

## 第2章 米国における危険度指標の変遷と各業界の取り組み

### 2.1. 危険度指標の変遷

保険業界で現在多用されている確率論的手法によるリスクカーブ（年超過確率曲線）については第3章以降で詳述することにするが、そこに至る過程は、すでに述べたように決定論→擬似確率論→確率論というように一本道ではない。危険度指標として最も多く使われるPMLという言葉に意味をもたせようとしたために混乱し、確率論から決定論に戻ったり、また、法廷論争になったりと20世紀後半は危険度指標にとっても激動の数十年であった。

地質学者、建設業界（エンジニア）の場合と保険業界では危険度指標に対するニーズがかなり異なっているので、その取り組みにもかなり差がある。本章では、両者の取り組みについてより詳細に個別にフォローしてみることとする。図2-1に、危険度指標の推移をまとめたフローを示す。

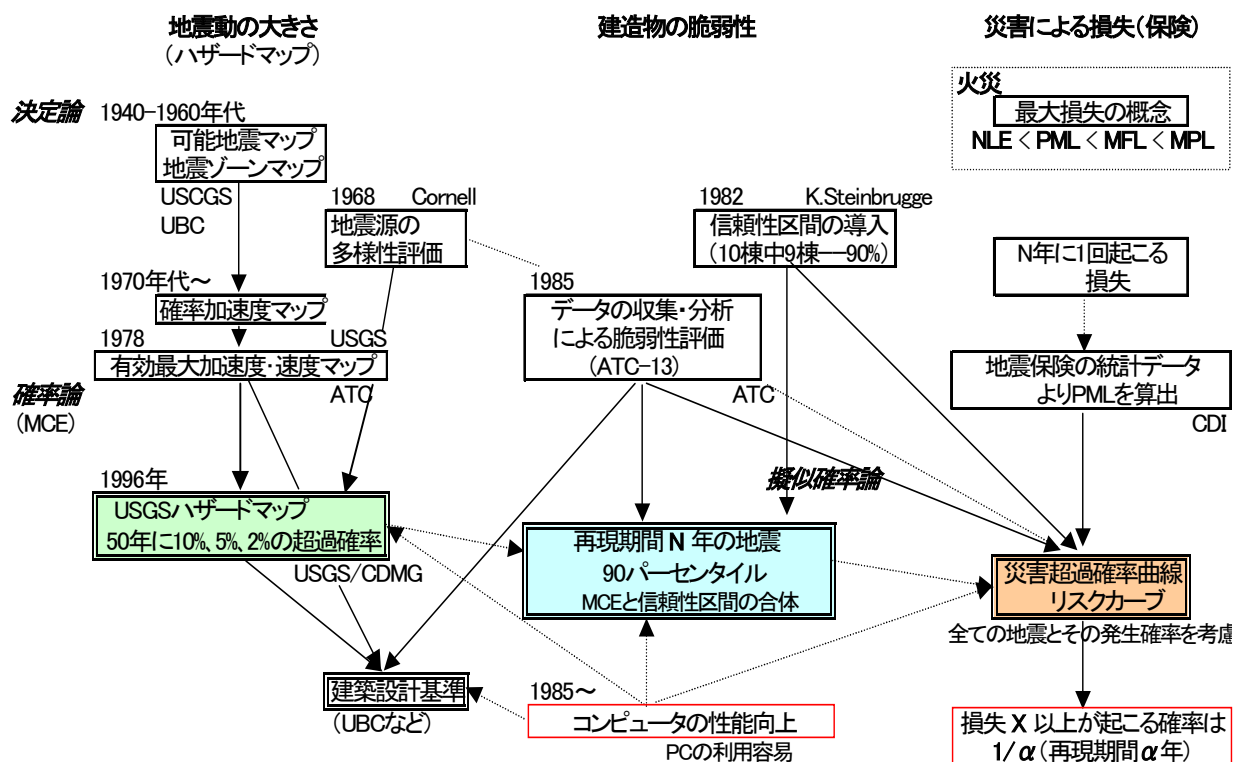


図 2-1 危険度指標の推移（決定論から確率論へ）

## 2.2. 地質学者および建設業界の取り組み

地質学者及び建設業界の取り組みの特徴は、前記 1.2. で述べた MCE を求めることと、その MCE をベースに個々の建物の脆弱性を考慮して損害額（率）を求めることであった。以下、代表的な機関・組織が取り組んできた主要点を具体的に述べる。

### 2.2.1 地震ハザードマップの作成（米国、主としてカリフォルニア州）

前述したとおり、決定論的な手法により地震動を評価する取り組みは当初から行われていた。地震学者にとっては、どの地域の地震動が大きいかが関心事であるが、建築技師にとっては、対象建築物の設計に際してどの程度の地震動を見込むべきか、また想定された地震が起きた場合、その建物の被害はどの程度になるかの予測が必要であった。そのため、かなり前から様々な方法や手段が用いられてきた。特に、建設業界では、耐震設計のためには、その地域の最大地表加速度（最大地表速度）を知ることが不可欠であり、地震学者の協力を得て、各種の地震強度マップ（地震ゾーンマップ）が作成された。これらは、初期には決定論的なマップであったが、次第に確率論的なマップへと大きく変化していった。このような地震学者、建設業界の努力の成果を保険業界も取り入れ、保険リスクの評価も確率論的手法に大きく前進していった。

