

エレベーター運行のスケジューリング

木治 潤一

1. はじめに

大きな建物や高層ビルでは、階間交通手段であるエレベーターは複数台稼働しているのが普通である。利用者が多いということがその理由である。しかし、エレベーターを複数台運行させるためには、次のような二面性をもつ問題に対処しなければならない。

1. 一人の利用者の側に立ってみれば、「目的の階に早く到達するには、どのエレベーターに乗ればよいか」という問題
2. ビル管理運営者にとっては、「利用者全体の階間移動の効率化のためには、どのエレベーターがどの階でどれだけの利用者を乗せるか」という問題

エレベーターが複数台あっても利用者数がそれほど多くはないビルではエレベーターを一台一台独立に運行させることもある。これは、第二の問題へは解答しないで、乗るエレベーターの選択を利用者各自の判断にまかせるという、単独で運行させる場合と同じく、第一の問題を利用者に解かせることだけで対処するものである。

一方、利用者数の多いビルでは、第一の問題を利用者に解かせることをしないで、主に第二の問題に対する解答する機構を備えて得られる解答にしたがって複数のエレベーターを運行させるシステムが稼働しているのが普通である。この複数のエレベーターをシステム側の総合的な判断に基づいて運行させるシステムは「群管理」と呼ばれている(図1参照)。群管理は各エレベーターが時間の経過とともにどの階にどの順番で止まっていくかをさだめるものであり、すなわち、エレベーター運行のスケジューリングを行うものであるということになる。

本稿では、サービスシステムという観点からエレベ

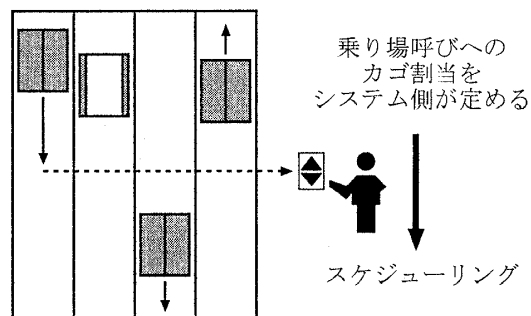


図1 エレベーター群管理

ーターシステムを紹介し、そこで行われているエレベーター群管理がどのようにスケジューリングを行っているかについて解説する。さらに、実際に導入されている工夫についても解説し、今後の展望を述べる。

2. エレベーターのサービスの特徴

2.1 エレベーターのサービス

エレベーターは、一つのビルにおける階と階との移動のための手段であることに特徴があるにしても、飛行機や鉄道やバスと同じく乗り合いの交通手段であることに変わりはない。しかし、飛行機や鉄道やバスは停止位置と停止時刻・時間が定められているのに対して、エレベーターでは、停止位置と停止時刻・時間があらかじめ決まっているわけではなく、利用者が決定するという違いがある。図2でエレベーターサービスについて説明する。まず、利用者は、乗り場*i*で「乗り場呼びボタン」を押してエレベーターにその階への停止を要求しなければならない。群管理システムは稼働しているエレベーターの中からいくつか(普通は一台だが複数台でもよい)を選んで、乗り場呼びボタンが押された階に停止させるようにエレベーターに指示する。エレベーターが乗り場呼びボタンが押された階に到着して利用者がエレベーターに乗り込むことになる。エレベーターに乗り込んでからはエレベーター内の「カゴ呼びボタン」(行先階を指定するためのボタン)を押して目的の階*k*を定めてエレベーター

きじ じゅんいち

㈱東芝 研究開発センター

〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町1

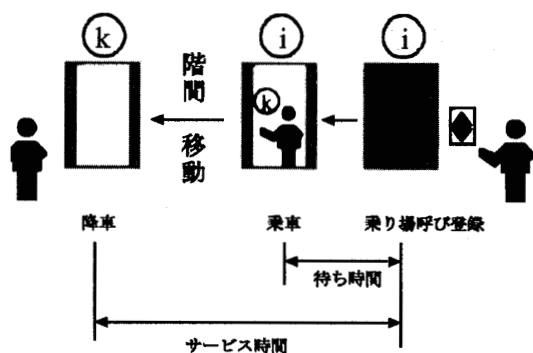


図2 エレベーター運行サービス概要

の停止位置を定めなければならない。

このように、エレベーターシステムでは利用者は乗り場呼びボタンとカゴ呼びボタンを押すことで、エレベーターシステムに停止位置を要求する。エレベーターシステム側は個々の利用者の要求に従ってエレベーター停止位置に随時停止していくことでサービスを提供することになる。

