 本シャフトによるユニット構成

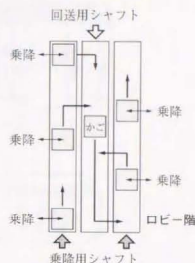


図 4-4：3 本シャフトによるユニット構成

状態で短時間で通過する。したがって、下りシャフトのかごの空間密度は低くなっており、下りシャフトには無駄な余裕が生じてしまう。

したがって、この方式はピーク時の上り方向と下り方向の需要が均等に近い場合に効果を発揮する方式である。

4.3.3 3 本シャフト 1 ユニット方式の提唱

ピーク時に見られる上りと下りの乗客需要の著しい偏りに対応できる、最初から偏った需要を考慮した運行方式としてこの方式を考えた。この方法では、1 本の回送用シャフトを 2 組の乗降用シャフトと組み合わせて用いる図 4-4 のような運行を行う。以下では、この方式を 3 本シャフト 1 ユニット方式（略して 3 本シャフト式）と呼ぶこととする。

3 本シャフト式を用いると、片方向の需要のみを捌く場合、理想的に考えてシャフト本数 1.5 倍で輸送力が 2 倍になる。中央のシャフトは両端の 2 倍のかごを捌く必要があるため、途中階でかごを止めると輸送能力が低下する。したがって、中央のシャフトは回送専用とする。これだけでは片方向のサービスしかできないが、鉛直輸送システム全体として逆方向のサービスを行うユニットが少数あればよいので問題はない。

さらにこの方式では、主に閑散時に生じる余剰かごを回送用シャフトに収納できることから、運行の柔軟性が高い。この方式は、ほぼすべてのビルで見られるピーク時の上りと下りの乗客需要の著しい偏りに対応したうえに、柔軟性も持ち合わせていることから、通常のオフィスを中心としたビルの中核的存在になり得る方式である。

4.3.4 各方式の使い分けの目安

2 本シャフト式と 3 本シャフト式の使い分けは、上り方向と下り方向の利用人数比で決まる。それを図 4-5 のような単純なモデルで考察する。1 シャフトの単位時間当たりの最大輸送能力が 1 で、ある方向の単位時間当たりの需要 d と別方向の需要 xd ($x < 1$) を捌くと

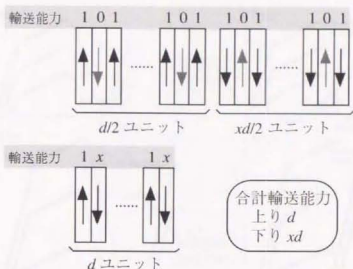


図 4-5：2 本シャフト／3 本シャフト式の比較

仮定した場合、1 ユニットで両方向のサービスをする 2 本シャフト式では d 個のユニットで両方向の需要を捌けるが、3 本シャフト式では $d/2$ 個のユニットで片方向を、 $xd/2$ 個のユニットで別方向を捌く必要がある。3 本シャフト式の方がシャフト本数を少なくできる条件は、(4-1) 式である。

$$2 \cdot d > 3 \cdot \left(\frac{d}{2} + \frac{xd}{2} \right) \quad (4-1)$$

これから、 $x < 1/3$ が得られ、上下方向の利用人数が 3 倍以上違う場合に 3 本シャフト式が 2 本シャフト式に比べて有利になることが分かる。

1 本シャフト式と 2 または 3 本シャフト式の使い分けは、1 本シャフト式のみが図 4-2 の仮定でかご数 3 という制約を受けるため、高揚程ほど 2 または 3 本シャフト式が有利となる。1 本シャフト式と 2・3 本シャフト式では、図 4-6 のように運行周期を決める要素が異なり、前者ではかごの 1 周時間、後者では前後の周期のかご間の干渉によって決められる。したがって、実際にかごの運行パターンを定めないと優位性の比較は不可能で、一般的な議論は難しい。

目安として言えるのは、図 4-7 のように、シャフト 1 本あたりのかご数が 3 個以下ならば、サービスに寄与しないシャフト間移動時間が余分にあるために 2・3 本シャフト式が不利となることである。低揚程の場合に運行パターンを定めた結果、2・3 本シャフト式の使用かご数が 1 シャフトあたり 3 個以上に増やしても輸送能力向上に貢献しない場合は 1 本シャフト式にした方がよい^A。

A. 後述の解析結果である表 7-1 から、このことが妥当な判定基準であることを定量的に読み取ることができる。

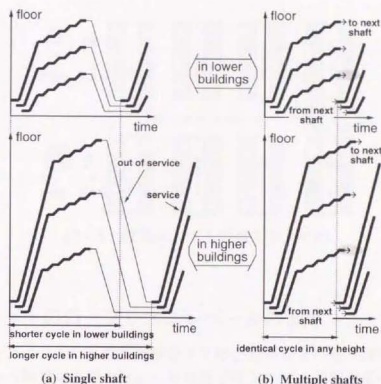


図4-6：1本シャフト式と複数シャフト式の運行周期を決める要素の差

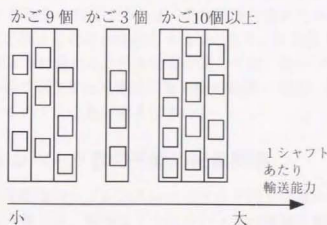


図4-7：かご個数と輸送能力の関係

4.3.5 緩行と急行のシャフトを分離した方式

これまで述べた方式とは別に、一般的に考え付きやすい方式として緩行と急行のシャフトを分離し、追い越しを可能とした運行方式がある。しかし、この方式については、設備面や運行面を議論した付録Aにより、図4-1のようなハード構成を取る場合は有効ではないという結論を得たため、本論文では結果的に中心的なものとして扱わないこととした。

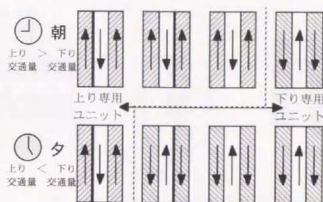


図4-8：複数ユニットの組み合わせ例

4.4 複数ユニットのロープレスエレベータの併用

前節で説明したユニットは、需要が少なく停止階が少ない場合は1ユニットで待ち時間 60 秒以内という限界以下での運転も不可能ではないが、需要が多い場合は停止階が増え、1ユニットでは待ち時間が増加してしまう。したがって、同じ階をサービスする複数のユニットを用意して協調運転を行う必要がある。実際の運行では、例えば図4-8のように、需要が多い時は多ユニット、少ない時には1ユニットというように使う。

どれだけのユニットを用意すればよいかは、運行計画を定めて各ユニットの輸送力や運行周期を算定し、需要を捌けるだけの輸送力を持つことと、最大待ち時間を 60 秒以下にすることの両方を満たすように定める。待ち時間に関しては、ロープ式エレベータではかごの出発間隔（すべてのかごが止まった場合の最大待ち時間に相当）を 30 秒程度以下にすることが目安とされているので、これに従えば良い。

4.5 ロープ式エレベータ群の平面的配置問題

図4-1のような構成を取るロープレスエレベータを平面上で適切に配置することは難しい。図4-1の構成を取る場合は、乗客は1つのユニットの両端の乗降用シャフトで同時にかごを待つことができないからである。

ロープ式エレベータでは、乗客の混乱を防止し、スムーズな乗降を実現するためには次の2つの点を守ることが望ましいとされ、一般的に直線配置で最大4台、対面配置で最大8台のエレベータを群として運行されてきた。

1. 5台以上の直線配置をなくすことで、乗客の動線が長くなるのを防ぐ
2. 異なるゾーン行エレベータを連続して直線配置しないことで、乗客の混乱を防ぐ

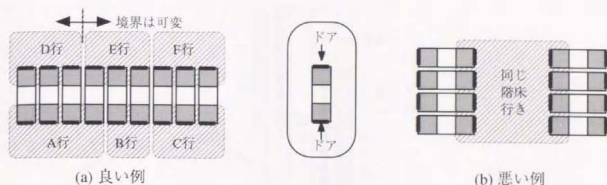


図4-9：シャフトの平面的配置案

一方、本システム特有の問題として、ある乗降用シャフトの裏側が別の乗降用シャフトとつながっている点がある。そのため、図4-9(b)のような対面配置にして乗り場の両側のドアで乗客を待たせようとする、同期して運行すべきユニット数が増えて運行が複雑になる。このため、なるべく直線配置のような片側で乗客を待たせる構成を取りたい。

さらに、需要に応じてサービスゾーンに割り当てるユニット数を変化させるなどの運行の柔軟性を持たせるために、図4-9(a)のように直線配置で多数のエレベータを並べ、それを複数の行先に分離して使用するのが望ましい。

この構成は、従来のエレベータの原則に反したものとなるので、乗客の混乱を避けるのが重要だが、下記の要因を考えれば、問題は小さいと考えられる。

1. すでに即時予報など、的確な案内による乗客の誘導が行われる素地はあること
2. IPASS[34]のような個別案内可能な端末の実現によつて的確な案内が可能となること
3. ロープレスイレベータは輸送効率がよい、必要な輸送力や待ち時間を実現するためのユニット数はロープ式エレベータの最大8ユニット（1ユニット＝1シャフト）よりも小さく抑えることが可能なこと

したがって、本論文では、図4-9(a)のような配置がよいとする。

4.6 1つのユニットにおけるシャフト・乗り場面積削減方法

これまで示したロープレスイレベータは、基本的に2本や3本のシャフトからなる1つのユニットはすべて同じ長さのシャフトから構成されており、さらにすべての階に乗り場が設けられることを暗黙の前提としてきた。これは、運行の自由度を増し、突発的な需要変動や長期的な需要変動への適切な対応を可能とするためである。

しかし、実際の通常運行では、1本のシャフトがすべての階をサービスすることは現実にはなく、無駄な乗り場やシャフトが存在する。したがって、上記で述べた運行の柔軟性を犠牲とすることで、さらなる省面積化が可能となる。

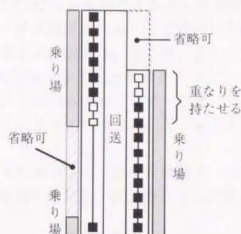


図 4-10：シャフト・乗り場の削減

具体的には、実際の運行形態を確定した上で、図 4-10 のように通常サービスしない部分の乗り場を削る。さらに、上層をサービスしないシャフトはシャフト自体を削ってしまう。こうすると、最初の設計時に仮定した運行形態を変えられなくなるが、省面積を最重要目標とする場合や、需要が変わる見込みがないと予想される場合は有効である。

この時、少しでも運行の柔軟度を持たせるためには、異なるシャフト・ユニット間のサービスゾーンに対応して存在する乗り場を重複させておくことが有効となる。重なる範囲は、シャフトの上下端に近い所では短く、中央に近い部分では長くするのがよい。ゾーンが複数ある場合、上下端でのゾーン変更がすべて中央付近に影響するため、必然的にゾーン移動量が大きくなるからである。

4.7 鉛直輸送システム全体から見た複数エレベータの役割分担

エレベータは、輸送単位が通常は 10 ～ 30 人と小さいため、ビル内にくつも設置される。しかし、全部のエレベータが同じサービスを担当することはなく、通常は役割分担するように設計されている。また、4.3 節で説明した各方式にはそれぞれ長所や短所があるうえ、ロープ式エレベータやエスカレータもそれぞれ長所や短所を持っている。したがって、エレベータの役割分担を行い、お互いの短所を補い合うことで、鉛直輸送システム全体として優れたものを作ることが可能となる。

各エレベータの役割を分担するには、需要形態を把握することが必要となる。ビル内の交通需要は、2.3 節でも述べたように、大きく次の 3 つに分けられる。

1. 建物出入階や食堂階などの特殊階とそれ以外の一般階との間（都心－郊外型輸送）
2. 特殊階どうし（シャトル輸送）
3. 一般階どうし（ローカル輸送）



これまでのビルでは、原則的に1, 3. を同じエレベータでサービスしており、2. の需要が多ければそれ専用のエレベータを設けている。ここでは、さらに1, 3. を別のエレベータでサービスする可能性について主に議論する。そして、ここでは、1, 2. の輸送を担当するものをメインエレベータ、3. の輸送を担当するものをローカルエレベータと定義する。なお、本節では大勢の乗客に乘換えを強いるスカイロビー方式は扱わないが、スカイロビー方式の場合のローカルエレベータは3. と1. のスカイロビーから各階への部分とを同時にサービスすることとなる。

現実のオフィス中心のビルにおけるピークは、出勤時・昼食時・退勤時に現れる。各時間帯における特殊階と一般階間の需要と一般階間どうしの需要との関係を次にまとめる。

1. 出勤時

ピークは非常に鋭く、短時間で大量の乗客が利用する。しかし、出入口から各一般階へ向かう以外の乗客はほぼゼロであり、ローカルエレベータは明らかに不要。

2. 昼食時

ピークは出勤時に次いで大きい。一般階間どうしの利用も全体の需要からみた比率は低いが存在する。ローカルエレベータを設けた方がよい可能性はある。

3. 退勤時

日本ではピークは小さく、持続時間が長い。その分、一般階間の利用もわずかだがある。海外で定時退社が一般的な所は出勤時と同様な特性と考えられ、ピークは出勤時よりも大きいこともある [40]。その場合はローカルエレベータの必然性は小さいと考えられる。

特殊階と一般階の間の需要に加えて一般階間どうしの需要も同じエレベータでサービスする時の欠点は、サービスゾーン内での停止階数が増えることである。そこで、メインのエレベータがロビー階と一般階間の需要に加えて一般階どうしのローカルなサービスを行うことによってどれだけ停止階が増加して、その結果どれだけ輸送力が低下するかを、(2-21) 式をもとに計算した。結果の図4-11 から分かるように、サービス階床数に対してロビー階からの乗客数が少ない場合には、一般階間の需要の影響を大きく受けることが分かる。そのケースとして、定員が小さい場合や、業務時にロビー階からの需要に対する一般階からの需要が相対的に大きくなった場合がある。

これまでのロープ式エレベータでは、定員十数名～二十数名で10～20階のゾーンをサービスするのが一般的であることを考えると、輸送需要が多くて元々多停止である条件のもとでは、上記1. の問題は本質的にそれほど大きくなかったと考えられる。しかし、ロープレスエレベータの場合は、定量的な議論を7.6節に示すように、定員を少なくして沢山のシャフトを設ける方が全体の占有面積を小さくできる可能性が大きいため、定員を小さくする設計もあり得る。その場合には、停止階増加による輸送力低下の問題が出てくる可能性がある。



設備的にローカル専用のエレベータが必要な場合は、需要ピーク時の需要形態に依存する。非ピーク時には、ピーク時にメインエレベータとして使用していたものをローカル輸送に転用できるからである。ピーク時の需要形態を分析し、次のことが満たされればローカル専用エレベータを設けた方がよいことになる。

混雑時にメインのエレベータがローカル輸送も同時に担当すると停止階数が増加して輸送力が下がり、メインのエレベータだけの時よりもローカルなエレベータと併用した方がエレベータ面積を削減できる

ここで問題となるのは、設備の設計段階ではローカルな需要が分からないことである。これは、同一企業または関連企業がどのフロアに入るかに大きく依存しており、もしそのフロアが決まっていれば2.3.1節のような目安を用いて大まかな需要を掴むことはできる。

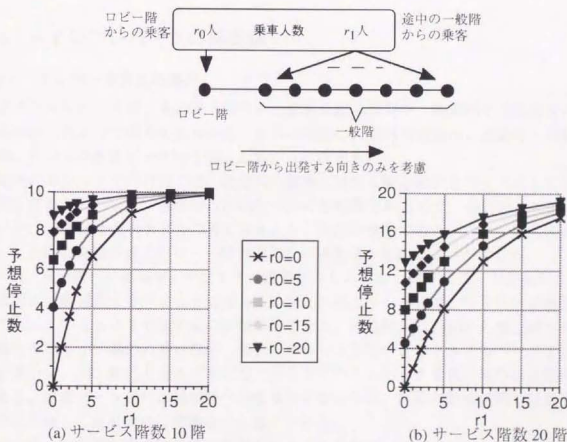


図4-11：途中の一般階間の乗客による停止階床数の変化

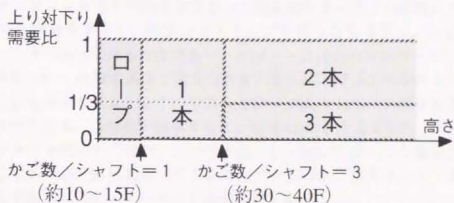


図 4-12：メインエレベータにおける各方式の使い分け方

4.8 メインエレベータの構成論

4.8.1 エレベータ方式の選択

メインエレベータは、主に地上階と各一般階を結ぶ需要や、展望階や食堂階などの需要にも対応したものである必要がある。それに対応した設備の計画は、出勤時・退勤時・昼食時、といった需要ピーク時を想定して行う必要がある。

従来のエレベータの計画では、出勤時の需要に対する輸送能力をベースにして台数や設置階が定められている。退勤時は出勤時の逆の乗客流であるので、本質的に大きく変わらないが、昼食時は食事をビルの外で取る人とビル内の食堂で取る人の2つに乗客流が分かれ、ビル内の食堂が地上のロビー階付近にない場合は本質的な違いが生じる。

一方、展望階への需要は、オフィスの需要がほとんどない休日にピークがあることから、面積的には展望階まで行くことのできるオフィス用エレベータで、オフィスの需要が小さくて余っているものを利用するのが効率的である。展望階へは外部から地上階へやってきた乗客の利用が圧倒的に多いため、現在のビルでは専用のシャトルエレベータを設けることも多いが、200階にもなるビルで地上から専用のエレベータを設けるのは面積的に不利である。需要ピーク時には展望階への需要は少ないため、設備の計画段階では展望階への需要は無視して実用的には問題ないと考えられる。

そこで、出勤時や昼食時に特に重要となるメインのエレベータについて考える。ビルが高いほど2.4節で述べたようにロープレスエレベータの優位性は増す。4.3.4節で議論したように、1シャフトあたりのかご数が3個より多い場合に複数シャフトのユニット化のメリットが出る。しかし、メインエレベータでは、ある程度の高速度性が要求されるため、かご1周時間が短くなるうえに、ブレーキ距離の増大により時隔を詰められないため、かごの個数は少ない。



厳密には第5章による運行計画を立てないと定量的な使い分けの議論はできないが、単純かつ理想的な議論をすると、複数シャフト方式を使う目安は図4-2のように全階床をサービスゾーン3つに区切れる程度であり、1ゾーンは現在のエレベータでは10～15階であるので大体30～40階であると考えられる。それ以下では1本シャフト式を使うことになるが、これもサービスゾーン1つであるとロープ式エレベータが有利となる。それが大体10～15階である。これらを図示すると、図4-12のようになる^A。すなわち、60階以上では3本シャフト式のかご数が1シャフトあたり3個より多くなり輸送力的に3本シャフト式が優位であるが、30階程度では3本シャフト式のかご数が1シャフトあたり3個程度にしかならず輸送力的に1本シャフト式が優位となる。

輸送能力面での使い分け方は上記のようになるが、ロープレスエレベータに代わってあえてロープ式エレベータを使う理由を列挙すると次のようになる。

1. 安価であること。
2. 高速が大きく、乗車時間が短縮できること。メインエレベータは、長距離を移動する乗客が多いので、重要である。ロープレスエレベータで高密度輸送を行うと、信号システムの制約により速度が抑えられてしまう。
3. サービスに寄与しない横行時間がないこと。ロープレスエレベータの横行時間が非常に長い場合は輸送上のネックとなり、ロープ式エレベータの優位性が大きくなる。

1. に関しては、費用と効果の比較を行う必要があるが、ロープレスエレベータがハードウェアとしてほとんど実在しないので、現段階では議論が難しい。2. は非常に優れた特性に見えるが、低層時にはあまり差が出ないことと、超高層になると耳詰まりなどの問題で、逆に利点とはならない。一方、3. は本質的なもので、ロープレスエレベータの横行速度によって複数シャフト式のロープレスエレベータの輸送能力が決められるが、それと1シャフト式のロープレスエレベータやロープ式エレベータの輸送能力とを比較することで各々のビルでロープ式かロープレスかの結論を出すことができる。

なお、需要が最もピークとなる時間帯にピークとは逆方向の需要が極めて小さい場合は、ロープレスエレベータでは輸送能力が過剰な場合が生じる。この場合に、このわずかな需要のために1ユニット余分に設備を持つておくのは無駄である。この場合、メインエレベータの補助用としてロープ式エレベータを用意するのが望ましいが、ピークが短時間であることも考えれば、荷物用や非常用の通常用いられないエレベータの輸送力をごく短い時間だけ逆方向のわずかな輸送用に転用する方が合理的である。従来の荷物用や非常用エレベータの概念を見直すことは設備の合理化に寄与すると考えられる

A. これらの目安は、特に1本シャフト式と3本シャフト式の使い分けについて後述の7.3節の定量的議論から妥当性が確認できる。



4.8.2 設置階

設置階の決定の際の最低限の制約は、地上からすべての階に行ける構成にすることである。したがって、すべてのシャフトは地上まで伸びている必要がある。

ロープレスエレベータを適用する場合は、いくつもの系統を用意する必要はない。しかし、低いビルの場合は1系統、高いビルの場合は数系統のエレベータに分けて、各系統毎に違ったものとするべきである。ローカルサービス区間は10～15階程度が目安で、図4-1より1つのユニットで3ないし6のゾーンをサービスできることから、60～90階毎に1つの系統を割り当てるとよい。

ビルの途中に多数の乗客が集中発生する食堂階等がある場合は、その階で系統を分割するのがよい。そうすると、すべての階からその階へ乗り換え無しのサービスを行うことができる。

設計で注意すべき点は、出勤時など最もピークの高い時間帯を想定して用意したユニットで昼食時など他のピーク時間帯を賄えるかどうかである。賄えない場合は、賄えない分だけ新たにユニットを追加することとなる。

4.9 ローカルエレベータの構成論

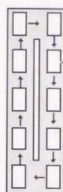
4.9.1 エレベータ方式の選択

ローカルエレベータは、数階～十数階程度の狭い範囲のローカルな需要を賄うものである。最も考えられる場面は、オフィスにおける業務時間に異なる階の同一企業または系列企業間の行き来が多く、それは通常上り方向と下り方向の輸送需要が似通っている。したがって、ロープレスエレベータを適用する場合は、1シャフト式のみ、または2シャフト式が優れている。

そのローカル用のエレベータの検討に近い例として文献[27]の例がある。文献[27]で紹介されている循環型エレベータはハード的にはロープ式エレベータだが、ロープを用いながら数個のかごを10～40階程度の2本のシャフト内で循環するエレベータで、運行上は4.3.2節で述べたものと同じである。文献[27]によると、このような狭い範囲の輸送でも、同一の輸送能力で占有面積が従来のロープ式エレベータの約半分となることが示されている。

狭い範囲でのローカルな需要の特徴として、サービス完了時間に占める乗車時間の割合が小さいため、速度が低くてもよいことが挙げられる。速度が低いとブレーキ距離が減り、かご数さえ多くできればかご間の時隔を詰めて、結果的に高密度運転が可能となる。

このような低速なローカルなロープレスエレベータの究極の姿は、遊園地の観覧車にある。すなわち、図4-13に示すように、2シャフトの中で1回おきにサービス階数分かるかごが、すべての階を同期して同時に発車し、次の階に同時に到着するというものである。乗車時間は長くなるが、最大待ち時間は1階分の走行時間約6秒に停止時間約10数秒を加



すべてのかごは
同期運転

かご間の物理的
干渉から間隔は
2階床分

図 4-13：観覧車的な高密度運行

えた約 20 秒の 2 倍の約 40 秒となり（横行時間は 5 秒程度と、理想的な場合を仮定）、2 シャフト式で十分なサービスができる。

さらに、図 4-14 のように、ローカルサービス区間がいくつも連続する場合は、ロープレスエレベータを用いれば同一シャフトで運用できる。ローカルサービス区間の境界も可変になるため、後で需要が変化した場合でも柔軟に対応できる。

このように、移動階床数の小さいローカルサービスでもロープレスエレベータを使う余地が大きいと思われる。それでもあえてロープ式エレベータを使う理由を列挙すると次のようになる。

1. 安価であること。特に、数階～10 数階程度のロープ式エレベータは需要が多いので非常に安価な供給が可能となろう。
2. 高速化による乗車時間短縮が大きいこと。ローカル区間の下端付近と上端付近の比較的長い区間を行き来する需要が多い場合には効果的である。
3. 1 シャフトあたりの輸送単位が小さいこと。需要が小さい場合には小回りの効いた計画が可能となる。ただし、需要が小さければメインエレベータに役割を任せることも考えなくてはならない。

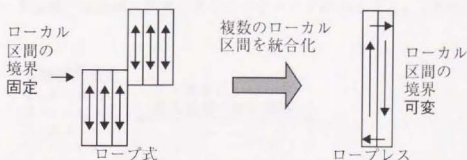


図 4-14：ローカルサービス用エレベータのロープレス化による設備の柔軟性

4. 横行しないため、サービスに寄与しない横行時間がないこと。ロープレスエレベータの横行時間が非常に長い場合はロープ式エレベータの方が有利な場合が生じる。

ローカルエレベータの場合も、ロープレスエレベータのかこの横行時間がどの程度になるかで結論が大きく異なってくると考えられる。

4.9.2 設置階

4.7節の議論から、ローカルエレベータがないとメインエレベータの性能が落ちる場所に設置するのが基本である。それは、通常は同一企業が複数の階にまたがってオフィス構えているような場所となる。具体的な方法は、図4-15のように特殊階を発着する乗客分を除いたODから各階間の断面交通量を求め、そのピークの地点付近で、両端を断面交通量の極小値とする区間にローカルエレベータを設けることを想定し、そのありなしで全体の床面積を比較して面積が少ない方を採用する。ローカルエレベータを設置するか否かの分岐点は、ケースバイケースで、明確な基準を示すのは困難である。したがって、これに関しては各設計者が両方の場合を比較評価するしかない。

短区間のロープ式エレベータが図4-14のように隣接する場合は、ビル建設後の需要変化に対する柔軟性を確保するために、統合してロープレスエレベータを導入するようにすべきである。

4.10 各エレベータのシャフト本数・ユニット本数等の決定

図4-16に、設計の流れを示す。大まかな流れは、対象とするビルの最も大きなピーク需要に合わせてまず設備を用意し、その設備でそれ以外の時間帯の需要を賄えるかをチェックし、賄えない場合は別の時間帯専用のエレベータを用意するという2段階になっている。最も大きなピーク需要を、ビルの需要特性に合わせて適切に定めて適切な設備が用意できれば、それ以外の需要は第5章で述べる運行計画だけの議論で処理することが可能である。

需要形態の複雑なビルに対しては、このように様々な考慮が必要であるが、多数の企業が入居したオフィスビルで、かつ主要な食堂が地上にある場合は、すべてのピーク需要が出勤時の特性に類似するため、出勤時だけの設計で十分な場合がほとんどである。