ここで、ハザードマップの変遷を述べる（文献 7）。初期の全国的な地震マップは 1930 年代の初期に発表されているが、1948 年に F. P. Ulrich (U.S. Coast and Geodetic Survey) がゾーンを 0、1、2、3 の 4 段階に分けた地震予測マップ（図 2-2）を開発した。これが UBC に採用され、最初の全国地震マップとなった。しかし、このマップは、ゾーン分割の根拠など不備が指摘されたこともありお蔵入りとなった。その後、1958 年に地震地域マップ（図 2-3）が Richter により発表された。これは、震源分布ではなく、最大地震動を推定していることと、定量的な発生頻度の概念を導入している点が大きな特徴であった。

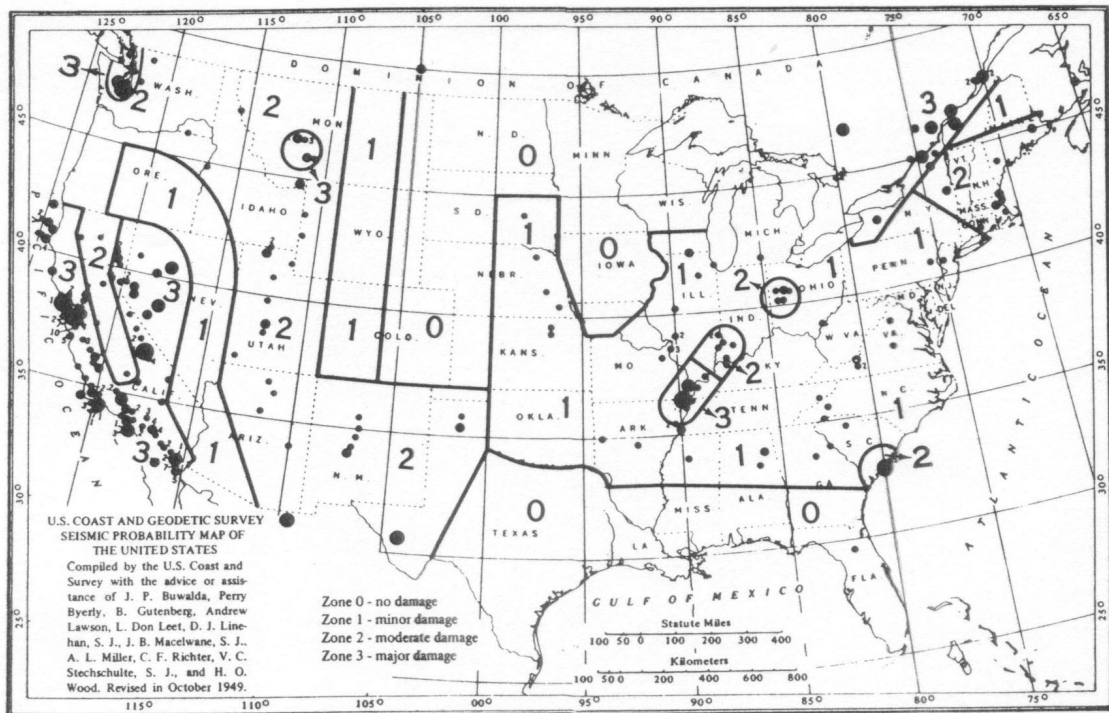


図 2-2 地震予測マップ (Ulrich 1948)

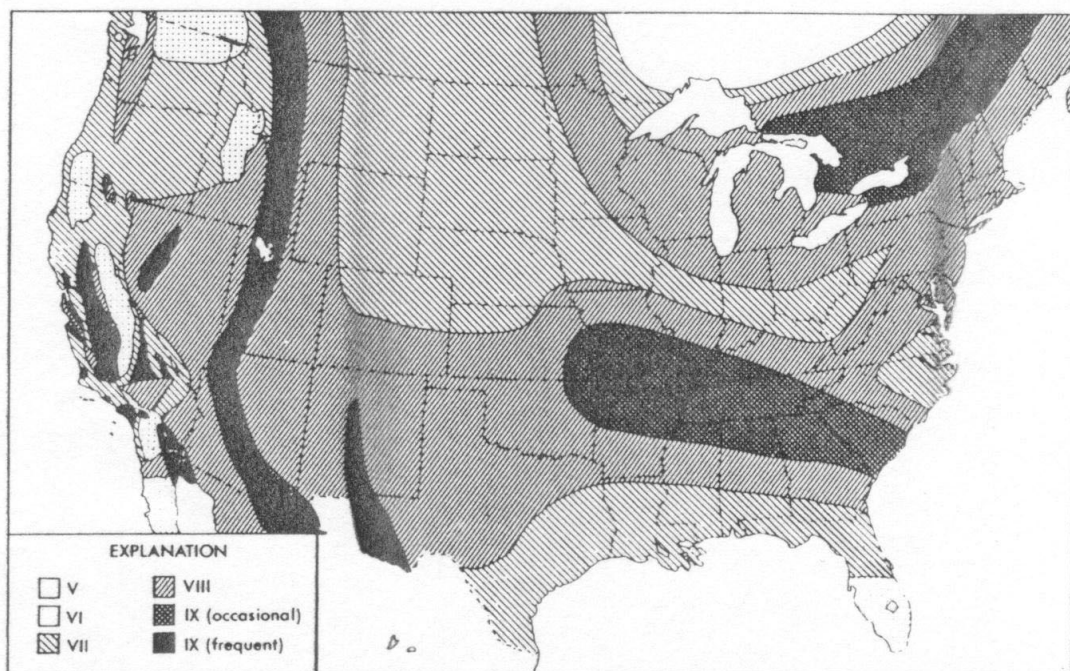


図 2-3 地震地域マップ (Richter 1958)

