

地震時人的被害のマクロプロセスモデル —プロトタイプの構築とモデルの適用性—
都立大学工学部 塩野 計司

地域安全学会 第2回研究発表会

地震時人的被害のマクロプロセスモデル

— プロトタイプの構築とモデルの適用性 —

塩 野 計 司

(東京都立大学・工学部)

1. はじめに

地震防災の分野では、被害推定の技術がさまざまな局面で利用される。震災対策の基礎調査として重要な位置をしめる被害想定は、種々の被害事象に対する推定結果の集成に他ならない。また、かつてはハザード・マッピングの意味合いが強かったサイスミック・ゾウネーションにも、被害推定の要素を取り入れることにより、災害評価としての具体性が高いリスク・マッピングの性格を持つものが多くなった。

今日、被害推定手法の「品ぞろえ」は豊富であり、1) 対象事象、2) 対象地域、3) 利用形態などの側面からみて、相当に広い範囲がカバーされている。しかし既存の手法を見直してみると、膨大な「品ぞろえ」にもかかわらず、なおカバーしきれていない部分があることに気づく。未解決の問題のなかにはつぎのようなものがある：

1) 開発途上国における人的被害の問題（対象事象の側面から）

多くの開発途上国において、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、ひとたび地震の発生をみれば、今日なお死者の多発という昔ながらの災害形態が出現する。開発途上国における減災の問題は、国際連合の提唱により開始された「国際防災の10年」の活動（1990-）においても、もっとも重要な課題の一つとして取り上げられており（第42回国連総会決議文）、開発途上国における死傷者の発生を対象とし、その低減に寄与するための研究は時宜をえたものと思われる。

2) 地球規模のゾウネーションの問題（対象地域の側面から）

従来のサイスミック・ゾウネーションには、一つの都市や都市圏などを対象としたものが多く、一つの調査が一国の範囲をこえて行われることはきわめて希だった。また、世界的な視野で行われた小数の例外（Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 1988など）も、ハザード・マッピングのレベルで行われたものであり、被害推定の要素をふくむリスク・マッピングの形はとっていない。

地球全体を視野におさめた危険度評価（具体的な手段としてはリスク・ゾウネーション）は、地球規模の減災を展開するための有効な基礎情報となるであろう。ただし、このよう

地域安全学会 第2回研究発表会

な調査を実現するためには、国や地域をこえて適用できる汎用的な被害推定手法の開発を先行させる必要がある。

3) 事後緊急対策への適用の問題（利用方法の側面から）

災害の軽減には、施設の耐震化をはじめとする「事前対策」の効果だけではなく、「事後対策」（緊急対応）の効果にも期待しなければならない。しかし事後対策には、発災直後の「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や活動規模に関する意志決定が阻害されるケースが多い。

「実情報」の入手が期待できないとすれば、適当な「見当」で代用することが考えられる。たとえ「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次的な目標としての妥当性が認められる。緊急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。このような局面における被害推定のあり方として、実際に発生した地震の記録を入力とした即時処理が考えられる。

この研究では以上の整理をもとに、地球規模での減災に寄与することをねらいとして、つぎのような目標を設けて被害推定モデルの開発を行った：

- 1) 一つの地震の発生にともなう死者数の推定手法を構築する
- 2) この推定手法を、国・地域を越えて適用できるもの（汎用モデル）として実現する
- 3) この推定手法を、災害の事前評価のみならず、緊急対応を効率化するための事後推定（即時推定）にも適用できるものとして実現する。

2. モデルの開発

2.1 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することにし、これにもとづいて被害推定モデルの基本部分を構成することにした。

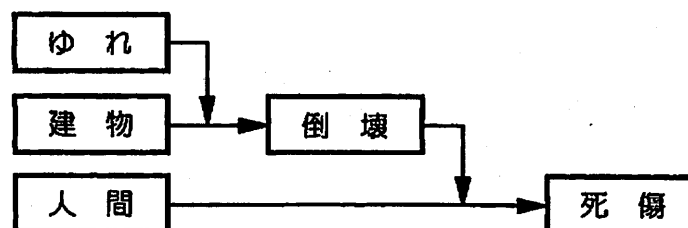


図-1 死者の発生プロセス

地域安全学会 第2回研究発表会

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地位を占める。死者（今世紀の総数：140万人）の75%以上が建物の倒壊によって発生している（Coburn et al., 1989）。建物の倒壊につづく重要な原因には地震火災、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に示したの簡単なモデルが十分に実用的なものである可能性は高い。

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、モデルの基本部分にビルトインすることを考えた。

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）があるために、両者をべつべつに取り扱うことには限界がある。しかし、当面は災害が収束した時点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（Alexander, 1985 など）によって推定することにした。

この研究では、汎用的に（国や地域をこえて）適用できるとともに、事後の即時推定にも適用できるような被害推定の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、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。第2の条件からは、地震に関する情報をできるだけぎり限定する、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、地震情報の収集に要する時間を短縮する必要がある。

2.2 モデルの構成

（1）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、相応の被害を伴うほどの地震であれば、ほぼ即時的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。