なお、これまで述べた議論は、設計者の主観の入る余地が残されている部分もある。一般にエレベータ設備の設計は、非常に多くのパラメータがあるうえ、ビルの性格や顧客の

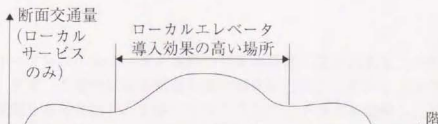


図4-15：ローカルエレベータを導入する効果の高い場所

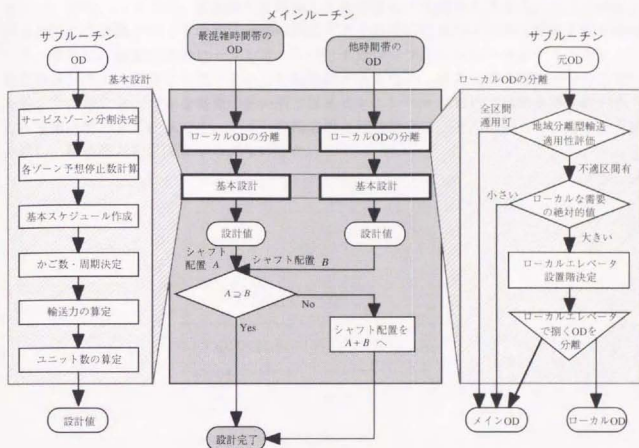


図4-16：設計のためのフローチャート

ニーズ等に依存するものでもあり、最適化が困難なのがその理由である。ロープ式エレベータでは、例えば文献 [41] のように非常に困難な最適化を遺伝的アルゴリズムを用いて解決する試みもあるが、やはり実段階では設計者の主観に頼る部分が存在する。したがって、ロープレスエレベータでも設計者の主観に多少依存するのは止むを得ないことであると考えられる。

実際に定めるシャフト本数やユニット本数は、図4-16のサブルーチンから見て分かるように、5章で述べる運行スケジュールを実際に作り、シャフトまたはユニット1つあたりの輸送能力を決定しないと定量的に求められないため、定量的な議論はここでは行わないこととする。

4.11 まとめ

本章では、ロープレスエレベータを実際のビルの設備に取り入れるための設備の設計方法をまとめた。まず、高層化による輸送力減少のない方式として、1シャフト複数かご運転機能と横行機能を有効利用した3本シャフト1ユニット方式を提唱し、ピーク時に上下方向の需要が著しく不均衡であるという一般的な需要に対して輸送能力が最大となるよう



にした。また、シャフト・乗場面積を削減して超高層ビル程度でも提案方式の適用性を上げる方法と、複数ユニットの並列運転の際にドアを直線的に並べる平面的配置方法も提唱した。さらに、提案方式のロープレスエレベータやロープ式エレベータなどの各方式には鉛直輸送システム全体から見てそれぞれ長短所があるため、各方式間の役割分担の重要性を示した。特にローカルな需要の多い所ではメインエレベータだけでは停止階床数が多くなって輸送能力が下がるため、メインの輸送用と補助的なローカル用のものに分ける方法を示し、輸送能力を発揮させるようにした。

第5章 ロープレスエレベータの運行計画

5.1 はじめに

本章では、ロープレスエレベータのセミデマンド運行の要素の一つであり、第4章の設計の段階でも仮定として必要となる、運行スケジュールの作成方法について述べる。鉄道における地域分離型輸送方式を導入した運行方法、上下方向の輸送の差異により異なった運行形態を構成する方法や、回送時のスケジューリング方法とその効果について述べる。

5.2 前提条件

以後の検討にあたって、次の仮定をおくこととする。

1. かごがシャフト間を乗り移れる位置は自由に設定できるものとし、理想的にはすべての階で乗り移り可能とする。

必要な所に必要なだけかごを供給するなど、柔軟な輸送を実現するためには乗り移れる位置がなるべく多い方がよい。

2. かごがシャフトを移る際には、乗客は載せない。

現状では、水平方向への移動が円滑かつ速く行なえるかどうかは不透明であるため、水平方向移動時には乗客を乗せないことを基本とした。これにより、乗客を載せた状態でのかご同士の追いつきが制限される。

3. 2つのかごの接近限界は2階床差分とする。

3.3.1節で述べたかごの大きさを考慮したものである。

4. かごはすべて均一なものとして区別をしない。

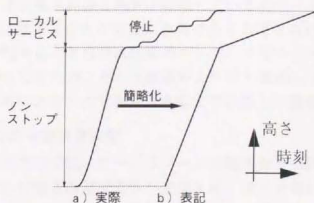


図 5-1：運行曲線の簡略化

かごを区別する必要がある場合として、ハードウェア的におおののかごの構造が異なる場合、あるいは少々冗談になるがVIP用の豪華なかごを用意する場合、などが考えられるが、検討の簡略化のために本論文では考慮しない。

なお、今後の議論で出てくる運行スケジュールは、特に正確さを必要としない限り、図5-1のように直線的に簡略化して表記することとする。これにより、今後出てくる運行スケジュールには、線が重なり一見衝突しているかのように見えることがある。

5.3 1 シャフト複数かご運転による地域分離型輸送方式

5.3.1 基本パターン

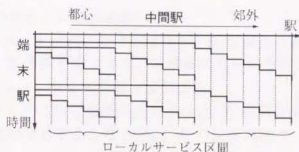


図5-2：鉄道における地域分離型輸送方式の簡単な一例

オフィスビルにおいて最も輸送力が逼迫する場合として、出勤時や昼食時などが挙げられるが、これらの時間帯の特徴は、特定階（ロビー階や食堂階）とその他の一般階の間の交通が非常に大きい点である。これは、鉄道における都心と郊外を結ぶ通勤輸送と類似している。

都市と郊外を結ぶ通勤鉄道路線では、図5-2のように都心の端末駅と郊外の各駅の間を高速に結ぶ地域分離型ダイヤ [42][43] が有効である。この運行では、都心から途中の郊外駅までで高速性を稼ぎ、その先でローカルなサービスを行っている。輸送需要が逼迫している状態での輸送は、通勤鉄道路線と形態が類似しているので、ロープレスエレベータでも地域分離型ダイヤを応用することが非常に有効であると考えられる。

サービスゾーンを分割すること自体は従来のエレベータでハード的に別々のシャフトに分離された形で行なわれてきたが、それを鉄道のように1本のシャフト内で行なう点が従来のエレベータと根本的に異なる点であり、本論文での新しい提案でもある。

5.3.2 サービスゾーンの分割境界決定

上記の地域分離型輸送方式では、サービスゾーンの境界をどこに設定するか、またいくつのゾーンに分割するかで輸送能力が大きく変化する。ゾーン数に関しては、ロープ式エレベータの例では1つのゾーンが10～15階分になるのが妥当とされている。地域分割数

が少ないと、階が多くなるにつれて高速性が失われるうえ、運行周期も長くなって高層化に対応できなくなるので、階に応じた地域分割数にする必要がある。

また、ゾーンの境界の設定には、次のような要素を考えなくてはならない。

1. 運用の面から（主に輸送力）

1.1 かご内の最大乗客数をなるべく同程度に

各々が持つ輸送力をなるべく有効に利用するため。最大乗車数は、ODが分かれば容易に計算可能である。

1.2 ローカル区間所要時間をなるべく同程度に

図5-2から想像すれば分かるように、ローカルサービス区間の所要時間が不均一だと、そのうちの所要時間が最も多い1つのゾーンが全体の周期を詰めるのを阻んでしまうため。

2. 乗客サービスの面から（主に乗換数）

2.1 ローカルエレベータを別に設ける場合か一般階同士の需要が極めて小さい場合どこでサービス階を切っても、乗換客がないので問題ない。

2.2 ローカルなエレベータを別に設けない場合

一般階どうしのODに乗換が生じるため、乗換を減らす工夫が必要。オフィスなら企業の境目で切るなど。(5-1)式の乗換増加率によって評価可能である。

ここで、最も重視すべきなのは、1.1に示したかご内の最大乗客数である。これを均一にするようにサービスゾーンを設定することが、設備の有効利用につながる。サービスゾーンは、1シャフトで3つのゾーンをサービスできることから、3の倍数がよく、かつ一般的なゾーン設定である10～20階程度とする。

次に重要なのが、2.2に示したローカルなエレベータを設けない場合の乗換を減らすことである。乗換数を評価する指標として、次のものを使用する。 i 階で分割境界を設定した時に、分割境界を新たに作ることで乗換の必要が生じる乗客数を全乗客数で割ったものを乗換増加率とする。乗換増加率は、分割境界を設定したことにより乗換という不利益を被る乗客の割合を示し、これが少ない程分割境界の位置がよいことを示す。

乗換増加率 E_i は(5-1)式のように定義する。

$$E_i = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{l=i+1}^n OD_{kl}}{\sum_{k=1}^n \sum_{l=k+1}^n OD_{kl}} \quad (5-1)$$

(5-1)式は片方向のみが対象である。ロビー階とのOD要素は取り除き、ローカルなODのみで計算することに注意が必要である。これをしないと、ロビー階と上方の一般階との直達可能なOD（一般に人数が多い）まで乗換数にカウントされてしまう。

出 発 階	目的階						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-	10	10	5	5	5	5
2	-	-	2	2	2	0	0
3	-	-	-	2	2	0	0
4	-	-	-	-	2	0	0
5	-	-	-	-	-	0	0
6	-	-	-	-	-	-	2
7	-	-	-	-	-	-	-

・ロビー階：1階で上り方向のみ
 ・2～5階は同企業のオフィス
 ・6,7階は同企業のオフィス
 ・1周期でかごが運ぶ人数を示す

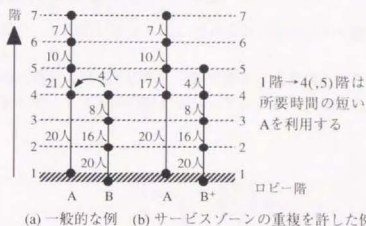


図 5-3：サービスゾーンの重複による効果の一例

各かごの最大乗客数から決めたゾーン境界を大きく変えない（±2階床程度）程度でこの乗換増加率が最も小さくなるような境界を選ぶ。かご内の最大乗客数を均一にするようにサービスゾーンを分割すると乗換が著しく増える場合は、図 5-3 のようにサービスゾーンを重複させることも 1 つの解決手法である。

最も重要度が低いのが、1.2 に示した、ローカル区間所要時間を均一にすることである。これは、図 5-2 のようなパターンに従った運行を行う際に、なるべく運行周期を詰めたい所から来た目標である。しかし、ローカル区間所要時間の長いかごがあっても、文献 [42] の鉄道の検討例と同じように、その後から来るかごが一時的に速度を落とすようなスケジュールを組めば、乗車時間が長くはなるが運行周期を詰めることは可能である。したがって、本質的な重要度は低いと考えられる。

5.4 1 シャフト複数かご運行によるローカル輸送

ローカル輸送では高速性は不要であり、基本的にすべてのかごが各階に止まり得るパターンで運転すればよい。その場合、かごは最大で 2 階床に 1 個、すなわち全階床数の半分だけかご数が必要となる。また、実際の状況を考えても図 4-11 に示したように、ローカル需要のような多対多の需要の場合は停止階床数が多くなりがちであることから、妥当性が伺える。

不要な停止を減らしたい場合、また、かご数を減らしたい場合には、使用するかご数を減らし、乗客のいない階を必要に応じて通過すれば良い。その場合でも運行計画は輸送力に合わせてかご数を設定することしか必要なく、あとは運行制御だけで対応できる。ローカル輸送に比較的近い条件での運行制御の検討はすでに文献 [27] でも行われている。

以上のように、ローカル輸送の運行計画に関しては新たに議論すべきことが少ないため、本論文ではこれ以上扱わないこととする。

5.5 横行機能がない場合の運行スケジューリング手法

ロビー階と各一般階を結ぶ輸送の場合、1本のシャフト内に置けるかご数はロビー階数以下でないとサービスが不可能である。

地域分離型輸送を前提とした基本的な運行は図5-4に示す形態である。これは、上り下り両方のサービスを行うパターンであるが、上下方向の需要が偏っている場合にはどちらか片方が回送状態になる。

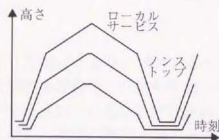


図5-4：地域分離型輸送を用いた1本シャフト内での往復運転

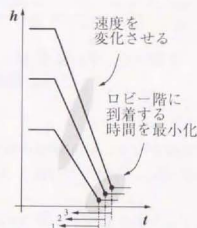
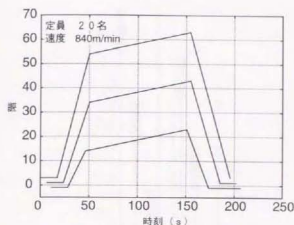


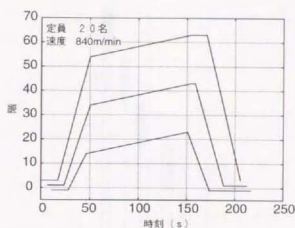
図5-5：速度を変数としたロビー階への到着時刻の最適化

かごの個数が決められているこの運行方法で輸送能力を上げるには、なるべくかごの1周時間を詰めることが必要である。そのため加速度・ジャークの制約の中で速度をできるだけ上げて運行するのが望ましい。かごが上っている時は、かごが段々分散してゆく方向なので問題ないが、かごが下っている時はかごが集中してくるため、時間が詰められない。したがって、ブレーキ距離を減らすために定格以下の速度に抑えることが必要である。しかし、速度が遅ければロビー階到着時間そのものが遅くなり逆効果である。

このように、各かごの降下時の速度には最適な値が存在することになるため、速度を最適化することを考える。その概念を図5-5に示した。ここでは、ある速度でかごを降下させる際に信号条件を考慮して先行かごと干渉しない限界まで回送開始時刻を早めた時の到着時刻を求め、降下速度を変化させて到着時刻が最も早くなる速度を選ぶ。この最適化では、降下速度という1変数の探索であること、運行の乱れを考えると厳密な最適化の意味は小さいことと、信号による干渉条件が場合分けを伴う複雑な関数となること、また単峰性は明らかであることから、黄金分割比を用いた1変数探索法(参照：付録B)を用いた。



(a) 最適化をした場合



(b) 最適化をしない場合

図5-6：速度最適化による輸送力向上

上り方向だけをサービスする時を例にとり、理想的走行曲線を保つという条件でかごが下る速度を最適化した結果を図5-6に示す。速度が極めて速いこの場合は、20秒程運行周期が詰められていることが分かる。

ただし、実際の運行では、上方に行ったかごをなるべく早く下に降ろそうとすると、信号システムの制約により自動的に速度は抑えられ、自然にかご間の時隔が詰められるのが普通である。その意味で、無理に最高速を出そうとした結果上方でかごが待機している図5-6(b)よりも、かご間の時隔を詰めるようにした図5-6(a)の方が実際の運行に近い。

5.6 横行機能がある場合のサービススケジュール作成方法

5.6.1 上りサービス時

ここでも地域分離型輸送を適用する場合を考えるが、横行機能でかごが隣のシャフトに移動できる場合にはかご数がロビー階数に制約されることはない。しかし、複数のかごがほぼ同時に出発するのが輸送能力的に望ましいため、1つのユニットでサービスできるゾーンはロビー階数と同じがよい。ロビー階が鉛直方向に並んでいることから、3つまでのかごは数秒から10秒という短い間隔で出せるが、それ以上のかごは3つかごを出した後には回送用シャフトから取り出さねばならず、短い間隔で出せないからである。

1つの乗降用シャフトにつき3つのゾーンをサービスする場合、その3つのゾーンそれぞれをサービスするかごが違うロビー階から出発するため、各シャフトのサービスゾーンの選び方に注意する必要がある。すなわち、建物に入って来た乗客にとって、目的階に行くためにどのロビー階を選べばよいかを分かりやすくしなくてはならないからである。

例えば、案内面を配慮して上のロビー階へ行けば上層の階へとといった直観的に分かりやすいゾーン設定をしたのが図5-7(a)である。その一方、図5-7(b)はシャフトを削るために

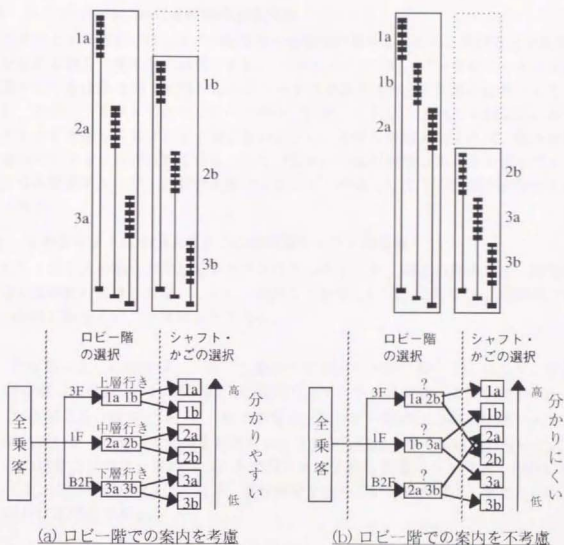


図 5-7：サービスゾーンのサービス順序

各シャフトがサービスするゾーンを固めた例であるが、この場合ロビー階と上層のサービスゾーンとの対応が難しく、乗客が混乱しやすい。

したがって、図 5-7 (a) のような方式が現時点では最も無難であり、案内により乗客の混乱が避けられるのであれば図 5-7 (b) のような使い方も可能となる。

5.6.2 下りサービス時

下りサービスの場合も、上りサービスと同様に、1つの乗降用シャフトにつき3つのゾーンをサービスするのがよい。上りサービスと比較した下りサービス時の大きな利点は、各階で載せた地上に降りる乗客は、どのロビー階へ降りてもよいことである。すなわち、図 5-7 (b) のような停止階パターンで運行しても、乗客は混乱なくロビー階のどこかへ到着し、ビルの外へ出ることができる。したがって、はじめてからこのような運行を前提としたスケジューリングが可能であるし、運行が乱れた時の柔軟性も大きい。



5.6.3 スケジュールにおける時刻の決定方法

上り方向と下り方向では、ロビー階使用の柔軟性が異なるものの、使用方法が決まれば、時刻を定める部分は基本的に同様である。ノンストップ区間、ローカルサービス区間の所要時間の定め方は第2章で説明したエレベータの交通計算方法と同様に計算できる。この作業を、各ゾーンをサービスするすべてのかごに対して行い、これらを出発順に並べ、信号システムを考慮して各かごが干渉しないようにしながら最密充填すれば、最小運行周期での運行スケジュールが作成できる。ここで出された運行周期はあくまで最小であり、次節で述べる回送用シャフトの容量次第ではユニット全体としてこの周期が実現できない可能性もある。

5.6.4 3本シャフト式の場合の2つの乗降用シャフトの位相

3本シャフト式の場合、乗降用シャフトは2つあるため、両者の間のロビー階出発／到着位相には調整の余地がある。しかし、次のことを考えれば、位相を $1/2$ 周期だけずらすのが一般的に最もよいことは明らかである。

1. 同位相に近い状態では、一斉に大量のかごが同一方向に動くことになり、電力の変動が激しくなる。これは位相を $1/2$ 周期だけずらすことで防ぐことができる。
2. 同位相に近い状態では、上り輸送の場合にはロビー階の二つの乗降用シャフトへ同時に近いタイミングでかごを回送用シャフトから供給しなくてはならないし、下り輸送の場合にはロビー階の二つの乗降用シャフトから回送用シャフトへ同時に近いタイミングでかごが流入してくる。運行周期を詰めている状態では、事実上このような運行は不可能である。

もちろん、 $1/2$ 周期から少しだけずらす制御も可能だが、それによる制御の効果が一般的に期待できないため、本論文では2つの乗降用シャフトのロビー階出発／到着位相を $1/2$ 周期だけずらすことにする。

5.7 回送用スケジュールの作成方法と作成例

5.7.1 回送用シャフトのスケジューリング問題とユニット全体のかご数

3本シャフト式の回送用シャフトにおけるスケジューリングの問題点は、サービスを終えたかごが次々に割り込んでくることにある。実際は、乗客の振舞いによる運行の乱れが生じ、割り込みはある程度ランダムになるが、周期的に割り込んでくる場合ですら問題は難しい。具体的には主に次のような点を考慮しなくてはならない。

1. 低層行きのかごと高層行きのかごは再びロビー階へ戻ってくる時間が異なり、低層行きのかごはすぐに次のサービスに使えても、高層行きのかごはその先の周期のサー

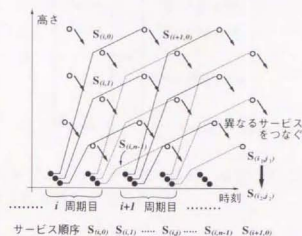


図 5-8：回送用シャフトのスケジューリング問題

- ビスにしか使えないこともある。特に、速度が低い場合はそれが顕著である。このように、行き先によってかごが戻って来られる時間のことを考慮する必要がある。
- 乗降用シャフトと回送用シャフト全体の運行スケジュールが決まれば、かご数が一意に定まるため、ユニット内のかご数を考慮する必要がある。

また、乗降用シャフトは地域分離型輸送を基本としたスケジュールが組まれているので、回送用シャフトでは、次の周期の乗降用シャフトの運行に支障を与えないように速やかにかごを回送する役割を持っている所も難しい。

ここでは、その回送用シャフトのスケジューリングとして、周期的条件の元で導き出す方法を提唱する。以下の議論は、上りサービス用ユニットの下り回送時を取り上げるが、本質的に下りサービスにも同様に適用できるものである。

実際の運用では、運行が乱れた時や運行スケジュールの変更時に過渡状態も生じるが、モデルの単純化のために図 5-8 のように回送用シャフトは完全な周期的運行を行うと仮定し、時間軸上での周期境界条件を持たせる。また、ここでは入力として運行周期、およびかご数を与えるものとする。その際の運行周期は、乗降用シャフトの運行スケジュールで決められる、最小運行周期以上でなくてはならない。

回送用シャフトでのスケジューリングは、図 5-8 において乗降用シャフトから乗り移ってくるかごを表す白丸と、サービスの開始位置を表す黒丸をつなぐことである。 i 周期目の j 番目の乗客サービスを $S_{(i,j)}$ とし、サービス $S_{(i,j)}$ のかごが次に $S_{(f(i),g(j))}$ のサービスを行なうとして f, g という写像を定義し、1 周期内の n 個のサービスについて一般化する。

周期的運行を仮定していることによって、 f は非負整数の中への写像となり、 g は図 5-9 のように 0 から $n-1$ までの整数集合の上への 1 対 1 の写像である。

このとき、回送用シャフトのスケジューリングは(5-2)式で表される写像 F で表現できる。



$$F: \begin{bmatrix} S_{(i,0)} \\ S_{(i,1)} \\ \vdots \\ S_{(i,j)} \\ \vdots \\ S_{(i,n-1)} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} S_{(i+f(1),g(0))} \\ S_{(i+f(2),g(1))} \\ \vdots \\ S_{(i+f(j),g(j))} \\ \vdots \\ S_{(i+f(n),g(n-1))} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

さらに、(5-2) 式でスケジューリングが表せる時、必要なかご数がどれくらいかを求める。まず、(5-3) 式で表される集合 N を定義する。

$$N = \{0, 1, \dots, n-1\} \quad (5-3)$$

周期境界条件より、(5-2) 式のスケジュールの写像表現では、どの周期の j 番目のサービスも $g(j)$ 番目のサービスにつながる。また、違う 2 つ以上のサービスから同じサービスにつなげてはならない。したがって、写像 g は集合 N の上への 1 対 1 の写像となり、これは (5-4) 式で表現できる。

$$g(i) \in N, g(i) \neq g(j) \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (5-4)$$

ここで、0 周期目に j 番目のサービスをしたかごに着目する。(5-2) 式の写像を順次たどっていくことによって、このかごは (5-5) 式で示されるようなサービスに順次用いられることになる。ただし、ここでは $g \cdot g(i) = g^2(j)$ のように、 k 回の写像を $g^k(j)$ と表現している。

$$S_{(0,j)} \rightarrow S_{(f(j),g(j))} \rightarrow \dots \rightarrow S_{\left(\sum_{i=1}^{k-1} f(g^i(j)), g^k(j)\right)} \rightarrow \dots \quad (5-5)$$

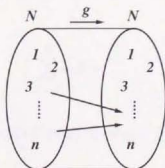


図 5-9: 写像の特性



このとき写像の性質より、 N の要素数 n 以下の回数だけサービスを繰り返すと、その間に必ず数周期先の j 番目のサービスに戻ってくることになり、(5-5) 式はループ状になる。すなわち、 $k \leq n$ となる k で、(5-6) 式が成り立つ。

$$g^k(j) = j \quad (5-6)$$

(5-5) 式で表される一連の運用ループを 1 つのグループとして、このようなグループが m 通り存在すると仮定する。 i 番目のグループにおいて適当に $j_i \in N$ を選び、(5-7) 式のようにグループを構成し、 k_i を定義する。

$$S_{(0,j)} \rightarrow S_{(f(j), g(j))} \rightarrow \cdots \rightarrow S_{\left(\sum_{p=0}^{k_i-2} f(g^p(j)), g^{k_i-1}(j)\right)} \rightarrow S_{\left(\sum_{p=0}^{k_i-1} f(g^p(j)), j\right)} \quad (5-7)$$

このように k_i を定義すると、まずグループ i 内において、(5-8) 式が成り立つ。

$$g^p(j_i) \in N, g^p(j_i) \neq g^q(j_i) \quad (p, q = 0, 1, \dots, k_i-1, p \neq q) \quad (5-8)$$

また、違うグループに同じ値の $g^k(j)$ が存在すると、違うグループ間にかごが行き交うことになって、(5-7) 式で表されるグループの概念に矛盾する。

したがって、(5-8) 式はすべてのグループについて拡張できて、(5-9) 式が成り立つ。

$$g^p(j_r) \in N, g^p(j_r) \neq g^q(j_s) \quad (5-9)$$

$$(p, q = 0, 1, \dots, k_i-1, p \neq q, \quad r, s = 1, 2, \dots, m)$$

$0 \sim n-1$ 番目のすべてのサービスは、(5-5) 式のような $1 \sim m$ のグループ中のどれかのサービスの中に存在しなくてはならない。したがって、(5-10) 式が成り立つことが期待される。

$$\sum_{i=1}^m k_i \geq n \quad (5-10)$$

一方で、要素数 n の集合 N について (5-9) 式が成り立つことから、(5-11) 式が成り立つ必要がある。



$$\sum_{i=1}^m k_i \leq n \quad (5-11)$$

(5-10) 式と (5-11) 式から (5-12) 式が成立する。

$$\sum_{i=1}^m k_i = n \quad (5-12)$$

i 番目のグループ中の 1 個のかごに着目すると、 $S_{(0, j_i)}$ から始まって同じサービス j_i に戻ってくるのは、(5-7) 式より、(5-13) 式で表される周期だけ先となる。

$$N_i = \sum_{l=0}^{k_i-1} f(g^l(j_i)) \quad (5-13)$$

すべての周期においてグループ i 内のすべてのサービスを行なおうとすれば、必要なご数は同じく (5-13) 式で表される。

これを全グループで足し合わせると、全体のかご数 N_c は (5-14) 式のようにになる。

$$N_c = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{l=0}^{k_i-1} f(g^l(j_i)) \right\} \quad (5-14)$$

