

津波避難時の自動車利用が住民の避難挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究

徳島大学 先端技術科学教育部 知的力学システム専攻 建設創造システム工学コース 構造

工学研究室

垣内 貴行

1. はじめに

1.1 概説

我が国は、世界的にも地震が多発する地域に位置しており、歴史的に繰り返し大規模な地震に見舞われている。2011年3月11日には日本最大規模のマグニチュード9.0の2011年東北地方太平洋沖地震に見舞われ、東北地方から関東地方にかけて東日本一帯に甚大な被害をもたらした。また、この地震に伴って発生した大津波によって、死者15,000人以上、行方不明者3,000人以上の多数の人的被害が生じた。この中には近くに高台は無く、避難に自動車を使用した結果大渋滞に巻き込まれ、車が避難に役立った面も否定できないが、犠牲となった人も数多くいる。これにより東日本大震災後の地震・津波対策を検討している国の中央防災会議専門調査会は津波からの避難方法を、現行の「原則自動車禁止」から、「原則徒歩」に変更する方針を決めている。しかし、内閣府の調査によると、今回の震災では、生存者の6割が車で避難していた一方、その3分の1は渋滞に巻き込まれたと回答していた。¹⁾

こうした津波による人的被害を軽減するために沿岸構造物や避難場所の整

備などの対策が行われているが、被害が全く生じないような対策を講じることは実質不可能である。したがって、津波による犠牲者を出さないためには、地震発生後速やかに住民全員が安全な場所に避難することが最重要である。

住民全員が確実な避難を行うことができるよう、避難場所までの各住民の所要時間や混雑状況、避難場所の収容可能人数などの避難活動における問題点を事前抽出することが必要である。また、住民個々の避難意識向上を図ることも不可欠である。そのためには、想定される様々な状況下で全住民参加の避難訓練を実施することが有効ではあるが、現実的には全住民参加の下での実施は容易ではない。この代替手段として、住民個々の挙動を反映し得る避難シミュレーションを行うことが有用であり、地区の避難安全性評価や津波対策に活用していくべきである。

1.2 研究目的

本研究では、様々な地域で適応可能な汎用性のあるマルチエージェントシステムを用いた避難シミュレーションの開発を行い、徳島県川内町の一部地域を対象として各個人の避難行動をシ

ミュレーションで再現させる。また本研究では、対象地区を避難モデル地区として東日本大震災時に問題となった自動車利用を考慮したシミュレーションを作成する。これより歩行者、自動車の複合的な避難を考慮した避難シミュレーションを実施し、津波避難時の自動車利用が住民の津波避難挙動に及ぼす影響を解析的に検討する。

2. 避難シミュレーションについて

本研究では、ステップに分けてシミュレーションを実施する。これは最短経路の計算とエージェント毎の避難経路の定義は計算時間がかかるため、別途計算してファイルを保存しておくためである。図 2.1 に示すような流れで避難シミュレーションを実施する。

まず本研究の避難シミュレーションシステムで用いる「道路(リンク)」、「交差点(ノード)」などの避難空間の属性データを作成する(図 2.1①)。このデータよりネットワーク型(ノード・リンク)の避難マップを作成する。そして、次にダイクストラ法を用いて、すべてのノードからの最短経路を計算する(図 2.1②)。その後、避難者を生成し、最短経路計算結果を入力する。(図 2.1③)。最後に、結果をアニメーションとリアルタイムのグラフ等で出力す

る。(図 2.1④)。

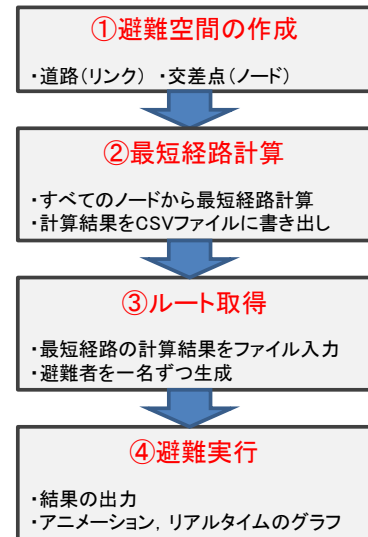


図 2.1 避難シミュレーションの流れ

2.1 道路ネットワークの構築

本研究では道路ネットワークを避難空間と考えシミュレーションを行う。一般に交通ネットワーク解析に用いられる道路ネットワークは、交差点をノード、道路(道路中心線)をリンクとし、それぞれに番号を付し、ノードとリンクの接続関係や各リンクの道路幅員などのデータの作成が必要である。

