

地震時人的被害の即時評価

— 国際救助活動の効率化に向けて —

Post-Event Rapid Assessment of Earthquake Casualties — Toward the Enhancement of International Rescue Mobilization —

塩野 計司*

By Keishi SHIONO

By integrating existing knowledge in seismology, earthquake engineering, and epidemiology, we developed a computer model applicable to the post-event, rapid estimation of expected fatalities for any given earthquake. Our design purpose for this model was to provide adequate information to simplify the post-event management of rescue activities. The model requires very few input variables making it a potentially useful tool in the early phase of rescue mobilization. Input data required in the estimation are earthquake magnitude, epicenter location, and three regional data of population density, dominant building type, and seismic intensity increment due to local site effects. Once completed, we tested the model's performance accuracy using the data obtained from recent significant disasters.

1. はじめに

地震被害の軽減は、施設の耐震化を始めとする恒久対策によってなされるのが本筋であろう。しかし、事前の恒久対策に万全を期すことは至難であり、事後の応急対策がはたす役割はきわめて大きい。災害の発生に対して事後対策の適切な展開をはかり、被害の拡大を阻止することもまた、防災における基本戦略の一つである。

事後対策が果たす役割は、日・米のような先進国（地震防災の「先進国」でもある）においても小さくはない。開発の途上にある国々においては、この傾向はなお一層である。

キーワード：地震防災，防災計画，人的被害，
即時被害評価，事後対策，国際救助活動

* 正会員 工博 東京都立大学助手
工学部土木工学科（〒192-03 八王子市南大沢1）

すなわち、大半の発展途上国において、その居住環境・社会環境は災害への配慮を欠いたものが主体をなし、地震の発生ごとに先進国の常識では考えられないような大災害が出現する。とりわけ、建物の脆弱性と救急対策資源の不足による死傷者の大量発生という災害形態は、発展途上国の地震災害における最大の特徴になっている。一つの地震による死者が千・万はおろか十万のオーダーに達することさえある。また、このような状況があるにもかかわらず、恒久対策の進展や救急計画の充実による安全性の向上が今後すみやかに進むことは、発展途上国が置かれた諸般の状況からみて望みにくい。発展途上国の減災について考えるとき、事後対策、なかんずく対策資源の国際的な運用による救急活動には大きな期待を寄せざるをえない。

ところが、事後対策には発災直後の「被害情報の空白期」に開始しなければならないという難しさがある。とりわけ遠隔地の対策資源を運用する国際的な救助活動にはその傾向が強く、情報収集の遅れによって出動

の有無や活動規模の設定に関する意思決定が阻害されるケースが少なくない。外国の救助活動組織が、地震の発生それ自体は別として、被害について知るためには、現地での被害把握（踏査など）のプロセスを待たなければならない、これが「被害情報の空白期」を生む不可避の要因になってきた。また被災地との通信手段が失われることによって、被害情報の伝達が遅れるという事態もしばしば発生している。

「実情報」の入手が期待できないとすれば、一時的に適当な「見当」で代用することが考えられる。たとえば「見当」ではあっても相応の確度をもつものであれば、対策のあり方を決めるための第一的な目標としての妥当性が認められる。事後対応の組立のなかに「見当づけ」というプロセスを持ち込むことによって発災直後の貴重な時間を有効に利用し、事後対策の初動を円滑化できる可能性がある。ただし、このアプローチにおいては、「見当づけ」の方法はもっとも重要かつ不可欠なツールであり、その開発を先行させる必要がある。

このような場面での「見当づけ」は、被害推定の問題に帰着する。しかし、実際に発生した災害を対象とした被害推定が必要であり、過去にも多くの例をみるような、仮想の地震を入力として行う事前評価の考え方や手順をそのまま導入することはできない。実際に発生した地震に関する情報（瞬時的に入手できるものに限る）を処理の原点に置くことにより、仮想の地震を導入することにもなう曖昧さを排除し、高い確度をもった被害推定を可能にすることが必要になる。また、地球上のどこに発生したものであれ、その災害を救助活動の対象とするためには、一つの都市あるいは地方を対象とした地域特化的な方法ではなく、国あるいは地域をこえて適用できる汎用的な方法の実現を目指す必要が生じる。

