

# 建造物内の避難経路立案のための最適化手法

## Optimization Method for Indoor Evacuation Routes Planning

安藤慧<sup>†</sup>, 飯島正<sup>‡</sup>

Kei Ando<sup>†</sup>, and Tadashi Iijima<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻,

<sup>‡</sup>慶應義塾大学 理工学部

<sup>†</sup>Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.,

<sup>‡</sup>Department of Science and Technology, Keio Univ.

### 要旨

本論文では、火災が発生した建物内からの避難の際に、在館者（被災者）を特定の経路に集中させることなく分散させることによって、全体的な避難効率と安全性を向上させる誘導経路の探索手法を提案する。本手法では、建物内には2種類のセンサが多数設置されていることを前提としている。一つは、人流センサであり、これによって在館者分布情報が常時収集される。もう一つは、熱感知センサや煙感知センサなど、災害の発生とその位置、範囲、規模等の災害状況を取得するセンサである。これらセンサによって取得された情報は、クラウドサーバへ定期的に転送される。この前提は、火災の発生とその状況、ならびに、その直前までの、ある程度の在館者分布が把握できることを意味している。クラウドサーバでは、発災直後にセンサ情報（在館者分布と災害状況）に基づき、単純化した避難シミュレーションを短時間で実施し、避難経路上の避難者の混雑状況を推定する。そのもとで、在館者全員が避難するために要する時間の平均を最小化する経路の探索を最適化問題としてとらえ、メタヒューリスティクスによる求解を図る。その解に基づき、館内各所で、そこにいる避難者にとって適切と推定される避難経路を通知する。今回は、特にホテルや大学の研究室のような間取りを持つ建物を対象に、火災発生から短時間で避難経路を求め、各室へ通知することを想定したシミュレーション実験を行い、その条件下における各メタヒューリスティック手法の効果を確認した。

### 1. はじめに

火災や地震などは、身近に発生しうる危機的状況である。そのような災害が発生した場合に備え、事前に様々な対策が講じられているが、一旦、災害が発生したら、その状況に応じた適切な避難誘導を行うことも重要である。近年に建造された建築物は、避難を考慮した建築基準を満たすことが義務付けられているが、現存する全ての建物が、その基準を満たしているわけではない。仮に基準を満たしていたとしても、被災者が特定の避難路に集中してしまうことで、避難が遅れたり二次災害が発生する可能性は否めない。

また、建物の利用目的や規模にもよるが、火災が検知されると非常ベルが作動し、さらに追って館内放送で情報が提供されることもある。しかし、出火地点から遠い地点、フロアが異なる地点では、実際に煙を視認するなど直接的な知覚を得られないか、得られても大幅に遅れるため、非常ベルの鳴動や館内放送での避難勧告があっても、正常性バイアスによって避難行動の初動が遅れてしまうケースも少なくない。避難を開始したとしても、出火地点や現状の煙の位置などを正確に把握しなければ、適切な避難経路を選択することができず、かえって危険な地点へ向かってしまうこともありうる。

そこで、火災等の災害発生時には、被災状況に加え、被災者数とその位置を基に、適切な避難経路を決定して、被災者に伝達し誘導することが有用である。これにより、避難行動の初動を早め、避難経路上で集中させることなく、在館者を避難可能な出口へ分配することができると期待できる。

今回は、下記の前提条件をおき、対象を限定している。一つ目は、建物の構造である。ホテルや学校のように、主通路となる廊下があり、いくつかの部屋が隣接しているような単純な構造の建物のみ取り上げる。二つ目は、設備である。在館者分布をある程度把握できる人流センサと、熱感知や煙感知によって災害状況を把握できるセンサとディスプレイが館内に配置され、それぞれ、発災後にも短時間なら使用可能なバッテリーと外部のクラウドサーバと通信できる機能をそなえていることを前提としている。但し、その実現性に関しては本論文では予備実験に基づき可能性を示唆するまでにとどめる。三つ目は、避難方法であり、窓から脱出するようなことは考えず、通常の出入口もしくは非常口からの避難のみを考える。

