室内ゾーニング法と避難路ネットワーク法による地震時居住空間危険度診断システムの開発

DEVELOPMENT OF DIAGNOSIS COMPUTER SYSTEM FOR SEISMIC CASUALTY RISK POTENTIAL IN DWELLINGS BASED ON THE INDOOR ZONING METHOD AND THE REFUGE ROUTE NETWORK METHOD

岡田成幸 —*1 黒田誠宏 —*2
菅 正史 —*3

Shigeyuki OKADA —*1 Nobuhiro KURODA —*2
Masashi KAN —*3

キーワード：
居住安全性, 避難経路, 診断, 人的被害

Keywords:
Indoor space safety, Refuge route, Diagnostic check, Human casualty

In addition to earthquake-resistant construction of dwellings, we must consider the indoor space safety from the viewpoint of casualty. We developed a diagnostic system aimed at seismic indoor risk reduction based on the evaluation algorithm of seismic casualty risk potential in dwelling space and of evacuation risk to outdoors. This computer system enables to make diagnosis of indoor safety easily and to support a safety arrangement planning of furniture, and besides to specify the victims of the family, the dangerous space in the dwelling and the risky zone of twenty-four hours a day as appropriate information to take countermeasures.

1. はじめに

気象庁震度 6 弱以下の揺れにおいては、注意深い耐震設計の下に建設された建物ならば、その多くは阪神淡路大震災における震災の帯内で見られたようなパンケーキ崩壊は起こさない。しかしながら、そのような建物においても家具転倒等による室内散乱の結果、多くの負傷者の発生は残念ながら避けることはできないのが実状である。既往地震における負傷者の発生因に関する研究^{1~4)}は、地震で揺れている最中の家具転倒の直撃により、また揺れ収まり直後に脱出する際に散乱物により負傷するケースが多いことを示している。

家具転倒から身を守るための事前対策として「家具の壁面への固定」が推奨されている。もちろん、重要な対策であり家具の固定をキャンペーンする運動は積極的に行っていくべきであろう。まずは住人の意識改革が根本になくなくてはならないからである。しかし、これで全てが解決するとは思われない。その有効性が言われているにも拘らず、実施率は極めて低い(静岡県防災局調査・平成 11 年度の県民の意識調査によると、東海地震が懸念される折、地震に関心があると答えた者は 93%いるにも拘わらず、家具固定の実施率は「大部分が固定してある」と「一部を固定してある」を合わせても 49.5%であった)。家具固定の実施が進まない理由として、

- ①家具固定は技術的にかなり難しい。
- ②家具に傷をつけることもあり、心理的に実施したくない。
- ③防止措置は家具の使い勝手を悪くし日常生活に不便を強いる。
- ④配置場所に固定すべき有効な構造体がない。間仕切り壁に固定したならば、壁ごと倒れてくることも考えられかえって危ない。

などが、考えられる。家具は壁に固定しておけば良いと断言できるほど事柄は単純ではない。上記問題点の解決策として、そして、家

具固定をより効果的対策に進化させるための方策として、家具の配置法による危険空間と安全空間の峻別法を提案する。行動不能になる場所は危険空間にしない、危険と安全空間に関する情報を住人に事前に与え、地震時には危険空間から遠ざかって、身を守るような仕掛けを作る。家具固定が出来ない空間の安全化対策であり、家具固定を実施できたとしてもその固定システムが地震時に破断したときのことを予め想定し、フェールセーフとして安全空間を確保しておく。このような多段階防備システムで室内安全を確保することにより効果的な対策となっていくと思われる。

筆者らは以上の観点より、個人ベースでの防災対策を支援する一環とし、住空間の地震時の危険度を予め総合的に診断するアルゴリズムを提案してきた。一つは、地震時の揺れている最中の家具転倒・散乱の発生確率に住人の持つ災害回避行動能力を乗じて室内の単位空間ごとの危険性を評価するものであり(室内ゾーニング法⁵⁾)、他の一つは揺れが収束した直後に居住者が避難移動する際の避難ルートの危険性をネットワーク解析するもの(避難路ネットワーク法⁶⁾)である。本報告は、これら二つの危険度診断アルゴリズムをコンピュータに実装し、建築や災害の特別な知識を持たない者でも、簡単な操作の下に、地震時に安全に暮らすための方法提示を支援する情報システムを実現したので、それについて述べるものである。システムに導入する診断アルゴリズムは、住家のみならず不特定多数が集まる娯楽空間(非住家施設)においても有効であるが、本論文では、以下、住家を対象としたシステムに特化して記述する。