ここで、(5-14) 式において、 $f(g^l(j_i))$ の項数を考える。‘ $\{ \}$ ’ でくくられた部分の項数が k_i 個であるため、 $1 \sim m$ で和をとって、(5-15) 式となる。

$$\sum_{i=1}^m k_i \quad (5-15)$$

これは (5-12) 式と同じで、結局 (5-14) 式の項数は n 項となる。したがって、ある数列 a_i を用いて (5-14) 式は (5-16) 式のように展開できる。

$$N_c = f(a_0) + f(a_1) + \dots + f(a_i) + \dots + f(a_{n-1}) \quad (5-16)$$



$$\frac{T}{2} = 3T_{dec} + T_{hm} + \frac{l}{v} \quad (5-19)$$

そして、減速度 a 、ジャーク k とすると、減速時間 T_{dec} は (5-20) 式のようになる。

$$T_{dec} = \frac{v}{a} + \frac{a}{j} \quad (5-20)$$

(5-19) 式、(5-20) 式から、周期 T は (5-21) 式のようになる。

$$T = \frac{6}{a}v + \left(\frac{6a}{k} + 2T_{hm}\right) + \frac{2l}{v} \quad (5-21)$$

$a=0.8(\text{m/s}^2)$, $k=1.0(\text{m/s}^3)$ とし、さらに 6 階床分の高さとして $l=24(\text{m})$ とした時に v と T の関係をプロットしたのが図 5-11 である。

図 5-11 をみると、周期を最小にする速度が存在する。(5-21) 式を微分してゼロとなる所を求めると (5-22) 式のようになり、 T_{hm} には依存しない。前記と同じ条件では 151.8m/min となる。

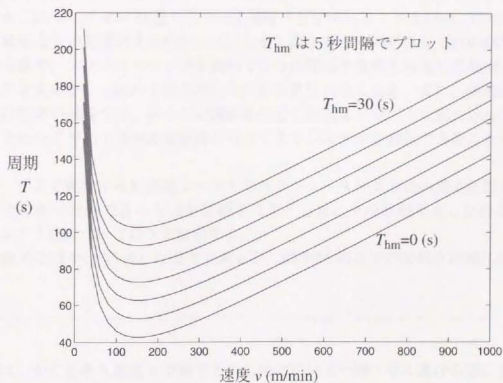


図 5-11：速度と周期の関係

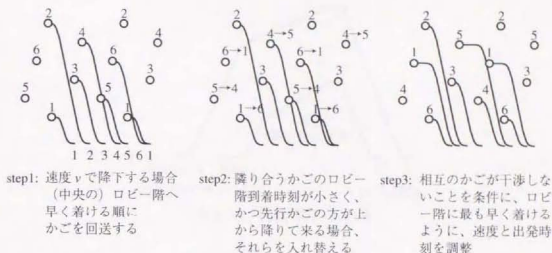


図 5-12: 回送スケジュールの決定方法の概略

$$v = \sqrt{\frac{al}{3}} \quad (5-22)$$

次に、(5-21) 式の関係を用いて、運行スケジュールを速やかに求める方法を説明する。

5.7.3 回送用シャフトスケジューリング方法

かごの回送順は、2つの乗降用シャフト分で6サービスゾーンを担当する、1周期あたり6個のかごについて $6! = 720$ 通りについて運行スケジューリングを行い、すべての方式を比較して最適なものを選択するのがよい。しかしながら、すべてのかご間の信号による干渉条件の考慮や、スケジューリングを始めてから周期境界条件を満足して収束するまでの繰り返しを考えると、上記の1通りあたりの計算量は大きくなる。また、後述の第6章における運行制御の議論では、各かごが遅れを生じて回送用シャフトに流れ込んでくる場面もあり、それらに対して速やかな計算を行ってスケジュールを修正できることが要求される。

そこで、ここで提案する回送用シャフトのスケジューリング方法の基本思想として、10秒以内の短時間で計算できる方法を目指すこととした。その思想をもとに提案したスケジューリング方法について以下で説明する。

方法の概要は図 5-12 に示した通りであるが、図 5-12 の3つの手順を詳細に以下で説明する。

step1

ここでは、かごをある速度 v で降下させた場合にロビー階へ早く着ける順に到着順序を定め、これを初期回送順序とする。回送順序を決めているのは、基本的にかご相互が無干

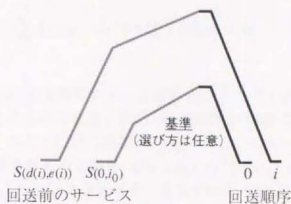


図 5-13：回送順序の定義

渉の場合に降下して中央のロビー階に到着する時の到着順序である。この、初期到着順序を決めるのが全体の効率を決める一つの重要な要素であるが、それには step1 における速度 v をどう仮定するかに依存する。ここで妥当な値として、与えられた周期から (5-21) 式を v について解いたもの（大きい方の解）を使用する。実際には、この v が定格速度 v_m 以上であれば、 $v=v_m$ とする。

回送順序は、図 5-13 のように、あるサービス $S_{(0, i_0)}$ を終えたかごを 0 番目として基準とする。そして、回送順序が i 番目のかごを、サービス $S_{(d(i), e(i))}$ を終えたかごとして、写像 d, e を定義し、6 個のかごの順序を定める。 d は $d(0) = 0$ とすると整数の上への写像で、 e は $e(0) = i_0$ とすれば 0 から 5 までの整数の上への 1 対 1 の写像となる。

この回送順序を示す d, e とかご数 n から、前述のスケジューリングを示す f, g を求める。そのために、まず (5-23) 式の写像 O を定義する。 O の意味は図 5-14 に示したように、 $S_{(0, 0)} \sim S_{(0, 5)}$ の 1 周期分のサービスのための 6 個のかごを図 5-10 の手順で回送する順序を示し、 $S_{(0, 0)} \sim S_{(0, 5)}$ の 6 個のかごのうち、回送用シャフトを i 番目に降りて来たかごは $S_{(0, O(i))}$ のサービスを行うことになる。これも e 同様に 0 から 5 までの整数の上への 1 対 1 の写像である。逆写像 O^{-1} も O と同一な写像となるが、区別して扱う。

$$O(i) = O^{-1}(i) = (8 - i) \% 6 \quad (5-23)$$

ここで、 $\%$ は左側を右側で割った時の余りを示す演算子とする。これは、プログラミング言語の C 言語と同じ演算子の使い方である。

まず、回送順序の基準とした $S_{(0, i_0)}$ のサービスについて、 f, g を求める。 d, e, f, g とかご数 n の関係は (5-24) 式となる。



$$\sum_{i=0}^5 (f(i_0) - d(i)) + O^{-1}(g(i_0)) = n \quad (5-24)$$

左辺第1項の Σ 全体は、回送順序が0～5番目のかごすべてが何周期前のサービスに由来するかを計算して足したものである。また、第2項の O の項は図5-14の左上のように回送順序0～5のかごがすべて次に同じ周期の $S_{(0,0)} \sim S_{(0,6)}$ のサービスに使われない場合のかご数の食い違いを補正するものである。 $d(i)$, $f(i_0)$, $O^{-1}(g(i_0))$ はいずれも整数であることから、(5-24)式から $f(i_0)$ と $g(i_0)$ を求めると、それぞれ(5-25)式、(5-26)式となる。なお、ここではすべて整数演算を行うため、本節における演算子 $\cdot /$ は割り算の際の商を示す。

$$f(i_0) = \left\{ n + \sum_{i=1}^5 d(i) \right\} / 6 \quad (5-25)$$

$$g(i_0) = O \left(n - 6f(i_0) + \sum_{i=1}^5 d(i) \right) \quad (5-26)$$

そして、これらを基準として、すべての i に対する $f(i)$ と $g(i)$ を求めるとそれぞれ(5-27)式、(5-28)式となる。

$$f(i) = f(i_0) - d(i) + \{ O^{-1}(g(i_0)) + e(i) \} / 6 \quad (5-27)$$

$$g(i) = O \{ \{ O^{-1}(g(i_0)) + e(i) \} \% 6 \} \quad (5-28)$$

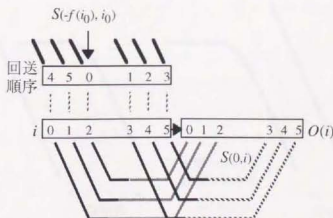


図5-14：回送順序と次のサービス順序の関係

step2

step1 でかごの初期回送順序とそれに伴い初期解としての f, g が定まるが、この段階ではロビー階での運用のみを考慮しただけであり、上層の方でかごが回送用シャフトに移ってくる部分の干渉を考慮していない。そこで、図 5-15 のように、上層から降りてくるかごを後回しにする操作が必要となる。この理由は次の 2 つである。

1. かご間の干渉を減らすため。図 5-15 でも分かるように、上層から降りてきたかごの後に下層でサービスを終えたかごが割り込んでくると、時隔が広がってしまう。特にシャフト間の移動時間が長いとこの問題が大きくなる。
2. 上層の方がかご密度が低くて空いている分、かごの待機可能時間が長いので、上層をサービスしたかごの回送を後回しにしても問題が生じにくい。

図 5-12 でかごの入れ替えの必要性を判断するための前後のかごの時刻差の基準が、一つの調整パラメータである。これに関しては、図 5-15 からみても分かるように、シャフト間移動時間が時隔に大きな影響を及ぼしていることから、基本としてシャフト間移動時間分 T_{hm} とする。

しかし、ロビー階での時隔も考え合わせると、入替の必要もない場合もある。図 5-10 から分かるように、前後のかごの時隔は、最上のロビー階を使用するかごの次に最下のロビー階を使用するかごが入ってくる所で開いてしまう。つまり、先行かご $S_{(0, e(i))}$ に対する $g(e(i)) = 0$ or 3 の場合は、上層で時隔が詰められない状態であっても入替を行う必要はない。

また、逆に 1 本の乗降用シャフト内において最上階をサービスし終えたものに関しては、待機可能時間が長いことから、先行かご $S_{(0, e(i))}$ に対する $e(i) = 0$ or 3 の場合は順序入替えの時刻差の基準を大きくした方が合理的である。本論文では、最上階をサービスしたかごに関しては、 $2T_{hm}$ を基準とした。

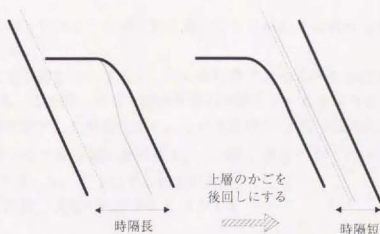


図 5-15：上層でのかごの干渉の軽減方法

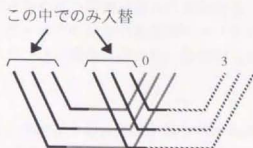


図 5-16：入替の制限

これらのことを考慮し、先行かごと後続かごのロビー階到着時刻をそれぞれ t_p, t_n としたときの入替基準は、(5-29) 式ようになる。なお、(5-29) 式の右辺は、2つの条件をともに満たす場合は結局 T_{hm} となる

$$t_n - t_p < T_{hm} + \begin{cases} -T_{hm} & (\text{if } g(e(i)) = 0 \text{ or } 3) \\ T_{hm} & (\text{if } e(i) = 0 \text{ or } 3) \end{cases} \quad (5-29)$$

この入替操作は、隣り合うかごどうしが(5-29)式を満たさなくなるまで入替対象を1つずつ後ろにずらしながら何周も続ける。しかし、図 5-16 に示すように、(5-29)式では入替が局部的となる。したがって、入替が1周目の時は、 $g(e(i)) = 0$ or 3 の場合でも(5-30)式に従って入替を行うこととした。

$$t_n - t_p < T_{hm} \quad (5-30)$$

step3

step2 でかごの回送順序が定められたが、まだかご間の干渉条件は考慮されていない。そこで、次のようにして最終的な回送スケジュールを作成する。

1. 適当なかご（6つあるうちのどれを選んでも最終結果は変わらない）を選び、速度 v で降下させる。
2. それに対して干渉しないように、その次に降下させるべきかごの降下速度、出発時刻を決定する。この時、ロビー階到着時刻が最も早くなるように、降下速度（速度 0 から v_m までの間で）を最適化する。その方法は 5.7.4 節で改めて述べる。
3. 2. の作業をかごの降下順に繰り返す。その際、直前のかごだけではなく、もっと前のかごとも干渉しないようにする必要がある。
4. 繰り返した結果、収束すればそれを解とする。

収束せず、計算するにつれ各かごの時刻が後ろにずれたり、また、計算中に各かごに与えられたサービス終了後とサービス開始前の乗降用シャフトでの待機可能時間を超えてかごを待たせる必要が生じたり、逆に待機時間が負の値になったりすることがある。それらの原因と対策次に列挙する。

1. 収束せず、計算するにつれ各かごの時刻が後ろにずれる場合は、回送用シャフトの容量が限界を超えているため、運行周期を長くするしかない。
2. 乗降用シャフトでのかごの待機時間が待機可能時間の上限を超えてしまった場合は、かごが余剰である。必要な運行周期を実現するにはかご数を減らす。ただし、上限を超えた値が小さい場合は、回送用シャフトで待機できるため、問題なく運行スケジュールが組める。この場合は減らす必要はない。
3. 乗降用シャフトでのかごの待機時間が負の値になった場合は、かご数が不足していることを意味するため、必要な運行周期を実現するにはかご数を増やす。

ユニットが下りサービスを行って、回送用シャフトではかごが上っていく場合も、基本的には同様の議論が可能である。step3における干渉状態に違いがあるが、一般にはロビー階に集中していたかごが分散する方向のため、上りサービス時よりも制約は緩くなる。

5.7.4 速度の最適化の方法

5.7.3 節の step3 で出て来た、各かごの速度を最適化する方法について述べる。最適化の概念は5.5 節で述べた方法と類似しているが、その際、次の点を考慮しなくてはならない。

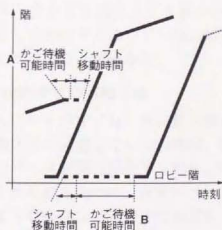


図 5-17: かごが乗降用シャフトに待機できる余地

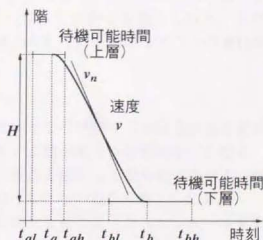


図 5-18: 回送かごの時間調整と速度最適化



1. かごがサービスを終えた後で、乗降用シャフト側にそのままとどまれる時間。これは、図5-17におけるAの部分に相当する。
2. かごが次のサービスを開始する前に、乗降用シャフト側のロビー階を占有できる時間。これは、図5-17におけるBの部分に相当する。

かごには、上記の時間以内の乗降用シャフトでの待機が許される。これらを考慮した上で、一つのサービスにつき、図5-18における t_a 、 t_b 、 v の3つのパラメータを調整する必要があるが、 t_a 、 v が決まれば図2-1の理想走行曲線を守っている限り t_b は一意に決まる。

次に、すでに運行スケジュールが決定しているすべての先行かごとの、信号による干渉条件を考慮する。この際、先行かごと干渉を起こさないようにしつつ、 t_a を最も小さくするように定める。図5-18から分かるように、 t_a は t_{al} と t_{ah} の2つの制約を受けるが、 t_{ah} より大きい値となった場合は $t_{ah} - t_a$ の分の時間を回送用シャフト側で待つことにすればよいので実際の制約とはしない。一方、 t_{al} は必ず守らなくてはならない制約である。

これにより、残された自由度は v のみとなる。この v は5.5節の議論と同様に、 t_b を最小化するパラメータとして用いる。ここでも5.5節で述べたのと同じ理由から黄金分割比を用いた1変数探索法(参照：付録B)を用い、 v を速度0から v_m までの間で探索して t_b を最小化する。ただし、もし最適な t_b が t_{bh} より大きい値となった場合は、スケジューリングが不可能となる。

5.7.5 実際のスケジュール作成例

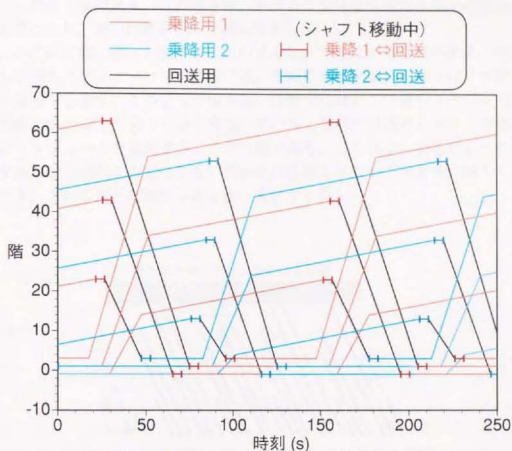
結果の例として、上記の様々な考慮点を反映しているものを図5-19に示す。図5-19(a)は、乗降用シャフトの運行周期が長く、かつシャフト間移動時間も短いため、回送用シャフトには余裕がある。したがって、サービスを終えたかごは、時間調整することなく速やかに回送されている様子が分かる。

一方、図5-19(b)の場合は、乗降用シャフトの運行周期が短く、かつシャフト間移動時間も長いため、回送用シャフトには余裕がない。そこで、前述のように、最も上層の方をサービスしたかごを待たせて下層の方をサービスしたかごを優先したり、下のゾーンをサービスしたものを下のロビー階に到着させたりして、回送用シャフトの運行周期の限界を短くしていることが分かる。

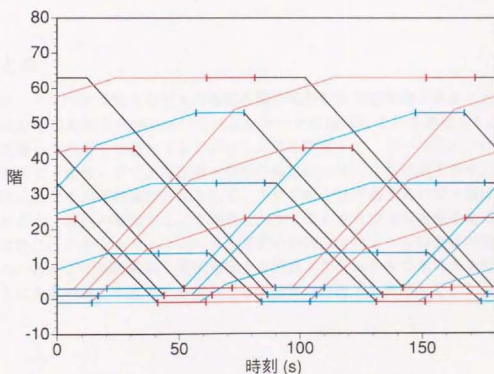
5.7.6 余剰かごの待機方法

運行ユニットの中には、常に最大輸送力を出せるだけのかごが存在する必要がある。しかし、輸送力が逼迫していない時は、必要なかご数が減り、余剰のかごが出る。余剰かごの収納スペースが別に存在するなら、かごの電源を落として眠らせるのがよいが、スペースの限られたビル内では、収納スペースを設けられない場合も考えられる。

そのような場合は、運行中にかごを一定時間休ませるようなスケジュールを組み、実効的に稼動するかごを減らす必要がある。図5-19では少々かごが余り気味の例であり、ロビー階での停止時間が長くなっているが、このようにロビー階での待機時間を長く取るの



(a) 定格速度 600m/min、シャフト間移動時間 5 秒、定員 20 人



(b) 定格速度 600m/min、シャフト間移動時間 20 秒、定員 5 人

図 5-19：作成された運行スケジュール例 その 1

がまず考えられる方法である。この場合は、急にかごを早発させたくなった場合でも容易に対応が可能となり、運行制御からみた利点もある。

しかし、かごが大幅に余った場合は、これでも対応できない可能性がある。特に、これまで議論して来たスケジューリング方法では、大幅にかごが余った場合はスケジューリングが不能になってしまう。そのような場合は、必要十分なかごで運行スケジュールを作成し、それを図 5-20 のように余ったかごを空いている上層部の回送用シャフトで待機させるように運行スケジュールを変更することが有効である。この場合、遅延によって次のサービスに回すかごが局部的に不足しても、代わりに待機させたかごを早めに降ろして使用することができる、これも運行制御からみて良い面となり得る。



図 5-20：回送用シャフト上部におけるかごの待機

5.8 まとめ

本章では、ビル内では地上とビルの各階の間の需要が最も支配的であることから、通勤鉄道の地域分離型輸送方式がロープレスエレベータに最適なことを明示した。その上で、地域分離型輸送を利用した運行スケジューリングを提案して、ロープ式エレベータに比べて高速性をあまり犠牲にせず占有面積あたりの輸送能力を約2倍に向上させた。また、下り輸送だけに有効な効率の運行方法として、下りの場合は到着するロビー階は複数のうちのどこでもよく、案内が簡単なことを利用し、上りよりさらに運行密度を高める方法も提案した。最後に、3本シャフト1ユニット方式の回送スケジュールは全体の輸送能力に影響するため、各かごの運行曲線を最密充填する回送スケジュールの求め方を提案し、回送用シャフトに大量のかごが流入する場合でも輸送能力の低下を防げることを示した。



第6章 ロープレスエレベータの運行制御

6.1 はじめに

本章では、ロープレスエレベータの円滑な運行に欠かせない、セミデマンド運行制御方法について説明する。第5章をベースにしたスケジューリング部による大まかな制御と、従来のエレベータ群管理制御をベースとした群管理制御部による細かい制御の2つの役割と相互関係について述べる。なお、本章では全体の概念を述べることを主目的とし、解析結果については7.7節で述べることにする。

6.2 運行制御の必要性

エレベータに限らず、鉄道・バスなどの交通機関では一般的に不安定な運行特性を持っている。複数のかごや列車・バス等を協調して運転する場合、図6-1のように、何らかの外乱で特定の（かご・列車・バス）が遅れるとその先の待ち客が増えてそのかごは混雑し、ますます遅れが増大する、いわゆる「ダンゴ運転」といった現象がしばしば見られる。

したがって、上記交通機関では負荷をすべての（かご・列車・バス）に均等に分担させるための運行制御が不可欠となる。鉄道で最もよく行われている簡単な運行制御は、遅れた列車の前を走っている列車を少し遅らせて前の列車にも負荷を分担させることである。

一方、エレベータでは、2.2.2節で説明したように、エレベータでは呼びが生じている階を状況によって図6-2のように通過することが可能なのが特長で、これにより高度で効果的な制御を可能としている。

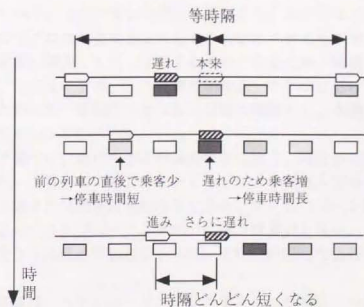


図6-1：交通システム一般に見られる不安定現象

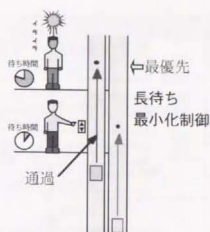


図 6-2：ロープ式エレベータの典型的運行制御の例

また、自重すべてを駆動装置で支持する自走式システムの場合、ダンゴ運転により上りかごと下りかごの数がアンバランスになると、電力変動が大きくなる。本研究で対象とする自走式のエレベータでは、効率的な運行制御によりダンゴ運転を防ぐことが電力面でも有利になる。

このような制御方法を利用すると、確率的な乗客の振舞いの影響を受けやすいエレベータでも効率的な制御が可能となる。本章では、セミデマンド運行を前提としたロープレスエレベータに必要な制御方法を説明する。

6.3 運行制御の全体的な構成

3.4 節では、ロープレスエレベータの運行方法として、スケジュール運行的要素を取り入れたデマンド運行という、セミデマンド運行を提唱した。スケジュール運行におけるスケジュールは基本的にマクロな需要をもとにして予め定められるものであり、デマンド運行はリアルタイムの需要に即応してサービスするものであるため、両者を統合的に扱うシステムよりも「スケジューリング部」と「群管理制御部」の2つに分けて制御系を組む方が合理的である。したがって、本論文でもこれらは別の機構とし、本論文で提案する運行制御系の基本構成を図 6-3 のようにする。

スケジューリング部では、現在のかごの運行状況に加え、現在から数分先までの交通需要とその予測値を用い、各かごに対してサービスゾーンと回送も含めたノンストップ区間と各々の両端階の発着または通過時刻のみを定める。サービスゾーン内での停止階の決定は群管理制御部に任せ、スケジューリング部の段階では規定しない。また、分オーダー以上の長時間の外乱や大きな外乱の悪影響があれば、それに対応して運行スケジュールを組直すことも行う。

一方、群管理制御部は、スケジューリング部で与えられた拘束力の低いスケジュールになるべく従うように呼びに対してかごを割り付けてゆく。秒オーダーの短時間の外乱や小さ

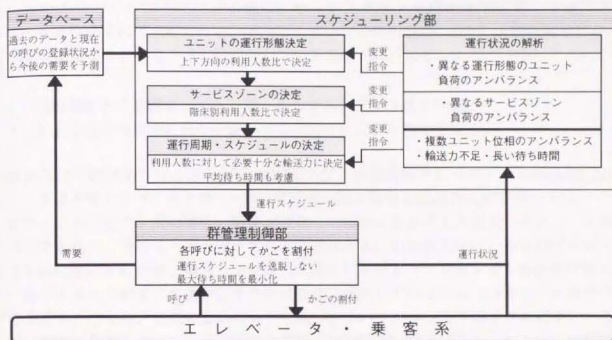


図6-3: スケジューリングと群管理制御の融合

な外乱による悪影響はここで吸収する。この方式では、ロープ式エレベータの群管理制御を、スケジュール遵守のための制御機構として利用しているのが特徴的な点である。

そして、呼びデータはデータベースに蓄えられ、豊富なデータから曜日・日・時間帯・その他のイベント情報に基づいた需要予測データを作成して、制御に利用する。この部分はロープ式エレベータとも全く共通な部分で、1.2.2節に示したようにすでに多くの研究がなされている分野でもあるため、本論文の対象とはしない。

以下では、図6-3の全体像の順に合わせ、スケジューリング部から群管理制御部へと説明を進める。この順では、運行の変更規模が大きいものから説明することになるが、制御頻度は逆に低い順となっている。

6.4 各ユニットの運行形態決定とその変更

交通需要は、1日の中で目まぐるしく変わる。3本シャフト式のロープレスエレベータの場合、各ユニットは上り用や下り用といった、色々な形態で運行されている。また、閑散時には全部のユニットは必要なく、運行を休止するユニットも生じる。そこで、運行制御の最も大きな部分として、各ユニットをどのような運行形態で用いるかを、常に需要を見ながら決定する必要がある。

予めビルの建設時に用意された複数のユニットに対して上下方向別の総利用人数等の情報を用いて、次のように運行形態を決定する。なお、1ユニット当たり輸送能力を予め概算する必要がある。輸送能力に関しては、第5章の運行計画の議論から、定格速度や定員

といったエレベータ固有の性能の他に、サービスゾーンの階床数を仮定して運行スケジュールを作成すれば求められる。サービスゾーンの階床数は、10～15階程度が目安で、ゾーン自体はどこに仮定しても目安として十分な値が得られる。

1. 利用者数から必要なユニット数、休ませるユニット数を決定。
2. 上下方向の利用者数比を考慮して方向別のユニット数を決定。

深夜などの閑散時には、ロープ式と同様の上下往復運転を行うが、その場合運行スケジュールは不要となり、あとは6.7節の群管理制御に関する議論のみが必要となる。

また、3本シャフト式の場合、需要が変化した場合に今まで上り用だったユニットを下り用にするなど、運行モードを切り替える必要がある。切り替え中は一時的にサービスができない状態になるため、輸送力になるべく低下しないような対策を考える必要がある。

一部のユニットがすでに運休している場合は、運休しているユニットを新しい運行モードで運転させてから、必要のないモードで運行しているユニットを休ませればよい。こうして一時的に稼働ユニットを増やすことで輸送力の低下は防止できる。しかし、出勤時や昼食時など、輸送ピーク時は全部のユニットが稼働している状態にあると考えられ、上記の方法は利用できない。特に、かごの動く向きを逆転する場合は、一時的に運行モード変更のためにユニットの運行を止めなくてはならない。

2本シャフト式の場合は、ユニット全体を止める必要があるため議論の余地はないが、3本シャフト式では一例として図6-4に示すように、過渡状態としてそのうちの2シャフトで循環させることで部分的運行を続けながらモードを変更できる。