この研究では以上の整理にもとづき、地震情報を入力とし、被災地の自然的・社会的な環境データを媒介として、死者数を評価するプロセス・モデルを、つぎのような要求にかなうものとして、プロトタイプレベルで実現した：

- 1) 一つの地震による死者数を推定すること
- 2) 実際に発生した地震に関する情報（実データ）を入力として、即時的な推定ができること
- 3) 国・地域を問わず汎用的に適用できること。

なお、発展途上国での減災は、国際連合の提唱による「国際防災の10年」（1990-）において、もっとも重要な課題の一つと位置づけられている（第42回国連総会決議文）。これとの関連においても、発展途上国の人的被害の軽減に寄与しようとする本研究は時宜を得たものである。

2. モデルの構築

(1) 方針

地震による死者の発生プロセスを図-1のようなモデルで代表し、これにもとづいて被害推定モデルの基本部分を構成した。

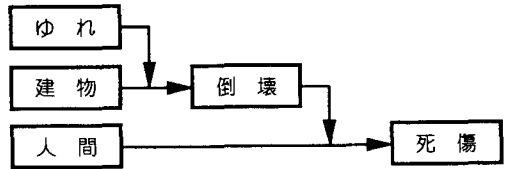


図-1 死者発生の概念モデル

地震による人的被害の原因を世界的な傾向としてみると、建物の倒壊が圧倒的な位置を占める。今世紀における地震による死者（130万人）の大半（75～90%）が建物の倒壊によって発生している^{21）22）}。建物の倒壊以外の原因には地震火災・地変・津波などがあるが、これらによる死者数の割合は小さい。このような点からみて図-1に示した簡単なモデルには十分な実用性が期待できる。

この研究では火災・地変・津波などによる死者については考慮しなかった。これはプロトタイプ（とりわけ初期段階における）を構築するうえでの判断であり、将来的にはこれらの原因による死者数を推定するためのサブ・モデルを実現し、モデルの基本部分（建物の倒壊による死者の推定）にビルトインする方針を定めた。

人的被害について考える場合、死者とならんで負傷者の問題がある。死者の発生には本来、時間依存的な性格（負傷者が死亡する）がある^{23）24）}ために、両者をべつべつに取り扱おうとすれば必ずと限界にいき当たる。しかし、この研究では当面、災害が収束した時点