1960年代は、地震動の確率論的評価への関心が増大した時期であった。その理由は、当時のハザードマップの欠点が認識されたことと、確率論的モデルの論文が多く発表され、それを地震ハザードモデルへの応用が進んだためである。

UBC1970年版には、Algermissen (USGS : United States Geological Survey : 米国地質調査所) により開発されたマップが使用されている。その後 1976 年版では、ゾーンの分類をカリフォルニアの一部に大地震の高い発生頻度を定性的に考慮してゾーン 4 を追加するなど一部修正され、1979 年版ではそのマップ (図 2-4) は更に修正されている。

1976 年には、米国の確率加速度マップ (図 2-5) が Algermissen と Perkins により発表された。これは岩盤における 50 年間 10%発生超過確率の期待最大加速度が定量化されたもので、それがマップに示されている。このマップでは、地震はその大きさ、発生再現期間、発生場所はランダムであり、震源ゾーン内の発生分布は一樣であるという考えである。地震のマグニチュードと再現期間はともに指数分布であり、マグニチュードは観測経験をもとに設定され、再現期間の分布はポアソン分布としている。

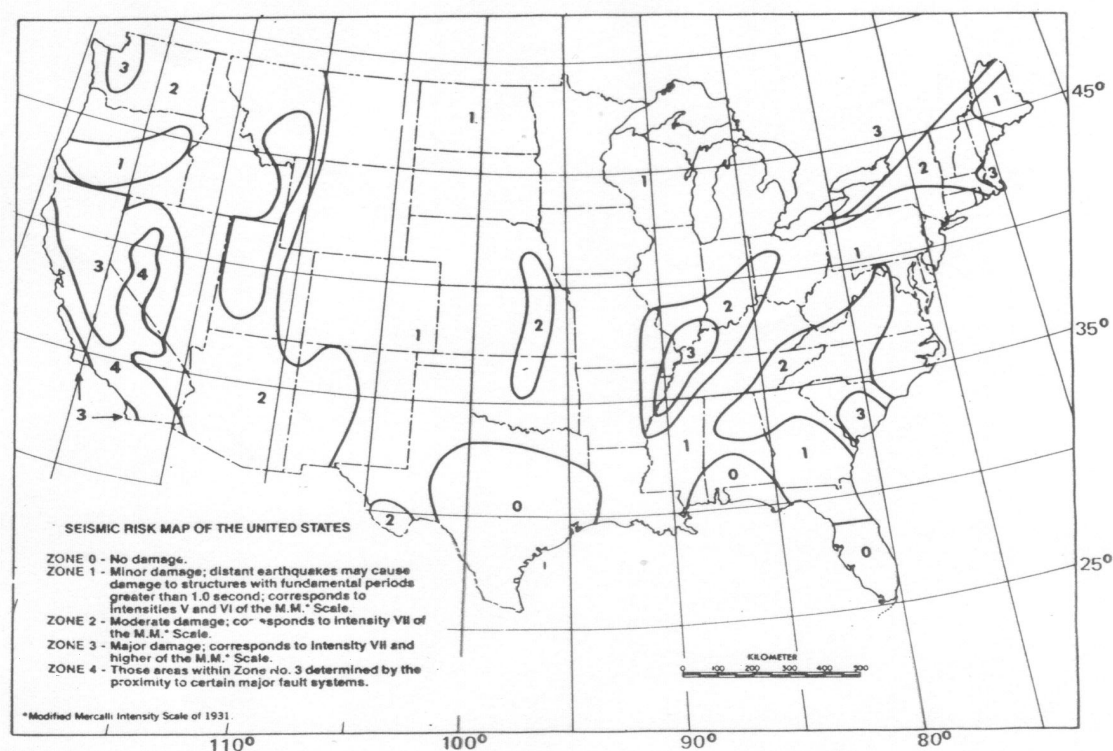


図 2-4 地震ゾーニング・マップ (UBC 1979)