そこで、本研究では、artisocの機能の一つである描画ツールを用いて道路ネットワークを作成した。

2.2 シミュレーション実行における三つのステップ

本シミュレーションモデルを実行する過程において三つのステップが必要

である。また、**artisoc** の機能の一つであるコントロールパネルを使用しており、これには実行モードが搭載されている。この実行モードには「避難実行」、「最短経路計算」、「ルート取得」の三種類がある。本モデルでは、この実行モードを用いて計算や結果の出力を行う。実行モードについて以下に説明する。

2.3 最短経路計算

まず初めてモデルを実行する場合、最短経路計算が必要となる。まずツリー上の **DijkstraLink** のプロパティを開いて初期値を 0 と設定する。次に、実行モードにおいて最短経路計算を選択し、シミュレーションを実行する。その場合、作成したネットワーク上のノード同士の距離を算出し、逆方向のリンクを作成する。その後ダイクストラ法による最短経路取得が行われる。

そして、このダイクストラ法を利用した最短経路の計算を行ってシミュレーションを終了する。そして計算結果は **dijkstra.csv** に保存される。例えば 4 章で述べる対象地域は交差点の数が 751 道路の数は 834 であり、選択しうる交差点と交差点のパターン数は 563,250 であり、この計算経路を計算している。この最短経路計算を一度行

うと、リンクとノードの位置を変えない限り、この行程は省くことができる。

2.4 ルート取得

最短経路計算を行った後、実行モードでルート取得を行う。このルート取得では、先ほど行った最短経路計算で得られた結果を使用し、**Building.csv** で設定したノードに避難者を生成する。そして避難者それぞれのルートを定義し、シミュレーションを終了する。終了する際、徒歩による避難者ならば **evacuee.csv** に、自動車による避難者ならば **car.csv** ファイルに避難者のルートを書き出し、避難実行の際、使用する。ここでの手順はコントロールパネルで①避難者の自動車の利用率②自動車車速③歩行速度④目的地 ID を設定した後、実行モードをルート取得に切り替えてシミュレーションを行う。

2.5 避難実行

最後に実行モードを避難実行にし、シミュレーションを開始すると結果が表示される。この時 **result.csv** ファイルに各ステップ時の全体、徒歩による避難者、自動車による避難者の数を記録する。

2.6 歩行者の基本移動モデル

歩行者の基本モデルについて以下に説明する。

まず、歩行者エージェントの目標とするノードを取得する。これは 2.4 章で説明したルート取得のステップで計算し、得たノードである。この目標に向かって歩行者エージェントは一定の速度で移動する。歩行者エージェント同士の衝突や混雑は本モデルでは考慮していない。目標のノードに到達すると、新たな目標を更新し、それに向かって、また移動を開始する。避難終了の判定がなされるまで、このサイクルを繰り返して最終目的地へと向かう。歩行者の移動フローは以下の図になる。

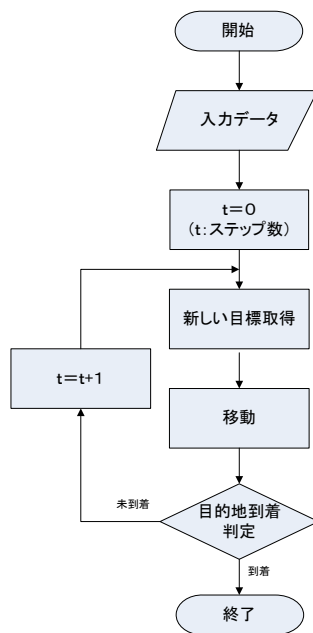


図 2.2 歩行者の移動フロー

次に自動車を利用した避難者の基本

移動モデルについて説明する。

2.7 車の渋滞を考慮した移動モデル

地震などの災害発生時には、多数の避難者が同時に避難を開始し始める。また、自動車の渋滞が発生すると考えられる。渋滞は、一般的に交通容量の不足、または走行中気付かないうちに速度低下してしまう車があり、後続の車との車間距離が縮まることから、次々に後続の車がブレーキを踏むことになり、渋滞が起こると考えられている。そのためそれらを避難シミュレーションで再現しなければならない。