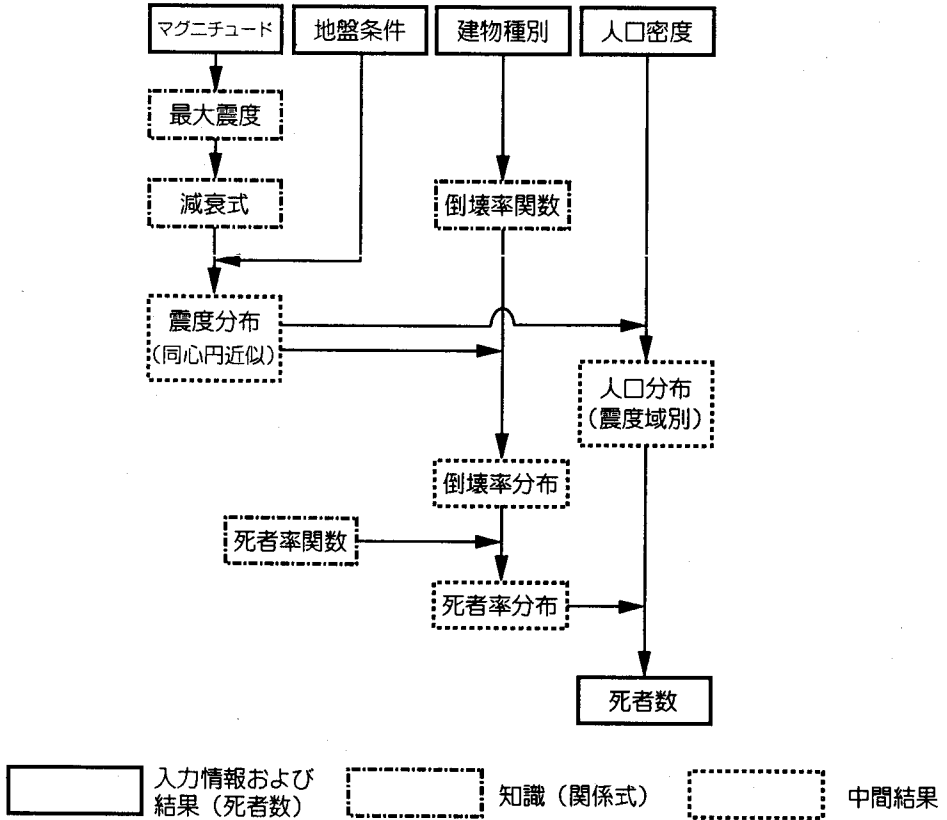


図-2 評価モデルの一般構成（処理の流れ図）

における死者と負傷者について考えることにし、負傷者数については死者数の推定値をもとに、既往の経験則⁹⁾によって推定する方針をとった。この論文では、死者数によって災害の規模を判断するという考え方をとり、負傷者数についてはとくに述べなかった。

この研究では、死者の推定が即時的かつ汎用的に（国や地域をこえて）行えるような方法の開発を目指している。この2つの条件のいずれによっても、推定モデルへの入力情報は質的・量的に制限されることになる。第1の条件からは、地震に関する情報をできるかぎり限定する、という要求が生じる；推定に用いる地震情報をできるだけ切り詰めることによって、情報の収集に要する時間を短縮する必要がある。第2の条件からは、世界中どこへ行っても入手できそうなデータだけを地域情報に選ぶ、という要求が生じる。

(2) 構成

被害評価モデルの一般構成を図-2に、モデル内の

処理手順のイメージを図-3に示した。以下に、モデルを構成する主要要素について説明する。

$$D = \int_{\theta} \int_r f(\rho \cdot V(I)) dr d\theta$$

- D: 全死者数 (人)
- f: 死者発生密度 (人/km³)
- I: 震度
- V: 建物倒壊率
- ρ: 人口密度 (人/km²)

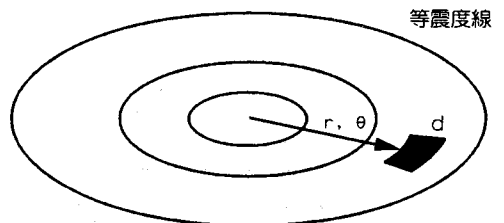


図-3 死者数の推定方法（処理のイメージ）

a) 入力情報

地震に関する入力情報には、つぎの2つを使った：

- 1) 規模（表面波マグニチュード：Ms）
- 2) 震央位置。

この2つの情報は、地球上のどこで発生したものであれ、相応の被害を伴う地震であれば、ほぼ即時かつ確実に入手することができる。これらの入手に要する時間は被害情報の場合にくらべ格段に短い。今日、世界各地にある地震観測施設が地震を検知し、震源要素を明らかにするには1時間とは要しない。たとえば、1985年メキシコ地震のさい、スイスの地震観測所は、地震の発生から30分後に自国の救助組織に当該の地震の発生について情報を提供している⁹⁾。これに対し、被害情報はそれ自体の収集が容易でないのみならず、その伝達に必要な通信網が災害による機能低下ないし停止の影響を受けることから、限られた時間内での伝達がむずかしい。被害情報が通常の通信網（多くの大災害において途絶した）を経由して伝達されるのに対し、地震に関する情報（地震波動）には地球内部という、きわめて安定した「通信媒体」を通じて、遠隔地にも確実に伝達されるという利点がある。