2. 診断アルゴリズム

地震による負傷を防ぐには、先に述べたとおり「揺れている最中

*1 北海道大学大学院工学研究科 助教授・工博
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

*2 北海道大学大学院工学研究科 修士(工学)
(現在 東北大学金属材料研究所)

*3 北海道大学大学院工学研究科 修士(工学)
(現在 三井情報開発㈱)

*1 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., M. Eng.

*3 Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., M. Eng.

の身を守る行為」と「揺れ停止後の避難移動行為」に関し、その安全性・危険性に配慮する必要がある。それぞれの行為の危険性診断アルゴリズムの詳細は文献^{5, 6)}を参照願うこととし、ここでは基本的考え方のみ記す。

2.1 室内ゾーニング法⁵⁾

揺れている最中の室内での負傷者発生モデルを図1のように設定する。室内を単位区画（任意設定可能、たとえば50cm区画）に分割し、区画（ x_i ）ごとに図1のモデルで危険性を評価する。モデルから分かるとおり、火災の出火延焼はここでは扱わないが、出火に伴う煙流動による避難危険度シミュレーションを同システムに組み込む試みは別途行っている⁷⁾。なお、高温等の危険物の落下転倒による負傷危険度は本アルゴリズムの算定対象となっている。図1のモデルより、区画ごとの負傷危険度 $D_i(x_i)$ は以下の式で表される。

$$D_i(x_i) = \text{Prob}[Be|x_i] \sum_j \{V_j(I) S_j(x_i) (1 - H(I, \text{time}, \text{age}, \text{sex}, \text{morbidity}))\} \quad \dots(1)$$

ここに、 I は負傷の程度、 $\text{Prob}[Be|x_i]$ は算定対象となる居住者が地震時に空間 x_i に存在する確率、 $V_j(I)$ は家具 j が転倒または散乱する確率、 $S_j(x_i)$ は家具 j が散乱することで空間 x_i にその家具が倒れるか否かを示すブール関数、 H は居住者の災害回避行動能力で地震動（震度 I ）及び個人属性の関数である。所与の条件下でこれらの確率関数は既知として与えられる。

図1 室内における人的被害発生モデル

2.2 避難路ネットワーク法⁶⁾

揺れ収束後、居住者は避難等の目的を持って室内のある場所から室外へ脱出を試みる。その脱出ルートを追跡し、そのルートごとの危険度を評価することにより室内のある場所における避難危険度が求められる。この場合、居室空間を複数からなる用途の定まった機能空間の集合として捉え、それらを節点（ノード）で代表し、全て

図2 住居内移動行為のネットワークモデル化

の節点について隣接節点との間を枝（ルート）で連結させる（図2）。このモデルにおいて、居住者の移動行為を点と点を結ぶ枝としての図式表現が可能であり、これをネットワークモデルとする。この時、枝（ルート）ごとに負傷危険度を枝の距離として以下のように数値表現（ルート障害度として定義）することにより、最短経路問題として危険度の算定を定式化できる。ルート障害度を枝の重みとし以下に定義する。

$$\text{所要時間}(I) = \text{歩行距離}(I) \times \text{障害度}(I) / \text{歩行速度}(I; \text{属性}) \quad \dots(2)$$

節点から節点までの距離が歩行距離であるが、地震時は家具散乱等により回り道をしなければならないなど震度（ I ）の関数として距離が変わる。同時にルートの屈曲点数が増減し、歩行速度にも影響する。障害度とは歩行経路の状態であり以下のように表す。

$$\text{障害度}(I) \in F[\text{受傷可能性}(I), \text{危険物状態}(I), \text{扉の開閉状況}(I), \text{ルート遮断}(I), \text{障害物}(I)] \quad \dots(3)$$