自動車エージェントはすべて視界を保有しており、前方を走る自動車が視界に入らない限り、基本走行速度で走行する。基本走行速度は本モデルでは 40km/h としている。また、基本走行速度は±5%の速度のブレを伴う。このブレを持たせることで自然に車間距離が縮まることになる。なお、自動車エージェントと歩行者エージェントはお互いに干渉はしない。また、自動車の移動フローは以下の図のとおりである。

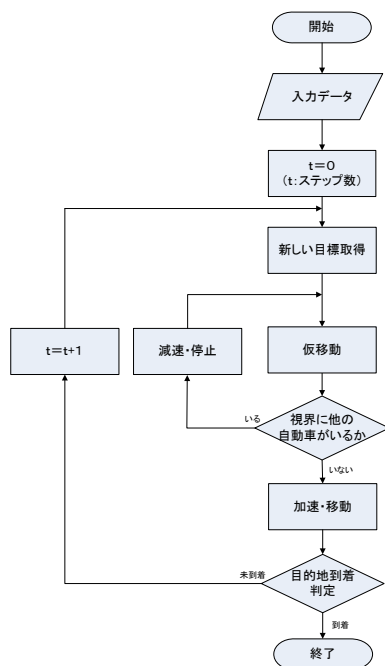


図 2.3 自動車の移動フロー

3. 実在地区を対象とした津波避難シミュレーション

本研究では、第 2 章で説明した手法を用いて津波避難シミュレーションを行った。本章では、今後の発生が予測されている南海地震において津波による被害を受けるとされている徳島県徳島市川内町の実在地区を対象として行った津波避難シミュレーションの前提条件および結果を示す。

3.1 シミュレーションの前提条件

システム適用地区として、徳島市川内町にある、小松西、小松東、小松北、旭野、下別宮西、下別宮東の地域を選定した。このシステム適用地区について位置を図 3.1 に示す。対象地域は吉

野川・宮島江湖川・今切川に囲まれる三角州であり、内陸側への交通手段が実質 3 本の道路しかない。3 本のうち、1 本は歩行者または自転車用の橋梁であり、自動車が通行可能であるのは、吉野川沿いの道路もしくは宮島江湖川にかかる相生橋しかない (図 3.1)。このため、この地域から自動車避難する場合、混雑が予想される。この地域をシステム適用地区に選定したのは、津波避難をする際、車の利用度や混雑によって避難時間への影響が大きいためである。

本節では、シミュレーション対象地区の道路ネットワーク、対象住民ならびにシミュレーションにおけるその他の前提条件について説明する。



図 3.1 システム適用地区位置図 (徳島県徳島市川内町)

3.2 対象地区の道路ネットワーク

徳島県川内町内のシステム適用地区（小松西，小松東，小松北，旭野，下別宮西，下別宮東）の道路ネットワークを図 3.2 に示す．これは GIS と artisoc の描画ツールを用いて構築している．本モデルでは避難者は阿波しらさぎ大橋に全員収容可能としている．



図 3.2 対象地区のノード・リンク

3.3 対象住民

本章における避難シミュレーションの対象住民は 6 地区合計 458 世帯の住民である．対象住民数は，表 3.1 に示すように，小松西区が 37 世帯，小松東地区が 63 世帯，小松北地区が 21 世帯，旭野地区が 147 世帯，下別宮東地区が 46 世帯，下別宮西地区が 144 世帯の計 458 世帯である．また，移動は世帯毎に行うものとし，基本歩行速度は 1.4m/s，自動車での走行速度は 40km/h としている．

表 3.1 対象地区の世帯数（徳島市 HP）

川内町	小松東	37
川内町	小松西	63
川内町	小松北	21
川内町	旭野	147
川内町	下別宮東	46
川内町	下別宮西	144
	計	458

3.4 その他の前提条件

地震発生時刻は一般に在宅の可能性が高い早朝とし，全住民が在宅しているものとした．さらに，家屋倒壊等による負傷がなく，地動時間（2～3 分）および避難準備時間（3～4 分）を考慮した地震発生の 7 分後に自力で避難を開始するものとした．対象とした徳島県徳島市川内町の沿岸への津波到達時間は地震発生約 53 分後と想定されている²⁴⁾．したがって，地震発生の 53 分後までに避難することが必要であると判断した．