被災地域に関する情報（地域データ）には、つぎの3つを使った：

- 1) 人口密度
- 2) 建物種別
- 3) 地盤の増幅特性。

建物の種別は、i) 耐力部材（承重要素）の様式と、ii) 壁の材料に着目して、つぎの9つに分類した：

- 1) 野石
- 2) アドベ（日干し煉瓦）

3) 切り石

4) 煉瓦

以上、組積造

5) 木造（薄い詰め壁）

6) 木造（厚い詰め壁）

7) 木造（木質壁）

8) 質の悪い鉄筋コンクリート（非耐震）

9) 質のよい鉄筋コンクリート（耐震）

この分類によって、i) 建物の強度（地震に対する脆弱性）と、ii) 被害を受けた建物が人間に及ぼすインパクトの大きさ（人的被害の誘発性）の大略が識別できるものと考えた。建物の特性には、この2つ以外にも人的被害の発生に影響するものがないわけではない。屋根の材料（重量）や建物の大きさ（脱出に要する時間や収容人数と関連）などであるが、上記の2つの要因にくらべて影響が小さいものと判断し、ここでは考慮しなかった。

地盤の増幅特性は、基盤（岩盤）での震度に対する増分として与えた。表-1には、震度増分の例を地形および表層地質との関連で示した。これらの値は、この研究で開発した被害評価モデルの検証（後述）の際に用いたものである。

震度増分を推定するためには、地形学・地質学・地震工学などの分野における既存の手法や知識を用いることができ、その結果には相当の精度が期待できる。また、そのなかにはきわめて限られた資料の利用を前提として開発されたものがあり、とりわけ地形図を基礎資料とし、地形・地質の判読に立脚した方法⁷⁾には、国・地域をこえた広い範囲への適用性が見込まれる。

表-1 地盤の影響による震度増分の例

地域	地質	震度増分
Managua, Nicaragua	沖積（湖岸, $V_s \sim 200$ m/s)	1.2
Tangshan, China	沖積（平原）	0.7
El Asnam, Algeria	沖積（Valley Deposit）	0.7
San Salvador, El Salvador	沖積（未固結火山灰）	2.0

震度のスケールはMSK震度階。

震度分布図や地震観測結果など、被害報告の記載をもとに震度増分を推定した。

b) 知識

評価モデルの構成には、つぎのような知識（経験式）を用いた：

- 1) マグニチュードと最大震度(震央震度)の関係
- 2) 震度の減衰式(震央距離と震度の関係)
- 3) 建物種別ごとの倒壊率関数
(震度と倒壊率の関係)
- 4) 建物被害率と死者発生率の関係。

上記の1)と2)を利用して、震度分布を評価した。マグニチュードと最大震度の関係にはKarnikの研究⁹⁾などを、震度の減衰式にはChandra et al.の研究⁹⁾などを用いた。最大震度や距離減衰には地域依存的な性質があるため、その影響を考慮して震度分布を評価することにした。震度分布は、震央を中心とする同心円で近似した。等震度曲線は一般に、断層の形状や形成過程、あるいは地形・地質(異方性)の影響を受けて真の円にはならない。しかし、第一近似的には円で代

表できる場合が多い。

既存の被害データ(調査報告や論文などの出版物から収集)を整理し、9つの建物種別ごとに倒壊率関数を与えた(図-4)。「倒壊」とは「修復不能」の被害レベルを指すものと考えた。なお分析した調査資料にはデータの収集方法や処理方法、あるいは用語に関する不統一があり、整合性に問題がないわけではなかった。しかし、地球上のあるあらゆる建物(もっとも脆弱なものから、もっとも耐震的なものまでをふくむ)のごく大まかな分類(9種類)に対し、それぞれの脆弱性を第一近似的に評価するうでは、さしたる障害にはならなかった。

建物倒壊率と死者発生率の関係は、Coburn et al.¹¹⁾が整理した結果を参照し、これを単純化して与えた(図-5)。重い材料で造られた建物ほど、倒壊による人間へのインパクト(人的被害の誘発性)が強い傾向を表現した。