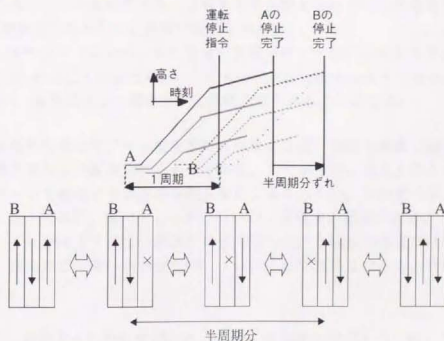


図6-4：運行モード切り替えの遷移図



さらに、両脇のシャフトは、ロビー階からの出発／ロビー階への到着の時刻が半周期分（乗客側からみた周期に対して）ずれており、モード切り替えのために一時的にサービスを止めようとする、どちらかの乗降用シャフト内でまだサービスしている時に、別の乗降用シャフトでは半周期分（30秒～1分）サービスが完全に止まることになる。

そこで、図6-4のように片側のサービスが先に完全に止まった段階で、逆方向のサービスを始めれば全体の輸送力の低下を抑えられ、逆方向の急な需要にも対応できる。

6.5 サービスゾーンの決定とその変更

6.5.1 サービスゾーンの決定・変更方法

まず、サービスゾーンの決定そのものは、運行計画の5.3.2節で述べたものと同じで、需要に合わせて的確に決定すればよい。そこで、以下では需要の変化により各サービスゾーンの負荷がアンバランスになり、ゾーンを変更する必要性が生じた場合の対処方法について議論する。

スケジュールにより各かごのサービスゾーンは決められているが、時々刻々と変化したり、突発的に変化する需要により、各ゾーンのかごの負荷分担のバランスを常に保つのは難しい。ロープレスエレベータの場合、複雑な運行計画のもとでかごを走らせるため、1つのユニット内の特定の1つのゾーンの負荷が増加してスケジュールより遅れてしまっただけで、全部のサービスゾーンへ影響が及ぶ。したがって、適切なゾーン設定で各ゾーンの負荷を均等化する必要がある。

ところが、次の2つの理由により、サービスゾーンの変更は容易ではない。

1. サービスゾーンを変更すると、これまで乗り換えなくて行けた乗客に、急に乗り換える必要が生じたりして、乗客の混乱を招く。
2. 特に、ロープレスエレベータの場合、複数のロビー階が存在してそれらが各サービスゾーンと対応しているため、サービスゾーンが変われば乗るべきロビー階も変わってしまう、乗客はロビー階を上下に移動させられることになる。

このような条件のもとでゾーン変更を行った場合には、変更を乗客に通知して徹底させる、という乗客案内上の配慮をする必要がある。したがって、図6-5のように案内が徹底されるまでゾーンを重複させる方法を取らなくてはならない。したがって、サービスゾーンは数分から数十分毎に、案内をしっかりと行いつつ変更する必要がある。

ところが、下り方向ですべての乗客がロビー階へ向かう輸送の場合だけは、すべての乗客がかごと一緒にロビー階へ向かうため、ゾーン変更は容易にできる。それには次の2つの理由がある。

1. 途中の一般階どうしの乗客がいなければ、乗り換えが増えたり減ったりする乗客は存在しない。

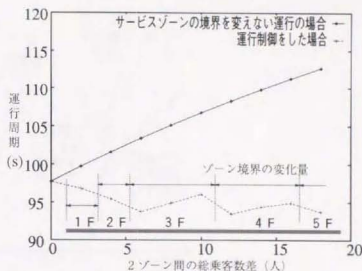
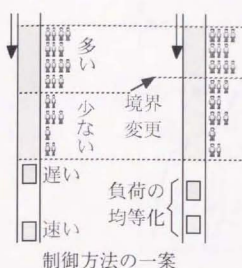


図 6-6：下り方向におけるサービスゾーン境界変更の効果

- 乗客は、ロビー階が目的ではなく、通常はビルの外に出るのが目的であるため、3つあるうちのどのロビー階に到着してもよく、たまたま乗ったかごがどのロビー階に着こうと関係がないこと。ただし、外に出るのが一番便利な階に着けるかどうかという問題は残るが、ここでは考えない。

したがって、この場合のみ頻繁なゾーン変更が可能である。極端に言えば運行周期毎にゾーンを変更でき、階によっては到着したかごが向かうロビー階がその度毎に違うといったことも可能となる。基本的な方法と評価は文献 [44] で行われており、図 6-6 のように各ゾーンの待ち客を均一化する制御により運行周期の増大を防げることが分かる。もちろん、このような制御を行うと、途中の一般階どうしを利用する乗客が不便となる。したがって、一般階間の乗客がいる時には基本ゾーン設定を守る必要があるが、その数が少なければ、ある運行周期で一般階間の乗客がいない確率も多く、ゾーンを可変にできる確率が高い。

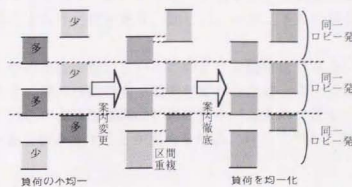


図 6-5：サービスゾーンの変更方法

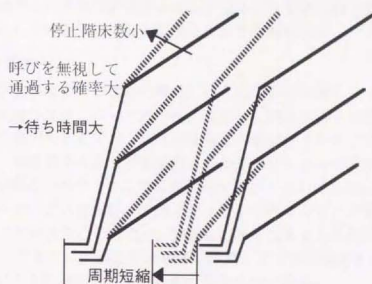


図 6-8：ゾーン内停止階床数の増減による利点と欠点

6.6 運行周期・スケジュールの決定とその変更

6.6.1 運行周期・スケジュールの決定

これまでに述べたことで、各ユニットの運行形態と実際にサービスする複数のゾーンが決定している。そこで、次に、実際に運行スケジュールを作成する必要がある。しかし、その基本的理論は第5章で示した通りであるので、ここで決めるべきことは、(2-21)式で示されるような、ゾーン内停止階床数と、運行周期である。

ゾーン内停止階床数は、(2-21)式の意味するランダムな乗客に対する平均的な値をとるのが一般的であるが、この値を小さくすれば図6-8のようにサービスゾーンでの所要時間が短縮でき、運行周期を詰められることで、輸送能力が上がる。したがって、この手法は需要が一時的に増えた場合の制御に用いることができる。

しかし、1周期内での停止階床数が減ることで、乗客が最初に来たかごに乘れない確率が上がり、待ち時間が増加するという懸念がある。運行周期を詰める効果と乗客が最初に来たかごに乘れない確率が上がる効果のどちらが大きいかが問題だが、7.7.3節で詳しく述べる結果からみると、ロープレスエレベータの場合、両者の影響は同程度で、ゾーン内停止階床数の設定に待ち時間が依存しないと考えてよい。つまり、必要な輸送能力に対して必要な運行周期を求め、そこからゾーン内停止階床数を逆算するだけで問題がないと考えられる。

その際、運行周期とゾーン内停止階床数の関係に議論の余地がある。つまり、実現する運行周期に対して、ぎりぎり可以实现できる程大きなゾーン内停止階床数を定めると余裕時間が小さくなるという欠点がある。ただし、2.5.1節の交通計算の要領でゾーン内の所要時



間を求めると、1 割の余裕を見て計算することになる。本論文ではすでに余裕を織り込み済みの理論を取り込んでいるため、ここではこれ以上議論しない。

6.6.2 かごの順序変更

ここでは、運行が乱れてかごが遅れた場合に行う必要がある運行スケジュールの変更の一つとして、かごの順序変更について述べる。ただし、順序変更を乗降用シャフトで行って地域分離型輸送の形態を崩しても、例えば先発した低層行きのかごを後続の高層行きのかごが追いかけて、高層行きのかごが低層行きのかごのサービスが終わるまで待たされたりして、メリットが出ないので、ここでは回送用シャフトにおける話に限定する。

回送用シャフトへのかごの流入は、乗降用シャフトでのサービスが終わった時刻に依存するため、遅れることがある。そのため、図 6-9 にみられるような回送スケジュールの変更が必要となる。このように、回送用シャフトにおいてかごの順序を入れ替えることは、次周期以降のサービスを円滑に行う上でも不可欠なものである。

この場合に問題となるのは、遅れにより次のサービスに使うかご数が不足することである。この場合は、5.7.6 節で説明した余剰かごをうまく活用できれば、次のサービスにかごが間に合わずに遅れを生じることもない。したがって、運行制御面から見れば、かご数の不足に備えて、常にかごを 1 個または数個待機させておくのがよい。待機場所は、最下のロビー階の下がかごをすぐ供給できるので望ましいが、それができない場合は最上階付近の回送かごが少ない所がよく、最上階をサービスしたかごが図 6-10 のようにしばらく留まるのが合理的である。

6.6.3 複数ユニット間の協調

同じ階をサービスするユニットは、最大待ち時間を短くするために、すべて同じ周期で運転してすべてのユニットの位相を均等にずらすのが理想である。したがって、運行スケジュールを作成する場合も位相関係を考慮しなくてはならない。しかし、もし運行が乱れ、あるユニットの位相が遅れた場合、そのユニットに対する待ち時間が増えた結果として乗客が集中し、結果として図 6-1 に示したように遅れが増加する危険性がある。

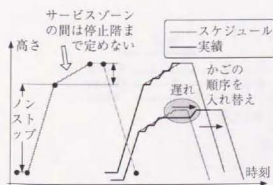


図 6-9：回送スケジュールの変更

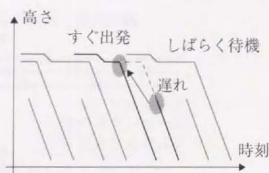


図 6-10：上層でのかごの待機



この場合、遅れたユニットの負荷を減らして、遅れを回復させることも必要であるが、図6-11のように遅れたユニットよりも位相的に1つ以上早いユニットを遅らせて遅延で重くなった負荷を速やかに多くのユニットに分担させることも有効な制御方法である。正常なユニットを遅らせるには、地下鉄などで行われている遅れた列車の前を走る列車を待たせるような制御も考えられるが、停止階の決まっていないロープレスエレベータの場合は、下記のようにゾーン内停止階床数を変化させることで、もっと効果的な制御ができる。

1. 遅れたユニットに関しては、ゾーン内停止階床数を減らしてサービスゾーンの所要時間を短くしたスケジュールに作成し直せば運行周期が詰まり、遅れを回復できる。
2. 遅れていないユニットに関しては、ゾーン内停止階床数を増やして、通常より多くの呼びを担当して多くの階に止まることにより結果的に遅らせる。

さらに、鉄道とは違い、スケジュールにおける時刻を厳密に守る必要がないため、遅延発生後の運行が円滑であれば遅らせた位相を元にもどす必要はなく、組み直したスケジュールに従ってそのまま運行すればよい。遅延発生後に積み残し等が出たままであれば、全ユニットのゾーン内停止階床数を減らして、積み残しがなくなるまでその状態を保てばよい。

6.7 群管理制御部

6.7.1 呼びの割り付けの制御による運行の円滑化

最後に、最も細かなレベルの運行制御として、乗客が乗り場で登録した呼びに対してどのかごを割り当てるかという、乗客に最も密接な関係のある呼び割り付け制御について検討する。

通常、前記のように、多ユニットで運行周期が同じ、そして位相も均等にばらつくように定められた運行スケジュールのもとでは、呼びの生じた階に最も近くてかつ停止可能なかごを止めるのがよい。しかし、本システムのスケジューリング部で生成されるスケジュー



図6-11：複数ユニット間の位相調整方法



ルは、前節で説明した通り、バスのように最初からデマンド性を考慮して、サービス階のいくつかは通過することを前提としているため、かごに呼びの割り当てが多いと遅れが生じ、運行スケジュールが乱れることになる。

したがって、定められたゾーン内停止階床数を超えて新たに呼びを登録すると運行スケジュールが乱れることが予想される場合、図6-12のように呼びを1つ後またはそれ以降にサービスするかごに割り当てることで、呼び割り付けの段階で運行乱れを防ぐことが可能となる。通過された呼びに対する待ち時間が長くなるが、待ち時間が許容とされる60秒以上にならない限り、全体の運行乱れを防ぐために実行すべきである。

止めるべきでない階を通過するという自体は、ロープ式エレベータでも行われている方法である。異なるのは、ロープ式エレベータでは運行スケジュールという制約がないために待ち時間等を直接的な評価量として停止階と通過階を定めている一方、本提案手法では待ち時間等はスケジューリング時点で考慮されているとしてそのスケジュールから遅れないように停止階と通過階を決めている点にある。

1つ階を飛ばすことによる効果を考えると、例えばある階から出発して1階上に停止して2階上に到着する場合は、1階分の走行時間が6秒で停止時間が14秒とすると20秒であるが、1階上を飛ばして2階上に直接行くことにより所要時間が2階分の走行時間8秒だけになるため、12秒の短縮となる。以後の検討では小さく見積もって10秒とする。

この方法の問題点は、乗客が特定の少数の階から大量に乗ってさまざまな階で降りる、例えば出勤時上り方向のような場合に効果が出ないことである。これは、一旦乗ってしまった乗客は目的の階で降りずしかないため、降車による停止階はいかなる制御によっても変えることはできないからである。このような場面では、サービスゾーンを細分化してその中ですべての階に止まってもローカルサービス区間の所要時間が増えないようなスケジュールを組むのが現段階では妥当と考えられ、その方法は現在でも一部行われている例がある。

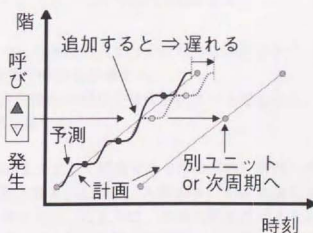


図6-12：スケジューリング的要素を取り入れたデマンド運行



しかし、より効果的な制御を行うには、かごに乗り込む段階で乗客を選別し、降車のために停止する階床数を一定以下にするのがよい。そのためには、次節で述べる情報収集機能と案内機能の充実が不可欠である。

6.7.2 情報収集機能と案内機能の利用による制御の高度化

運行制御では、乗客を制御する機能ともいえる案内機能も重要な要素の一つである。図6-12の例のように無案内で乗客の行動を操作できる場合はよいが、かごに乗り込む段階で乗客を選別する必要がある場合、各乗客の行き先を把握し（情報収集機能）、乗客を的確に誘導する（案内機能）ことが必要である。このような制御について、ロープ式エレベータでは文献[32]のような導入例があるが、ロープレスエレベータではスケジュールに従った円滑な運行を実現するために、必要性がより高いと考えられる。

6.7.2.1 情報収集方法： ここでは、各乗客がどの階からどの階へ移動しようとしているかを把握することを対象とする。現在の通常のエレベータは、行先階をかご内で指定するが、乗り込んでしまった段階では乗客を選別することは不可能である。したがって、かご内の行き先ボタンの機能は、図6-13のようにかごの外に移すべきである。当然、そのボタンは各シャフト毎に独立したものではなく、群管理制御のために連動していなくてはならない。これにより、かご内で行き先を指定することが不要になることと、行先階という重要な情報が早く得られることで、乗客側とシステム側双方にとって利点となる。

さらに、2.4節で述べたIPASSのような高度な情報端末を個人が持って利用すると、例えば出勤時に建物に入った時点でその人のオフィスがある階への呼びを自動的に登録し、エレベータ乗場に着いた頃にかごが着いているといったように、システムが需要をいち早く把握することによる高度な制御が可能になる。また、その端末を使って各乗客が行先階も含めて手動の呼び登録もできる。ただし、登録が早すぎて実際に乗り込むまでの時間が長いと、時間差は不確定要素を含むことに注意する必要がある。実際は、呼びの有効期限のようなものを設け、かご到着までの時間をカードに表示して乗客に早く来ることを促したりする必要がある。

ここで議論すべき点に、次の2つの方式の比較がある。

1. 乗客は乗り場にやってきた時点で自分の行先が登録されていなければ、行先ボタンを押す、または端末で呼びを登録する。
2. 乗客はすでに行き先階への呼びが登録されている場合にも、行先ボタンを押す、または端末で呼びを登録する。

2.の方が各ODの人数まで正しく把握できるため、特に各階への需要がばらついている場合に高度な制御が可能となる。しかし、人数が多いODを優先すると、急いでいる人が1人で何回もボタンを押すといったように、悪用の危険性がある。乗り場のボタンで対策をする場合は、画像処理で得た待ち人数よりもはるかに多い呼びが登録されていたらキャンセルする、などの従来からあるようないたずら対策を応用する必要がある。

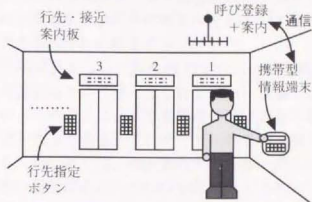


図 6-13: 想定する乗客案内システム

ただし、個人の端末で登録する場合は、端末の ID が分かると考えてよい。同じ端末からは 1 つしか呼びを登録できない（同伴者がいる場合はその人数分だけ）ようにすればよく、簡単である。結局、情報端末による入力ができる人のみ、逐次登録すればある程度の優先サービスが受けられる可能性が大きい、という形にするのがよい。

6.7.2.2 案内方法： ここでは、各々が降車のための停止階を選択することによる待ち客の選択方法と、乗せるための案内方法を対象にする。各々が停止階を決定するには、スケジュールを守れる停止数にした上で、待ち時間の長い乗客の行き先から順に乗車人数が定員を超えない範囲で選ばれよう。

停止階が決まったら、その階以外に行く乗客が乗らないようにするのが案内の必要条件であり、そのために来たかごがどこに止まるかを明示することが必要である。現時点で行

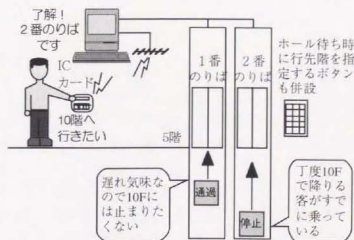


図 6-14: 行先階情報の早期取得とその利用



える方法は、到着したかごの行き先をドアの上部等に表示するものである。しかし、この方法だと的確に与えられる情報量には限りがあり、例えば「45階～51階」というように1区間か2,3区間のゾーンの形態でしか指定できない。

ここでも情報端末の利用が望ましい。図6-14のように、情報端末を持っている人には、個別に「どこのドアの何番目のかごに乗ってくれ」という情報だけ与えればよく、そのかごがどこに止まるかという、その人にとって重要度の低い情報は落とすことができる。また、そのため、6-7節で述べたような各かごのサービス階を不連続にするような制御を積極的に用いても問題が生じない。さらに、個別案内であれば、かごの停止階を変更してもきめ細かな案内により乗客の混乱が生じにくいのも利点の一つとして挙げられる。

6.8 まとめ

本章では最初に、スケジューリングと従来のエレベータ群管理制御をベースとする制御の役割と相互関係を定義して、セミデマンド運行の具体的な制御方法を示した。次に、スケジューリング部での制御として、ロープ式エレベータでは必要がなかった、上り用や下り用といった運行形態の適切な決定方法と切り替え方法を提唱した。また、サービスゾーンの変更や回送かごの順序変更方法を提唱し、各かごの負荷が不均一な場合やスケジュールが乱れた場合の運行の円滑化を可能とした。さらに、運行位相の調整方法も提案し、複数ユニット間の負荷を均一化して運行の乱れ防止を可能とした。最後に、ロープレスエレベータ向けの群管理制御方法を提唱して各乗客の待ち時間の増大を防ぎながらスケジュールからの遅延も防ぐことを可能としたうえ、上り方向の輸送では個別の行先情報取得と案内が重要であることも示した。

なお、本章では基本的に運行制御手法の説明のみを行ったが、実際の解析に関しては7.7節で改めて述べる。



第7章 提案したシステムの定量的な有効性分析

7.1 はじめに

本章では、第4,5,6章の議論を踏まえた上で、提案したロープレスエレベータの設備面や運行面での評価を行う。ロープ式エレベータなどの他方式との比較、階床数に対する各方式の特性、また、提案方式における、駆動装置や定員といったハードウェアの要素に対する輸送能力の変化、運行制御の効果について述べる。

7.2 計算方法

7.2.1 評価量

運行制御の良否を論じる7.7節以外では、基本的に設備の設計段階の議論を主とする。この場合、乗客はばらつきなく等間隔で到着するという仮定のもとで議論する。このようなモデルでは、待ち時間と輸送能力は反比例の関係となり、平均待ち時間は最大待ち時間の1/2となる。したがって、待ち時間と輸送能力のどちらかを取り扱えばよいが、輸送能力はシャフト1本あたりの値に規格化が容易で、概念的にも理解しやすいことから、本章では輸送能力を主に扱う評価量とする。

また、実際の設計では、占有面積の問題を重視する。これも輸送能力に反比例する。特に様々な方式の比較評価を行う際は、占有面積で議論を行うこととする。占有面積の議論のほとんどは、ロープ式エレベータのシャフト1本分を単位として議論している。ロープレスエレベータは、釣り合いおりの占有面積減少分よりもリニアモータ等の駆動装置の占有面積増大分の方が大きいと考えられる。文献 [6] の検討における実際のロープレスエレベータとロープ式エレベータのハードウェアの比較設計例から、本論文ではロープレスエレベータのシャフト1本の断面積は、ロープ式エレベータのシャフト1.3本分に相当すると仮定する。

一方、7.7節のような運行制御の議論では、乗客の確率的到着を考慮しなくてはならず、このようなモデルでは輸送能力・平均待ち時間・最大待ち時間はそれぞれ異なる意味を持つ。このうち、輸送能力は上記の計画段階である程度定められるものであり、従来の群管理制御の評価でも待ち時間の方が評価量として一般的に用いられている。そこで、7.7節では、待ち時間を評価量として扱う。

最後に、乗客がかごに乗り込んでから降りるまでの乗車時間も重要な評価量の一つである。これは、運行スケジュールが確定すれば、特に計画段階ではシャフト数等によらず一定とみなしてよい。したがって、ここでは乗車時間をそのままの形で扱う。平均乗車時間はノンストップ区間所要時間にローカルサービス所要時間の半分を加えたものとする。な

お、本章では特に明記されていない場合の待ち時間・乗車時間は平均値のことを指すものとする。

7.2.2 ロープレスエレベータの計算時の仮定

ロープレスエレベータでは、ある定格速度に対して次の2つの仮定をおき、5章での運行スケジュールリングを行い、実現可能な周期を求め、輸送能力の計算を行っている。

1. サービス時は乗車時間短縮のため、加減速度・ジャークの制約内で図 2-1 に示したような理想運行曲線を保ちつつ、そのエレベータが持つ最大の速度を出す。
2. 回送時には理想運転曲線を保ちつつ、前後のかごが接近し過ぎる時はなるべく時隔を詰めるように速度を調整する。

7.2.3 異なるシャフト本数を持つユニットやロープ式エレベータとの比較方法

ロープレス方式には、4.3 節で述べたように異なるシャフト数の形態が考えられる。したがって、3本シャフト式と1本シャフト式のように、異なるシャフト本数間で比較を行なう場合、シャフト本数の違いを考慮する必要がある。したがって、本論文では輸送能力をシャフト1本あたりに換算して表示を行うこととする。

さらに、従来型エレベータとロープレスエレベータの比較では、公平のため次のことを考慮する必要がある。

1. 面積的配慮：ロープ式エレベータでは、低層をサービスするエレベータは、巻上機等を格納する機械室以外にはサービス階より上のスペースを必要としない。
2. 時間的配慮：ロープ式エレベータでは、低層と高層のエレベータは同期運転をしていないため、低層のかごの方がかごの1周時間(RTT)が短い分だけシャフト1本あたりの輸送力が大きくとれる。

本論文でもこれらのことを考慮して評価量の計算を行っている。

ロープ式と1本シャフト式はかご数が固定されているため、速度が大きいほどかごの回転が速くなり、輸送力が稼げる。一方、2本以上のシャフトを用いた循環運行では、かご数の制約がないため、ブレーキ距離の関係から速度を落としてかご数を増やした方がよい。したがって、輸送力を大きくした状態での比較ならば、前者は加速度・ジャークの制約の中で与えられた揚程でできるだけ速度を大きくする仮定を置き、後者は例えば速度を200m/minなどに固定することとした。

7.2.4 想定する運行条件

7.7 節以外では、出勤ピーク時のサービスのみを仮定する。退勤時・昼食時など、ピーク時の乗客の動きを見ると、特殊な需要構造のビル以外は出勤時の需要形態に類似したものとなる。したがって、現実の設備計画段階では、出勤時の解析のみ行えば済む場合も多い

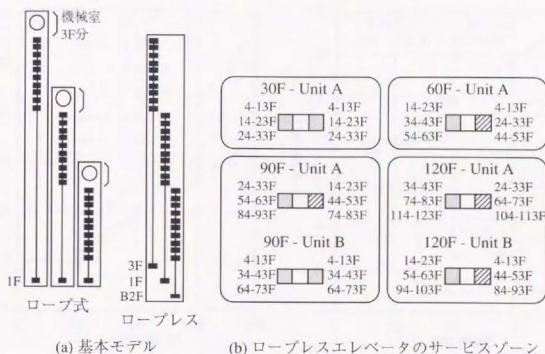


図7-1：計算時の仮定

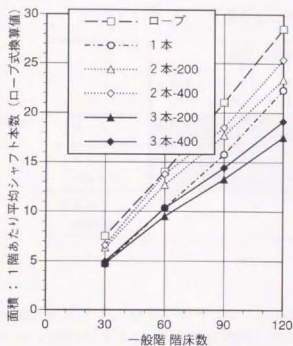
ので、出勤ピーク時の解析だけで特性の把握には十分であると考えられる。少なくとも退勤時には、ロビー階と各サービスゾーンの対応をつける必要がない、制御により停止階床数を減らし、輸送能力を出勤時より高く保てるなど、出勤時より条件は楽であるので、これも出勤時のみを考える理由の一つとなる。その際、乗車人数はこれまでのエレベータ交通計算と同様、定員の80%乗車と仮定する。

一方、運行制御段階では、第6章で述べたように上下方向の差は大きいため、上り方向のみを考えるだけでは不十分である。

7.3 様々なエレベータ方式の階床数に対する性能変化

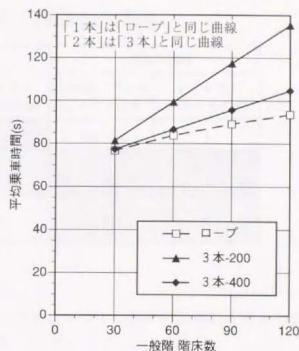
ここでは、これまで紹介した様々なエレベータ方式の有効性が、ビルの高さによってどう変わるか、その一般的傾向を調べてみた。ここでは、1つのサービスゾーンの階床数を10階に固定し、ロビー階からすべての階へ同じ人数の乗客が移動するという出勤時の需要を仮定した。また、定員は20名とした。

計算したビルの高さは、一般階30階（ゾーン数3）、一般階60階（ゾーン数6）、一般階90階（ゾーン数9）、一般階120階（ゾーン数12）の4通りである。このとき、ロープ式エレベータとロープレスエレベータのシャフト配置は図7-1(a)のように仮定し、面積の計算ではロープ式は機械室分を含め、ロープレスでは地下のロビー階を含める。また、ロープレスエレベータの3本シャフト式における各シャフトのサービスゾーンは図7-1(b)のように仮定する。30階のUnit Aと90階のUnit Bは、ユニットの両脇のシャフトで同じゾー



凡例の数字は定格速度 (m/min)

図7-2：各方式における階床数と占有面積の関係



凡例の数字は定格速度 (m/min)