ここにおいて、個々の停止位置を定めるのが利用者であるということがシステム側が停止時刻・時間を厳密にコントロールするのが不可能にしている（選択可能な停止位置から実際の停止位置を決めることだけができる）。このことが定期運行である飛行機・鉄道・バスとの本質的なサービスの違いである¹。

2.2 サービスの評価指標

飛行機・鉄道・バスなどのように定期運行の場合では、上で述べたように停止位置と停止時刻が定まっているので時間と時刻とをあわせてサービスの性能を考えるのが普通である。すなわち、出発して目的地に到着することに関して、移動時間が適正かどうか、時刻（時刻表、スケジュール）通りに行われるかどうかでサービスの良し悪しが決まる（乗り心地などの、単に交通手段として以外の要素についてはここでは考えないことにする）。しかし、輸送手段が各停止位置で利用者のすべてを輸送する能力を満たしている限りにおいては定期運行上支障はないはずであるから、結局、サービス性能は輸送能力の限界を越えるかどうかにかかるといえることになる。

これに対して、エレベーターの場合は利用時刻は任意であるから（いつでも利用可能であることが前提と

される）、利用時間だけを評価するのが一般的である。この考え方は窓口業務などのサービス評価においていわゆる待ち行列理論としてよく議論されているもので[2]、エレベーターシステム独自のものではない²。

利用時間の具体的な評価指標としては待ち時間とサービス時間が代表的である。エレベーターシステムにおける待ち時間とサービス時間は次に示されるものとなる（図2参照）。

待ち時間：利用者が乗り場で「乗り場呼びボタン」を押してからエレベーターに乗り込むまでの時間

サービス時間：利用者が乗り場で「乗り場呼びボタン」を押してから目的地に到着するまでの時間

飛行機や鉄道やバスの定期運行の交通手段とは違い、一つのエレベーターに乗っている利用者でもそれぞれに待ち時間、サービス時間に違いがある。そこで、普通は稼働時間帯毎に統計をとった平均待ち時間、平均サービス時間がほしいのサービス性能の目安とされている。

さらに、待ち時間やサービス時間の平均値だけではなく、最良・最悪のケースとして、最小待ち時間、最小サービス時間、最大待ち時間、最大サービス時間や、設定された規準値よりも評価が悪い待ち時間（長待ち時間）などの指標も考慮されることが多い。これらの指標を、実際に、割当においてどのように利用するかということについては次章で述べる。

3. 群管理におけるスケジューリング

エレベーター運行（スケジューリング）は群管理が司っているから群管理の良し悪しがサービス性能のカギということになる。ここでは、群管理におけるスケジューリングの方法について述べる。

3.1 スケジューリングにおける条件

まず、群管理がスケジューリングであるということ直感的に理解していただくために図3を参照願いたい。この図はエレベーターの運行に際してのいわゆる“ダイヤグラム（運行線図）”を示したものである。鉄道などのダイヤグラムと類似のものである。鉄道などで運行計画（時刻表）をたてることを想定していただければ、これがスケジューリング問題であることは容

¹ 事実かどうかは定かではないが、阿刀田高氏[1]によると、イスラエルでは安息日にはエレベーターは各階にかかわらず停止して運行するのだそうである。この場合なら定期運行ということになるが、無駄を覚悟の停止が多くなるので効率面では問題外である。

² 自動車の交通信号制御の分野でも個々の車両の運行時刻は判らないのはエレベーターの利用者と同じであり、やはり出発から到達までの時間である旅行時間（＝出発地点から到達地点までに交通にかかる時間）を指標の一つとしている。