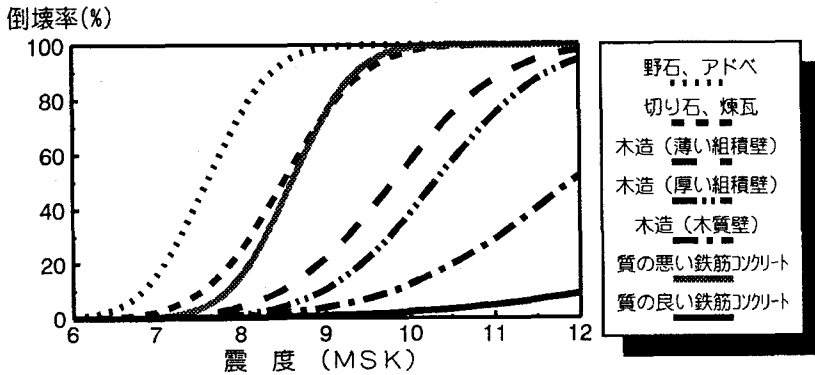


図-4 建物の倒壊率関数

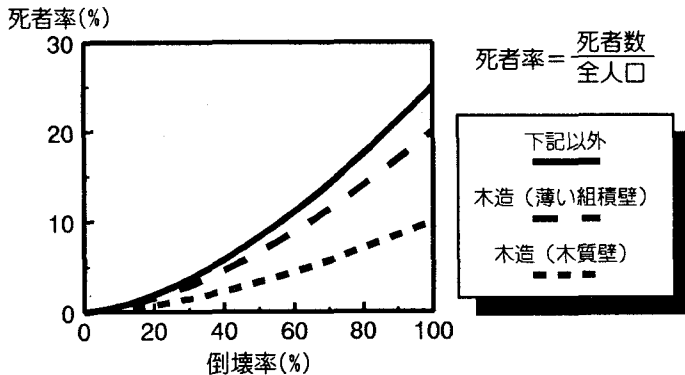


図-5 死者の発生率関数

3. モデルの検証

実現したモデルの推定精度を、1960年から1986年のあいだに発生した16個の地震(表-2)によって調べた。これらの地震はいずれも内陸に発生した浅発地震であり、相当の被害を伴ったという点で共通している。また、これらの地震のなかには、建物の倒壊以外の原因(火災・地震・津波など)による死者が卓越したものは含まれていない。

ここで取り上げた地震による死者の合計(約25年間)は約30万人であり、今世紀における25年間あたりの平均値・約35万人と大差ないことが分かった。このことから、これら16個の地震は、当該の期間に発生し、かつ建物の倒壊によって多くの死者を発生させた地震の大半を含むこと、したがって大きな被害地震を代表する標本として適当なものであると判断された。

なお、先に示した建物の倒壊率関数(図-4)と死者の発生率関数(図-5)は、ここで取り上げた16個の地震でのデータから直接に(インバージョン的に)求めたものではない。図-4、図-5に示した関係は、より平均化の進んだ知識として位置づけられることを付記する。

これらの地震に関する死者数のデータと、推定に必要な入力情報(被災地域の人口密度、建物種別、地盤

の影響による震度増分;地震のマグニチュードと震央位置)を収集した。この作業には地震の調査報告や各種の統計書を利用した。個々の地震に対する詳しいデータはべつの報告¹⁰⁾に収録した。

いくつかの地震(被災域)については、建物種別を2~3種類の混在として、たとえば「60%のアドベと40%の煉瓦」のように与える必要が生じた。このような場合には、建物種別ごとの構成比を追加情報として与え、つぎのようにして死者数を算定した:

$$D = \sum_i (c_i \cdot d_i)$$

ここに

D: 死者数

c: 建物種別の構成比 ($0 < c < 1$)

$$\sum_i c_i = 1$$

d: 建物種別の死者数

i: 建物種別を示す添え字

死者数のデータと推定値を比較した(図-6)。推定モデルを構成する諸要素の第一近似的な性格にもかかわらず、データと推定値の対応はほぼ満足できるものだった。推定値とデータの比(推定値/データ)は平均が1.6、これに対する70%の信頼区間が0.54~

表-2 被害評価モデルの検証に用いた地震

地震, 国	年	M	死者(人)
1 Buyin-Zara, Iran	1962	7+1/4	12,000-15,000
2 Varto, Turkey	1966	6.5	2,394
3 Adapazari, Turkey	1967	7.5	89
4 Dasht-Bayaz, Iran	1968	7.3	7,000-10,000
5 Gediz, Turkey	1970	7.1	1,086
6 Burder, Turkey	1971	6.0	57
7 Bingol, Turkey	1971	6.7	878
8 Ghir, Iran	1972	7.1	5,000
9 Managua, Nicaragua	1972	6.6	5,000-11,000+
10 Lice, Turkey	1975	6.7	2,385
11 Caldiran, Turkey	1976	7.4	3,840
12 Guatemala	1976	7.5	22,778
13 Tangshan, China	1976	7.8	242,469
14 El-Asnam, Algeria	1980	7.3	2,263
15 Southern Italy	1980	6.8	2,735-4,689
16 San Salvador, El Salvador	1986	5.4	1,500