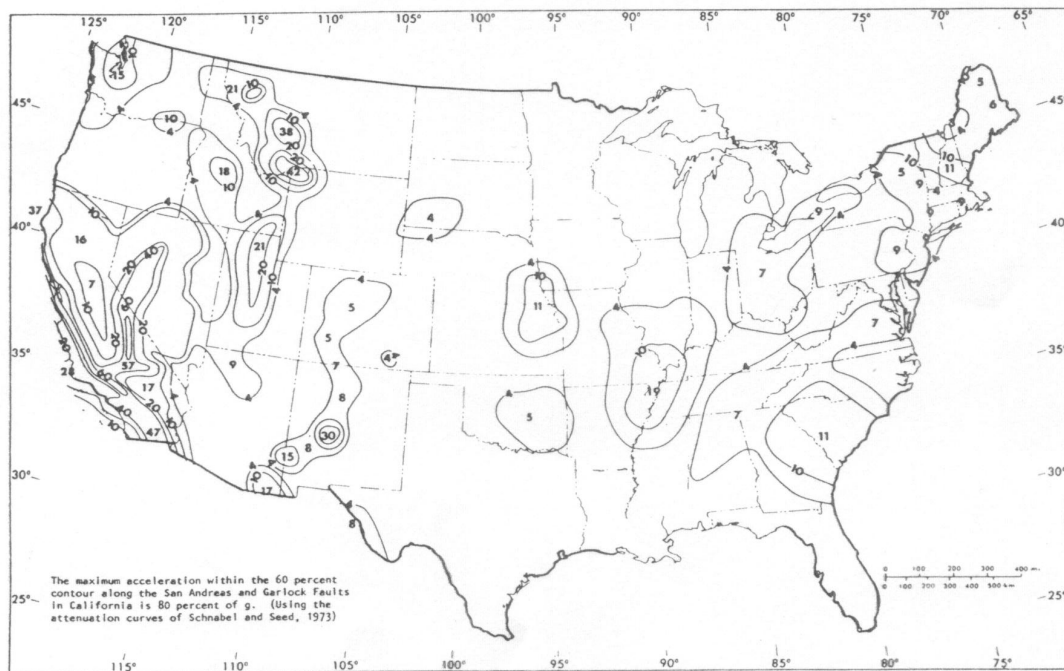


図 2-5 50 年間の超過確率が 10%の確率加速度マップ (Algermissen and Perkins 1976)

1978 年に Algermissen と Perkins の確率加速度マップが完成しているが、ATC (Applied Technology Council) の新しい耐震設計法の開発を目的としたプロジェクトがほぼ同時期に行なわれた。ATC のレポートには、二つの地震動マップ (有効最大加速度 (図 2-6) と有効最大速度) があり、これより設計地震動を求めて地震 (水平) 力係数を計算する。この二つのマップは、Algermissen と Perkins により発表された 50 年間 10%発生超過確率の期待加速度 (1976 年) がベースになっている。Wiggins による米国の予想最大速度と改正メルカリ震度階マップも ATC の地震動マップに大きな影響を与えた。この ATC-3 レポートは、新しい耐震設計法を作るために二つ以上の学問領域の努力により生み出された研究成果利用の実例である。

1982 年に、Algermissen らは 10、50、250 年間のエクスポージャ期間に対する確率最大加速度および確率速度マップを発表した (図 2-7)。1976 年の Algermissen-Perkins のマップ (図 2-5) と比較すると、1982 年のマップは、USGS により行われた一連の作業をとりいれて大きく進歩していることがわかる。

最新の全米的な震源モデルおよび地震動地図は、1996 年に USGS より発表された。この最新版は米国中の多くの科学者の協力により作成されたものであり、カリフォルニア州のモデルは CDMG (California Division of Mines & Geology : カリフォルニア州鉱山・地質部) との協力で作成された。震源と減衰モデルの文書及び確率論的地震動マップはすべて、インターネットで公開されている。

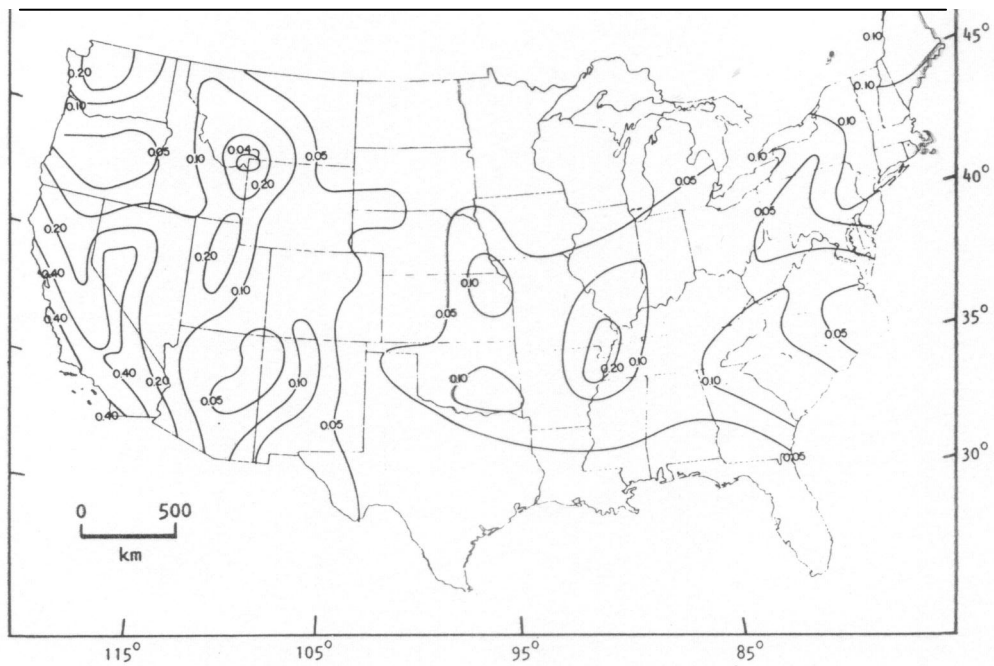


図 2-6 有効最大加速度マップ (ATC 1978)