被災地域に関する入力情報（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。

建物種別：建物の種別は、1）耐力部材（承重要素）の構造と、2）壁の材料に着目して7つに分類した（図-3参照）。この分類によって、1）建物の強度（地震に対する脆弱性）と、2）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）がほぼ識別できると考えた。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

地域安全学会 第2回研究発表会

るものがある。屋根の材料（重量）や建物の大きさ（強度や収容人数と関連）などであるが、ここでは考慮しなかった。

地盤の増幅性：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。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。推定モデルのテスト（後述）で用いた震度増分の値を表-1に示した。

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M S K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。

(2) 知 識

つぎのような知識（経験式）によって推定モデルを構成した：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。これらの関係式を用いた処理のイメージを図-2に示した。

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

D: 全死者数 (人)

d: 死者発生密度 (人/km²)

I: 震度

V: 建物倒壊率

ρ : 人口密度 (人/km²)

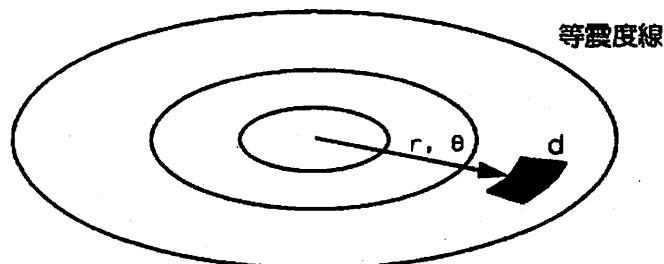


図-2 死者数の推定方法（処理のイメージ）

地域安全学会 第2回研究発表会

震度：マグニチュードと最大震度の関係にはKarnik (1965)の研究などが、震度の減衰式にはChandra et al. (1979)の研究などがある。最大震度や距離減衰には地域依存的な性格があるため、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。

建物倒壊率：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、7つの建物種別ごとに倒壊率関数を与えた（図-3）。「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処理方法や用語に関する不統一があり、データの整合性には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（7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えでは、さしたる障害にはならなかった。

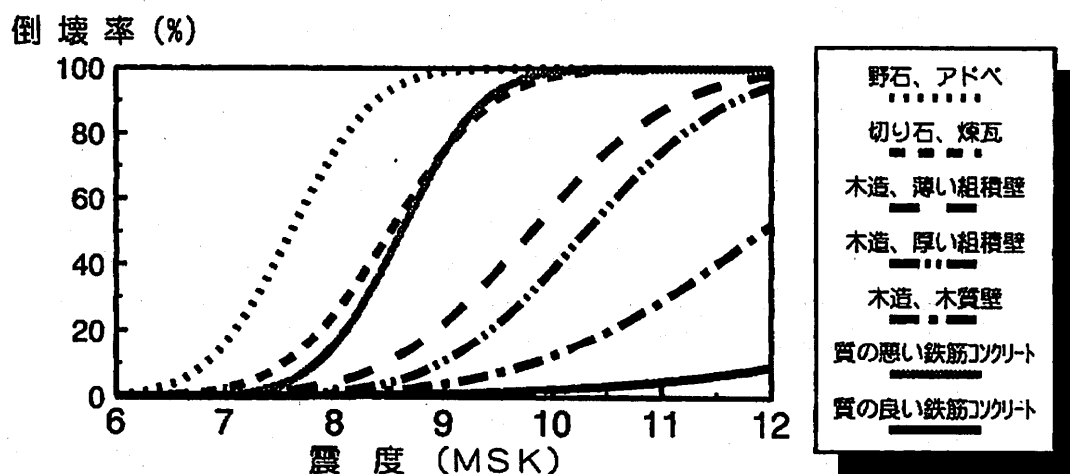


図-3 建物の倒壊率関数

死者発生率：建物倒壊率と死亡者発生率の関係は、Coburn et al. (1989) が整理した結果を参照し、これをわずかに単純化して与えた（図-4）。

2.3 テスト

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。これらの地震は内陸に発生した浅発地震で、相当の被害を伴ったという点で共通している。建物の倒壊以外の原因（火災、地変、津波など）による死者が卓越した地震は含まれていない。これらの地震について死者数のデータと、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。

地域安全学会 第2回研究発表会

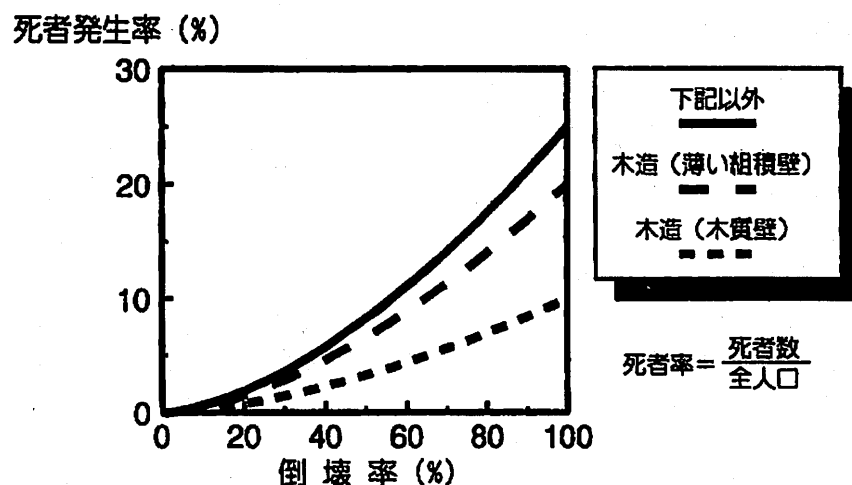


図 - 4 死者の発生率関数

表 - 2 被害推定モデルのテストに用いた地震

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 Burdur, 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