## 2. 既存研究と本研究の位置づけ

本研究は、建築物内部を対象とした避難シミュレーションと、メタヒューリスティクスを用いた避難経路最適化を対象としている。屋内災害を対象とした避難シミュレーションに関する研究は、建物の設計段階で避難安全性を評価し、設計上の問題を明らかにしたり、在館者の振る舞いを推定して避難誘導體制を検討するための方法として活用されていることが多く、主に、避難者個人単位での避難行動を予測するシミュレーション技術に関する研究が行われている [1][2]。建物の CAD データの利用に関しては、この先行研究の成果を一部利用して研究を開始した。また、メタヒューリスティクスの利用は、GIS による空間分析と GA によって、道路上の安全性と避難距離を考慮した災害時の避難経路を探索する手法 [3] や、出口が複数あるスタジアムなどからの避難計画に多目的メタヒューリスティクスを適用する先行研究 [4][5] がある。

しかし、本研究では、避難設備や誘導體制の設計・評価のための事前計画の一環として避難計画を立案する、いわゆる「事前調査」を対象としていない点が、他の多くの先行研究と異なる。本研究は、火災発生直後から、センサによって得られている建物内の状況に基づきシミュレーションを短時間で実行し、最適な避難経路を探索する、いわゆる「リアルタイム避難計画立案」に相当する。リアルタイム避難計画立案は、火山噴火にともなう溶岩流からの避難など、市街地への影響が及ぶまでにある程度の時間的余裕があるケースで検討されているが、本研究は館内センサの情報を、館外の高性能クラウドサーバで利用できる前提で、深夜の宿泊施設での火災などに対して、深夜就寝中の宿泊者の避難開始が可能となるであろう 5~10 分以内（サーバの性能に依存する）に、各客室ごとに適切な避難経路案を通知することを目指している。

## 3. 提案

### 3.1. センサによる被災状況と被災者情報の収集

避難誘導には、建物自体の静的情報だけでなく、発災後の建物内の動的情報が重要となる。ここでの動的情報とは、火災を想定し、火災の出火元や延焼の状況、煙の充満の程度など、避難する際に影響を与える要因であり、発災前には得られず、発災後も時間経過にしたがって刻々と変化する情報を指す。これらの情報を収集するために、建物内にセンサを多数設置する。

具体的には、火災状況を把握するために煙センサによる煙濃度の検出と、熱及び火炎検出器による発火地点の特定、人流計測センサによる各設置場所の在館者数（在館者分布）を取得することを想定している。但し、発災後の人流計測は、発災地点近辺では煙の発生により困難になると判断し、発災直前までの在館者分布を利用することにとどめた。在館者分布に関しては、リアルタイム避難計画立案という観点からは高い精度が要求されているわけではない。そこで予備的な実験では、ホテルのような宿泊施設で深夜就寝中に発災するケースを想定し、客室入り口の天井に設置した広角カメラで頭上から映像中の頭頂部を追跡することで入室状況を判断している。その結果、廊下を移動中であつたり、客室以外の館内施設を利用中である宿泊者はカウントしていない（深夜の想定のため、該当者は少ない上に、廊下を移動中であれば避難行動の開始が遅れる傾向は低く、館内施設の場合は、従業員の避難誘導が迅速に行われると考えている）。

予備実験では、建物内の情報をリアルタイムに取得するために、ARM プロセッサ搭載の低価格シングルボードコンピュータである Raspberry Pi [6] を利用している。Raspberry Pi (3 Model B) は、USB ポートもしくは GPIO にセンサを接続し使用することができる。最大消費電力は約 12.5W と低くモバイルバッテリーでも駆動可能である。つまり、建物内が停電してした場合でも、短時間であればセンサからの情報収集が可能である。対応する 3G 通信モジュールがあり携帯通信網が利用できるため、センサ情報は、発災前は定期的に、発災後は回線数にもよるがバッテリー駆動が可能な期間連続して、建物外に設置された外部のクラウドサーバへアップロードし、避難計画立案に使うことができる。すなわち、Raspberry Pi によってセンサを IoT 化し、多数設置することで、建物内の動的情報を収集する。こうしたセンサは、電源や通信の面