さらに歩行速度は以下の式で与えられる。

$$\text{歩行速度} \in \text{平均歩行速度}(\text{歩行空間幅}, \text{屈曲点数}, \text{傾斜}) \times$$

$$\text{低減係数}(\text{時間}, \text{震度}; \text{性別}, \text{年齢}) \quad \dots(4)$$

低減係数は室内ゾーニング法で用いたものと同様の関数を採用する。なお、歩行速度は対象空間内の居住者数により群衆流としての扱いも可能であり、また、影響する必要歩行空間幅も居住者数でパラメトリックに変更させているので、当診断法は住家以外の娯楽空間でも適用が可能である（詳細は文献⁶⁾を参照されたい）。このようにして得られた危険度の重み付きネットワークモデルに最短経路探索を適用し、脱出ルート全体の所要時間、すなわち危険度を求める。最短経路探索にはダイクストラ法が応用できる。

診断アルゴリズムでは上記のとおり、数多くのパラメータを考慮しているが、アルゴリズムを実装した以下に示すコンピュータ診断では、居住者属性以外の殆どのパラメータは、コンピュータが自動的に設定し、利用者の負荷軽減が図れるように、プログラムを工夫している。

3. システムの構成

現場的に診断が可能のように、コンピュータ上に、以上のアルゴリズムを登載したソフトウェアプログラムを構築した。診断を行う居住者の便を考え、操作性の良い対話型プログラムとして実現した。開発にはGUIが容易に作成できるMicrosoft社のVisual Basic 6.0を使用した。プログラムはWindows OS上で動作する。プログラムは図3に示すように、計算モジュール、室内標準データ、図形入力画面、各設定画面等から構成されている。

図3 プログラムのモジュール構成

3.1 計算モジュール

このモジュールは、室内ゾーニング法による室内危険度評価と避難経路ネットワーク法による避難危険度評価を計算する基幹部分である。室内ゾーニングは、サブプログラムとして「家具・置物等の散乱域の計算 $S_j(x_i)$ 」「家具の転倒・散乱の確率計算 $V_j(I)$ 」「居住者の災害回避行動能力の計算 $H(I, time, age, sex, morbidity)$ 」から構成される。また、避難路危険度評価は、サブプログラムとして「避難経路の自動生成」「経路間危険度計算」そして「最短避難経路計算（ダイクストラ法）」の各アルゴリズムを実装している。

屋外への避難経路（ノード・ルートのネットワーク）は、利用者に経路トレースさせることなく、自動生成するプログラムを独自に開発し、利用者の負荷軽減を工夫した。節点（ノード）は各部屋の重心位置及び開口部（扉、窓、部屋どおしをつなぐ開口部）の中心に自動発生させ、直近節点を探索し、直線（ルート）で自動リンクさせるものである。もちろんこれらは初期値であり、居住者が普段良く居る場所にスタートの節点をマウス操作で移動させることになる。また、障害物等による迂回路は、出力画面上でマウスクリック操作により修正することができる。なお、窓も脱出口の一つとして設定してあるが、実際に利用できるかどうかは、利用者の判断に委ねられる。ただし、窓を脱出口とした場合、実態に合うようにプログラム上では脱出のための動作負荷量が通常玄関よりも大きく設定されており、避難障害度は大きくなる（詳細は文献⑩を参照）。

3.2 室内標準データ

診断する住居の平面図に関する部品（扉・窓等）や設える家具は、形や大きさについて予め標準タイプのものをデータとして用意した。これらをマウスドラッグ操作で画面上に移動し、必要があればドラッグ操作で任意に大きさを変更できるようにすることで、CAD操作に不慣れな利用者でも簡単に自宅を描画することができるように工夫した。各データは、図形描画による入力との一貫性を考慮して、オブジェクトとして定義してある。オブジェクトはプログラム中では独自の関数が定義されたユーザ定義型として表現される。部屋、開口部、家具、住人などのオブジェクトを定義し、それらを互いに関連づけて、室内状況が表現可能なデータ構造を構成している。図4はオブジェクト間の関係を示したものである。各データを積み上げて最終的に住居データを構成するわけであるが、データどおしを組み合わせる上位のデータに構築する「集約」という操作、及び他データ属性の一部を引数として取り込む「参照」という操作に大きく分かれる。オブジェクトは属性のひとつとして図形を持ち、入力画面上では図形として表示され、計算時は対象物に関連する情報を