図7-3：各方式における階床数と乗車時間の関係

ンをサービスする。実際は両脇が違う乗り場になってしまうが、基本的輸送特性を見るのが目的であるため、ここではこの問題を無視する。

これ以外に、1本シャフト式、2本シャフト式でサービスと回送を行う方式の比較も行う。そこで、定格速度について次のような仮定をおいた。

1. ロープ式と1本シャフト式は、かご数が限定されているため、速度が高い方がかご一周時間が短くなって輸送力が上がる。ここでは、なるべく輸送能力を優先することとし、これらの方式に有利な仮定として速度は加速度・ジャークの制約の範囲内で可能な限り出す、つまり一定速度では走行しないモードで走ることとする。
2. 2本・3本シャフト式は、かご数が自由に設定できるため、速度を上げる必要はない。生理的な影響や乗車時間の問題も含め、定格速度は200m/min, 400m/minの2通りで計算を行うこととする。そして、かご数は最も輸送能力の大きくなる個数を選ぶ。

以上の仮定をおき、1階あたり5分間に10人の乗客が発生した場合に必要なシャフト・ユニット数を計算し、機械室も含めた各階床数のシャフト本数の総和を合計し、それを総階床数で割ることで1階床あたりの平均シャフト本数を計算した。なお、ここでは理想化した議論を行っているため、シャフトやユニット本数は整数化せず小数として扱った。その結果を図7-2に示す。図7-2の中で折れ線が重複してわかりにくい部分については、別途表7-1に具体的数値を示している。さらに全乗客の平均乗車時間も計算したのでその結



表 7-1：低層時における占有面積の具体的値

	一般階30階床		一般階60階床	
	1階あたり平均 シャフト本数	1シャフト あたりかご数	1階あたり占有 シャフト本数	1シャフト あたりかご数
1本シャフト	4.689	3	10.358	3
3本シャフト 200m/min	4.764	3.67	9.528	4.33
3本シャフト 400m/min	4.947	3	10.346	4

果も図 7-3 に示す。なお、ロープレスエレベータのシャフト 1 本分の面積は、前述のようにロープ式のシャフト 1.3 本分に換算している。

図 7-2、図 7-3 や表 7-1 をみると、次のようなことが言える。

1. ロープ式と 1 本シャフト式では、1 階床あたり占有シャフト本数が階床数にほぼ比例している。これを言い換えると、エレベータ総占有面積が階床数の 2 乗に比例することを意味している。
2. 2・3 本シャフト式では、1 階床あたり占有シャフト本数の増加が階床数が増えても抑えられており、これらの方式の高層化への対応能力が高いことを示している。
3. 全般的な傾向として、ロープ式が劣ることは 30 階床程度でも明らかであるが、前節のようなスカイロビー方式を導入した場合は前節の結果から推測して 60～70 階床程度まではロープ式でも互角となる。
4. 表 7-1 にある通り、60 階までは 1 本シャフト式と 3 本シャフト式が互角である。これは、かご数が一つの要因として効いている。3 本シャフト式のシャフト 1 本あたりのかご数が 3 個だと 1 本シャフト式と同じになるが、この場合横行時間分だけ損失がある 3 本シャフト式の方が不利となる。表 7-1 からいって、大まかには 3 本シャフト式はシャフト 1 本あたりのかご数が 4 個以上でないと 1 本シャフト式に劣る恐れがあるといえる。
5. 乗車時間は速度の高いロープ式と 1 本シャフト式が有利であるが、120 階で最上階まで行くかごは定格速度が生理的影響が懸念される程高い 1000m/min 以上となってしまっている。一方、2・3 本シャフト式は、速度 200m/min では 120 階にもなると乗車時間が延び過ぎており、400m/min 程度位まで速度を上げた方が総合的なサービスが良くなる可能性を示している。



6. 2本シャフト式が他のロープ式エレベータと比べて優れないのは、2本シャフト式に不利な上りのみの需要を仮定しているためで、当然の結果である。

以上で、輸送面でのロープレスエレベータの優位性が明らかとなった。しかし、ロープ式エレベータにもスカイロビー方式のような省面積性に優れた方式があり、それとの比較評価や、シャフト面積だけではなく乗り場面積も考慮した評価も必要である。そこで、次節では、実際のビルに近いモデルをもとにそれらを詳細に検討することとした。

7.4 実際のビルを想定した際の諸方式の比較

7.4.1 乗客需要の仮定

本節では、現存のビルを参考にして仮定した図7-4のようなロープ式エレベータのモデルを例として用いる。このビルの乗客需要の仮定を、実測値も参考にして次の通りとした。

1. 出勤時は3Fから各階へ向かう乗客がほとんどなので、途中の一般階どうしや下り方向のODは無視できる。退勤時はその逆としてよく、かつ需要の絶対値が小さい。
2. 途中階に食堂がないため、昼食時も出退勤時と同様の議論ができる。

これらから、ここでは出勤時のみを考えればよい。実際にエレベータの計画では出勤時を想定しているため、図7-4の各エレベータの輸送能力を計算し、そこから設計時の想定需要を逆算した。エレベータの輸送能力の計算にはロープ式エレベータで用いられる交通計算の手法を用い、図7-6のようにビルの最上階をサービスしないエレベータは、各ゾーンの最上階をサービスしないとして計算した。その結果を示したのが表7-2である。表7-

表7-2: 輸送能力の計算結果

エレベータ	A	B	C	D	E	F
かご1周時間(s)	217.0	216.0	207.1	193.5	178.8	148.4
1台の5分間輸送能力(人)	26.54	26.67	27.81	29.77	32.21	38.82
全台数の5分間輸送能力(人)	212.3	213.4	222.5	238.2	257.7	232.9
1階当り5分間到着人数 計算値(人)	19.3	17.8	18.5	21.6	25.7	29.1
1階当り5分間到着人数 設計値(人)	17	17	18	21	25	29
全階分の5分間到着人数 設計値(人)	187	204	216	231	250	232

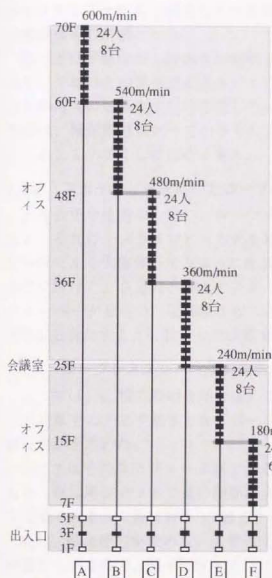


図 7-4：想定するエレベータシステム

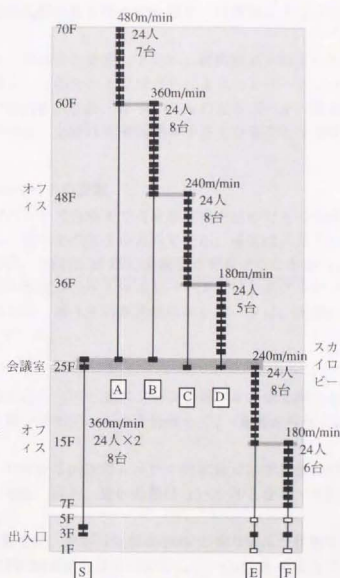


図 7-5：スカイロビーを用いた方式

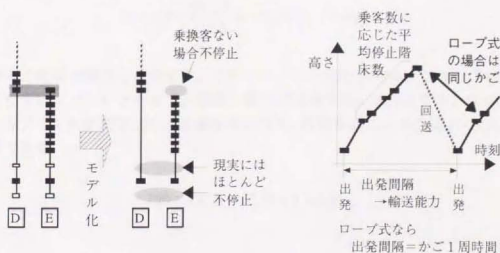


図 7-6：計算時の運行のモデル化

2ではさらにそれを1階当たりの5分間到着人数に直したのもも載せ、計算値よりも少ない整数値を設計値とした。

表7-2は下層ほど1階当りの需要が大きくなることを示している。超高層ビル以上になると、下層ほど全床面積が大きいものも多く、このケースではそれによりエレベータシャフトの増大の効果を十分打ち消してしまっている。なお、表7-2のAのエレベータの需要設定は、輸送能力に比べて小さくしているのは、上層ほど床面積が小さくなることを考慮してあえて小さくしたためである。

7.4.2 スカイロビーを用いたロープ式エレベータの設計

より公正な比較のために、ロープ式エレベータで究極まで占有床面積を詰めたものも考える。それは、スカイロビー方式を用いた、図7-5のような方式である。通常はスカイロビーはビルを大体等分するように配置するが、今回は25階に会議室が存在することから、そこに設けた。さらに、地上とスカイロビーを結ぶシャトルエレベータには、ダブルデッキエレベータを用い、省面積となるようにした。図7-5の各系統のエレベータは、実際に表7-2を満たすように設計した台数を記している。

7.4.3 ロープレスエレベータの設計

ここでは、比較の際の条件を揃えるために定員・サービスゾーンを図7-4と全く同じとして計算する。まず基本となるピーク時の運行スケジュールを作成して、(乗客から見た)運行周期を求めた。

図7-7はそのスケジュール例である。この場合は回送用シャフトの容量には十分余裕があり、乗降用シャフトで運行周期が決定される。結果、最小周期は133.5秒となり、それを実現できるかご数は最小13個となった。

次に、輸送能力を求める。通常の交通計算では、乗客は定員の80%が乗り込んだ状態を仮定しているので、図7-7の各ゾーンの5分間輸送能力はすべて等しく、(7-1)式のように43.15人と計算される。

$$24 \times 0.8 \times \frac{60 \times 5}{133.5} = 43.15 \text{ (人/5min)} \quad (7-1)$$

その結果と需要を照らし合わせて、必要なユニット数を求める。ユニットは、5分間の需要が最も多いゾーンに合わせて、必要な数だけ用意する。表7-2より、Eのエレベータが担当するゾーンの需要が250人と最も多いので、必要なユニット数は(7-2)式のように6つと計算できる。

$$250 + 43.15 = 5.79 < 6 \text{ (unit)} \quad (7-2)$$

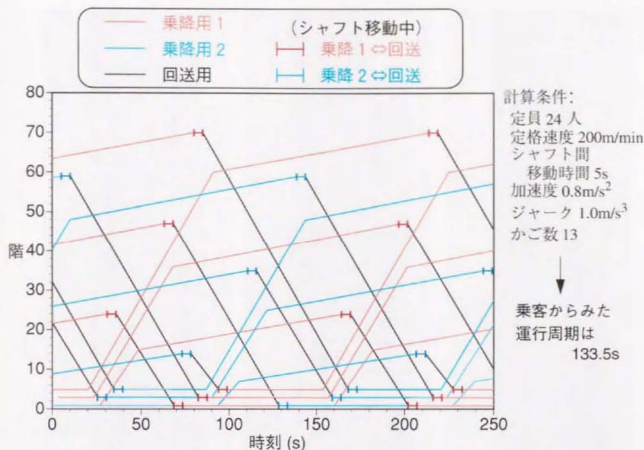


図7-7：生成された運行スケジュール

ただし、上り方向 6 ユニットだけでは下り輸送ができないので、もし下り用ユニットを 1 つ用意するならば全部で 7 ユニットとなる。

さらに、占有面積削減のため、図 7-8 (a) のように全階にシャフトとドアが存在するもの (方式 A) に加えて、運行形からみて不要な階にはドアやシャフトを設置しない図 7-8 (b) のモデル (方式 B)、さらにドアやシャフトを減らすように運行形態を変更した図 7-8 (c) のモデル (方式 C) を追加したものも検討する。方式 A と B では、5.6.1 節で述べたような、5F から 48F-70F、3F から 25F-48F、1F から 7F-15F、という高層のロビー階は高層階行きといった対応が取れていたが、方式 C ではそれが崩れていて乗客が分かりにくいという欠点を持つ。方式 B と C では、6.5.1 節に記した運行制御の柔軟性を確保するために、ゾーン境界を変えられる (15F, 60F は $\pm 2\text{F}$ 、25, 48F は $\pm 3\text{F}$ 、36F は $\pm 5\text{F}$ とし、平均 $\pm 3\text{F}$ とした) ような余地を残した構成とした。

7.4.4 各方式の比較

これまで説明した、大まかに分けて 3 通り、細かく見れば 5 通りのエレベータシステムの比較評価を行った。その際、輸送能力は表 7-2 の形で制約条件となっているため、主な

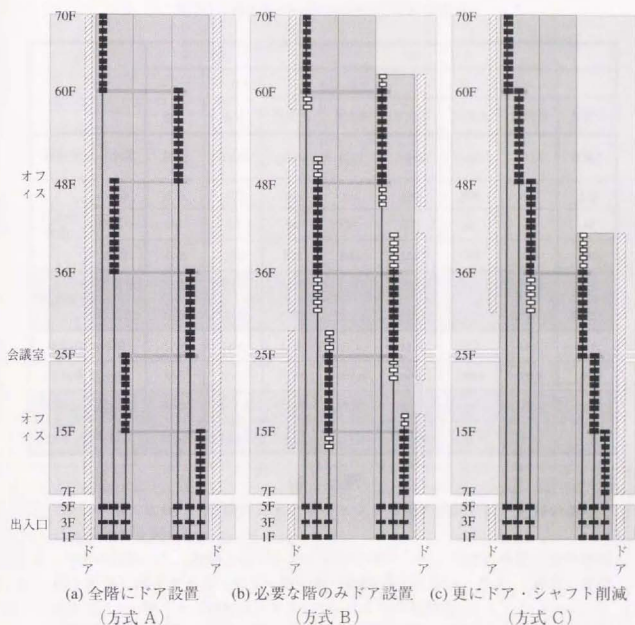


図 7-8：ロープレスエレベータのモデル

評価量を、シャフト・乗り場を合わせて計算した占有床面積とし、その他に待ち時間、乗車時間でも比較した。

比較の際、ロープ式エレベータはシャフト上部に機械室があるため、分速 180m の遅いエレベータは 2F 分、その他のエレベータを 3F 分として延べ占有階床数に加えた。ロープレスエレベータの場合は、下りサービス用のユニットが必要かどうかにより条件が異なるので、それを除いた 6 ユニットのの場合と、それを入れた 7 ユニットのの場合を計算した。

各評価量の計算結果を表 7-3 に示す。表 7-3 から、次のような傾向を読み取れる。



表 7-3：各エレベータ方式の比較評価結果

		ロープ式		ロープレス					
		スカイ ロビー なし	スカイ ロビー あり	6 ユニット			7 ユニット		
				方式A	方式B	方式C	方式A	方式B	方式C
総シャフト本数		2042	1440	1260	1212	1086	1470	1414	1267
ドアの 枚数	一般	534	477	768	594	450	896	693	525
	ロビー	46	74	36	36	36	42	42	42
	総合	603	588	822	648	504	959	756	588
総面積	通常和	2645	2028	2082	1860	1590	2429	2170	1855
	重み和	2645	2028	2460	2223.6	1915.8	2870	2594.2	2235.1
平均待ち時間		12.6	16.6	11.1	11.1	11.6	11.1	11.1	11.6
平均乗車時間		84.3	99.3	109.6	109.6	109.6	109.6	109.6	109.6
平均サ ービス 時間	通常和	96.9	115.9	120.7	120.7	121.2	120.7	120.7	121.2
	重み和	109.5	132.5	131.8	131.8	132.8	131.8	131.8	132.8

注 釈

1. 総シャフト本数：各階床におけるシャフト本数の総和。同じ定員の条件では床面積に比例する。
2. ドアの枚数：一般階とロビー階に分けて集計した。ドアの枚数は乗り場面積と密接に関係するが、ロビー階の乗り場面積が大きいのと考え、「総合」評価として、(一般) + (ロビー) × 1.5 としたもの載せた。
3. 総面積：一般階のドア1枚あたり乗り場面積がシャフト1本分に相当するため、上記の2つの和をとった。「重み和」とあるのは、つり合いおりの分の面積減とリニアモータの分の面積増を勘案し、ロープレスエレベータのシャフト面積に重み1.3をかけたもの。
4. 平均待ち時間：全乗客の平均。スカイロビー方式の場合はシャトル+ローカルの和で計算。単位は秒。
5. 平均乗車時間：乗車時間は、乗ってから降りるまでの時間の意。全乗客の平均。スカイロビー方式の場合はシャトル+ローカルの和で計算。単位は秒。
6. 平均サービス時間：待ち時間と乗車時間の和をとったサービス完了時間の平均値。「重み和」とあるのは、待ち時間を2倍して和をとったもの。単位は秒。



1. ロープレスエレベータはロープ式の場合より乗り場部分が増えがちである。
2. 運行形態をある程度固定し、不要部分のシャフトやドアを削る方式 B だと、1 割くらい占有面積を削ることができる。
3. ロビー階での案内が複雑だが、方式 C なら 2 割以上占有面積を削れる。輸送の柔軟性をある程度犠牲にすれば、70 階程度のビルでもスカイロビー方式より面積的に勝る性能を持つと言える。
4. 乗車時間は、エレベータを乗り継ぐスカイロビー方式の方がロープレスエレベータよりも有利となった。シャトルエレベータが 30 秒程度で済むことと、ロープレスエレベータの速度が遅いことが原因である。しかし、ロープレスエレベータの速度を上げると、時隔が広がって輸送力が落ちた結果として、需要に対して必要なユニット数が増える可能性がある。
5. 時間的なサービス水準は、高速性が最も有効となるロープ式のスカイロビーなしが最良となった。スカイロビー方式とロープレスエレベータはほとんど互角であるが、乗り換えが不要である分、ロープレスエレベータの方が有利である。

ここでは、現状の超高層ビル程度で比較を行ってみたが、性能的に従来のロープ式エレベータに十分対抗でき、この程度の高さのビルへのロープレスエレベータの適用の意義が明らかとなった。

なお、出勤時にロープレスエレベータを 6 ユニットしか用いない場合、下り輸送ができない。これに関してはピークが短時間であるため、4.8 節の最後で述べたように、下り需要が少ないならば荷物用や非常用といった出勤時には用いられないエレベータの輸送力をごく短い時間だけ下りの輸送用に転用するのが合理的であろう。

以上の議論により、現状の超高層ビル程度の高さで十分にロープレスエレベータの利点を発揮できることが分かった。そこで、次節以降ではロープレスエレベータの詳細な解析に移る。なお、1 本シャフト式は基本的な運行特性がロープ式に準じており、ロープ式エレベータの議論から類推が可能であることから、以下では 3 本シャフト式のみを扱う。

7.5 ハードウェア性能に対する輸送特性の比較評価

自走式のかごを用いた鉛直輸送システムでは、3.2.1 節で述べたように鉛直方向に対して十分な加速度が得られると考えてよい。したがって、ここで問題とする点は、鉛直方向への定格速度と水平方向への移動時間の 2 つである。これらについて順に解析する。

7.5.1 鉛直方向の定格速度

まず、鉛直方向の定格速度を 100, 200, 400, 600m/min の 4 通りに設定し、かご数を変化させて運行スケジュールを作成し、最小運行周期を求めてシャフト 1 本あたりの 5 分間輸送能力を算定した。図 7-9 は一般階階床数 60 の時、図 7-10 は一般階階床数 120 の時の特性を示したものである。なお、一般階床数 120 の場合は、サービス階は 12 に分割し、そのう

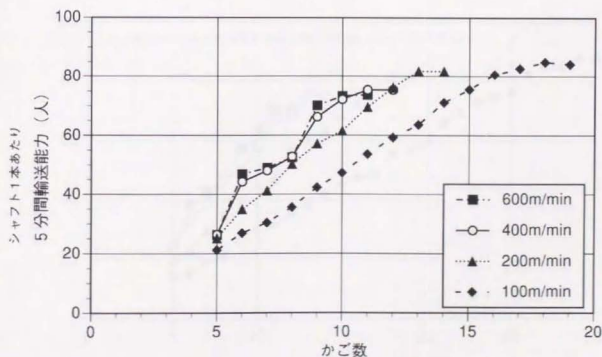


ちの6つ(24-33F, 34-43F, 64-73F, 74-83F, 104-113F, 114-123F)のサービスをするものについて解析を行った。

計算は、かご数を1個ずつ増やして行うが、輸送能力が飽和か減少した場合、または実行可能な解が得られなくなった場合には計算を打ち切っている。

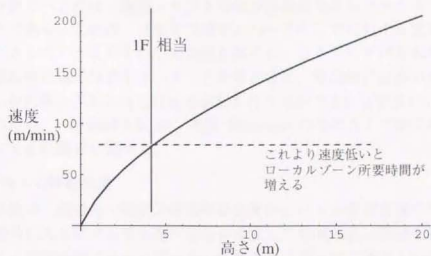
これから、次のようなことが言える。

1. 同じかご数ならば速度が高い方が輸送力が大きい。これは、かご1個の一周時間が短縮され、かごの回転が早くなったために、結果的に運行周期が詰められるからである。
2. 最大の輸送力は速度が低い方が大きいことが分かる。これは、1. の効果をかご数の増加で打ち消すだけではなく、速度を落とすことによるブレーキ距離の減少で、時隔が詰められる効果が得られているためである。
3. 速度が100m/minより下がると、(2-1)式をプロットした図7-11から見て分かるように、1F分の昇降でも最高速度 v_0 よりも定格速度 v_m が小さくなってしまい、ローカルサービス区間の所要時間が増えはじめ、逆に輸送能力が下がる減少が見られる。輸送能力向上のためには定格速度100m/min未満まで速度を下げてはならない。

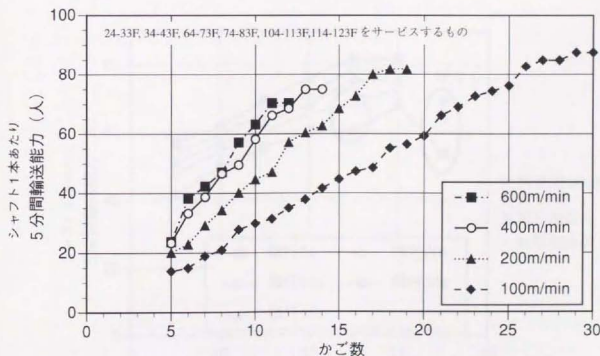


定員20名, 地域分割数6, シャフト間移動時間5秒

図7-9: 一般階階床数60の場合のかご数と輸送力の関係

図 7-11: 高さ h と最高速度 v_m の関係

4. 図 7-9 と図 7-10 を見比べると、階床数が増えてもかご数が増えるだけで、最大輸送能力はほとんど変わっていない。したがって、大部分の基本的特性は特定の階床数を持つ 1 つのビルの場合について検討すればよいことが分かる。



定員 20 名 地域分割数 12, シャフト移動時間 5 秒

図 7-10: 一般階床数 120 の場合のかご数と輸送力の関係



上記で最も強調すべき点は、複数シャフトの場合は従来のエレベータよりも速度を低く設定できることである。これは、自走を実現するハードウェアに対する要求性能を下げられ、ロープレスエレベータそのものの実現性を高くし、コストも下げられることを意味する。しかし、閑散時の乗車時間を減らすことを考えると、性能的には高い速度を持たせておいて輸送能力が必要とされる時だけ減速運転を行う方ができれば望ましい。

なお、参考のため、一般階階床数 60、速度 200m/min の時の各かご数において得られた運行スケジュールを付録 C に載せた。

7.5.2 水平方向への移動時間

水平方向の移動は、機械的な装置か電気的な装置かといった装置自身の特性の他に、水平方向への移動時に人を載せる場合乗り心地を考慮して加減速度に制限を設けるなど、設計思想によっても移動時間は変わってくる。移動時間は速いほど優れていることは確かであるが、本論文で提案した方法の有効性があるのはどの時間範囲かを解析することで、ハードウェアの開発指針になる。

一般に、シャフト間移動時間が長いと、地域分離型輸送で整然とした運行がされている両脇の乗降用シャフトより、かごが乱雑に流入してくる回送用シャフトの容量が厳しくなり、うまくスケジューリングできない場面が生じ、横行機能を利用する価値が小さくなる。そこで、シャフト間移動時間を理想的な 5 秒という値から、10、15、20、30 秒と変化させ、性能の変化を調べた。その結果を図 7-12 に示す。

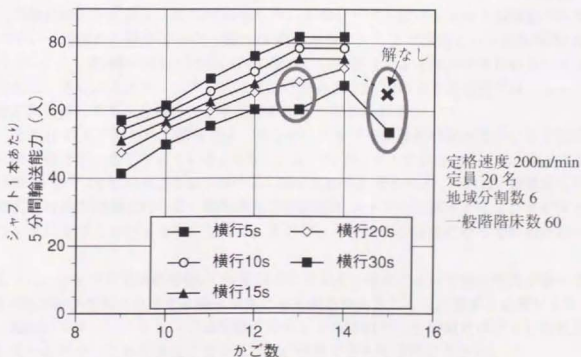


図 7-12：シャフト間移動時間による輸送能力の変化

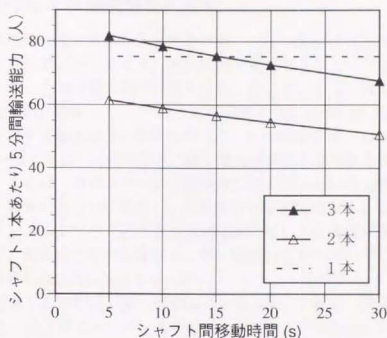


図 7-13: シャフト間移動時間と各方式の輸送能力の関係

すべて 14 個のかごで実現された最大輸送能力自体は、運行周期がシャフト間移動時間の変化分だけ変わることによる効果しか出ておらず、特に回送用シャフトの容量に制限が生じる場面はなかった。

一方、3 本シャフト式・2 本シャフト式・1 本シャフト式について、シャフト間移動時間と最大の輸送能力を計算し、図 7-13 に示した。1 本シャフト式はシャフト間移動が不要であるので、一定値の直線を引いた。図 7-13 からみると、ここで仮定した一般階床数 60 の場合は、シャフト間移動時間は 15 秒以内に留めないと横行による利点が失われることになる。ただし、明らかに 3 本シャフト式に優位性がある 120 階のような場面では、シャフト間移動時間は長くても十分横行による効果が出ると考えられる。

また、図 7-12 の丸で囲われた部分では、明らかにシャフト間移動時間が小さい場合に比べ大幅に輸送能力が小さくなっている。さらに、図 7-12 の「×」で示したように、シャフト間移動時間 20 秒で 15 個のかごを使う場合は、解が求められなかった。これは、乗降用シャフト側で実現可能な周期に対して、偶然各かごが回送用シャフトに移るタイミングがスケジューリングに支障をきたすようになって、スケジューリングが不能になっているためである。

このように、シャフト間移動時間が 20 秒以上となると、場面によって運行周期が詰められず、輸送能力が予想外に低下する場面が生じる可能性があることに注意する必要がある。ただし、現在のシミュレーションでは両脇のシャフトの位相を $1/2$ 周期だけずらした状態で固定しているので、これを変化させると状況が改善できる可能性は大きい。



7.6 定員設定に対する輸送特性の変化

定員は多い方が当然一度に沢山の乗客を運べる。一方、図4-11に示されたように、定員は少ない方が停止階床数が少なくなり、運行周期を短くできるという効果もあるが、定員1人あたりのシャフト占有面積も同時に増大する。そこで、ここでは定員設定に対する輸送特性の変化を定量的に検討した。ここでは、定員を5, 10, 15, 20, 25, 30人の6通りに変化させて、かご数に対する輸送能力の特性を調べた。その結果を図7-14に示す。

図7-14から分かることは、定員が小さいほど最大輸送能力を発揮させるかご数が多くなることくらいで、あとは定員が大きいほど輸送能力が大きいという定性的傾向しか読み取れない。そこで、最大輸送能力に着目し、占有面積で規格化することとした。