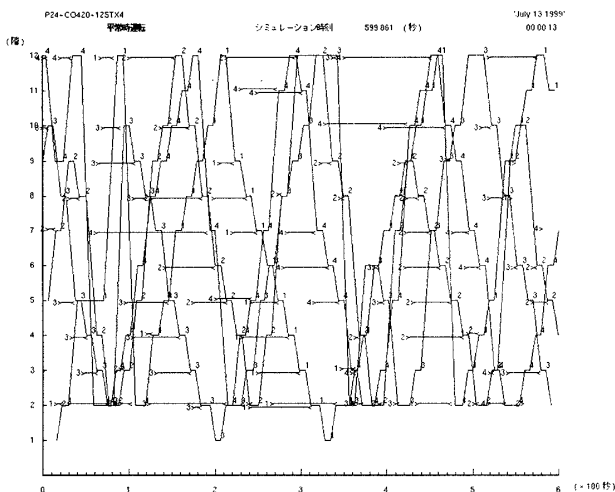


図3 エレベーター運行のダイヤグラム

易に理解されるだろう。鉄道などでは、乗り継ぎなども考え合わせながら各停止位置(駅)での利用者数をだいたい設定できることで、運行本数を定め、そしてそれによって運行間隔を設定することでいわゆる時刻表を定めているはずである。エレベーター運行のスケジューリングにおいても、スケジューリングという意味では、おなじ理屈である。

ところが、エレベーター運行においては、実際には停止位置・時刻・時間が、何時発生するかわからない利用者に左右されるところが、定期運行の鉄道などのスケジューリングにおける条件と同じという訳にはいかないところである(表1参照)³。実は、図3は、鉄道などのように運行前にあらかじめ定まっているものではなく、実際にエレベーターが運行した結果を示したものである(図3は計算機シミュレーションによるもの)。図3では、稼働中(シミュレーション中)、どの時刻にどれだけどの階に停止してさらにどの時刻にどの階を出発したかが示されている。エレベーター運行では、鉄道のようにダイヤグラムを事前に描くという訳にはいかないのである。

3.2 スケジューリングの考え方

前章でエレベーターのサービス性能の評価指標として、待ち時間やサービス時間があることを述べた。群管理は複数台のエレベーターの運行を総合的に司るものであり、その能力次第でサービス性能の良し悪しを左右することも述べた。そして現在では、これらサービス性能を左右する待ち時間やサービス時間などの指

³ サービス性能の評価に関して、待ち行列の問題として論じられるという特徴を持つことが、飛行機・鉄道・バスなどの定期運行が単に輸送能力の問題に帰着されるのと異なることは前章で述べた。

表1 スケジューリングにおける条件の違い

項目	交通手段 飛行機, 鉄道, バス	エレベーター
利用者発生時刻	集合時刻	任意
停止位置	既定	未定
停止時刻	既定	未定
需要規模	大	小/中
需要変化	小	大
サービス評価	輸送能力	待ち行列論
スケジューリング	時刻表	乗り場呼び割当

標値を直接反映するようなスケジューリング(乗り場呼び割当)が行われている。

例として、4台のエレベーターが稼働している12階建てのビルを想定しよう(図1参照)。9階で上層階に向かう利用者が発生した場合、群管理システムは各エレベーターが9階の上昇に対応できるまでの時間⁴—待ち時間—を算出する。これらの算出される待ち時間の中で、例えば一番短い時間となるエレベーターを9階に向かわせることにすれば、この時点ではこの利用者に、最短時間のスケジュールを組むことになる。ただし、このすぐ後で別の利用者が例えば6階で乗り場呼びボタンを押し、9階に向かっているエレベーターが、群管理によって対応させられないとも限らない。この場合、9階の利用者は当初の群管理システムの見積もりよりも長く待たされることになる。したがって、単に目の前に発生した利用者にたいするサービスを考えた最小待ち時間という評価指標単独では群管理はうまくいかないのが普通である。

そこで、一般的には、2.2節で述べたようなサービス指標を直接算出(予測)してその評価に基づいて割当が行われる。

平均待ち時間を最小にするエレベーターへ新たな乗り場呼びを割り当てるというのも、上のサービス指標に基づく最適化の基準の一つである。各カゴ $i(i=1, \dots, N)$ に既に m_i 個の乗り場呼びが割り当てられている状況で、乗り場呼び j の待ち時間が $w_{i,j}$ として算出できるものとする(現在の乗り場呼びから派生する利用者降車階床が既知であり、将来新たに乗り場呼びも発生しないものとする場合は算出は容易である)。

⁴ そのとき各エレベーターに別の利用者は乗っていてもかまわないが、下っている場合にはいったん利用者がすべて降りる階まで行くことは運行の条件とされる。空の場合や、上昇している場合は直接9階に向かうことができる。