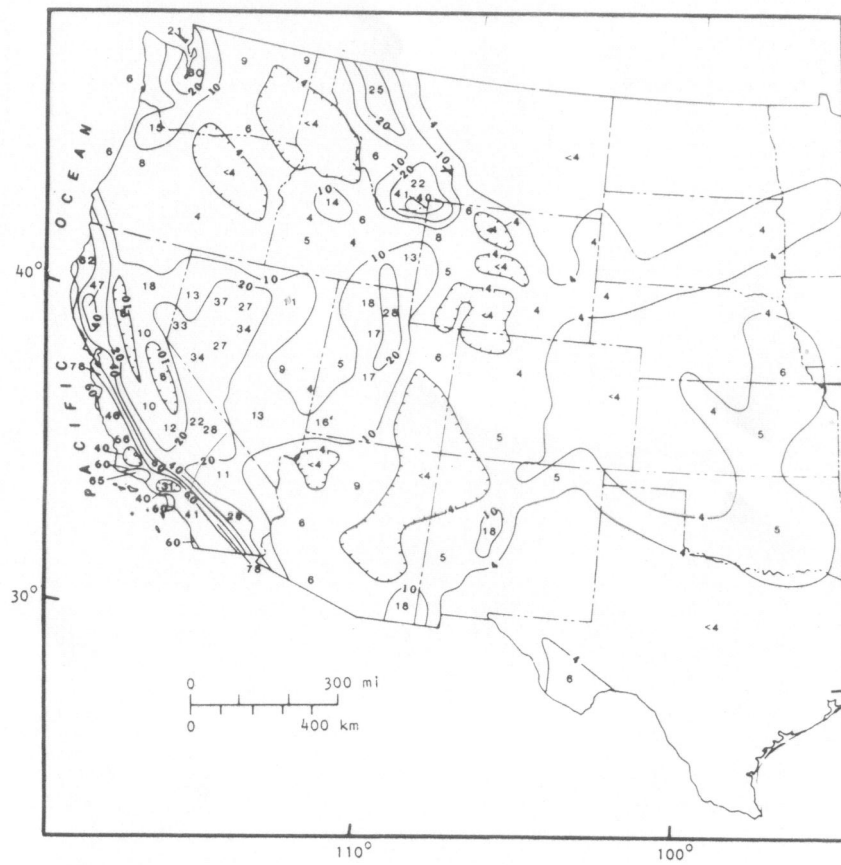


図 2-7 50 年間の超過確率が 10%の確率最大加速度マップ(Algermissen et al 1982)

USGS が提供しているハザードマップは、50 年間に、10%の超過確率（年超過確率 0.21%）、5%の超過確率（年超過確率 0.103%）および 2%の超過確率（年超過確率 0.0404%）の 3 種類、また、起こり得る地表加速度としては、最大地表加速度、0.2 秒周期加速度、0.3 秒周期加速度および 1.0 秒周期加速度の 4 種類、両者を掛け合わせて合計 12 種類のハザードマップを公開している（文献 8）。

上記のハザードマップは、米国全土では 1/7,000,000、カリフォルニア州、ネバタ州、アルバータ州西部、ユタ州については、1/2,000,000 の縮尺で提供されている。図 2-8 に一例として 50 年、超過確率 10%の地表最大加速度のマップを示す。