しかし、ロープレスエレベータの占有面積が定員に対しどう変化するかは現時点では不明である。そこで、現段階で分かる情報として、文献[37]からロープ式エレベータの昇降路面積と定員の関係を仮に用いることとした。

文献[37]から計算した特性は、図7-15のようになった。これを一次関数として最小二乗法で係数を求めた。7.2.1節でロープレスエレベータのシャフト1本分の断面積はロープ式エレベータのシャフト1本の1.3倍であるとしたので、得られた係数にそれぞれ1.3をかけ、最終的に昇降路面積Aと定員cの関係を(7-3)式のように仮定した。

$$A = 0.3090c + 1.596 \text{ (m}^2\text{)} \quad (7-3)$$

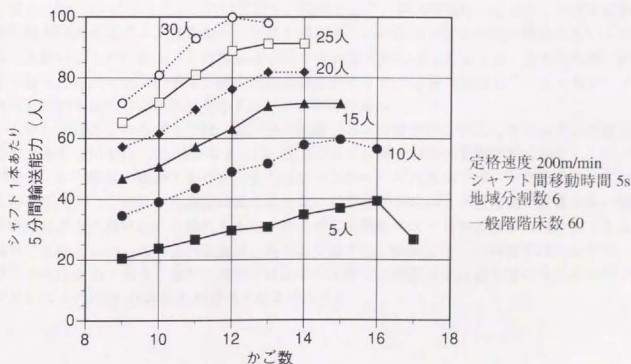


図7-14: 定員による輸送能力の変化

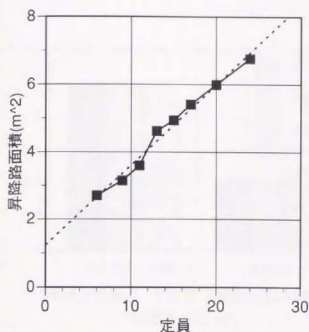


図 7-15: ロープ式エレベータにおける
定員と昇降路面積の関係

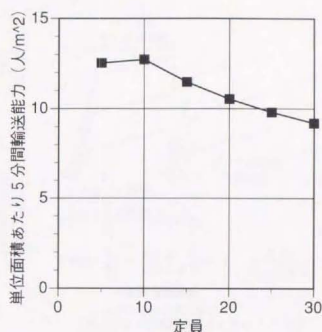


図 7-16: 定員と単位面積あたり輸送能力
の関係

図 7-14 と (7-3) 式から、各定員における単位面積あたりの輸送能力を計算したのが図 7-16 である。これを見ると、定員 10 名付近が最も輸送密度が高くなることが言える。

さらに、ロープ式と 1 本シャフト式も加え、定員 20 名と定員 5 名の時の輸送能力の差を計算し、図 7-17 に示した。これによると、傾向として、定員削減時には 3 本シャフト式の優位性が増大することが読み取れ、定員を減らすことの意義が従来の横行機能のないものよりも高いことがわかる。この理由は、図 7-18 に模式的に示したように、全体の周期に対するローカルサービスの所要時間の占める割合が大きく、定員を削減してローカルサービス所要時間を減らした効果が大きく出やすいからである。

しかし、ここでのモデルでは、途中の一般階どうしの需要をないとしている点に注意が必要である。図 4-11 でも分かるように、定員が少ない場合はその影響を受けやすい。したがって、その需要が極めて少ない、またはローカルサービス用エレベータが併設されている時でないと、このような議論は成り立たない。定員が小さいと一般階間の需要が多い昼間時に輸送力が稼げない可能性もあり、特に同じ企業のオフィ스가数階分にわたってある場合には使えない。この節の結論は、あくまで途中の一般階どうしの需要がほとんどない場合のみに有効であり、通常の設計では従来の高層ビル程度以上に通常用いられるロープ式エレベータ同様 20 名程度が妥当となるだろう。

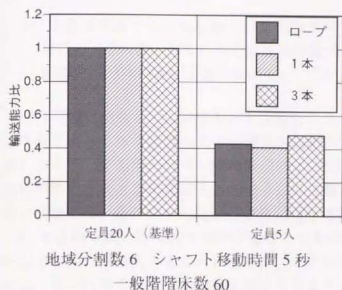


図 7-17: 各方式における定員と輸送能力の関係の比較

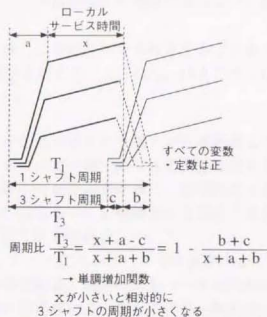


図 7-18: ローカルサービス所要時間と周期の関係

7.7 ロープレスエレベータに有効な運行制御方法の検証

最後に、運行制御の効果について検討を行う。ただし、エレベータ一般の運行制御については、すでに 1.2.2 節で述べたような群管理制御という形で高度な発達をしており、これら従来の技術や知識を生かせることも多い。そこで、ここでは提案したロープレスエレベータ特有の問題として、運行スケジュールを守った状態での制御効果のみに着目して解析をした。

図 7-18 から分かるように、途中の停止階床数の上限を設けると、ローカルサービス所要時間が短縮され、結果的に運行周期を詰めることができる。そして、その効果はロープ式エレベータよりもロープレスエレベータの方が大きいことは 7.6 節で述べたのと同様である。そこで、ここではまず、解析的モデルを構築して運行制御特性を明らかにし、それを計算機上で乗客を発生させて処理するシミュレーションにより確認した。

7.7.1 検討する際の前提条件

ここで行った検討では、問題の単純化のために次の仮定を設けている。

1. 上り方向のピーク時の輸送で、1つのロビー階のみに着目する。また、最も停止階床数が増えて厳しい条件となりやすい条件として、ロビー階から各階へ同じ割合で乗客が向かうと仮定する。



2. 複数ユニットを並列して運転し、すべてのユニットは位相差が均等になるように運行されているとする。
3. 乗客は到着すると乗り場で行き先階ボタンを押し、登録された各行先をかごに割り付ける。その際、与えられた停止階床数の上限値を超えないようにし、超えた呼びは別のドアの次のかごに割り付ける。

1. の仮定に関連して、本来もっと複雑なシステムから1つのロビー階という局部的なものを取り出してきて議論してよい理由を説明する。あるロビー階でのかごの出発時刻を変更しようとしても他のロビー階の状況によってそれが不可能な場合が多く、結果的に出発時刻の変更は大きな外乱が入った場合以外は積極的に行えない。出発時刻を積極的に変えない状況では、他のロビー階との相互作用を無視できるからである。

3. では乗り場で行先階を指定することにしたが、ロープ式エレベータでは例が少なく、不公平なものを導入することになるが、これにも理由がある。通常のエレベータの出発時には、早く出発するかごに乗客を乗せようと確率的要素により各かごの停止階床数はばらつく。ロープ式エレベータならかごどうしが干渉しないので問題ないが、ロープレスエレベータでは異なるゾーンをサービスするかごと干渉を起こす可能性があり、結果的に余裕時間を多く取らざるを得ない。したがって、ロープレスエレベータの方が停止階床数を揃えて各ユニットのサービスゾーン所要時間を揃える必要性が高く、行先階が事前に分らないとロープレスエレベータの効果が大きく下がる危険性があるからである。

ところで、この議論は上り方向についてのものであるが、乗客の行先が乗車前に分かっているため、運行形態は違っても全員がロビー階に向かう下り方向の輸送でも考え方は同じとなる。下りの場合、サービスゾーンの各階で発生した乗客に対して停止するかごを割り付けることになる。違いが出る要因は、各階でのかごの出発時刻に差があることだけである。したがって、ここでは上記のような上り方向の議論を取り上げた。

7.7.2 解析的モデルによる検討

出勤時に行先階情報を用いて乗客を選別し、各かごの停止階床数を制限する解析的モデルを考える。サービスゾーンの停止階床数は n とし、1ユニットの運行周期を T 、並列運転しているユニット数を u とする。乗車人数 r はロビー階出発時の人数を示すが、2.5.1.1節の交通計算の手法と同様にロビー階で常に定員の80%が乗車すると仮定する。無制御の場合の平均的予想停止数 s_0 を基準とし、停止階床数の上限値 s を定める。ここで、簡略化のために次の3つの仮定をおく。

1. 各乗客はロビー階からすべての階へ均等な確率で向かうと仮定する。
2. 最も早く出発するかごが目的階に止まらないために乗れなかった乗客を r_r 人とし、かごの出発間隔 T/u の間の乗客の流れを、図7-19のようにする。
3. 積み残された r_r 人の乗客の行先階床数 s_r を s の関数とし、(7-4)式のような形とする。



$$s_r(s) = \begin{cases} s_0 - s & (s \leq s_0 - 1) \\ 1 & (s > s_0 - 1) \end{cases} \quad (7-4)$$

4. 積み残された乗客は必ず次のかごに乗れるとする。

3. の仮定で、 $s=n$ の時は $s_r=0$ であるべきであるが、結果的に積み残し人数が 0 になるとで、最終的な結果は 1 でも変わらない。また、本来は (7-4) 式に r_r の項が入ってくるべきであるが、計算が複雑になるため (7-4) 式の簡略モデルを用いる。

これらの仮定から全乗客の平均待ち時間を求める。まず、新たに来た r 人の乗客で、必ず先発のかごに乗れる人数は、 s から前の周期で積み残された乗客の行先階床数を引いた階床数に等しく、(7-5) 式のようになる。

$$s - s_r(s) \quad (7-5)$$

ここで、(7-5) 式がもし負になると、以下の議論が成り立たなくなるため、この解析では $s < s_0/2$ の場合は扱えないことに注意する必要がある。

次に、必ず先発かごに乗れる保証のない残りの乗客 1 人が積み残される確率は、停止階床数 n のうちの止まらない $n-s$ 階分を行先を選ぶ確率に等しいので、(7-6) 式のようになる。

$$\frac{n-s}{n} \quad (7-6)$$

積み残される可能性のある乗客数は $r - (s - s_r(s))$ 人なので、積み残される人数 r_r は (7-7) 式のようになる。

$$r_r = \frac{n-s}{n} \{r - (s - s_r(s))\} \quad (7-7)$$

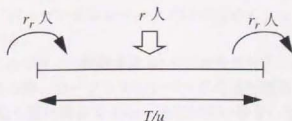


図 7-19：モデルでの乗客の流れ



積み残されなかった乗客 $r-r_r$ 人の平均待ち時間を $T/(2u)$ 、積み残された乗客 r_r 人の平均待ち時間を $3T/(2u)$ とするとき、全乗客の平均待ち時間 $t_w(s)$ は (7-8) 式 のようになる。

$$\begin{aligned} t_w(s) &= \left\{ \frac{T}{2u}(r-r_r) + \frac{3T}{2u}r_r \right\} / r \\ &= \frac{T}{u} \left\{ \frac{1}{2} + \left(1 - \frac{s}{n} \right) \left(1 - \frac{s-s_r(s)}{r} \right) \right\} \end{aligned} \quad (7-8)$$

(7-8) 式は、例えばすべての乗客が各周期ですべての階に均等に向かうとして単純に $t_w(s)$ を各階への平均出発間隔の半分の $T/(2u) \cdot n/s$ とした時よりも、 s が小さい領域で小さな値が出る。これは、各乗客の振る舞いを考慮に入れて、需要のある階に止めるという実際に近いモデルになっていることが原因である。

ここまでは、運行周期 T を固定してきたが、実際は s を変化させると最小運行周期も変化する。具体的には、停止階床数が 1 つ減ると T が $t_0=10$ 秒 (少なめに見積もった値) 減るとする。 T は $s=s_0$ の時が基準の値であるため、(7-8) 式 の T を (7-9) 式 に置き換える。

$$T_0 + t_0(s-s_0) \quad (7-9)$$

これを考慮した時の $t_w(s)$ は結局 (7-10) 式 のようになる。

$$t_w(s) = \frac{T_0 + t_0(s-s_0)}{u} \left\{ \frac{1}{2} + \left(1 - \frac{s}{n} \right) \left(1 - \frac{s-s_r(s)}{r} \right) \right\} \quad (7-10)$$

あと、5 分間輸送能力 $c(s)$ は、同様にして (7-11) 式 のように求められる (なお、ここでは各時間変数の単位を秒として計算する)。

$$c(s) = \frac{300ur}{T_0 + t_0(s-s_0)} \quad (7-11)$$

なお、このモデルは、ロープレスエレベータだけではなく、ロープ式エレベータにも適用できるものとなっている。

(7-10) 式、(7-11) 式 に基づき、一般階床数 60 のビルを想定し、 $n=10$, $s_0=8$, $r=16$ の条件のもとで解析を行った。この時、ロープレスエレベータの運行周期 T_0 は最も短い場合で 110 秒 (速度が低い場合)、最も長い場合で 130s (速度が高い場合) である。一方、ロープ式エ

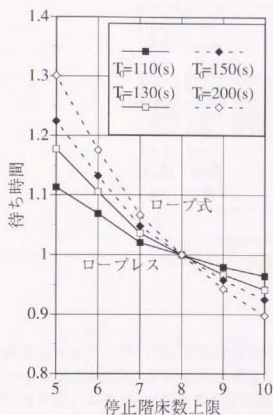


図 7-20：停止階床数上限値と待ち時間の関係 ($s=s_0$ の時を 1)

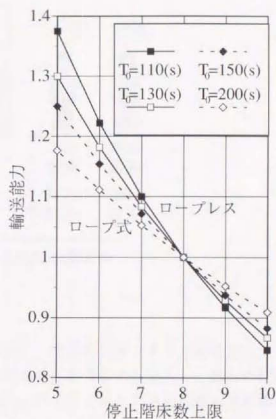


図 7-21：停止階床数上限値と輸送能力の関係 ($s=s_0$ の時を 1)

レベータの運行周期 T_0 は最も短い場合で 150 秒（低層行きの場合）、最も長い場合で 200s（高層行きの場合）である。したがって、この 4 通りの T_0 について計算を行う。

ここで、解析では $s=s_0$ の時を基準とし、 $t_w(s)/t_w(s_0)$ と $c(s)/c(s_0)$ を計算することとした。こうすると、ここでは明確に定義していないユニット数（ロープ式の場合はシャフト数） u を消去することができる。 $t_w(s)/t_w(s_0)$ と $c(s)/c(s_0)$ の計算結果をそれぞれ図 7-20 と図 7-21 に示す。

実際の運行制御では、あるユニットの遅れを取り戻すためだけでなく、輸送能力を一時的に上げる時にも s を小さくしたい。この場合の効果が図 7-21 に示されているが、ロープレスエレベータの方が効果は大きくなる。一方、その代償として待ち時間の増大がある訳だが、図 7-20 から見るとロープレスエレベータの方が待ち時間の増大が抑えられている。

結局、ロープレスエレベータでは、需要に対して輸送能力が不足してきた場合、 s を小さくする制御をロープ式エレベータよりも積極的に導入する動機が大きいことが言えた。ただし、 s はどこまでも小さくできる訳ではない。 s を小さくして運行周期を詰めれば必要なかご数が多くなるが、それに対して十分なかご数がすでに用意されている必要がある。ま

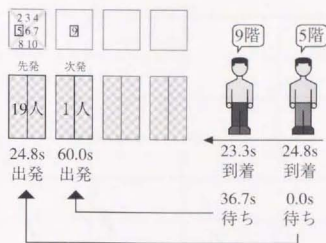


図 7-22：行先階による乗客の選別例

た、乗降用シャフトでのサービス時間が短くなると、回送用シャフトに単位時間あたりにより多くのかごが流入し、かごの処理能力を上回ってしまうこともある。これらの問題が顕著にならないよう、 s は最小でも設計値である s_0 の半分よりも大きい程度に留めるのがよい。

7.7.3 シミュレーションによる検討

次に、実際に乗客を計算機上で発生させるシミュレーションで、前節の効果の検証を行った。ここでは、実際の運行の際に、乗客が溜まったり、待ち時間が長い人が出ないかどうかを確認する意味も兼ねている。まず、このシミュレーションでの前提条件を示す。

1. サービスする1つのゾーンの階床数は10とする。停止階床数上限値8のとき、1階床あたり平均値として1分間に17人の乗客が向かうとして、2.5.1.2節に示したような方法で乗客を発生させる。停止階床数上限値8以外の時は、平均乗車人数を揃えるため、各乗客間の到着間隔に図7-21に示した比率の逆数をかけ、需要を変化させる。
2. 4ユニットを並列して運転し、1ユニット運行周期は停止階床数上限値8の時に T_0 を120秒とする。この時、4ユニット分で平均出発間隔30秒を実現する。4つのユニットは位相差が均等になるように運行されているとする。
3. 定員は20人として満員なら早発する^Aこととする。それ以後のかごは予め位相を均等にするように定められた出発間隔を維持して出発時刻を前にずらす方が望ましい

A. あくまで早くドアを開けて出発しようとするだけであって、上層のロビー階のかごが出発していなければ実際に出発はできないし、先行のかごに追いついて結局到着は同時刻であることも有り得る。

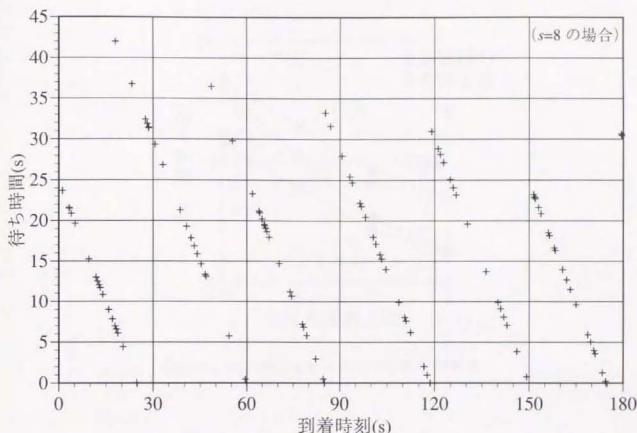


図 7-23: 各乗客の到着時刻と待ち時間

が、ここでは上層でのかごの動きまで考慮しておらず、恒常的に前にずらせる保証が
確実ではないため、出発時刻を守ることにする。

上記の仮定に基づき、5000 人分のデータでシミュレーションを行った。まず、シミュレーションで制御の効果が現れている部分を取り出してきた例を図 7-22 に示す。ここでは、先に来た乗客が停止階床数の上限に達したかごに乗りせず、後続のかごに割り当てられている。結果として、それより後に到着した乗客が先に出発できているという逆転現象が生じている。

図 7-23 に、各乗客の到着時刻と待ち時間の特性の例の一部を示した。斜めの直線上に乗っている乗客は同じかごに乗ったことを示し、その直線と横軸の交点は出発時刻を示している。各かごは 30 の倍数の時刻に出発することになっているが、いくつかのかごは満員のため早発していることが分かる。図 7-23 のような解析により、常に満員近くまで乗り、時々満員が生じる状態でも特に問題なく運行が出来ることが確認できた。

しかし、図 7-23 を詳細に見ると、部分的に問題点が見受けられる。1 番目のかごが図 7-22 のように乗客を断った状態で早発をしているうえ、さらに 2 番目のかごが定時に出発し

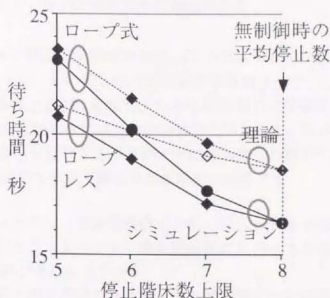


図7-24：停止階床数上限値と待ち時間の関係

ているため、2番目のかごを最初に待っている乗客の待ち時間が長くなってしまっている。これは、本シミュレーションでの満員時とその後の出発時刻の仮定に問題があるのが原因である。出発間隔を守るように出発時刻を前にずらす方がよいが、スケジュールに余裕がない場合には前にずらすことが困難である場合もあるので、運行状況によって出発時刻のずらす量を適切に調整しなくてはならない。一般に、このような問題は多数のシミュレーションによって経験的に定める必要があり、現時点では定量的な検討は難しい。

なお、図7-23では連続して来た乗客が重なって表示されることや、各乗客の行き先階が分からないことから、付録Dに乗客の到着時刻・行き先階・待ち時間の生データを200人分だけ取り出して載せているので、合わせて参照されたい。

次に、停止階床数の上限値を変化させ、停止階床数の上限値が1減るごとに10秒運行周期が縮まるとした場合の、待ち時間の変化を調べたのが図7-24である。比較のため、図7-24では1シャフトの運行周期 T_0 が180秒のロープ式エレベータ6シャフト^Aで行ったシミュレーション結果と、それぞれの条件での(7-10)式から求めた理論値を示した。

結果を見ると、ロープレスエレベータの方が停止階床数の上限値を減らした場合の待ち時間増大が小さいことが分かり、シミュレーションでも理論的解析と同様の結果が得られた。ということは、待ち時間というサービスレベルに最も大きな影響を与える評価量を大きく変えずに、周期を変化させることで輸送能力を変化させられるという見通しを得た。

A. 停止階床数上限値8の時に乗り場単位で見たかごの出発間隔が同じとなるように設定。

理論値とシミュレーションは似た傾向にあるものの、完全に一致しないのは、理論解析に次の2つの現象が含まれていないことに大きな原因がある。

1. 理論解析では、常に乗客を定員の8割としていた。しかし、実際は到着間隔の不均一性から満員が発生し、その際にかごを予定より早発させている。
2. 理論解析では、乗客は最初に乗車できなくても2番目に発車するかごに乗れるとしたため、かごの出発間隔の2倍以上の時間は待たされない。しかし、満員が発生して溢れた乗客は、2番目に発車するかごがすでに他の階への呼びですべて占められていると、かご出発間隔の2倍以上待たされる場面が発生する。

1. は全体的にシミュレーション値を理論値より低く抑える効果を持ち、2. は停止階床数の上限値が小さい場合にシミュレーション値を理論値より高くする効果を持ち、結果的に理論値より図7-24の傾斜が急になっている。

なお、待ち時間では最大値も問題となるが、最大値は確率的な問題であり有意な情報を見出せない。参考のため待ち時間が最も長くなる $s=5$ の時の状況を示すと、ロープレスエレベータでは限界と言われる60秒を超えた乗客は5000人中6人、その最大値は63秒と、許容範囲であるといえる。一方、ロープ式エレベータでは、 $s=5$ の時に60秒を超えた乗客は5000人中27人で、さらに最大値も70秒に達しており、問題がある。

その他、行先階情報の有無の違いによる制御方法やその効果の差異など、運行制御の降下に関する詳細な検討については、本論文に基づいた検討が並行して行われている文献 [45] を参考にされたい。

7.8 まとめ

本章では、まず、70階建てのビルについて、通常のロープ式エレベータ、スカイロビーを用いたロープ式エレベータ、ロープレスエレベータの3通りの設計を行って比較した。ロープレスエレベータは、現状では最も省面積なスカイロビー方式に匹敵し、占有面積の観点からは現状程度の超高層ビルでも適用可能という結論を得た。さらに、各方式の比較を詳細に行った結果、高層ほど提案の3本シャフト式の優位性が増すこと、30階程度では1本シャフトで3個のかごを往復運転させる方が輸送力の観点から有利という結果を得た。

次に、提案の3本シャフト式のみを解析を行った。提案方式は、ロープ式とは異なり、速度が遅い $100 \sim 200\text{m/min}$ の時に輸送力を 600m/min の時の約1割増しにできることを示した。水平方向への移動能力に関しては、移動時間30秒以内なら移動時間の増加分だけ周期が延びることを示したが、移動能力が低いとスケジューリングが難しく、移動時間20秒以上では遅延の収束時に問題を生じることを明らかにした。また、定員に関する議論では、小さい方が停止階が少なく輸送力的に有利だが、定員1人あたりのエレベータ面積の増加により、定員10名程度がよいことを示した（ただし駆動装置の占有面積と定員の関係は



考慮外)。定員を減らす利点は提案方式の方がロープ式よりも大きいことと、定員が少ないと一般階間の需要が多い時に停止階が増えて輸送力が上がらないことも同時に示した。

最後に、運行制御面でのセミデマンド運行をもとにした基本的運行シミュレーションを行った。解析的モデルの検討で、サービスゾーンでの停止階床数の上限値を減らすと、輸送能力の増加率がロープ式エレベータに比べて2倍程度になり、かつ待ち時間の増加率はロープ式エレベータに比べて半分程度になることを示し、運行制御への積極的適用を提言した。シミュレーションでも、サービスゾーンでの停止階床数の上限値を減らしても待ち時間をほぼ一定にできることと、時折満員になるような需要に対しても問題なく輸送が可能であることを示した。



第8章 結論

8.1 本論文の成果

本論文では、ロープレスエレベータの導入可能性を明確にすることが望まれている中で、ロープレスエレベータを用いた新しい鉛直輸送システムの提案と構築方法、そしてその輸送性能に関してこれまで各章で議論を行って来た。その内容をまず章別にまとめる。

第1章：序論

研究の背景と目的となる部分について述べたこの章では、ビルの高層化とエレベータシステムの現状をまとめ、今後さらなる高層をしようとするとエレベータの輸送能力の点からビルの実現自体に問題が生じることを示した。これを打開するためのロープレスエレベータシステムの構想をまとめ、これまでの構想のように単にロープ式エレベータをロープレスエレベータに変えただけでは検討が不十分であることを指摘した。

第2章：エレベータの検討に必要な基礎的概念

ハードウェア性能、交通需要、乗客案内や、性能評価など、解析の際のロープ式・ロープレスに共通する概念を述べたこの章では、まず1.2階床差程度の近接階を階段等で移動する乗客の効果を考慮した上で、各階方向別の乗降人数データから運行計画や制御に必要な需要OD (Origin-Destination) そのものを推定する方法を提案した。さらに、輸送能力評価に必要なサービスゾーン内でのかごの停止階床数の平均値を、これまで一般的には考慮されていなかった一般階相互間の需要も含めた形でODから求める式として導出し、評価の精度を高めた。

第3章：ロープレスエレベータ固有のシステム条件

ロープレス特有の機能に依存する解析上の前提を扱ったこの章では、まず自走式のかごに必要な推力特性から加減速度は常に乗り心地の限界まで出せるとみなしてよいことを示した。また、ロープレスエレベータには追突防止の信号システムが不可欠であるが、この鉄道信号との相違点をまとめ、閉塞長を1階床分以下にすれば閉塞長や先行かごの速度情報の有無に関わらず、かごの運行間隔をほとんど最小値にできることを示した。さらに、信号システムのもとでは、輸送力を上げるためには鉄道のようにスケジュールに従う運行がよいことを示し、スケジュール運行を取り入れた上で従来のエレベータと同様のデマンド運行の要素を加えたセミデマンド運行の概念を提唱した。

第4章：ロープレスエレベータを利用した鉛直輸送システムの設計

この章ではまず、高層化による輸送力減少のない方式として、1つのシャフトに複数のかごを運転し、横にも動ける機能を有効利用した3本シャフト1ユニット方式を提唱し、エレベータシステムが最大の能力発揮を求められる、上下方向の需要が著しく不均衡であ



るピーク時の需要に対する輸送能力を高める方法を発案した。また、シャフトと乗場の床面積を削減して既存の超高層ビル程度でも提案方式が有利に適用できる方法と、複数ユニットの並列運転の際にドアを直線的に並べる本方式に適した新しい平面的配置方法も提唱した。さらに、提案のロープレスエレベータとロープ式エレベータのそれぞれの長所と短所を考慮して、各方式間の役割分担の重要性を示し、特にローカルな需要の多い所ではメインの輸送用と補助的なローカル用のものに分けるべきことをその具体的方法とともに示した。