新たな乗り場呼び p をカゴ k に割り当てるとするときの平均待ち時間 $\bar{w}(k)$ は次式にしたがって算出される。

$$\bar{w}(k) = \left(\sum_{i=1, i \neq k}^N \sum_{j=1}^{m_i} w_{i,j} + \sum_{j=1}^{m_k} w'_{k,j} + w'_{k,p} \right) / \left(\sum_{i=1}^N m_i + 1 \right) \quad (1)$$

このとき、 $\bar{w}(a) = \min\{\bar{w}(k)\}$, ($k=1, \dots, N$) をみたとすカゴ a に新たな乗り場呼び p を割り当てるときの平均待ち時間を最小にできると期待できる。ここで、 w' は、新たな乗り場呼び p の影響をうける、割当候補カゴ k に既に割り当てられている乗り場呼びについても待ち時間を算出し直すことを表している。

これは、先ほどの例でいくと、4台のエレベーターそれぞれに新たな9階の乗り場呼びに対応させると仮定したそれぞれの場合について、各エレベーターが既に割り当てられているが未だ対応していない乗り場呼び（利用者乗車階）への待ち時間をすべて算出して、その平均値が一番小さくなる場合のエレベーターに9階の乗り場呼びを割り当てるというものである。

ただ、これもあくまで“平均値”で判断するので、かならずしもすべての乗り場呼びに同じくらいの待ち時間でサービスできるという保証はなく、極端に短い待ち時間と逆に長くなる場合とができて、評価値としては平均化されたままの数值になっているということも多い。このとき、長待ち時間の乗り場呼びが問題なのだが、極端に長い時間の待ちの場合には、乗り場呼びのエレベーターの割り当てを変更する処理が行われることもある。

また、特に平均値での評価の場合には、待ち時間ではなく、サービス時間について評価指標の値を算出する場合もある。

このように、エレベーター群管理は、乗り場呼びが発生するなどの度に、待ち時間やサービス時間の評価指標を随時算出し直して（サービス性能の予測）、そしてエレベーター割り当ての最適化を図り、利用者の要求を逐次こなしてゆくことで「スケジューリング」を行っている。

4. 需要状況に適應する群管理

エレベーター運行のスケジューリングでは、利用者発生（需要発生）がよく判らないことが、サービスの評価が待ち行列論における議論となり、スケジューリングが最適化計算の繰り返しで行われることを前節で

述べた。では、実際問題としてどのような状況でどのように評価指標を組合せてスケジューリングを行うのだろうか。ここでは、需要発生の多様性に注目しながら、実際に適用されている群管理技術について述べる。

4.1 需要発生の多様性

これまで再三、利用者がいつ乗り場に来てどの階に行くかということがわからない、と繰り返してきたが、単に判らないだけではなく、実は一定でないことも問題となる。朝の出勤時、勤務中の時間帯、昼食時、退社時におけるエレベーター利用の人のながれ—交通流—（交通流の実際の現れがエレベーターシステムに対する需要発生である）がそれぞれ異なることを思い浮かべていただければ理解されよう。さらに、

1. ビル毎に需要発生パターンが異なる
2. 同じビルでも毎日同じ需要発生パターンとは限らない

のように、個々のビルそのものにおける違いもある。

前節までに、サービス性能についての評価は待ち行列論として議論される旨述べた。理論としての待ち行列論は客の発生に確率分布を想定することで議論の土台を作っている。しかし、このなにかの確率分布を導入するというだけでは現実のビルの需要を十分には記述できないというのが、群管理の難しいところなのである。

4.2 群管理の切替え

需要発生パターンを一つの確率分布として設定してそれに対して最適な群管理を、例えばあらかじめ膨大なシミュレーションを行って構築するというよりも、時間帯毎の交通流に見合った需要発生パターン、実データに基づく需要発生パターンをいくつか想定してそれらに対する群管理処理を定めておき、稼働中に随時状況に合わせて群管理処理を切替えてゆくというやり方をとるのが一般的である。

1. 稼働実績を利用した需要発生パターン予想

ビル階層別利用人数概数からいわゆる OD 表—利用者毎の乗り場階（Origin）と行き先階（Destination）の統計表—を作って、実績値を逐次参考にしながら、なにかの統計的条件を設定して需要発生の期待値を算出する[3]。これから得られる需要発生の状況を群管理処理に反映させる。