避難時は最短時間経路を通り，最寄りの避難場所（阿波しらさぎ大橋）に向かうこととした．道路混雑時は歩行速度の低下を考慮しないが，車同士での渋滞は考慮する．

本章で行う避難シミュレーションのパターンを表 3.2 に示す．全体の避難者における自動車の割合を 10% 上げていき，避難挙動への影響をシミュレートした．また，各パターン 5 回の結果

の平均をとった。また表には避難完了率の標準偏差の平均（二乗平均）も示す。表の数値より比較的ばらつきのないデータが取れたと考える。

表 3.2 シミュレーションパターン

パターン	車の割合	歩行者の割合	避難完了率の標準偏差(%)
1	0%	100%	0.00
2	10%	90%	0.91
3	20%	80%	4.00
4	30%	70%	1.01
5	40%	60%	0.99
6	50%	50%	1.24
7	60%	40%	1.24
8	70%	30%	2.16
9	80%	20%	1.51
10	90%	10%	1.31
11	100%	0%	0.00

3.5 避難シミュレーション結果

以下にシミュレーション結果を示す。

3.5.1 避難完了時間と避難完了率曲線

本研究で開発した手法を用いて、避難シミュレーションを行った結果を示す。表 3.3 は各シミュレーションパターンにおける 6 地区全体の避難完了時間およびそれぞれのパターンの歩行者・自動車の避難完了時間の平均値を

示したものである。

現在、対象地区への最大波到達時間は 53 分となっており、この結果を見る限りでは、すべてのパターンにおいて津波が到達するまでに避難が完了する。この表から、自動車の割合が増えるにつれて、全体の避難完了の時間が遅くなるのが分かる。自動車の割合が 10%～60%までの場合、自動車が先に避難完了しているが、60%を超えるあたりから、歩行者のほうが先に避難を終えている。それと同時に全体の避難完了時間もだんだんと増えていることが分かる。これは、自動車の利用率が 60%を超えるあたりから、非常に大きな渋滞が発生しており、自動車の避難完了時間が全体の避難完了時間に影響しているためだと考えられる。出力結果より相生橋周辺と吉野川沿いの道路で大きな渋滞が発生していることが分かった。そのため、特に相生橋において渋滞緩和などの対策が必要となる。橋梁の幅員を広げることや、災害時に

表 3.3 シミュレーション結果

パターン	自動車の割合	車速	歩行者の割合	全体の避難完了時間	歩行者の避難完了時間	自動車の避難完了時間
1	0%	40km/h	100%	35分 43秒	35分 43秒	なし
2	10%	40km/h	90%	35分 43秒	35分 43秒	12分 36秒
3	20%	40km/h	80%	35分 43秒	35分 43秒	15分 48秒
4	30%	40km/h	70%	35分 43秒	35分 43秒	21分 17秒
5	40%	40km/h	60%	35分 28秒	35分 28秒	24分 50秒
6	50%	40km/h	50%	35分 10秒	35分 10秒	27分 42秒
7	60%	40km/h	40%	35分 28秒	35分 28秒	32分 27秒
8	70%	40km/h	30%	36分 16秒	35分 05秒	36分 16秒
9	80%	40km/h	20%	40分 42秒	34分 34秒	40分 42秒
10	90%	40km/h	10%	44分 03秒	34分 51秒	44分 03秒
11	100%	40km/h	0%	46分 30秒	なし	46分 30秒

において交通誘導員等が必要である。また、相生橋は昭和 40 年に竣工しており平成 26 年現在、49 年が経過している。老朽化が進んでおり、地震時に落橋した場合、津波到来までに避難完了できない可能性がある。よって相生橋に代わる新たな橋が必要だと言える。

そして、パターン 1 から 7 までは、全体の避難完了時間が速くなっておらず、ほとんど同じような結果となっている。これは避難時間が一番最後に避難する避難者の避難完了時間に依存するからである。そのため結果として全体の避難完了の時間には影響がなかったと考えられる。移動手段の振り分け方によっては、全体の避難完了の時間がさらに短くなると考えられる。避難完了率曲線は住民の初期位置および移動手段の選択によって上昇割合が急激に変化することが考えられる。また、遠方に居住している住民は、できるだけ早く住居を出発または移動手段を自動車にするなどできるように準備をしておくことが必要であると考えられる。