で独立性が高いため、大規模な設置工事を行う必要もなく、段階的にセンサ数を増やすこともできるため、導入の敷居も低くなると期待できる。

ここで、提案する情報収集から避難誘導までの流れのイメージを示す(図1, 2)。

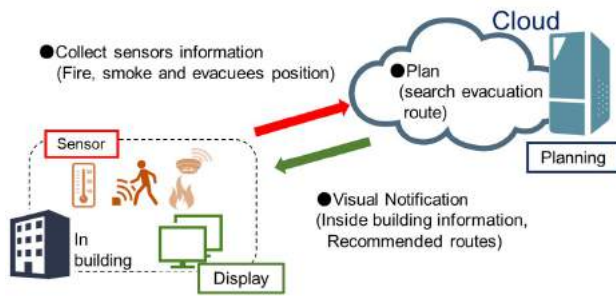


図1 建物内情報の収集から避難誘導までの全体像

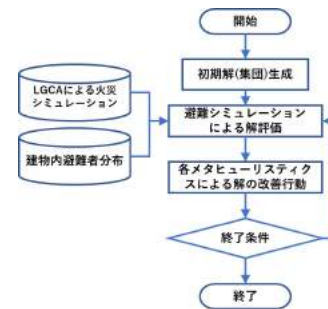


図2 Planning内フローチャート

### 3.2. 建物情報の取得

延焼や煙流動等の物理シミュレーションには、天井の高さ等の3次元情報が必要だが、避難経路を求めするためには、各フロア毎の2次元情報(見取り図等の間取り情報)とフロア間の移動手段(階段等)の情報があればよい。本研究では、3次元CADの標準交換フォーマットであるIFCから建物の構造情報を取得する。IFCは3次元情報であり、総合的なBIM(Building Information Modeling)の観点から、館内の各種配管情報等も含みうるが、今回は必要な2次元情報だけを抽出する(図3)。

間取り情報からは、座標点の値だけでなく、部屋のような閉空間と、ドア、廊下や階段といった移動路を認識し、経路探索・シミュレーションを行うために必要な部屋間の接続関係をモデル化する必要がある。IFCでは部屋といったオブジェクトやドアや窓などの属性情報、および、それらの接続関係も記述されているため、そこから部屋等の空間をノードとし接続関係をネットワークで表現したトポロジーマップを生成する(図4)。避難経路の策定には、この建物の座標情報とトポロジーマップを使用する。

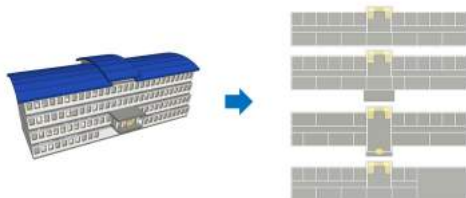


図3 IFC[7]からの2次元情報の抽出

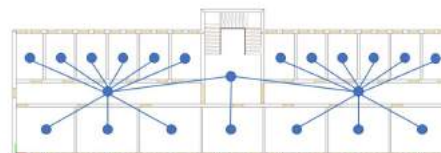


図4 トポロジーマップの例

### 3.3. 各メタヒューリスティクスによる避難経路の策定

本論文の範囲での目標は、避難経路の最適化のために、焼きなまし法、タブーサーチ、アントコロニー最適化、粒子群最適化、遺伝的アルゴリズムといったメタヒューリスティクス手法をそれぞれ単独で利用し、適用可能性、有効性の評価するところまでと設定した。そこで、得られた知見をもとに、各手法を組み合わせ活用するのは、今後の課題と位置づける。

メタヒューリスティクスの各アルゴリズムの基本は、以下のような流れである。

- 1) 過去の探索結果を利用して、新たな解を生成(探索)
- 2) 生成した解を評価
- 3) 解の評価情報を、解の探索に反映

1), 3)に関しては各手法により異なってくるが、2)の解の評価に関しては共通する。今回は「解の評価方法」として、被災者分布から混雑度を考慮するために、簡易的な離散型シミュレーションを行い、シミュレーションによって求めた、避難者全員の平均避難時間を評価値とする。シミュレーションは、IFCから求めたトポロジーマップとセンサから得られた建物内の火災状況・避難者分布をもとに行う。本研究では、発