2. 時間帯に応じた群管理処理変更

例えば、出勤時にはビルの入口の乗り場である1階に優先的にエレベーターを配置するように

し、昼食時や退社時には出口となる1階に集まるエレベーターを各階均等に再配置するという処理を個別に設定しておき、時間帯に応じて処理を実施する。

当初は時間帯などの条件に応じてノウハウに基づいて処理を切替えるものであったが、80年代半ば頃から、AI、ファジィ理論に基づいて多目的な指標の評価を行った上での群管理処理の切替が行われるようになり、最近ではGA (Genetic Algorithm) なども用いられるようになってきている[4~7]。

多目的評価においては、評価項目間でのトレードオフが生じてしまうのが一般的であるが、その解消のために群管理シミュレータが開発され[4, 6, 8], オフラインでの評価の後にブラッシュアップされて現実の群管理で切替え処理が適用されるというやり方がとられている。

4.3 需要変化に対応する群管理システム

90年代はじめ頃からは、上のような群管理切替え処理のほかに、モデリング技術としてのニューラルネットワークの群管理への利用も試みられるようになった[9, 10]。

ニューラルネットワークを用いて群管理システムに需要変化(交通流の変化)を自動的にきめ細かく判別させることで、典型的な需要パターン以外の交通流においてもサービス性能を落とさないことを目指しており、群管理システムとしてはもっとも進んでいるものである。本稿の総括の意味を込めて、当社の例[9]を以下に紹介しておく。図4は群管理の構成の概要を示す。ファジィニューラルネットワーク[10, 11]により、ビルの交通流の予測モデルを構成しておく。予測モデルは、群管理処理パラメータとビルの現在の交通流を示すパ

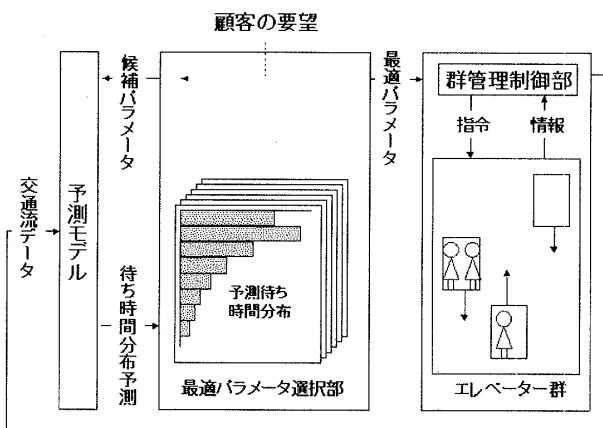


図4 ファジィニューラルネットワーク応用エレベーター群管理システム

ラメータを入力として、待ち時間分布を予測して出力するようにあらかじめ学習されている(図5参照)。普通の数学モデルでは表現しにくい、パラメータと待ち時間分布との関係がニューラルネットワークによってパターンとして表現され、かつそのパターンの微妙な修正も自動的に行えるのが実用になったポイントである。

この予測モデルに、現在の交通流データと候補のパラメータセットを入力して各候補パラメータセット毎に出力される予測待ち時間分布を比較して、良い待ち時間分布が得られるパラメータセットを実際にビル群管理システムに適用するというものである⁵。

これにより、個々のビルの交通流の特徴に自ら対応していける群管理システムが実現した。

5. まとめと今後の展望

エレベーター運行のスケジューリングの特徴は、需要発生にかかわる待ち行列論と繰り返し最適化にあることを述べた。

エレベーターシステムは、本来、各利用者に個別的なサービスを提供するものである。しかし、

- 利用者は何時、どのように現れるか
- 何を持って良いサービスとするか

という不確定であいまいな要素を持つ、利用者全体を対象にしたサービスシステムとして構築されなければならないという辛さがある。その意味で、運行のスケジューリング計算手法そのものよりも、需要の予測とサービス性能の予測の方が重要な問題として一般に認