また、パターン別の避難完了率曲線は図 3.3 となっている。

結果より、パターン 1 からパターン 7 まで全体の避難完了時間は早くなっておらず、ほとんど同じ結果となっていることは述べたが、グラフの形状より

任意の時間の全体の避難完了率を切り取った時、自動車の使用率が 60% までなら避難完了率が高いことが分かる。つまり、全体の避難の効率性は向上しているといえる。これについては後で詳しく述べる。

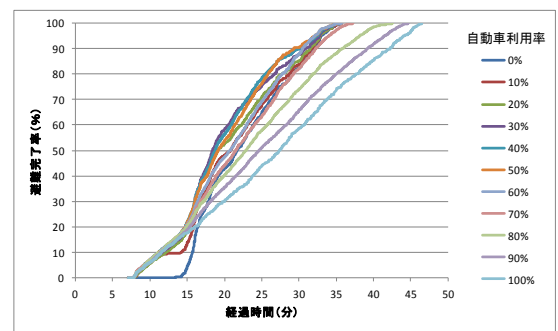


図 3.3 全パターンの全体の避難完了率曲線

3.5.2 地区避難安全性評価指標 I

地区避難安全性評価指標 I とは藤原⁶⁾が開発した地区の避難安全性を数値で表せる指標のことであり、個人の移動の様子や避難完了率の時系列変化などの避難プロセスを考慮した避難状況の分析ができる。つまり、避難シミュレーション結果から得られる情報を基に、「その地区においてどの程度安全にスムーズに津波避難が可能であるか(避難安全性)」を示すことができる指標のことである。

地区避難安全性評価指標 I は各地区の避難安全性を「ある避難完了率 r に対する地震発生からの経過時間 t_r が津

波到達予想時間 t_a より短いほど、その地区は津波避難に対して高い安全性を有している」と考える。これは時間差 $(t_a - t_r)$ が各避難完了率 r において大きくなればよいということである。したがって、地区避難安全性評価指標 I として次式が得られる。

$$I = \frac{\int_0^{100} (t_a - t_r) dr}{\int_0^{100} t_a dr} = \frac{\int_0^{r(t_a)} (t_a - t_r) dr}{100t_a}$$

式 (3.1)

ここで、避難完了率が r (%) となるときの地震発生からの経過時間を t_r 、地震発生から津波が到達するまでの予想時間を t_a とする。 t_r 、 t_a の両方を避難開始からの時間とすることもできるが、避難意識の向上により出発時刻が早くなることも避難安全性が高まることになるため、地震発生からの時間としている。

なお、式 (3.1) は同一地域において固有の値となる津波到達予想時間 (t_a) を用いて無次元化している。また、式 (3.1) の分母は図 3.4 に示す避難完了率曲線における赤色部の面積に相当し、式 (3.1) の分子は図 3.4 に示す避難完了率曲線における黒斜線部の面積に相当する。式 (3.1) について考えると $I \leq 1$ であり、 I が 1 に近くなるほど避難安全

性が高いといえる。一方で、津波到達予想時間における避難完了率が低いほど I は小さくなる傾向がある。

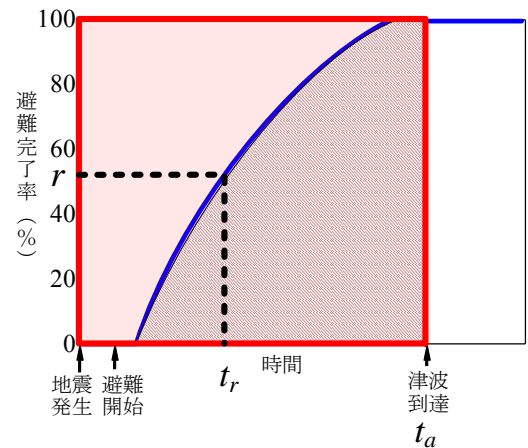


図 3.4 避難完了率曲線と地区避難安全性評価指標の関係

地区避難安全性評価指標 I を使うことで、先ほどの結果の自動車の利用率を上げたことによる避難の効率性を調べることができる。避難安全性評価指標の結果は表 3.4 のようになった。