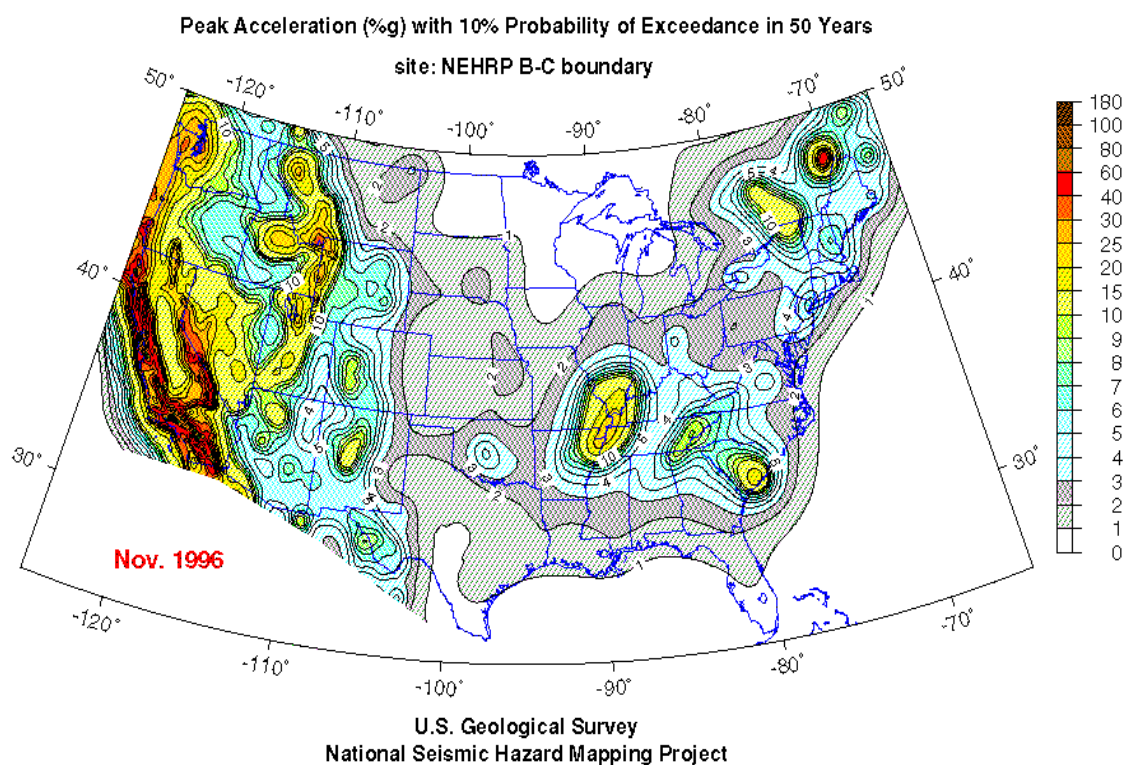


図 2-8 50 年間の超過確率が 10%の地表最大加速度マップ（USGS 1996）

地震ハザードマップの歴史をたどってみたが、エクスポージャ期間として 10、20 および 50 年が使われていた中で、50 年という数字が当時の一般的な建物の耐用年数に近く、また、人間が現実的に感知し得る長さであるということもあり、1976 年の Algermissen 以来引き継がれ、定着してきたものと思われる。やはり、先輩の研究で利用された数値は、その先輩が偉大であればあるほどそれを踏襲するという歴史の流れの中で定着していったと推察される。また、超過確率のパーセントについては、50 年間に 10%の超過確率、50 年間に 5%の超過確率、50 年に 2%の超過確率、あるいは 250 年に 1 回、500 年に 1 回などが使わ

れている。地震以外の自然災害、例えば海洋波の波高が 100 年に 1 回を最大波高として船舶の構造設計の一つの目安としていたことなどを考えれば、発生確率が小さく、不確定要素が大きい地震に対して、建築技術者が 500 年（または 475 年）に 1 回の地震動、つまり 50 年間に 10%の超過確率を目安にしたことも、当然の成り行きであったと思われる。

## 2.2.2 ATC の取り組み（建物の脆弱性評価）

米国の ATC（Applied Technology Council）は、SEAOC（Structural Engineers Association of California：カリフォルニア構造技術者協会）の努力により 1971 年に設立された。ATC の目的は、構造技術（および関連する地盤、風、地震）の設計実務者が技術開発の成果についていき、且つそれを有効に利用することを助けるとともに、必要な研究を促進し、それらの成果を広く利用させることである。

このような設立の趣旨のもと、ATC は毎年のように研究プロジェクトを立ち上げ、多くの成果を上げてきた。前述の ATC-3 のレポートも建物の耐震設計基準に大きな貢献をし、特に 1985 年に発行された ATC-13（カリフォルニアにおける地震被害評価）は、FEMA（Federal Emergency Management Agency：連邦危機管理局）の依頼を受けて行われた地震被害評価に関する最も有名な調査研究である（文献 9）。この研究の特徴は、設備のクラス分けを徹底して行ない、建物を 40 クラス、その他の構造物（橋、ダム、タンクなど）を 38 クラス、合計 78 クラスに分類し、また、その用途（工業、農業、商業など）を 35 クラスに分類するとともに、過去の地震動を改正メルカリ震度階に分類し、地震動による物的被害、地盤崩壊、浸水、火災などの被害、さらに機能損失（使用不能損失）、人的被害の程度をこれらのクラス分類ごとに整理し、両者の相関関係を求めたことである。

この研究は、それまで過去の被害データの収集方法および分類がばらばらで、将来の地震被害の予測に充分活かすことが出来ないという欠点を克服したばかりでなく、保険業界で実務的に進められていた確率論的被害予測プログラムの基礎データとして使用され、その開発されたシステムの信頼性（特に脆弱性評価において）向上のために非常に大きな役割を果たした。

## 2.2.3 SEAOSC の取り組み

建築技術者の立場からも PML についての定義がなされた（文献 10）。SEAOSC（Structural Engineers Association of Southern California：南カリフォルニア構造技術者協会）は、地震リスク評価、特に PML の合理的アプローチを展開するために地震損失評価小委員会を設立した。この委員会は PML を「定義された地震による建物や構造物に対する、与えられた超過確率における損失」と定義している（SEAOSC 1995）。この委員会は定義

された地震を「対象建物あるいは構造物に影響する、与えられた再現期間を持つ地震動」と記述している。言い換えれば、再現期間は地震発生地域での地震動についてのものであって、損失規模についてのものではないということである。この SEAOSC の定義は、建物あるいは構造物の人命安全設計を意図した UBC の要求に近いものである (ICBO 1994 年)。つまり、その地点における設計地震動は、50 年間に 10% の超過確率をもつものであり、475 年の再現期間に相当するものである。