災後の短時間での経路策定を目指しているため、厳密なシミュレーションではなく、シミュレーションを簡素化することで実行速度の向上を図っている。具体的には、近くにいる被災者は、まとまって集団的に行動し、個別の判断で行動しないことを前提としている。すなわち、その集団は与えられた経路通りに移動し、集団から逸脱した行動をとるメンバはいないものと仮定する。これにより、行動主体としてのエージェントを、個体から集団単位で扱うことで、計算量を減らしている。

また、解の評価を建物全体の避難シミュレーションによって行うため、1つの解に、単一の場所からの避難経路だけでなく、各場所からの避難経路情報を持たせる必要がある。したがって、今回は、避難の開始場所数の長さを持つ配列とし、配列要素として、各場所からの避難経路を可変長の配列として保持する2次元配列を解表現とする(図5)。



図5 解表現

終了条件としては、時間制限を設けるとする。解の探索途中だとしても、それまでに得られている解の中で最も良い解を返すことができるので、設定した避難誘導の開始時刻(発災発覚後5~10分以内)に、その時点で、適切と判断できた避難経路を提案することができる。また、初期解集団の生成時に、各部屋からの経路をランダムに生成するだけでなく、出口までの最短距離を持った個体を1割生成し、初期解集団に含めることで、静的情報だけから求められる最適避難経路よりも劣った解にはならないようにしている。

焼きなまし法(SA)[8]とタブーサーチ(TS)[9]による解探索方法の設計において、最も重要なのは、「解の近傍」をどのように定義するかという点である。一般的な経路探索問題における「解の近傍」は、既存経路の途中から違う経路に置き換えたものとするのが、一般的である。今回の解表現だと、複数地点からの経路を保持しているため、そのまま当てはめることができない。そこで、与えられた解候補の保持する地点からの経路の2割を、違う経路に変化させた解表現を、その近傍解として定義した。SAにおける遷移確率は初期値を0.5、最終値を0.001とした。TSのタブーリストのサイズは9とした。

アントコロニー最適化(ACO)[10]に関しては、各避難開始場所をアリの巣とし、各場所ごとにアリが経路を生成し、それらの経路を取りまとめたものを一つの解とした。ACOにおける解の改善は、フェロモンが多く残存している経路を選択するように新しい解を作るところにある。そのため、すべてのアリで共通の採餌行動の場、つまり同じフェロモンマップを参照すると、どのアリもフェロモンにつられて同じ経路を通るようになってしまい、経路が分散されにくくなってしまう。これでは避難者の分散という目的に明らかに合致しない。そこで、各避難場所ごとに採餌行動の場を生成するものとした。

粒子群最適化法(PSO)[11]は、解の更新をするために、解の差分を求める必要がある。今回の解表現のように、離散的な解の場合は、単純に差分を求めることができない。そこで、経路をノードの集合とみなし、集合の差を求め、その差を速度ベクトルとして解の更新を行った[12]。ここでの集合の差は、ローカルもしくはグローバルベストのみ経由しているノードを意味する。そのノードを経由するように現状の経路を更新させた。

$$x'_i = \begin{cases} x_i + (\hat{x}_i - x_i) & (if \text{rand}[0,1] < w) \\ x_i + (\hat{x}_{gi} - x_i) & (if w \leq \text{rand}[0,1]) \end{cases}$$

通常PSOでは、解  $x_i$  から、重みづけ定数  $w$  に応じて、ローカルベスト  $\hat{x}_i$  とグローバルベスト  $\hat{x}_{gi}$  それぞれの差を反映して、解を更新する。ローカルベストとグローバルベストの経路によっては、両者との差を反映すると冗長な経路を取り得るため、確率的に差を反映させて解更新させた。