第5章：ロープレスエレベータの運行計画

第6章のセミデマンド運行の要素の一つで、第4章の設備設計でも必要な運行スケジューリングを扱ったこの章では、ビル内では地上とビルの各階の間の需要が最も支配的であることから、通勤鉄道の地域分離型輸送方式が最適なことを明示し、地域分離型輸送を利用した運行スケジューリングを提案して、ロープ式エレベータに比べて高速性をあまり犠牲にせず占有面積あたりの輸送能力を約2倍に向上させた。また、到着ロビー階が変わっても差し支えない下り輸送だけに有効な効率的運行方法を提案し、上りよりさらに運行密度を高めることを可能にした。最後に、3本シャフト1ユニット方式の高い輸送能力を維持するための回送かごのスケジューリングの求め方を確立した。

第6章：ロープレスエレベータの運行制御

第3章で述べたセミデマンド運行を詳しく扱ったこの章では、最初に従来のエレベータ群管理制御をベースとする制御の役割と本研究のスケジューリングとの相互関係を定義して、セミデマンド運行のあるべき具体的制御方法を示した。次に、スケジューリング部での制御として、従来方式とは全く異なる上り用ユニットと下り用ユニットとの最適ユニット数の配分や切り替え方法を新たに提唱した。また、サービスゾーンを変更したり回送かごの順序を変更するとともに、複数ユニット間の運行位相も調整することにより各かごの負荷を均一化させたり、スケジュールが乱れた場合の運行の円滑化を可能とした。さらに、運行位相の調整方法も提案し、複数ユニット間の負荷を均一化して運行の乱れ防止を可能とした。最後に、ロープレスエレベータ向けの群管理制御方法を提唱して各乗客の待ち時間の増大を防ぎながらスケジュールからの遅延も防ぐことを可能としたうえ、上り方向の輸送では個別の行先情報取得と案内が重要であることも示した。

第7章：提案したシステムの定量的な有効性分析

第4, 5, 6章の議論で提案したロープレスエレベータの設備面や運行面での評価を行ったこの章には、本論文の定量的成果が集中している。まず、70階建てのビルを例とし、通常のロープ式エレベータ、スカイロビーを用いたロープ式エレベータ、ロープレスエレベータの3通りについて、それぞれに最適と思われる設計を行って比較した。ロープレスエレベータは、現状では最も省面積になるスカイロビー方式に匹敵し、占有面積の観点からは現状程度の超高層ビルにも適用可能という結論を得た。さらに、各方式の比較を詳細に行った結果、高層ほど提案した3本シャフト1ユニット方式の優位性が増すこと、30階程度では1本シャフトで3個のかごを往復運転させる方が輸送力的に有利という結果を得た。

次に、提案の3本シャフト1ユニット方式のみの解析を行った。提案方式は、ロープ式とは異なり、速度が遅い100～200m/minの時に輸送力を600m/minの時の約1割増しにできることを示した。水平方向への移動能力に関しては、シャフト間の移動時間30秒以内なら移動時間の増加分だけ周期が延びることを示したが、移動能力が低いとスケジューリングが難しくなり、移動時間20秒以上では遅延の収束時に問題が生じることを明らかにした。また、定員に関する議論では、小さい方が停止階が少なくて輸送力的に有利だが、定員1人あたりのエレベータ面積は定員が少ない方が増加するため、定員10名程度がよいことを示した（ただし駆動装置の占有面積と定員の関係は考慮外）。定員を減らす利点は提案方式の方がロープ式よりも本質的に大きいことと、定員が少ないと一般階相互間の需要が多い時に停止階数が増えて輸送力が上がらないことも同時に示した。

最後に、運行制御面でのセミデマンド運行をもとにした基本的運行シミュレーションを行った。解析的モデルの検討で、サービスゾーンでの停止階床数の上限値を減らすことによる輸送能力の増加率がロープ式エレベータに比べて2倍程度になり、かつ待ち時間の増加率はロープ式エレベータに比べて半分程度になることを示し、運行制御をより積極的に適用すべきことを示した。シミュレーションでも、サービスゾーンでの停止階床数の上限値を減らしても待ち時間をほぼ一定にできることと、時折満員になるような需要に対しても問題なく輸送が可能であることを示した。

全体として、ロープレスエレベータの利点を活かすことに着目して本論文で提案した鉛直輸送システムは、輸送能力的に既存の程度の超高層ビルにも十分適用できることを示すことができた。ロープレスエレベータの合理的システム設計とロープレスエレベータ自体の導入可能性の是非を議論する上で、本論文はロープレスエレベータの潜在能力の大きさを定量的に提示したことでその礎となる部分を築き、今後の積極的な議論を促す肯定的な結果を得たと言える。

8.2 今後の課題

ロープレスエレベータはまだ検討が始まった段階で、具体的なハードウェアの実物がないため、本論文ではコストの議論を含めることができなかった。実際のビルに適用されるためには、本論文での検討に加えて次の3つの事項を総合的に検討し、ロープレスエレベータの導入可能性を評価することが必要である。

1. ハードウェア自体の初期導入コスト、電力料金やメンテナンス費用などのランニングコスト
2. ビルの大きさ一定の条件のもとでの、エレベータ占有床面積の減少によるビルの有効床面積の増加分のレンタル料から入るビル自体の収入増
3. 有効床面積一定の条件のもとでの、ビルの大きさの削減に伴う建設費用減

なお、1. に関しては、ロープレスエレベータが完全に不利であると考えられがちであるが、シャフトだけ用意しておいてかごを後から追加することも容易であるため、必要な時に必要なだけかごに投資すればよいという利点も見逃せない。

もう一つの残された課題は、主に運行制御面である。実際のエレベータの運行制御の場面では、会議が終わって大量の乗客が一気に殺到したり、もっと大きな問題として悪意を持つ乗客がかごを止めるなど、様々な外乱がある。本論文では、これらを無視して理想的議論に終始してきたが、これらの現実に関わり得る大きな外乱に対して適切な運行が可能かどうかの判断は、過去の実際の運用の中での実績やビルが建設される国の風土、都市の事情に基づく総合的な検討を必要とするが、工学的に定量化が難しい要素も多く、大学レベルの基礎研究段階では困難な面も多い。

しかし、ロープレスエレベータの導入可能性が公に認められれば、エレベータメーカーを中心とした多数のエンジニアがロープレスエレベータの問題に取り組み、多くの問題が将来的に解決されていくことが期待される。今後のハードウェア開発も含めたロープレスエレベータ技術のさらなる発展を期待したい。



謝辞

本論文を完成させるにあたり、本当に沢山の方々にお世話になりました。ともすればタダのマニアックな机上の空論となりがちなこの研究にお付き合下さったことに對し、ここで感謝の意を示さなくてはならないと思います。

まず、研究に対する高度な御見識と豊富な御経験に裏付けられた的確な御指導により、研究を常に正しい方向に導いて下さった、指導教官の曾根 悟 教授 に心よりお礼申し上げます。曾根先生からは、研究内容だけではなく研究に対する確固たる思想をも自分なりに学ぶことができ、今後の研究者としての活動のために必要不可欠なものを得た気が致します。次に、自分のお時間を犠牲にしてまで親身になって常に懇切丁寧な御指導を下された古閑 隆章 助教授 にもお礼申し上げます。はなりません。その熱心に御指導されるお姿から、研究者にとって研究指導も養うべき大切な能力であることを学ばされたように思います。また、1997 年度まで研究生生活のあらゆる面で御指導・御助言を頂いた 笠井 啓一 元助手（現 東海大）にもお礼申し上げます。

エレベータのメーカーサイドから有益な御意見や貴重な資料・データを頂いた、1997 年度まで設置されていた交通システム工学（JR 東海）寄付講座の高岡 征 元客員教授（日立製作所）、芦谷 正裕 元客員教授（三菱電機）、三菱電機の 駒谷 喜代俊 氏、ならびにその関係者の皆様方にお礼申し上げます。さらに、上記寄付講座の T. R. Eastham, J. F. Gieras, C. J. Goodman, R. A. Smith 各元客員教授、また、御氏名は省略するが各客員研究員の方々には、研究だけではなく英語や海外の話題なども教わったことに感謝致します。同寄付講座の水間 毅 元客員助教授（運輸省交通安全公害研究所）には、幅広い御見識から貴重な御指導を頂いたことにお礼申し上げます。そして、同寄付講座の高木 亮 元助手（現 東京電力）には、研究面はもちろんのこと、計算機環境の整備でも大変お世話になったことにお礼申し上げます。

在学中には、電気学会のいくつかの委員会活動に参加させて頂きましたが、中でも色々な方々に研究面での御意見や資料の御提供を頂きました。構造物関連縦型リニアドライブ協同研究委員会・リニアドライブ業際応用協同研究委員会（委員長：共に 現 東京理科大 正田 英介 教授）、ソフットの手法による旅行時間短縮技術調査専門委員会（委員長：古閑 隆章 助教授）の各委員の方々にもお礼申し上げます。特に、日立製作所の 中里 真朗 氏 にはお世話になりました。

曾根・古閑研究室の中では、まず、筆者とともに難しい(?) ロープレスエレベータの研究に取り組んでくれた 1997 年度卒論生の 吉村 裕 君と 1998 年度卒論生の 高橋 拓二 君に感謝したいと思います。その他にも、マニア（鉄道に限らない）あり、お調子者あり、寝惚あり……と、十人十色のキャラクターがそれぞれ印象的だった、大学院生や卒論生の諸君にも研究生生活の色々な場面でお世話になりました。また、事務手続等でお世話になった元事務補佐員の 小川 靖子 さん・金本 美津子 さん・片岡 紀枝 さん・藤森 紫保子 さん、現事務補佐員の 朝倉 香織 さん・池田 恵子 さんにもお礼申し上げます。さらに、様々な会社・国などのバックグラウンドを持った研究員や研究生の方々には、それらのバックグラウンドに応じて様々なことを教わったことに感謝致します。なお、お世話になった方が多すぎて、個人名を全員出せなかったことをお詫び致します。

最後に、この研究は文部省科学研究費補助金（特別研究員奨励費）に支えられて来たこと、筆者自身も日本学術振興会特別研究員として研究奨励費に支えられて来たこと、そして博士課程での研究は何よりも両親をはじめ家族の理解に支えられて来たことを記して、謝辞と致します。

1998 年 12 月 18 日

宮武昌史



参考文献

- [1] 東京大学工学部交通工学研究共同体：「東京の交通問題」技報堂出版(1993)
- [2] 腰塚：「コンパクトな都市とは何か」日本オペレーションズリサーチ学会 1993 年度秋期発表会アブストラクト集, pp.142-143 (1993)
- [3] 運輸省運輸政策局情報管理部：「運輸関係エネルギー要覧」(1995)
- [4] 野村・棚橋：「VVVF エレベータの最近の動向」三菱電機技報, Vol.61, No.11 (1987)
- [5] J. W. Fortune : "Mega-high-rise Elevatoring" *Elevator World*, Vol.45, No.12, pp.128-135 (1997)
- [6] 「ロープレスエレベータへのリニアモータの応用に関する研究」電気学会 縦型リニアドライブ協同研究委員会(1993)
- [7] 棚橋 他：「横浜ランドマークタワー向け速度 750m/min エレベーターの振動・騒音対策と電気システム」, 三菱電機技報, Vol.67, No.10, pp.939-943 (1993)
- [8] 山崎 他：「横浜ランドマークタワー向け速度 750m/min エレベーターの安全装置」, 三菱電機技報, Vol.67, No.10, pp.944-948 (1993)
- [9] 大島 他：「最近のエレベータ技術」明電時報, No.4, pp.42-49 (1998)
- [10] 坂井 他：「個性化知能群管理エレベーターシステムの開発」, 日立評論, Vol.71, No.5 pp.469-476 (1989)
- [11] 久保 他：「ファジィニューラルネット応用エレベーター群管理システム」, 東芝レビュー, Vol.49, No.9, pp.627-630 (1994)
- [12] 氏原 他：「最新のエレベーター群管理」, 三菱電機技報, Vol.67, No.10, pp.949-953 (1993)
- [13] Albert T.P. So and S.K. Liu : "An Overall Review of Advanced Elevator Technologies" *Elevator World*, Vol.44, No.6, pp.96-101 (1996)
- [14] J. W. Fortune : "Top/Down Lift Design", *Elevator World*, Vol.38, No.7, pp.30-33 (1990)
- [15] 浅川、石嶋：「ダブルデッキエレベータ」三菱電機技報, Vol.46, No.12, pp.1376-1380 (1972)
- [16] J. W. Fortune : "Revolutionary Lift Design for Mega-high-rise Buildings", *Elevator World*, Vol.46, No.5, pp.66-69 (1998)
- [17] 海老原、正田：「ロープレスエレベータは可能か」電気学会誌, Vol.115, No.7, pp.420-423 (1995)
- [18] 喜多村 他：「ロープレスエレベータ構想」平成 5 年電気学会全国大会講演論文集 7, No.S12-5, pp.(S.12-11)-(S.12-14) (1993)
- [19] Toshiaki Ishii : "Elevators for Skyscrapers" *IEEE Spectrum* September pp.42-46 (1994)

- [20] H. Kamaike, T. Ishii, E. Watanabe and Y. Matsukura : "A Ropeless Linear Drive Elevator" *Elevator World*, Vol.39, No.3, pp.42-43 (1991)
- [21] 中里 他 : 「ロープレスエレベータへのリニアモータ適用の検討」平成5年電気学会全国大会講演論文集7, No.S12-5, pp.(S.12-15)-(S.12-18) (1993)
- [22] 財団法人 エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター : 「リニアモータによる垂直輸送システム実証研究」ENAA GEC 1992-DP1 (1992)
- [23] E. A. Marburger : "The Transrapid - a Futuristic Technology about to become a Part of Today's Transport System" *MAGLEV'98*, pp.2-7 (1998)
- [24] H. Soejima and K. Isoura : "Development of the Maglev System in Japan : Past, Present and Future --" *MAGLEV'98*, pp.8-11 (1998)
- [25] 平尾 他 : 「浮上式鉄道における列車制御と給電区分開閉器制御」電気学会 交通・電気鉄道研究会資料, TER-92-34, pp.21-30 (1992)
- [26] 古閑 他 : 「ロープレス鉛直輸送システムとその分岐装置のための二次元リニア同期モータの横方向駆動動作特性」電気学会交通電気鉄道・リニアドライブ合同研究会資料, TER-97-18 and LD-97-56, pp.7-12 (1997)
- [27] 藤野 他 : 「循環型エレベータによるビル内大量輸送システムの基礎検討」電気学会論文誌D, Vol.117-D, No.7, pp.815-822 (1997)
- [28] 湯村 他 : 「ロープ式マルチカーエレベータのコンセプトと設備効率」日本機械学会 [No.96-55] 講演会講演論文集 [昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩], pp.1-4 (1997)
- [29] 岩田 他 : 「ニューラルネットワークによるエレベータ交通流の検出」計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.3, pp.209-215 (1997)
- [30] 土木学会編 「第4版 土木工学ハンドブック II」技報堂出版
- [31] 弓仲 他 : 「エレベータ・システムの計画と評価」日立評論 Vol.54, No.12, pp.85-92 (1972)
- [32] "How interesting can an elevator be?" <http://www.schindler.com/story/revolution.htm>
- [33] 稲葉 : 「エレベータの知的制御」エレベータ界, 1994年7月号, pp.15-19 (1994)
- [34] 高木、原口、曾根 : 「公共交通利用個別支援システム IPASS」電気学会 交通・電気鉄道研究会資料, TER-97-50, pp.49-52 (1997)
- [35] 原口 竜也 : 「公共交通利用支援システム IPASS における乗客のリアルタイム個別案内手法」1998年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻 修士論文 (1998)
- [36] J.W. Fortune : "Mega High-Rise Elevators" *Elevator World*, Vol.43, No.7, pp.63-69 (1995)
- [37] 日本エレベータ協会 : 「昇降機計画指針」(1992)
- [38] 新保 他 : 「平常時におけるエレベータ交通のシミュレーションとその応用」三菱電機技報, Vol.44, No.8, pp.985-1004 (1970)
- [39] 林 他 : 「エレベータ待ち客の感覚待時間解析によるイライラ関数の同定」昭和55年電気学会全国大会講演論文集, No.1298, pp.1700-1701 (1980)



- [40] R. D. Peters : "Green Lifts" *Elevator World*, Vol.46, No.11, pp.96-102 (1998)
- [41] 市川, 飛田, 藤野, 米田 : 「遺伝的アルゴリズムによるエレベータ配置計画」, 平成 6 年電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集, No.171, pp.701-704 (1994)
- [42] 小川 浩 : 「混雑緩和を目指した都市近郊型路線ダイヤの合理的作成法」 1994 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士論文 (1994)
- [43] 小川 他 : 「バイナリダイヤを利用した列車ダイヤの合理的作成法」 平成 6 年電気学会全国大会, No.762 (1994)
- [44] 吉村 裕 : 「下り方向の需要特性を利用したロープレスエレベータの運行制御」 1998 年東京大学工学部電気工学科卒業論文 (1998)
- [45] 高橋 拓二 : 「ロープレスエレベータの運行制御」 1999 年 東京大学工学部電気工学科卒業論文 (1999; 予定)



発表論文

1. 宮武、秋澤、茅：「運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造の評価」電気学会論文誌 B, Vol.115, No.6, pp.617-623 (1995.6)
2. 古閑、宮武、曾根：「リニア同期モータを用いた鉛直輸送システムの開発と複数かご協調運転の研究」東京大学工学部・工学系研究科紀要 A-33 (1995.12)
3. 宮武、古閑、曾根：「ロープレスエレベータの運行特性評価」日本AEM学会誌, Vol.5, No.3, pp.49-55 (1997.9)
4. 宮武、古閑、曾根：「ロープレスエレベータシステムの提案とその有効性評価」電気学会論文誌D (1998.12 現在 投稿中)
5. 宮武、古閑、曾根：「ロープレスエレベータにおけるセミデマンド運行制御」電気学会論文誌D (1998.3 投稿予定)
6. M. MIYATAKE, N. ISHIKAWA, T. KOSEKI, and S. SONE : "Experimental and Operational Study on Vertical Transportation System Driven by a Linear Synchronous Motor Using Permanent Magnet" *Linear Drives for Industry Applications (LDIA' 95)*, pp.73-76 (1995.6)
7. M. MIYATAKE, T. KOSEKI, and S. SONE : "Rational Scheduling for High Density Transport in Ropeless Lift Systems Using Multiple Cars with Transferability between Shafts" *Computers in Railways V, Vol.2 : Railway Technology and Environment, (COMPRAIL' 96)*, pp.375-384 (1996.8)
8. M. MIYATAKE, T. KOSEKI, and S. SONE : "Ropeless Elevator System and Its Operating Techniques" *The 3rd Seoul National University - The University of Tokyo Joint Seminar on Electrical Engineering*, pp.46-49 (1998.1)
9. M. MIYATAKE, T. KOSEKI, and S. SONE : "Design and Traffic Control of Multiple Cars for an Elevator System Driven by Linear Synchronous Motors" *Linear Drives for Industry Applications (LDIA' 98)*, No. AP-22, pp.94-97 (1998.4)
10. T. KOSEKI, K. YAKUSHI, M. MIYATAKE and S. SONE : "Evaluation of Three Dimensional Force of a Test Machine of a Two-dimensional Linear Synchronous Motor" *Japanese Roumanian Joint Seminar on Applied Electromagnetics and Mechanics (JRJSAM'98)*, Kiryu (1998.11)
11. 宮武、古閑、石川、曾根：「リニア同期モータを用いた自走式垂直輸送システムの基礎検討」電気学会 リニアドライブ研究会資料, LD-95-11, pp.77-86, 伊勢 (1995.2)

12. 宮武、古閑、曾根：「自走式鉛直輸送システムの実時間スケジューリング」電気学会システム・制御研究会資料，SC-95-30，pp.51-60，新潟（1995.10）
13. 古閑、宮武、曾根：「ロープレス鉛直輸送システムとその分岐装置のための二次元リニア同期モータの横方向駆動動作特性」電気学会 交通電気鉄道・リニアドライブ合同研究会資料，TER-97-18 or LD-97-56，pp.7-12，（1997.8）
14. 古閑、宮武、富井、大野：「ソフトの手法による旅行時間短縮技術調査専門委員会活動報告」電気学会 交通・電気鉄道研究会資料，TER-98-56（1998.12）
15. 宮武、古閑、曾根：「輸送効率向上のための自走式鉛直輸送システムの運用法」鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL'95）講演論文集，No.123，pp.439-442（1995.12）
16. 宮武、古閑、曾根：「ロープレスエレベータの運行特性評価」第8回 電磁気関連のダイナミクス シンポジウム，No.B5，pp.167-170（1996.5）
17. 宮武、古閑、曾根：「ロープレスエレベータの運行スケジューリングとシステム評価」鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL'96）講演論文集，No.2C-11，pp.243-246（1996.7）
18. 宮武、高橋、古閑、曾根：「スケジュール的要素を取り入れたロープレスエレベータのセミデマンド運行制御」鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL'98）（1998.11）
19. 古閑、日下部、宮武、曾根：「車両群のセミデマンド運行と必要となる技術要素」鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL'98）（1998.11）
20. 宮武、秋澤、茅：「運輸エネルギー消費を最小化する最適都市構造」平成6年電気学会全国大会 講演論文集 [12]，No.1650，pp.173-174（1994.3）
21. 宮武、石川、古閑、曾根：「複数かごの協調運転による自走式垂直輸送システムの総合的検討」平成6年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集，No.195，pp.831-834（1994.8）
22. 宮武、古閑、曾根：「自走式垂直輸送システムの複数かご協調運行に関する基礎検討」平成7年電気学会全国大会講演論文集 [4]，No.909，pp.379-380（1995.3）
23. 宮武、古閑、曾根：「自走式鉛直輸送システムの合理的運用法」平成7年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 II，No.192，pp.247-250（1995.8）
24. 宮武、古閑、曾根：「回送かごの処理を考慮したロープレスエレベータ運行スケジューリング」平成8年電気学会全国大会 講演論文集 [4]，No.965，pp.388-389（1996.3）
25. 宮武、笠井、古閑、曾根：「ロープレスエレベータを用いた新しい鉛直輸送システム」平成9年電気学会全国大会 講演論文集 [4]，No.1049，pp.442-443（1997.3）
26. 宮武、古閑、曾根：「ロープレスエレベータの効率配置計画法」平成9年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 III，No.187，pp.281-284（1997.8）

27. 古関、日下部、宮武、曾根：「二次元リニア同期モータの推力増加と横方向ディテン
ト力の低減法」平成 9 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 III, No.220, pp.411-
414 (1997.8)
28. 宮武、古関、曾根：「ロープレスエレベータにおける設備・運行計画の柔軟性」平成
10 年 電気学会全国大会 講演論文集 [4], No.934, pp.369-370 (1998.3)
29. 吉村、宮武、古関、曾根：「ロープレスエレベータにおける下り運行時に適した運行
方法」平成 10 年 電気学会全国大会 講演論文集 [4], No.935, pp.371-372 (1998.3)
30. 宮武、古関、曾根：「ロープレスエレベータの信号システムに関する考察」平成 10
年 電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集 III, No.252, pp.229-232, 秋田 (1998.8)
31. 古関、薬師、宮武、曾根：「二次元リニア同期モータの試験機と準三次元解析を用い
た三次元力の評価」平成 10 年 電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集 I, No.102,
pp.345-348, 秋田 (1998.8)
32. 宮武、古関、曾根：「現状程度の超高層ビルへのロープレスエレベータの適用性評価」
平成 11 年 電気学会全国大会 (1999.1 投稿予定)
33. 高橋、宮武、古関、曾根：「ロープレスエレベータの群管理制御について」平成 11
年 電気学会全国大会 (1999.1 投稿予定)
34. 村井、古関、宮武 他 10 名：「MAGLEV'98 第 15 回磁気浮上システム国際会議」
Japan Railway Engineers' Association (JREA), Vol.41, No.11, pp.27-31 (1998.11)



付録 A 緩行と急行のシャフトを分離した運行方式

ここでは、ロープレスエレベータにおける一つの設備形態として、緩行と急行のシャフトを分離した運行方式について説明する。この方式は一般的に考え付きやすいものではあるが、図 4-1 のようなハード構成を取る場合は有効ではないという結論を得たため、本論文では結果的に中心的なものとして扱わなかったものである。

設備面の考察

鉄道では、通過列車が多くて輸送密度の高い線区向けに、図 a のように駅部分に本線から分かれた待避線上にホームのある、オフライン駅という形態がある。さらにこれを発展させ、オフライン駅どうしをつなぐと、急行線と緩行線を分けた形になる。エレベータでも、これらの適用を考えることは容易にできる。

エレベータでは階間の長さがかご長よりも短いため、オフライン駅的な構成であっても待避線が連続するため、図 b のように事実上急行シャフトと緩行シャフトに分けるのに等しい。したがって、ここでは図 b のような自由に追い越しのできるモデル構成のみを考え、これ以降では「緩急線分離方式」と呼ぶことにする。

上下方向で均衡な需要をさばくためには、緩行・急行のシャフトを 2 本ずつ組み合わせた 4 本シャフトで 1 ユニットの構成することになる。一方、前述の 3 本シャフト式と同様



図 a: 鉄道におけるオフライン駅

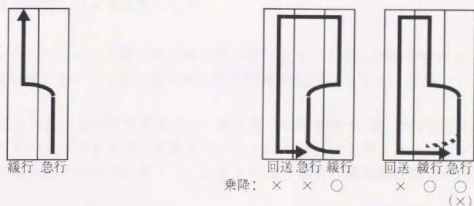


図 b: 緩行と急行の分離

図 c: 3 本ユニットでの運行例

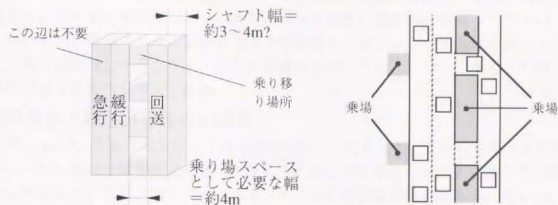


図 d: 緩行シャフトと回送シャフト間に設けた乗り場スペース

に、偏った需要をさばくための片方向のサービスを行うユニットを考えると、シャフトは緩行・急行・回送の3本のシャフトをユニットとして使用することになる。以下では、3本のシャフトを用いる場合を例にとって説明する。上下ともサービスをしたい場合は、回送用シャフトを緩行・急行のシャフトの組に置き換えて考えればよい。

本論文での「両端のシャフトにいくかにしか乗降できない」という条件を守ってユニットを構成すると、かごは図 c の左のような無駄な動きをする。特に、下層をサービスするかごは、輸送密度の高い急行シャフトの下層部を頻繁に横行するため、輸送能力が下がる。したがって、図 c 左の本線と待避線を入れ替えるのが望ましく、そのためには中央のシャフトでも乗降ができるハード構成が必要になる。

かごの両面にリニアモーターを配置する方式で実現するには図 d のようなハード構成が最も簡単である。これ以外で真中のシャフトにアクセスする構造は、リニアモーターの一次側を一時的に収納するなどの大掛かりな機械的な機構が必要となるため、ここでは考えない。