この結果より避難安全性評価指標値は自動車の利用率が上がるにつれて向上し、パターン 5、自動車利用率が 40% を超えると低下することが分かる。下の図 3.5 は左の縦軸に避難安全性評価指標値、右の縦軸に避難完了時間を取り、折れ線グラフは評価指標値、棒グラフは完了時間を表している。

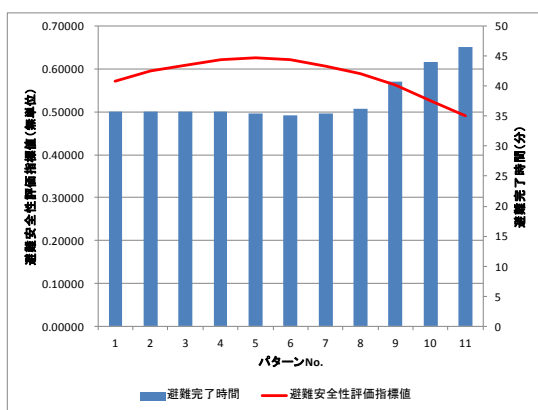


図 3.5 避難完了時間と避難安全性評価指標値との関係

このグラフからもパターン 1~11 の中で評価指標の値はパターン 5 が最も高くなり、自動車の利用率が 40%程度である時が最も避難安全性を有していると判断できる。これは避難完了時間がその地区で最後に避難完了する避難者の避難完了時間に依存することや、自動車の利用率が高まるにつれて避難完了率の上昇が大きい時間帯が早く、このことが指標値に反映されているためといえる。

表 3.4 避難完了時間と指標値の関係性

パターン	全体の避難完了時間	歩行者の避難完了時間	自動車の避難完了時間	避難安全性評価指標値
1	35分 43秒	35分 43秒	なし	0.57245
2	35分 43秒	35分 43秒	12分 36秒	0.59527
3	35分 43秒	35分 43秒	15分 48秒	0.60829
4	35分 43秒	35分 43秒	21分 17秒	0.62212
5	35分 28秒	35分 28秒	24分 50秒	0.62652
6	35分 10秒	35分 10秒	27分 42秒	0.62295
7	35分 28秒	35分 28秒	32分 27秒	0.60625
8	36分 16秒	35分 05秒	36分 16秒	0.58968
9	40分 42秒	34分 34秒	40分 42秒	0.56197
10	44分 03秒	34分 51秒	44分 03秒	0.52684
11	46分 30秒	なし	46分 30秒	0.49180

4. 結論

本研究では、自動車の利用率と渋滞を考慮し得る避難シミュレーション手法を構築し、モデル地域に適用した。シミュレーション結果より自動車の利用率が 40%の場合に避難の効率が最も高くなり、60%を超えると避難完了時間が長くなることが分かった。今後は本手法をより現実的な避難シミュレーションができるように拡張するとともに、それを用いて避難における自動車の活用方法について検討する予定である。また、他の地区へも適用をし、住民の防災意識向上のためのツールとしても広く活用してゆく予定である。

5. 参考文献

- 1) 防災対策推進検討会議：津波避難対策検討ワーキンググループ 第5回会合
- 2) 文部科学省研究開発局地震・防災研究課 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：今までに公表した活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧
<http://www.jishin.go.jp/main/c/houkihyoka/kaikou.htm> ,
[2012.1.1.](http://www.jishin.go.jp/main/c/houkihyoka/kaikou.htm)
- 3) 徳島県：津波高暫定値報告書，
2011.12.22.
- 4) 日本建築学会：建築設計資料集成一人間，丸善，2003.
- 5) 日本火災学会：火災便覧 第3版，共立出版，1997.
- 6) 藤原康寛，成行義文，源貴志，三神厚：Petri Net を用いた津波避難シミュレーション手法の開発と地区避難安全性評価への適用，土木学会四国支部第15回技術研究発表会，pp51-52，2009.
- 7) 天野健：GIS を用いた震後の避難・救援期におけるリンクの重要度評価に関する研究
- 8) 山影進：人工社会構築指南，書籍工房早山，2011
- 9) 兼田俊之：artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション

ン，書籍工房早山，2010