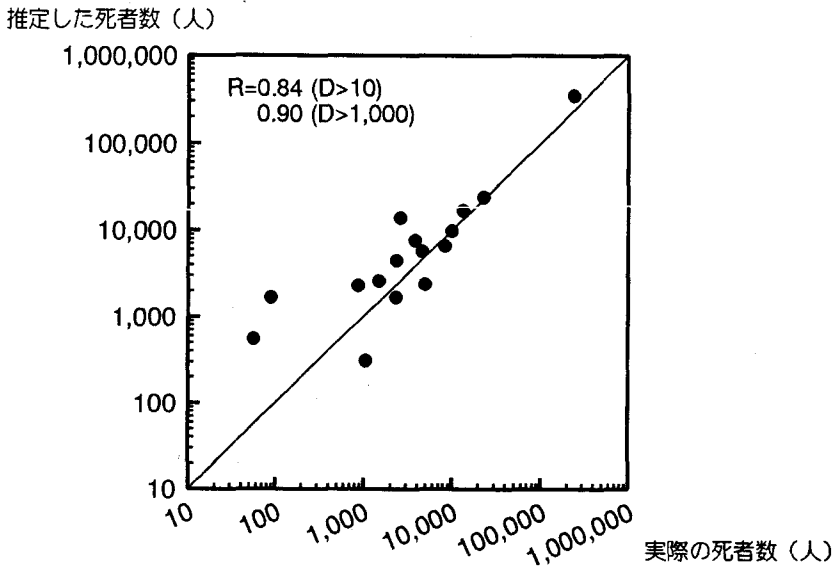


図-6 死者数の記録と推定値の比較

4.8 (平均値に対しておよそ1/3～3倍)だった；死者数のオーダーだけを問題にすれば、70%の確率で正しく推定できることが示された。なお、死者数が1,000人を超える地震(13個)に限ってみれば、データと推定値の相関はさらによく、両者の比は平均が1.2、これに対する70%の信頼区間が0.59～2.5 (平均値に対しておよそ1/2～2倍)だった。

4. おわりに

国や地域の別を問わず、一つの地震による人的被害の規模を、発災後、即時的に評価する方法を開発した。被害推定の即時性を実現するために、地震に関する入力情報として、地震の発生から間をおかずに入手できるマグニチュードと震央位置だけを使用した。また、この方法を国や地域をこえて適用できるものにするために、被災地の特性に関する情報(地域データ)には、どのような国や地域でも準備できそうなものだけを使用し、地域データが得られないことによって汎用性が失われることがないように配慮した。この研究で実現したプロトタイプ・モデルでは、地域特性を表す指標として人口密度、建物種別、地盤特性(震度増分で表した地盤の増幅性)の3つを用いた。

構築した評価モデルの推定精度は、モデルを構成する諸要素の第一近似的な性格にもかかわらず、ほぼ満足できるものだった。死者数が100人～10万人の範囲にある16個の地震のデータを用いてテストした結果、およそ70%の確率で死者数のオーダーを正しく推定できることが明らかになった。なお、この推定精度は、実現したプロトタイプ・モデルに対する比較的容易な改善(後述)によって、さらに向上するものと期待できる。

この評価モデルには、その即時性と汎用性に注目すれば、発災直後の「被害情報の空白期」にあって事後対策、とりわけ国際的な救助活動の意思決定を支援するツールとしての役割が期待できる。算出された死者数(人的被害の規模を示す指標)は、発災直後における、被害の「実情報」が得られない時間帯にあって、対策のあり方を決めるための第一次的な目標としての利用価値がある。すなわち、人的被害の規模を死者数のオーダーとして「見当づけ」ることができれば、自国の救助隊の派遣に関わる意思決定は、出動の有無や大まかな派遣規模の設定など、その基本的な部分では飛躍的に単純化できる。