乗り場として必要なスペースは、標準的には乗り場1ヶ所あたり約4mとされている。したがって、約4本分のシャフトスペースが必要で、その4本のスペースの中に大部分の乗り場が入り込む形になる。

さらに、次の2点を考慮しなくてはならない。

1. 緩行シャフトと回送シャフト間の乗り移り階は急行シャフト側に乗り場を設ける
2. 最上の乗り移り階とその1つ下の乗り移り階との間に急行シャフトは不要

これら2つの効果は相反的な効果であるので、乗り移り場所が最大10カ所程度であれば、1ユニットあたりのシャフト4本分を超えないことになる。従来の3本シャフト式だと乗り場を含めて5本分のスペースを食うことを考えれば、さらに緩急線分離方式の優位性が増す。

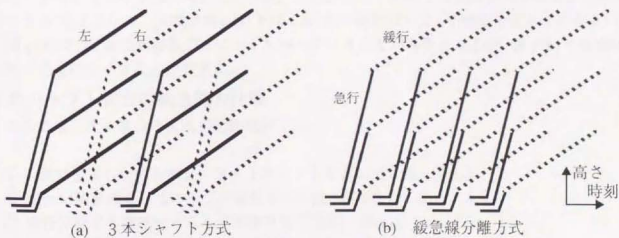
しかし、緩急線分離方式の場合、1つの乗り場には従来方式よりも高い頻度でかが到着する。これまで乗降用シャフトが2本だったのを、実質的に待避シャフトの1本だけにしたために、最低でもかが到着頻度は2倍になるので、ユニット数は半分になり、結果として乗り場面積は半分となる。同じ乗客数をさばくなら、ドア一つあたりの乗り場面積を多めにする必要性も考えられる。

運行形態と輸送力を決める要因

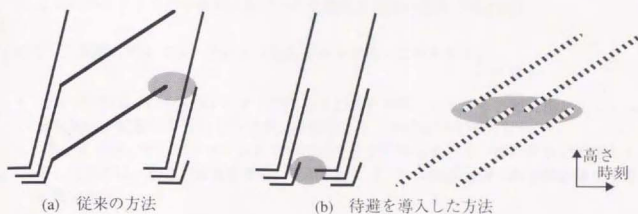
図e(a)のような3本シャフト式の運行パターンに対して、ここで考えた方法の運行スケジュールは地域分離型輸送のローカルサービス部分を緩行シャフトに移した、図e(b)のような形である。なお、図eでは回送用シャフトの運行は省略してある。図e(b)の特徴は、次の通りである。

1. 実質的に緩行シャフト1本で全ての乗降を行っている。
2. 急行シャフトは上層ほど空いているが、緩行シャフトはどの位置でも同じかご密度である。
3. ゾーン境界で隣接2つのサービスゾーンのかかが干渉しあう可能性がある。
4. 輸送力を決める要因がこれまでと違う。
5. ドア数は少なくてよく、乗り場の数や面積を減らせる。
6. 急行シャフトの上層部は削ることが可能。

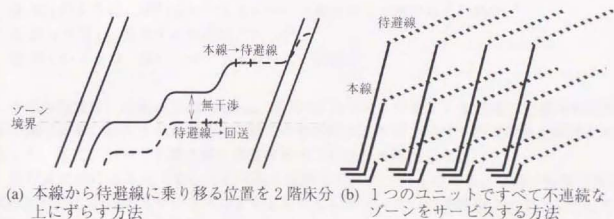
2.で、図eの2つの場合では、輸送力を決める要因が異なっているとしたが、周期を詰められない要因となるクリティカルな場所を示したのが図fである。図f(b)の左側の制約は無くせないが、右側の制約は図gのように軽減することが可能である。



図e: 運行スケジュール



図f: 輸送上制約となる場所



図g: 緩行シャフトにおける干渉を軽減する方法

図g(a)では、急行シャフトから緩行シャフトに乗り移る位置を2階床分変えることで、緩行シャフト上での干渉を防いでいるが、急行シャフトのかごの処理能力が落ちるのが欠点となる。したがって、実際は図g(a)と図e(b)の中間を取って、1階床分ずらすのがよい。

図g(b)では、比較的多数のユニットを持っていることが条件となるが、図f(b)の右側の制約は完全になくすることができる。

3本シャフト式との輸送能力比較

ここでは、次の5つの方式を比較検討する。

- ① 4章で提案したの3本シャフト1ユニット方式（追い越しなし）
- ② ゾーン境界ですべてのかごが横行する方法（図e(b)）
- ③ 横行位置を2階床分ずらして干渉を防ぐ方法（図g(a)）
- ④ 横行位置を1階床分ずらして干渉を防ぐ方法（図g(a)の変形）

⑤ 1つのユニットでサービスするゾーンを連続させない方法 (図g (b))

ただし、比較に際しては、次のような前提条件を置くこととする。

- ②～⑤では、すべてのシャフトが同じかご数をさばくことから、回送用シャフトの容量制約が問題になりにくいので、回送用シャフトの運行は考えない。
- ②～④では、サービスゾーン内で実際に停止する階によって干渉の度合いが変化する。ここでは、最悪の場面を考え、干渉を起こすゾーン境界付近に停止階が集中すると仮定する。

各方式において、時隔を決定する最もクリティカルな場所は次の通りである。

- ② 図hのように、緩行シャフト上のゾーン境界部分
- ③ 図iのように、緩行シャフト上のゾーン境界から2階床分上の部分
- ④ 図hか図iに相当する部分のどちらか
- ⑤ 図jのように、急行シャフト上のロビー階部分

各図の数値は、定格速度 200m/min、定員 20 名で走らせることを想定した際の各部の所要時間である。定員 5 名の場合は各階での停止時間を 5 秒、ロビー階での停止時間を 8 秒とした。また、シャフト間の横行時間はすべて共通に 5 秒とした。

各方式における実現可能な運行周期を比較したのが、表 a である。なお、提案方式は、実際に作成した運行スケジュールをもとにしたもので、2つの乗降用シャフトで同じサービスをするとして周期を半分になっている。



図h: ゾーン境界でのかご間の干渉

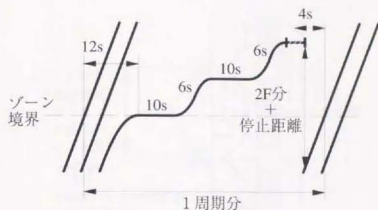
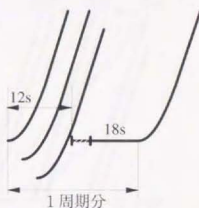
図 i: 待避シャフトへの移動位置を 2 階床分ずらした
場合のかご間の干渉

図 j: ロビー階でのかご間の干渉

表 a: 提案方式と各緩急線分離方式の比較結果

	定員 20 名	定員 5 名
① 提案方式	58 s	35 s
② 緩急線分離方式	55 s	40 s
③ 緩急線分離方式	53 s	43 s
④ 緩急線分離方式	39 s	30 s
⑤ 緩急線分離方式	35 s	25 s

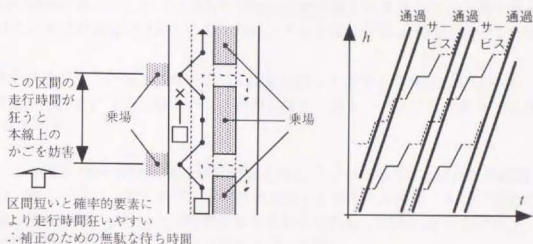
表 a から、④か⑤でなければ、実質的に緩急線分離方式の効果がなくことが分かった一方で、④か⑤ならば輸送力的には十分な効果があることも分かった。

ハード的構造からくる運行の硬直化の問題

もし、図 d のような方式を取り、サービス中のかごが本線側の乗り場まできちんとサービスしようとする、図 k のように運行する。したがって緩行シャフト内のかごが頻繁に急行シャフトの運行に影響を及ぼす。

サービスゾーンを自由に変えるような柔軟な輸送を実現しようとする、回送用シャフトへの乗り移り階は多くする必要があるが、この場合、図 k に書いたようにサービスゾーン内での走行時間の制約が多くなり、セミデマンド運行時のような確率的要素が入ると運行が難しい。これを防ごうとすると、本線側の乗り場には止まれない。つまり、次のいずれかの現象を防ぐことができず、3 本シャフト式のような柔軟な輸送体系はとれない。

1. 回送用シャフトへの乗り移り場所が限定されていることによる輸送の硬直化
2. サービスゾーン内走行時間の制約増加による輸送の硬直化
3. 回送用シャフトへの乗り移り階でのサービス不能による輸送の硬直化



図k: 乗り移り階部分のかごの移動による輸送的制約

現実的には、ゾーン境界を2パターン用意し、3ゾーン分で乗り移り階6カ所、それに加えてロビー階3カ所を加え、乗り移り階は大体10カ所分が限界であろう。

②～④のようにサービスゾーンが連続する場合、サービスゾーンにおけるサービス開始・終了時刻の制約も大きい。すなわち、図1のように、上下ゾーンのスケジュールが決まれば中央ゾーンのスケジュールもゾーン境界の制約によりほぼ決まってしまう。

斜行機能について

節のようにシャフト間を行き来する機会が多い場合、斜行機能があれば、水平と鉛直両方向の移動が同時に可能で、サービス時間の短縮につながる。



図1: ゾーンが隣接する場合のサービス開始/終了時刻の制約

その斜行機能であるが、かごが走行中で停止状態を経ないままシャフト間を移る運行パターンはこれまでの議論では出てこないため、それを除くと図 m の 2 パターンがある。

1. 停止状態どうしの場合、両シャフトにまたがって走行する部分は 1 階分
2. 通過から停止に至る（あるいはその逆）場合、両シャフトにまたがって走行する部分は 2 階分

なお、この議論（特に斜行時間を横行時間と同じとしている点）には大きな問題がある。なぜなら、乗り心地は鉛直・水平両方向の加速度・ジャークのベクトル和で制約されるため、実際は横行時間に 5 秒以上の時間を費やすからである（単純に図 m 左で水平・鉛直両方向の距離・加速度・ジャークが同じなら $5\sqrt{2} \approx 7$ 秒）。

斜行はショートカットするために時間短縮効果が大きい。しかし、2 シャフトにまたがって走る距離が長い分、図 n のように運行周期が増大する可能性もある。図 n の場面では 14 秒程度は運行周期が増大する。

斜行機能は、周期増大による輸送力減少よりサービス完了時間の減少の効果が大きければ有効である。しかし、すべての人が斜行または横行を経験するとしても、3 ～ 4 秒の短縮にしかならないため、十分な効果は得られない。しかし、1 ユニットでサービスするゾーンが図 g (b) のように不連続なら、周期は増大しない。

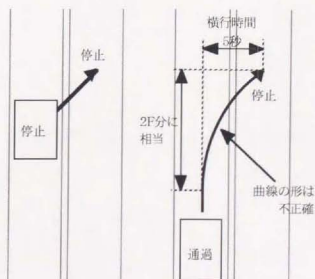


図 m: 斜行の 2 パターン

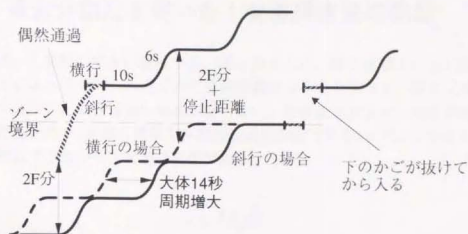


図 n: 斜行機能が運行周期に与える影響

緩急線分離方式の是非

緩急線分離方式は、単なる輸送能力的な評価では良いものが見えるが、輸送の柔軟性を大きく損なうのが欠点である。緩急線分離方式は、いわばダイヤに合わせて設備を作った鉄道のように、ある運行モードでは最適だが、それ以外では使い勝手が悪いものとなるだろう。この点では、どんな需要に対しても最適に近いものを出せる可能性を持つ従来方式の方が有利と言える。

さらに、緩急線分離方式は、シャフト移動時に乗客を乗せることになり、従来のエレベータにない水平方向への移動が加わるので、乗り心地の悪化も懸念されるのも問題である。

このように、4.2 節のようなハード構成を取る限りは、緩急線分離方式での高密度かつ柔軟な運行は不可能であると考え、論文の本文中では取り上げないこととした。



付録 B 黄金分割比を用いた 1 変数探索法の概要

この方法は、1 変数の場合に適用でき、図 o のように、探索区間中に (a) 式で示される黄金分割比 τ によって分けられた 2 点で目的関数の大きさを調べて、探索区間を小さい方に絞っていく方法で、微分係数の演算が要らない、計算量が少ない、精度を正確に指定できるなどの特長を持つ、非常に簡単な非線形最適化手法である。ただし、この方法では local minimum に対応できないので注意が必要である。

$$\tau = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad (a)$$

ある 1 変数関数 $f(x)$ について、区間 $[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]$ 内での最小点を求める場合を考える。探索区間内で、(b) 式に基づき、黄金分割比 τ で分けられた 2 点を取る。

$$\begin{aligned} x_3^{(i)} &= \frac{\tau-1}{\tau} (x_2^{(i)} - x_1^{(i)}) + x_1^{(i)} \\ x_4^{(i)} &= \frac{1}{\tau} (x_2^{(i)} - x_1^{(i)}) + x_1^{(i)} \end{aligned} \quad (b)$$

$x_3^{(i)}, x_4^{(i)}$ について、 $f(x)$ の値を求め、大小関係によって次の処理を行なう。

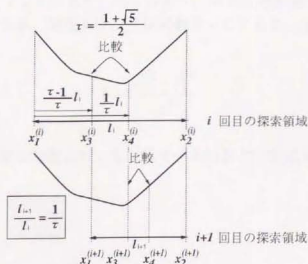


図 o: 一変数探索法のアルゴリズム

1) $f(x_3^{(i)}) > f(x_4^{(i)})$ の場合

(c) 式に従って、探索区間を $x_2^{(i)}$ 側に移動する。

$$x_1^{(i+1)} = x_3^{(i)}, \quad x_2^{(i+1)} = x_2^{(i)} \quad (c)$$

さらに、 $x_3^{(i+1)} = x_4^{(i)}$ の関係が成り立つため、関数 $f(x_4^{(i)})$ の計算値は (d) 式のように次のステップ $i+1$ でも使える。

$$f(x_3^{(i+1)}) = f(x_4^{(i)}) \quad (d)$$

2) $f(x_3^{(i)}) < f(x_4^{(i)})$ の場合

(e) 式に従って、探索区間を $x_1^{(i)}$ 側に移動する。

$$x_1^{(i+1)} = x_1^{(i)}, \quad x_2^{(i+1)} = x_4^{(i)} \quad (e)$$

さらに、 $x_4^{(i+1)} = x_3^{(i)}$ の関係が成り立つため、関数 $f(x_3^{(i)})$ の計算値は (f) 式のように次のステップ $i+1$ でも使える。

$$f(x_4^{(i+1)}) = f(x_3^{(i)}) \quad (f)$$

上記の作業を繰り返すことにより、図 o のように探索区間を縮小でき、最適点を所定の精度で求めることができる。精度 δ は、反復回数を n とすると、(g) 式で与えられる。

$$\delta = \frac{x_2^{(0)} - x_1^{(0)}}{\tau^n} \quad (g)$$

これを用いると、必要な精度に対して反復すべき回数が一意に定められる。



付録C 様々な場面における運行スケジュールの変化

ここでは、7.5.1節で計算した条件の一つ、一般階階床数 60、速度 200m/min の時について、かご数を 5 個から 14 個まで変化させた際に得られる運行スケジュールを図 p ～ 図 y に示した。

運行周期はかご数を増やすにつれ減少し、13 個 (図 x)、14 個 (図 y) で運行周期が最大となっている。13 個 (図 x) と 14 個 (図 y) は乗降用シャフトから決まっているため、運行周期が同じであるが、14 個 (図 y) の場合の方がかごが余り気味となり、ロビー階の部分で沢山のかごが待機していることが分かる。もっとかごを増やすとロビー階がオーバーフローし、5.7.6 節の図 5-20 のように上層で待機をするような処理が必要となる。

また、かごが 11 個 (図 v) の場合は、上層のかごが乗降用シャフトで待機していることが分かる。この場合は各かごが回送用シャフトに移動するタイミングが悪いためである。このような現象は、サービスゾーンや運行周期の定め方によって生じることがあり、回送用シャフトの処理能力が逼迫している場合は運行周期がうまく詰められないという悪影響を及ぼす可能性を持っている。(7.5.2 節の図 7-12 で曲線が乱れている所はこれが原因)

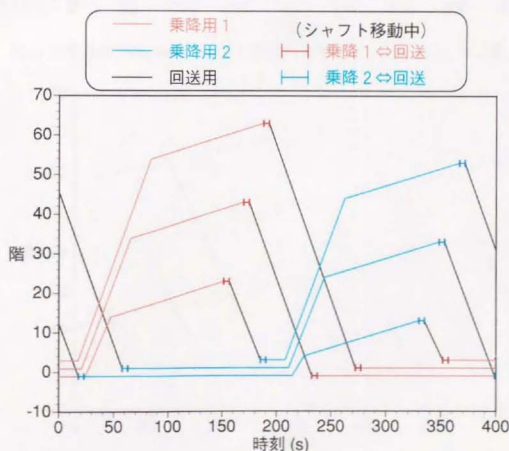


図 p: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 5 個

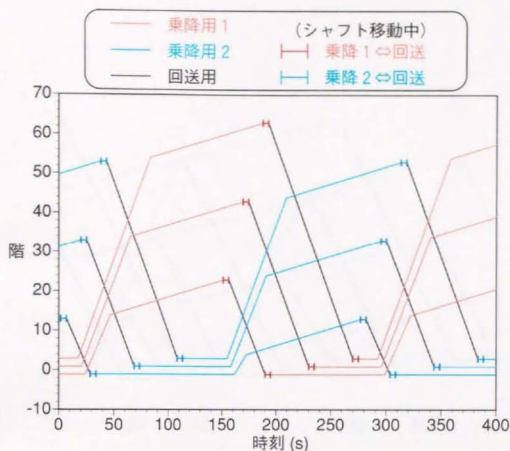


図 q: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 6 個

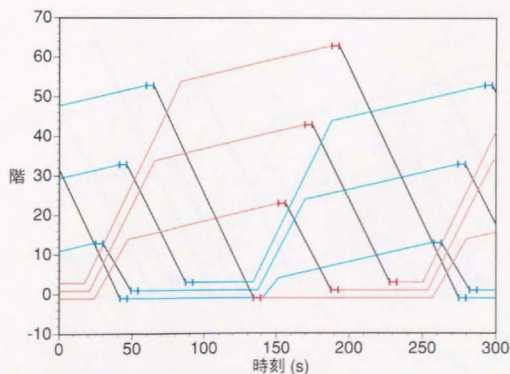


図 r: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 7 個

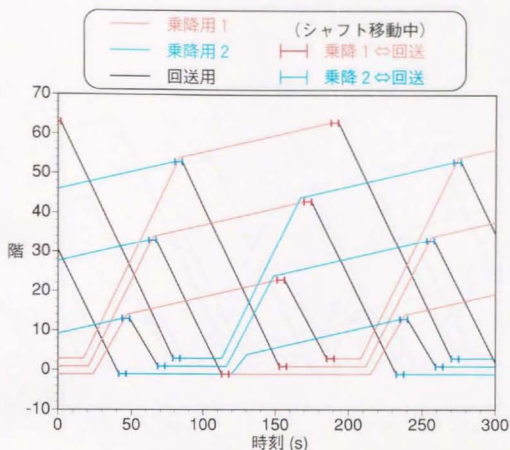


図 s: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 8 個

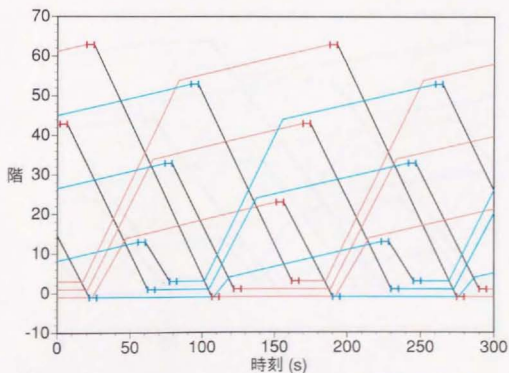


図 t: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 9 個

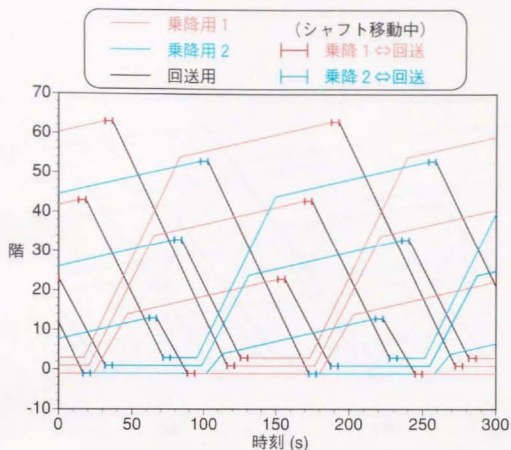


図 u: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 10 個

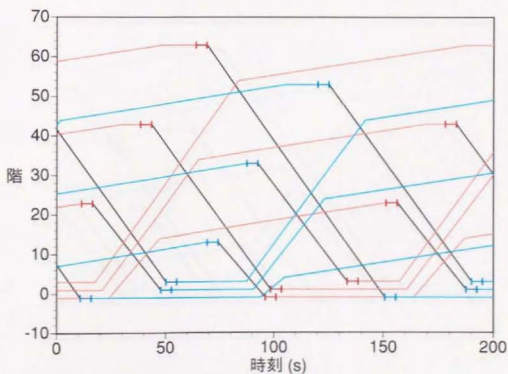


図 v: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 11 個

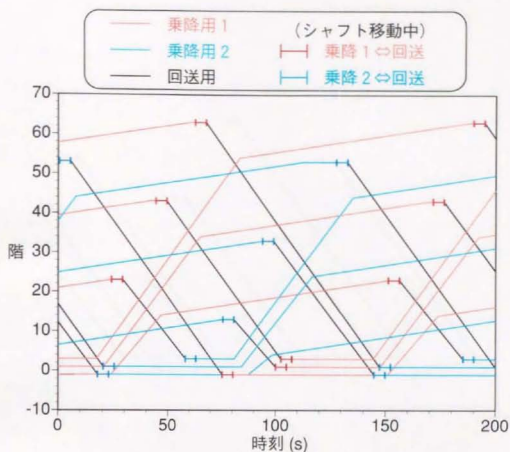


図 w: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 12 個

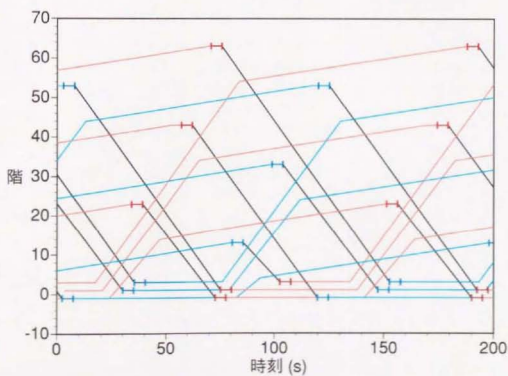


図 x: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 13 個

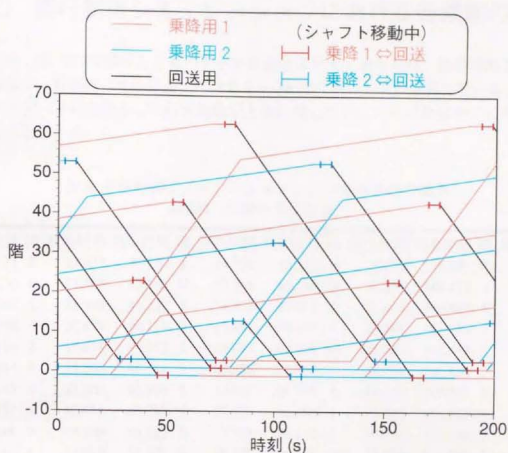


図 y: 定格速度 200m/min, シャフト間移動時間 5 秒, 定員 20 人, かご数 14 個



付録D 運行制御シミュレーションにおける各乗客の動き

ここでは、図7-23で図示した元のデータを表bに示す。表bには、到着時刻と待ち時間だけではなく、行先階（サービスゾーンを1～10階で表わした）も載せている。なお、下線を引いたデータは先発かこの行先階数が上限に達していたために先発かごに乗りなかつた乗客を示している。

表b: 運行制御シミュレーションにおける各乗客の動き
(時刻・時間の単位は秒)

到着時刻	階	待ち時間	到着時刻	階	待ち時間	到着時刻	階	待ち時間	到着時刻	階	待ち時間
1.175	2	23.673	40.700	1	19.300	85.184	9	0.000	136.297	10	13.703
3.250	6	21.598	42.142	10	17.858	85.380	10	33.245	140.122	4	9.878
3.345	2	21.503	43.127	2	16.873	87.018	5	31.608	140.891	4	9.109
3.968	3	20.879	44.119	3	15.881	90.657	5	27.968	141.936	4	8.064
5.210	2	19.638	45.357	3	14.643	93.192	10	25.434	142.942	5	7.058
9.584	4	15.264	46.664	5	13.336	93.944	7	24.681	146.136	7	3.864
11.848	4	13.000	46.904	5	13.097	96.449	5	22.176	149.241	6	0.759
11.877	6	12.971	48.715	4	36.469	96.865	1	21.760	151.412	9	23.214
12.348	7	12.500	54.262	2	5.738	98.174	2	20.452	151.730	9	22.896
12.816	8	12.032	55.408	7	29.776	100.651	10	17.975	151.925	6	22.701
13.160	2	11.688	59.524	5	0.476	101.511	10	17.114	153.011	2	21.616
13.988	4	10.860	59.977	3	0.023	102.817	8	15.809	153.758	7	20.869
15.857	10	8.991	61.866	3	23.318	103.338	4	15.287	156.109	2	18.517
17.011	5	7.837	64.004	4	21.180	104.634	6	13.992	156.470	2	18.156
17.893	8	6.955	64.215	1	20.969	108.731	6	9.894	157.987	4	16.639
18.018	9	41.982	64.972	4	20.212	110.598	2	8.027	158.297	2	16.330
18.271	7	6.577	65.662	8	19.522	111.038	8	7.588	160.656	2	13.970
18.759	6	6.089	65.776	3	19.408	112.462	8	6.163	161.952	4	12.675
20.424	4	4.424	66.087	10	19.097	116.610	10	2.015	163.158	6	11.469
23.262	9	36.738	66.528	5	18.656	117.661	8	0.964	165.001	6	9.625
24.811	5	0.037	67.224	9	17.960	118.625	7	0.000	168.734	6	5.893
24.848	2	0.000	70.472	3	14.712	119.060	2	30.940	169.614	8	5.012
27.580	10	32.420	74.002	9	11.182	121.173	3	28.827	170.647	4	3.979
28.118	5	31.882	74.509	3	10.675	121.843	3	28.157	171.037	6	3.589
28.556	8	31.444	77.979	3	7.205	122.849	5	27.151	173.368	7	1.258
28.634	1	31.366	78.367	3	6.817	124.936	5	25.064	174.416	8	0.210
30.651	8	29.349	79.380	8	5.804	125.941	5	24.059	174.626	9	0.000
33.148	6	26.852	82.242	10	2.942	126.823	5	23.177	179.368	9	30.632
38.685	10	21.315	84.689	5	0.495	130.418	3	19.582	179.540	7	30.460