死者数のデータと推定値を比較した (図 - 5)。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0.54~4.8 (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人以上の地震 (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。

地域安全学会 第2回研究発表会

推定した死者数 (人)

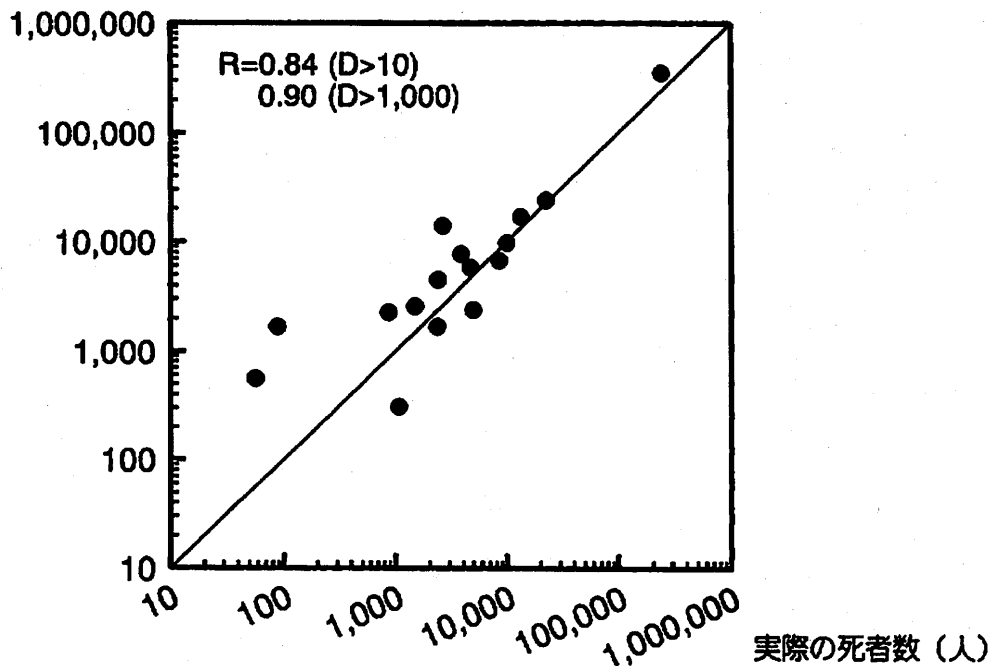


図-5 死者数の記録と推定値の比較

4. おわりに

地震による死者の発生を、巨視的なプロセスモデルによって記載する方法を開発し、国や地域をこえて適用できる推定方法（汎用モデル）として提案した。このモデルの汎用性を高めるために、推定に用いる地域データには、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モデルの適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、地域の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。

また、この推定モデルには、仮想の地震による事前推定のみならず、実地震記録による事後推定（即時推定）にも適用できるような構成を取り入れた。地震に関する入力データには、地震の発生から間をおかずに入手できるものだけ（マグニチュードと震央位置）を使用し、これによって被害推定の即時性を実現した。

この推定モデルには、その汎用性に注目すれば、地球的な視野の危険度評価（リスク・ゾーネーション）におけるツールとしての役割が期待でき、災害の事前評価を通じて長期的な減災対策の展開に寄与しうる可能性がある。また、この推定モデルがもつ即時性に注目すれば、発災直後の「情報の空白期」にあって緊急対応（とりわけ国際的な救助活動）の意志決定を支援する手段としての役割が期待でき、事後対策の効率化にも寄与しうる可能性が認められる。

地域安全学会 第2回研究発表会

この研究で構築した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100～10万人の範囲にある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。

今回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、手付かずのままで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。

この推定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見て通ることはできない。モデルの汎用性は、推定に必要な地域情報を世界中から収集し、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。一方、即時推定への応用の観点からみても、発災後の限られた時間内に被災地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を準備しておくことが不可欠と考えられる。必要な地域データが「国や地域をこえて準備しやすい」ものに限定されているとはいえ、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考えられない。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のように思われる。

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. コッパーン博士との議論は有益だった。記して感謝する。

引用文献

- Alexander, D., 1985. Deaths and Injury in earthquakes, *Disasters*, Vol.9, No.1, pp.57-60.
- 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.
- 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, U.S.A., pp.P107-P132.
- Karnik, V., 1965. Magnitude-intensity relations for European and Mediterranean seismic regions, *Studia Geoph. et Geod.*, Vol.9, pp.236-249.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 1988, *World Map of Natural Hazards*, 2nd edition, München, Deutschland.