実現したモデルには、等震度曲線の楕円近似のように、単なる数値処理上の問題として容易に改良できそうな部分が残っている。また、建物被害や死者の発生に関する経験式の改善など、災害事象の解釈を含むやや複雑な問題もある。さらには負傷者の問題や、火災・地変・津波などによる死傷者の問題のように、手付かずのまま残っているものもある。これらの問題については、プロトタイプ・モデルの改善をへて実用モデルの構築にいたる、今後の展開のなかで順に処理していきたいと考えている。

この評価モデルを実用化するための過程において、データベースの開発という問題を避けて通ることはできない。モデルの即時性・汎用性は、推定に必要な地域情報をあらかじめ世界中から収集し、データベース化することによって、はじめて現実のものになる。発災後の限られた時間内に被災域の地域データを収集することは不可能であり、世界規模での地域データベースの開発が要請される。評価モデルの構成において、必要な地域データを「国や地域をこえて準備しやすいものに限る」という配慮はしたものの、全世界を相手としたデータベース作りが容易なこととは思われない。推定モデルの実用化に向けて、解決しなければならない最大の課題である。

この研究の立案にさいし、東京大学・地震研究所の太田 裕先生より多大な援助をいただいた。研究を進めるにあたりケンブリッジ大学・マーチン建築都市研究センターのA. コッパーン博士、ヴァージニア科学技術大学・州立大学のF. クリムゴULD教授との議論は有益だった。記して感謝する。研究費の一部に文部省科学研究費（課題番号：03201136、代表：塩野）を用いた。

引用文献

- 1) Coburn, A. W., A. Pomonis, and S. Sakai, 1989, Assessing strategies to reduce fatalities in earthquakes, Proceedings of International Workshop on Earthquake Injury Epidemiology for Mitigation and Response, July 10-12, 1989, Baltimore, Maryland, U.S.A., pp. P107-P132.
- 2) Power, M. S., D. E. Foul, C. C. Thiel Jr., F. H. Swan, R. R. Youngs, A. Boudiaf, M. Khorichi, N. F. Forell, and G. G. Mader, 1991, Seismic Microzonation of the Ech Cheliff region, Algeria, Proceedings of Fourth International Conference on Seismic Zonation, August 25-29, 1991, Stanford, California, U.S.A., Vol. I, pp. 539-588.
- 3) Shiono, K. and F. Krimgold, 1989, A computer model for the recovery of trapped people in a collapsed building: Development of a theoretical framework and direction for future data collection, Proceedings of International Workshop on Earthquake Injury Epidemiology for Mitigation and Response, July 10-12, 1989, Baltimore, Maryland, U.S.A., pp. P260-P295.
- 4) Shiono, K., F. Krimgold, and Y. Ohta, 1992, Modeling of search-and-rescue activity in an earthquake, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, July 19-24, 1992, Madrid, Spain, in printing.
- 5) Alexander, D., 1985, Deaths and injury in earthquakes, Disasters, Vol. 9, No. 1, pp. 57-60.
- 6) Frisch, T., 1986, Rescue Mission in Mexico City, UNDRO News, Office of the United Nations Disaster Relief Co-Ordinator, Geneva, Switzerland, January/February, pp. 5-8.
- 7) 松田磐余, 1989, 地震被害想定のための地形・地質の分類, 総合都市研究, 東京都立大学都市研究センター, No. 38, pp. 13-23.
- 8) Karnik, V., 1965, Magnitude-intensity relations for European and Mediterranean seismic regions, Studia Geophysica et Geodae tica, Ceskoslovenska Akademie, Vol. 9, pp. 236-249.
- 9) Chandra, U., J. G. McWhorter, and A. A. Nowroozi, 1979, Attenuation of intensities in Iran, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 69, No. 1, pp. 237-250.
- 10) Shiono, K., F. Krimgold, and Y. Ohta, 1991, Post-event rapid estimation of earthquake fatalities for the management of rescue activity, Comprehensive Urban Studies, Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University, No. 44, pp. 61-106.