## 2.2.4 Steinbrugge による PML の定義

PML の定義は多数あるが、特にその発祥として多く引用されるのが、Karl Steinbrugge による定義である (文献 11)。その定義は次のとおりである。

### Karl Steinbrugge による PML の定義

個別建物の予想最大損失 (Probable Maximum Loss) は、以下の条件のもとでの金銭的損失 (または、保険価額のパーセント) である。

- ① 予想最大損失ゾーン (PML ゾーン\*) にある硬い沖積層または同程度に固められた人工的盛土に位置し、そして、
- ② 予想最大地震の震動のみを受けるもの、つまり、断層をまたいでいることや地滑りの影響を受けないこと。

建物クラスの最大予想損失 (クラス PML) は、上記条件のもと、与えられた地震建物クラスにおいて、10 棟のうち 9 棟を超えない金銭的期待最大損失と定義される。10 棟目の損失は、不適切な設計又は施工の特異性であるとか、異常な地震動と建物の応答、そして建物クラスに適合しない地質的ハザードなど、極めて例外的なものである。この 10 棟のうち 9 棟の定義は、高い PML 値の高い部分と低い PML 値の低い部分に、わずかな誤差をもたらす傾向がある。以後、PML という時は、特に記述のない場合は「クラス PML」のことを言う。

建物の下の断層破壊、そのサイトの地滑り、および構造的に弱い地盤などの地質的ハザードは、クラス PML の数値には含めず、特別なハザード地域にある建物は、PML 値を PML 手法の項で論議したように修正する必要がある。

上記の定義には、PML ゾーンという言葉が出てくるが、下記のように定義している。

「PML ゾーンとは、長さが予想最大地震による断層破壊の予想最大のもので、震央深さの 2 倍の幅を持つ区域のことである。この PML ゾーンは、通常の地震保険引き受けのゾーンより明らかに小さく、両者を混同してはならない。Puget Sound を除く西部地域の断層では、この PML ゾーンは普通 15 マイル (断層を中心として) の幅で、實際上ゾーンの長

さは地震保険引受ゾーンの長さと同じでなければならない。この 15 マイル 幅は、すべての横ずれ断層に当てはまるが、逆断層には当てはまらない。逆断層は、上部がずれるので、上部の方にゾーンが移動する。この移動は数マイル程度であるが、一般的なルールはない。」

以上のように Steinbrugge は、PML を定義しているが、この 10 棟うち 9 棟という定義は、次のように解釈される。例えば、ある村の立地条件が上記の 1、2 であったとする。この村には 10 棟の建物があり、ある大きさの地震が発生したとする。その地震による損失を小さい順に並べ、L[1]、L[2] ----、L[9]、L[10] とすると、L[1] が最小の損失で L[10] が最大の損失ということになる。この場合、最大予想損失（PML）は、L[9] の損失であるということの意味している。言い換えれば、なんらかの寓意性で生じる可能性のある極端に大きい損失は排除することを意味している。

この、10 棟のうちの 9 棟という定義は、当時としては比較的理解し易い定義であったことから、その後の建物の脆弱性評価において 90 パーセンタイルという概念で、現在広く使われるようになったが、本来の定義では断層に近い PML ゾーン内の建物という定義であったものが、ゾーンの定義を無視して使われたり、引用したりしているうちに、10 棟のうち 9 棟という定義のみがいつのまにか市民権を得て一般に使われるようになったものと考えられる。

## 2.3. 保険業界の取り組み

### 2.3.1 CDI（カリフォルニア州保険庁）

保険業界では、支払い保険金の総額が幾らになるかということは大きな関心事である。特に地震保険が早くから発達してきたカリフォルニア州では、1971 年のサンフェルナンド地震以降、保険業界の抱える地震リスクに大きな関心が集まり、それを受けて CDI (California Department of Insurance : カリフォルニア州保険庁) は 1978 年に通達 226 を出し、地震保険の認可を受けているすべての保険会社に、州内の建物および家財の地震被害を対象とする保険エクスポージャを毎年報告する義務を課した(文献 12-14)。この報告義務は、現在も続いている。

これらの保険会社は、詳細なアンケートに回答するという形で、CDI にいわゆる予想最大損失（PML）や、大地震が発生した場合に建物や家財の予想支払保険金（免責金額控除後）を見積もり、州内の 8 つの地震ゾーン別に報告している。CDI は、この年次アンケート調査を基に保険対象となっている PML 損失を地震ゾーンごとに集計し、その結果を 2 年毎に公表している。地震ゾーンは、8 つのゾーンに分けられており、ゾーン A（サンフランシスコ）とゾーン B（ロサンゼルス/オレンジ郡）が最も地震リスクが大きい地域である。