図4 室内標準データの構造

持ったデータ型として扱われる。居住環境・居住者属性に関わるパラメータ設定変更は、設定画面モジュールとの連携により行われる。

3.3 入力画面モジュール

平面図・家具配置の簡便な入力のために図形入力画面を独自に作成した。平面図作成の操作は、建築の知識なしにできるように、基本的に一つの部屋を矩形として扱い、矩形どおしをつなげることでより平面図が完成する直感性を重視した。もちろん変形な部屋も扱える。また、部屋の端点は画面上に描画してある直近グリッドにスナップさせる等の工夫により、利用者の平面図作成負荷を軽減させている。画面上ではグリッド表示、画面移動、図形入力／編集操作が可能である。平面図・家具配置図・室内危険度ゾーニング・避難経路をレイヤとして扱っており、それらレイヤの管理機能を持つが、プログラム中では操作を簡便にするために入力表示の切り替え画面を通してレイヤ切り替えは自動的に行われる。描画操作は Windows API (Application Program Interface) を直接呼び出すことで高速化を図っている（図7参照）。

3.4 設定画面モジュール

画面の表示状態の切り替え時に表示され、評価計算のパラメータ（居住環境・居住者属性等）入力及び変更を行う画面モジュールである（図8参照）。

3.5 ファイル入出力

平面図・居住者情報・家具配置等の診断対象の環境情報をファイルに保存する。また危険度評価結果をファイルに保存する。デフォルトの標準家具データおよび被害関数データ（家具の転倒確率等を与える関数）は、追加・変更が容易にできるように、プログラムから独立したファイルとして管理し、起動時に読み込まれる。その他、計算の途中結果（個人別定危険度、経路別所要時間等）を表及びグラフで表示することができ、それらも保存される。

4. プログラムの操作手順

操作のフローを図5に示す。以下に、操作手順を追って説明する。

4.1 診断システムの起動

システムを起動させるとメニュー画面として、診断の操作フローが示される（図6）。

4.2 診断世帯の諸条件の入力

以下の情報を入力する。入力のためのインターフェースが用意されている。

i) 住宅の平面図作成（図7）

2階建ての場合、階段により上下階がリンクされる。2階の平面図作成の際、1階部分が淡色表示されそれを基準に作画が可能である。

ii) 住人の個人属性（年齢、性別、ライフスタイルー部屋別居住時間帯ー）設定（図8）

iii) 家具を配置（図9）

図5 操作フロー

図6 初期メニュー画面

4.3 想定地震の入力

任意の下記診断条件をメイン画面から入力する。

- i) 揺れの大きさ (床応答震度)
- ii) 地震発生時間

4.4 揺れている最中の負傷危険度を診断

操作ボタンの押下により、以下の情報が表示される。

- i) 散乱物・家具転倒範囲を室内にゾーニング表示
- ii) 個人別の負傷危険度を数値表示し、室内にその範囲をゾーニング表示 (図10)
- iii) 定点 (室内別) における、各住人別の負傷危険度の時間変化をグラフ表示 (図11)。各人の各部屋における存在確率 (図8で入力) と、その時間帯における各人の災害回避行動能力が加味され、危険度を折れ線グラフで表示する。この例 (図11) ではリビングにおける危険性が表示されているが、滞在時間が長い主婦 (52歳、女性) の危険性が、朝と午後の時間帯に際立って高いことが分かる。

4.5 避難経路の負傷危険度を診断

操作ボタンの押下により、以下の情報が自動的に表示される。

- i) 室内の各箇所から室外までの経路を表示
- ii) 各経路を屈曲点で小区間細分し、区間ごとの危険度表示 (図12)
- iii) 室外脱出までの所要時間を一覧表示