遺伝的アルゴリズム(GA)[13]は、各部屋からの経路を遺伝子として、部屋の数だけ遺伝子を配列したも



のを染色体，個体とみなした．交叉方法は，今回の解表現では，遺伝子の順序は適応度に影響せず，複数の経路情報を保持するため，単一の経路問題で通常採用される 1 点交叉等では不適で，一様位置交叉を採用した．親となる個体対のどちらかを遺伝させるかを遺伝子座ごと，つまり各避難開始場所ごとに決めた．突然変異方法は，染色体の配列の中からランダムに選び出し，新しい遺伝子，経路に置き換えた．交叉率は 0.6，変異率は 0.2 とした．選択は，エリート保存とトーナメント方式を採用し，トーナメントサイズは 6 とした．以上のように，遺伝的操作を行い，世代を繰り返した．

### 3.4. 施設内にいる避難者への通知

策定した避難経路を，建物内の各部屋（ホテルなどのドアの内側に避難経路図が掲示してあることがよくあるが，そのような部分）にディスプレイを設置してあることを仮定し，そのディスプレイに，IFC から抽出した建物内の見取り図とセンサから得られた現在の火災状況・策定した推奨避難経路を表示する．このディスプレイは，独立した通信モジュールを備えたタブレット型端末のように，バッテリー駆動で外部のクラウドサーバから送信された避難経路図が表示できることを仮定している．施設全体の状況を伝達することで，避難者は建物の外までの安全な避難経路を把握できるうえに，推奨避難経路を表示することによって，特定の経路へ避難者が集中する混雑状態を緩和できると期待している．

## 4. 実験・評価

本研究において，構築した避難経路策定方法は，建物内において火災が発生した場合の経路を策定するものである．したがって，評価・検証実験の内容としては，建物内での火災が発生した状態を仮想的に作りだし，その情報をもとに経路を策定し，単なる最短経路で避難した場合と比較することになる．歩行速度は，階段や煙の濃度・人の混雑度などの状況によって変化させた [14][15][16]．

まず，この実験の条件を以下に記す．

- 実験に用いる建物構造は，図 6 を用いる
- 経路策定に用いるトポロジーマップはあらかじめ IFC から生成しておく
- 火災情報は，ガス格子セルオートマトン [17] により，煙の仮想データを生成し，センサー配置情報（図 7）と照らし合わせ，センサー情報として与える
- 避難者は，各部屋に 1～10 人（正規乱数）いるものとする

火災状況に関しては，多数考えられるが，ここでは一例を取り上げて考えた（図 8）．



図 6 建物見取り図

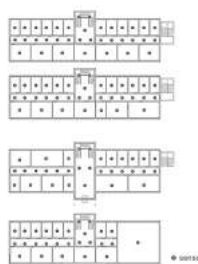
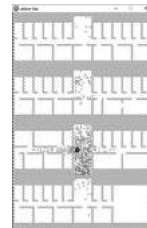
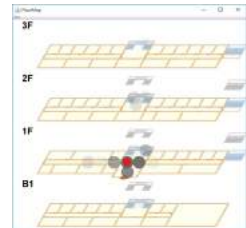


図 7 センサー配置



[1] Lattice Gas CA



[2] センサ情報

図 8 火災状況

以上の実験条件で，最短経路の場合と比較して避難者平均避難時間（ステップ数）が改善度合いを求めた．実験はランダムに生成した 3 種類の在館者分布で各 5 回行い，改善度の平均を求めた（表 1，図 9）．

$$\text{改善度} = \frac{\text{最短距離経路の避難時間} - \text{各手法によって求めた経路の避難時間}}{\text{最短距離経路の避難時間}} \quad (1)$$

まず，図 9 を見ると，ACO だけ解の改善がほかの手法に比べて極端に低い．グローバルベストな解の共有方法がフェロモンによる経路選択への影響のみだと，早期の解の収束には不向きであると考えられる．ACO 以外の群知能の PSO と GA に関しては，ACO と比較すると近似解への収束が早い．その中でも，

表1 各手法での改善度

手法	繰り返し数			
	5	10	20	30
SA	0.329	0.341	0.346	0.347
TS	0.297	0.338	0.347	0.347
GA	0.242	0.310	0.341	0.343
PSO	0.232	0.255	0.267	0.294
ACO	0.085	0.090	0.119	0.127