CDI の定義している PML は、可能性のある最大の地震が起こった時に、カバーしているポートフォリオまたは特定の設備に対して保険会社が支払うべき最大損失額のことである。例えば、家屋の数を 10 万戸、平均再調達価額を 20 万ドルとすると、合計の再調達価額は 200 億ドルとなる場合を想定してみよう。ある地震が発生した時、多数の家は一部損壊するが、全く無傷の家もある。保険会社のマネージャはどの程度の保険金支払額になるか推定しなければならない。CDI は、この概念を発展させ、保険に加入している家屋の再調達価額と PML パーセント係数を掛けることにより、ある地震ゾーンの保険加入家屋の全ての平均期待損失額を求めた。つまり PML パーセント係数（10%免責控除あり）を 1.7%とすれば、200 億円  $\times$  0.017 = 3.4 億円となる。この 1.7%は、過去の大地震の被害を参照して決められたものである。表 2-1 に一例を示す(文献 13)。

表 2-1 ゾーン A（サンフランシスコ）における PML

元受保険業者により出再されたPML

|             | 1992     | 1993     | 変動率<br>1993/92 | 1994     | 変動率<br>1994/93 | 1995     | 変動率<br>1995/94 | 1996     | 変動率<br>1996/95 |
|-------------|----------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|
| 直接PML       | \$13,199 | \$11,324 | -14.2%         | \$11,729 | 3.6%           | \$12,812 | 9.2%           | \$11,532 | -10.0%         |
| リスクごとの出再PML | \$7,265  | \$4,083  | -43.8%         | \$4,120  | 0.9%           | \$5,036  | 22.2%          | \$4,912  | -2.5%          |
| 上記出再後純PML   | \$5,933  | \$7,241  |                | \$7,609  |                | \$7,776  |                | \$6,620  |                |
| 異常災害出再PML   | \$2,481  | \$2,089  | -15.8%         | \$2,088  | 0.0%           | \$1,881  | -9.9%          | \$1,665  | -11.5%         |
| 上記出再後純PML   | \$3,452  | \$5,152  |                | \$5,521  |                | \$5,895  |                | \$4,955  |                |
| 合計出再額       | \$9,746  | \$6,171  | -36.7%         | \$6,208  | 0.6%           | \$6,917  | 11.4%          | \$6,577  | -4.9%          |
| 出再比率(%)     | 73.8%    | 54.5%    |                | 52.9%    |                | 54.0%    |                | 57.0%    |                |

上記は、元受保険会社が引き受ける保険に関する直接 PML であるが、保険会社はリスクを転化・分散するために再保険に出再するのが普通である。この場合出再した部分についても PML という言葉を使用している。すなわち、直接 PML（元受保険業者が引き受けた保険金額の総額に PML パーセントを掛けた額に相当）、出再 PML（直接 PML のうち出再した部分の PML）また、出再後純 PML（直接 PML—出再 PML）と称しており、CDI では明らかに PML を定義されたものとしてではなく、単に予想最大損失を意味する言葉として使っている。このことは、PML を使う場合に、その定義を明確にして使う必要があることを意味しており、保険業界では個別に定義しながら PML を使ってきた。

このように、保険会社が PML を算出するには、引き受けた保険金額（契約金額）の総額と PML パーセントが必要となる。この PML パーセントは、地震ゾーンごとに地震リスクの大小に応じて決められている。これは、過去の地震被害等のデータから統計的に算出することも可能であるが、CDI でのアンケート調査、あるいは建築技術者、地質学者などの調査・研究の成果を取り入れ、地震被害額の推定のための精度を向上させてきた。特に、保

険業界に大きな影響を与えた研究は、前記 2.2.2 での「ATC-13：カリフォルニアにおける地震損害評価データ」（ATC 1985）である。かなり詳細なデータが集められ徹底的な分析が行なわれ、後述の超過確率曲線を求めるための貴重な資料となり、コンピュータの発達と相まって、保険業界のリスク算出に関する大きな流れを形成した。

保険市場で使われている PML の定義に関しては、1990 年代の文献（文献 10）では、CDI による PML の定義を紹介している。

- リヒタースケール 8.25（1906 年サンフランシスコ大地震相当）までの地震に対応する集積保険損失。この値は予想最大損失（PML）と呼ばれる。
- 予想最大損失（PML）とは、この地域で起こりうる最大規模の地震を想定し、その期待地震動による被害損失を意味する。
- 予想最大損失（PML）とは、10 棟の建物のうち 9 棟が受ける予想最大経済損失の平均値と定義される。

この三番目の定義は、2.2.4 章で述べた Karl V. Steinbrugge の定義をフォローしたものである。

### 2.3.2 NDC（自然災害連合）

保険会社により組織されたグループの一つである NDC (Natural Disaster Coalition：自然災害連合)は、PML を次のように定義している（文献 10）。

- PML は 500 年の再現期間を持つ損失と定義される。これは 1 つの地震から受ける損失が PML と定義された損失を超える確率が年 0.2%（1/500）ということである。
- PML が 500 年に 1 回発生する地震ではなく 500 年に 1 回発生する損失と定義されているので、PML となりうる地震は複数存在するということになる。

1990 年代の半ばになると、保険業界においても確率論によるリスク評価の手法が確立し、専門のソフトウェアも開発され、コンピュータ技術の進歩と相まって確率論的考えが保険業界に浸透してきた。建設業界では、設計に用いる地震動とその発生確率を予測し、その地震動に対する建物の脆弱性を評価して損失（率）を求めるという手順になるが、保険業界の場合は、最終的には損失（率）を求めるので、500 年に 1 回発生する地震ではなく、500 年に 1 回発生する損失ということになる。