平面図選択画面

平面図作成画面

図7 住宅平面図作成関連画面

図8 住人の個人属性設定関連画面

家具配置結果一覧

図9 家具の配置関連画面

図10 室内危険度出力例

図 11 定点危険度変化 (リビング)

図 12 避難路危険度出力例

5. コンピュータ上でシステム化することの意義

このシステムの利用法に言及しながら、本システムの特徴及び意義を以下にまとめる。

・ 地震時の室内危険度に関する実用レベルでの診断が可能

住居の構造的耐震診断は、たとえば、(旧)建設省住宅局監修による木造住宅の耐震精密診断と補強方法(簡易版としての、わが家の耐震診断表)が実用レベルのものとして普及している。本システムは、室内に関する地震時危険度診断を行うものであり、コンピュータ上にプログラムソフトウェアを構築することにより、前者同様の診断が実用のレベルに達した。

・ 室内危険度の総合診断であるということ

著者らが提案したアルゴリズムは揺れの最中の危険度と、揺れ収束後の避難時の負傷危険度を個別に評価する方法であったが、コンピュータ上では一つの想定した地震動に対して、揺れている最中の危険度と揺れ収束後の避難時の危険度をリンクさせて計算し、かつ表示する総合診断システムとして実現した。これにより、揺れの結果、家具等が散乱し、避難路を閉塞させるという事象の時間展開を、画面上で再現し、揺れの危険度とそれに関連した結果としての避難路の危険度を、そのイベント(危険事象)が発生する順を追って表示することで、住人の危険に対する理解度を向上させ、防災対策の実践へと円滑に誘導することができる。危険度診断を総合診断とするために、既論文に提案のアルゴリズムをそのままプログラム化するのではなく、対話型一環処理のアルゴリズムに改良している。

・ 現場での往診的診断が可能

診断とは一般に調書を取り、研究室にデータを持ち帰って計算(検討)し、結果を後送する形式が多いが、ここに提案のものは可搬型コンピュータでの診断が可能であり、その場で瞬時に結果を知ることができる。このことは、住人(=素人)自らが危険度診断できるというばかりではなく、たとえば、ハウスメーカーの建築家が本装置を持ち込み、住人との現場での対話によって新築・改築の際の防災対策のあり方、さらには現状での安全な住まい方・暮らし方について、診断結果を見ながら話し合いができることになり、危険・安全に対する臨場感・説得性・理解が格段に向上すると考えられる。いわば室内危険に関する往診型システムと位置づけられる。

・ 繰り返しシミュレーションが可能

本システムは危険度を診断するのみならず、家具配置の変更・各室の使い方の変更・住人の増減など、色々な状況を想定しその状態における危険状況を何度でもシミュレーションできる。このことはその世帯の将来における危険度予測にもなり、また危険箇所を改善した場合、どの程度の改善状況かを即座に知ることができることを意味する。すなわち、改善のための代替案の比較検討ができ、より安全な暮らし方を探ることができる。

・ 住人別の危険度診断が可能

本診断アルゴリズムの特徴でもあるが、個人属性(年齢・性別・行動能力等)を考慮した危険度診断ができる。このアルゴリズムをコンピュータ上に実現したことで、個人ごとの危険性を時間帯別に、さらに場所別に知ることができるのみならず、居住者どおしの比較ができ、誰がわが家の災害弱者(災害時に最も弱く、他者からの救助を必要とする人)なのかが家族の共通理解となり、わが家の防災実践計画に反映できる。

・ 素人でも本システムで対話的に診断が可能

地震と建物とに関わる危険度診断をする場合、一般には、建物情報や地震動情報など、専門的知識を必要とする。しかし本システムは地震・建築・防災の知識のない一般の人でも無理なく操作し診断ができるように、本文中で述べたとおり(たとえば、診断の基本となる自家平面図を CAD の知識なしに容易に作図が可能、家具の標準スケールを多種用意することにより家具配置の容易性を高めた、動線の自動発生等々)、プログラム上で各種の負荷軽減に関する工夫を行った。