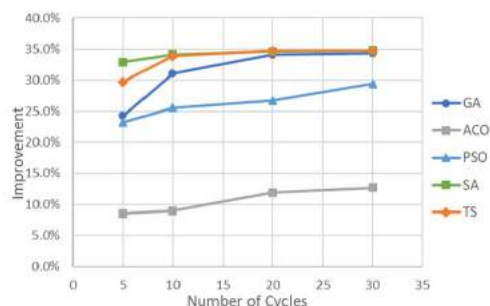


図9 各手法での改善度

GAの交叉や突然変異による解更新の手法は、PSOのグローバルベストとの差分による解更新よりも、大胆な探索ができるため、GAの方がPSOに比べて近似解への収束が早い。近傍探索ベースのSAとTSは、繰り返し回数が少ない段階から、改善度が比較的高い結果を得られている。今回、実験条件として採用した建物構造だと、出口や階段の数から取り得る経路案が少なく、解空間が比較的小さい問題であるため、局所解が全体最適解になっている可能性が考えられる。今回の問題では、近傍探索ベースの手法が向いているという結果になったが、建物の条件を変えた場合での実験を行い検討する必要がある。

## 5. まとめ

規模が小さくない単純な間取りの建物において、火災発生から短時間の間に、火災状況や避難者分布を考慮した避難経路を自動で探索・各室へ通知する想定の実験を行う場合、近傍探索ベース手法である焼きなまし法やタブーサーチが有効であることを確認した。しかしながら、建物の条件により有効な手法が異なることが予想されるため、他条件での検討が必要である。今回の建物では近傍探索ベースのような、良い探索結果近辺を探索する手法が向いているが、経路候補が多い建物に関しては、GAなどの創発的な探索が向いていると推察されるため、他の建物での検討をし、建物の構造に応じた手法を明らかにし、どのような建物にも適用できるような手法が求められる。

## 参考文献

- [1] 海老原学, 掛川秀史: “オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル,” 日本建築学会計画系論文集, 467号, pp.1-12, 日本建築学会, 1995.
- [2] 木村謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峰岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史: “マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現 歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築,” 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.636, pp.371-377, 日本建築学会, 2009.
- [3] Kayoko Yamamoto, and Yuichiro Shimura: “Searching method for the optimal evacuation routes at the time of earthquake outbreak,” 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), IEEE, 2017.
- [4] Qiuping Li, and Zhixiang Fang: “Multiobjective Evacuation Route Assignment Model Based on Genetic Algorithm,” 18th International Conference on Geoinformatics, 2010.
- [5] Xinlu Zong, Shengwu Xiong, Zhixiang Fang, and Wanru Lin: “Multi-objective Ant Colony Optimization Model for Emergency Evacuation,” Sixth International Conference on Natural Computation, 2010.
- [6] Raspberry Pi Foundation UK registered charity 1129409: “Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi,” <https://www.raspberrypi.org/>, 閲覧日:2018/01/11.
- [7] University of Auckland: “KIT: AC11-Institute-Var-2-IFC,” <http://openifcmodel.cs.auckland.ac.nz/Model/Details/110>, 閲覧日:2018/10/20.
- [8] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi: “Optimization by Simulated Annealing,” Science 220 (4598), pp.671-680, American Association for the Advancement of Science, 1983.
- [9] Glover Fred: “Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence,” Computers and Operations Research 13 (5), pp.533-549, 1986.
- [10] M Dorigo: “Optimization, Learning and Natural Algorithms,” Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, 1992.
- [11] J. Kennedy, R. Eberhart: “Particle swarm optimization,” Proc. Int. Conf. on Neural Netw., pp.1942-1948, Nov./Dec., 1995
- [12] A. Toofani: “Solving Routing Problem using Particle Swarm Optimization”, International Journal of Com-

puter Applications (0975-8887), Volume 52 No.18. 2012

- [13] John H. Holland: “Adaptation in Natural and Artificial Systems,” The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [14] 日本建築学会: “建築物の火災安全設計指針,” 丸善, 2002.
- [15] 日本火災学会: “火災と建築,” 共立出版, 2002.
- [16] 兼田敏之: “artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション,” 構造計画研究所, 2010.
- [17] U. Frisch, B. Hasslacher, and Y. Pomeau: “Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equation,” Phys. Rev. Lett., 56, 1505, American Physical Society, Elsevier, 1986.