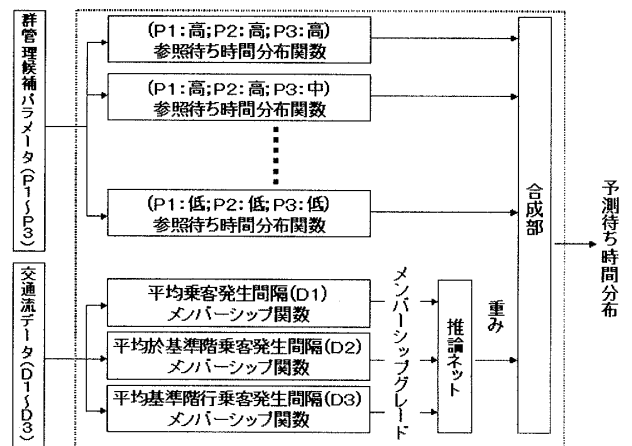


図5 予測モデルの構成概要

⁵ すなわち、ファジィニューラルネットワークが、ファジィだけのところに用いた計算機シミュレータに比べて、簡便にしかもオンラインで使えるシミュレータとしての役割を果たすのである。

識されており、前章で紹介した当社の群管理システムも同様の立場からの適用例である。

個々の利用者発生に関連する問題点をもう少し具体的に見れば、つぎのような点が挙げられる。

1. ビル利用面積効率化のため、エレベーター数はもともと少なめ
2. カゴ呼び発生で予定停止位置が追加される
3. 一つの乗り場においての複数の利用者のそれぞれの本当の待ち時間は群管理システム側には判らない
4. サービス時間は移動階数にも依存する
5. ドア閉は利用者が制御することが多い

これらには、乗り場呼びボタンやカゴ呼びボタン、あるいは、エレベーター荷重の変化などから得られる情報だけでは予測できないような交通流を発生させる要因ともなり得る。より良いサービス性能の実現に向けては、予測制度向上の根拠を与えるような新たなセンサー情報が必要となろう。

ところで、エレベーターシステムのサービス性能はビルの構造や利用のされ方に大きく左右される。ビルの大規模化・多様化に伴って、シャトル運行型エレベーター、ダブルデッキエレベーター、自走式エレベーターなどの運行特性が異なるエレベーターが開発されたり、研究対象として想定されている[5]。これらのハードの多様化にしたがって、ソフト面（情報・サービス）では総合性が高く、利便性に富むものが今後求められてゆくとと思われる。

参考文献

- [1] 阿刀田高：“旧約聖書を知っていますか” 新潮文庫 (1994).
- [2] 森村英典，大前義次：“応用待ち行列理論” 日科技連 (OR ライブラリ 13) (1975).
- [3] 米田清，中山靖子，松本敏明：“エレベータ群のトレス駆動シミュレーション” オペレーションズ・リサーチ，Vol. 42, May, No. 5, pp. 371-374 (1997).
- [4] 原田豊，久保進，春木和仁：“AI 応用エレベーター群管理システム” 東芝レビュー，Vol. 44, Sep., No. 9, pp. 726-729 (1989).
- [5] 平元武治，中里真朗：“省エネルギー・高福祉を目指したエレベーター・エスカレーターの動向” 日立評論，Vol. 75, Jul., No. 7, pp. 432-436 (1993).
- [6] 氏原英世，天野雅章，山崎幹弘：“最新のエレベーター群管理” 三菱電機技報，Vol. 67, Oct., No. 10, pp. 949-953 (1993).
- [7] 米田健治，飛田敏光，大貫朗，梶浦秀郎：“階床ごとのニーズに合わせて運行する群管理エレベーターシステム— 遺伝的アルゴリズムを用いた階床別個性化知能群管理—” 日立評論，Vol. 79, Sep., No. 9, pp. 15-20 (1997).
- [8] 今崎直樹，久保進：“エレベーター群管理システムの計画・設計のためのシミュレーション技術” 東芝レビュー，Vol. 50, Jul., No. 7, pp. 545-546 (1995).
- [9] 久保進，中井章二，今崎直樹：“ファジィニューラルネットワーク応用エレベーター群管理システム” 東芝レビュー，Vol. 49, Sep., No. 9, pp. 627-630 (1994).
- [10] 匹田志朗，天野雅章，岩田雅史：“ニューラルネットワーク応用群管理システム [AI-2100 N]” 三菱電機技報，Vol. 70, Nov., No. 11, pp. 1086-1091 (1996).
- [11] 今崎直樹ほか：“ニューラルネットワークによるファジィモデリング” 東芝レビュー，Vol. 45, Dec., No. 12, pp. 991-994 (1990).
- [12] 今崎直樹，木治潤一：“ニューラルネットワークによるファジィモデリング” 日本機械学会 第1回交通・物流部門大会，Nov. (1992).