・ 診断プログラムの配布・利用の簡便さ

プログラムは CD-ROM 1 枚で構成されており、一般への配布が可能である。コンピュータ上への展開も簡便で、将来的にインターネット WEB での利用も構想中にある。

・ 防災教育ツールとしての利用

本システムを危険度診断の本来の目的に利用するほかに、地震時の室内環境変容を理解させるための防災教育ツールとしても利用可能である。ビジュアル表示であることの理解のしやすさに加え、本システムには床振動の強さに応じて家具がどのように挙動するのか、人間行動能力がどのように低下するのかを示す被害関数が内蔵されており、それら関数の物理的意味と計算原理を理解するツールとしても利用できよう。

・ 家具レイアウトの実態調査ツールとしての利用

本システムを利用し、家具配置及びその利用法に関する実態調査

を組織的に実施可能である。本研究の延長として、安全性・利便性・快適性に配慮した家具の最適配置に関する標準の検討がある。そのような調査研究のための資料収集ツールとしても、現場の簡便性の故に利用が可能である。

最後に、本システムの方法の妥当性・有効性について触れておく。著者らは、長く地震時の人的問題を研究対象として扱ってきており、これまでに1978年宮城県沖地震・1982年浦河沖地震・1983年日本海中部地震・1987年千葉県東方沖地震・1993年釧路沖地震・1993年北海道南西沖地震・1994年北海道東方沖地震・1995年兵庫県南部地震・2000年鳥取県西部地震・2003年十勝沖地震において、直後調査を実施してきた。室内の散乱状況と震動下の人間行動についてはヒアリングを通して、時間軸上に実態を再現する調査を行っている。その調査結果²⁾は、関連論文のシリーズの中で報告している。本論で触れたゾーニング法は、それら調査結果をある程度うまく説明しているし、それについては文献に一部報告済みであり⁵⁾、方法の妥当性はある程度検証されているとの理解である。もちろん改良すべき点はまだ多く残されていることは承知しており、今後も改善に向け努力していく所存である。また、このようにシステム化し診断を実現することによる防災の有効性については、著者の1人が担当している大学講義・演習に本システムを防災教育ツールとして実際に利用し、学生はシステムの利用を楽しみながらも自らの災害危険性認識に極めて有効であること、また学生はその結果を実家に報告し家族に改善を促すなど、得た知識・情報が波及していくこと、等々を確認している事実を挙げておきたい。

謝辞

本システムを実用化するにあたり、試作段階で、著者の1人が担当している当大学工学部建築都市学科の講義・演習に本システムを利用した。受講した多くの学生から、貴重な意見を頂いた。記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 村上ひとみ・坂井 忍・村上公一・高井伸雄：1993年釧路沖地震の人間行動調査 ―負傷者の発生と病院の対応―、日本建築学会北海道支部研究報告書、66、17-20、1995。
- 2) 岡田成幸：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 ―その2 1993年釧路沖地震にみる揺れている最中の災害回避行動、日本建築学会構造系論文集、481、27-36、1996。
- 3) 村上ひとみ：室内空間の安全性 ―鳥取県西部地震の調査から―、地震防災システム公開研究会、15-20、2000。
- 4) 西田佳未・岡田成幸・高井伸雄・和藤幸弘：2000年鳥取県西部地震における被害と行動に関するアンケート調査、第20回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、11-12、2001。
- 5) 岡田成幸：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 ―その1 居住空間危険度マイクロゾーニングの提案―、日本建築学会構造系論文報告集、454、39-49、1993。
- 6) 岡田成幸・黒田誠宏：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 ―その3 室外への避難脱出経路の危険度評価法の提案―、日本建築学会構造系論文集、563、83-89、2003。
- 7) 北海道立寒地住宅都市研究所・北海道大学大学院：火災危険度評価、地震時の室内安全評価手法の開発に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所調査研究報告、104-JO、31-38、2001。

[2003年9月5日原稿受理 2004年2月23日採用決定]