

第 1 章 米国における危険度指標の歴史

1.1. 初期の決定論

1.1.1 歴史的背景

PML という言葉は、いつ頃から使われだしたのかは、必ずしもはっきりしない。しかし、人類の歴史の中ではあらゆる自然災害が多発しており、それらの自然災害からどのように住民を守るかが為政者の大きな仕事の一つであったことから見ても、PML (Probable Maximum Loss : 予想最大損失) あるいは同様の概念がかなり以前からあったと考えるのはごく自然なことである。しかし、その概念が、具体的な数値との関連で定義されるようになるのは、やはり損害保険が事業として成立ってからであり、火災、爆発あるいは海難といった突発的・偶発的な事故によって引き起こされる損害がどの位になるか、またその上限は幾らと考えれば良いか、また、保険の加入者から見れば、そのような災害が起こった時にどれだけの保険金が支払われるかということを知る必要があったからである。損害は、偶発的なハザードの発生とそれに対する脆弱性によって引き起こされるものであるので、その上限の決定には、損失の持つ偶発性と脆弱性という 2 つの側面が反映されていなければならない。保険辞典 (文献 1) には、「損失の上限は、最悪の状況が重なった場合に、特定のリスクに関して起こりうると考えられる最大の損失にするべきである」と記されている。

この「最大の損失」とか「最悪の状況が重なった場合」のような言葉が使われているのは、曖昧なものの中で何らかの明確性を、主観的なものの中から客観性を決定論的に求めようとしているためである。しかし、そのような明確性や客観性には定量的な概念がなく、非現実的であることが多い。NASA においても、スペースシャトル・チャレンジャーの安全性について、「スペースシャトルは有人飛行であり、必然的にその使命の成功確率は 1.0 である」という声明を出していたが、1986 年の惨事が起こるまでは定量的なリスク評価は実施されていなかった。

リスクに関しても、かなり以前から決定論に対比して確率論という考えが存在していたが、決定論者も、自然災害のように偶発的に発生する被害に関しては、その被害の大きさはかなり不確実であることは認識していた。決定論的手法では危険度を評価するにあたり、しばしば不確実性を計測する代わりに、被害の大きさを大き目に (安全側に) 見積もる方法が採用され、リスクの定量化は行われなかった。決定論のベースは科学的な自然法則であり、損失に関する上限について科学原理を基に確立できるならば、リスクを定量化する必要はないと考えていたことが理由の 1 つとして挙げられよう。

不確実性を確率的に処理するリスクの定量化の際には、被害を発生させるハザード (地

震・台風など)、評価すべき建物等の脆弱性といったあらゆる関連情報を集めて、これをモデル化するという膨大な作業が必要であることを考えれば、被害データが少なくコンピュータが普及していなかった時代に決定論的手法が主流であったのは当然であると考えられる。従来、保険における最大補償額の見積りが決定論的に行われていたのはこのためである。

PMLに関する考え方の流れを見ると、保険業界、建設業界それぞれそのアプローチにかなり差のあることが分かる。保険業界では支払保険金が最大でどの程度になるのかという点に大きな関心をもっていただけ、この額が分かればその算出過程にあまり立ち入る必要はなかった。個別の建物の損害額（損害率）も場合により必要であるが、引き受け保険契約全部の支払保険金が必要になることが多く、個々のばらつきはあまり問題とはならなかった。一方建設業界は、建築物が受ける最大の地震動を決定論的あるいは確率論的いずれかの方法によって想定し、その地震動（外力）に対して耐え得る設計をすることがポイントであった。また、災害後の建物の被害額（被害率）に関するデータの集積と分析は、それ以降の設計基準等に反映され大いに役立った。

以上のように両者の関心事は必ずしも一致していないが、両者それぞれの成果をとり入れ相乗効果を発揮し確率論的考え方を育みながら、同時に決定論的方法をも充実させてきた。1980年代半ばになるとパーソナル・コンピュータが普及し、従来煩雑で手計算では物理的に不可能であった確率論的計算手法が低コストで、かつ容易に使えるようになり、確率論が普及し、特に保険業界ではその手法が主流になってきた。

1.1.2 火災リスク評価（危険度指標の発祥）

初期の損害保険事業においては、火災保険が大きな比重を占めていたので、火災保険の損失の上限を正確に求めることが要求された。特に、火災や爆発により大きな被害が予想される石油化学プラント等の場合は、災害が起きた時に工場（被保険者）自身または専門のサーベイヤーによって被害の調査が行なわれ、それらのデータを基に最悪の損失シナリオが作成され、損失の見積りが行なわれた。

最悪の災害がどのようなものになるかは、工場のプロセスや工場の配置あるいは予防措置等によって異なるが、最悪の火災は、燃料貯蔵タンク周辺の発火であり、また最悪の爆発は蒸気雲爆発、つまり蒸気雲の濃度が最も高い時の発火によって引き起こされるであろうということは経験的に理解されていた。このような評価は、当時の決定論的手法に基づいて、発生する可能性がある損失を大きめに見積もることによって行われるのが一般的であった。また、その損失の発生確率や信頼性水準は示されなかった。しかし、過去の蒸気雲爆発事故の事例を検証することにより、その後発生する可能性がある「最大の」シナリオを実際に起きた災害に近いものにするには十分可能であった。代表的な蒸気雲爆発

としては、化学処理工場では英国の Flixborough (1974 年)、石油化学工場ではテキサス州の Pampa (1987 年)、ソ連の Ufa (1989 年)、フランスの LaMede (1992 年)、ベネズエラの Lake Maracaibo (1993 年) などがある。

このような決定論的な評価には、確率の概念は含まれていないが、複雑な流体力学分析や化学工学の専門知識を駆使して、論理が理路整然と組み立てられており、それらの手順が、1980 年代初期には、既に PC 上で稼動する PML のソフトウェアにも組み込まれていた。

PML の概念は、前述のように火災リスクに由来して使われだしたものである。火災リスクの評価には、PML の他に、NLE、MFL、MPL などがあり、定義も異なっている。いずれも確率の概念は含まれていないが、火災発生後の災害の大きさを左右する防火対策、延焼防止対策の差を考慮して用語を区別しており、参考のために以下に示す。

- **NLE (Normal Loss Expectancy)**
スプリンクラー、火災・煙検知器など能動的な火災防止システムがすべて正常に作動した場合を仮定したときの予想損失。
- **PML (Probable Maximum Loss)**
主要な能動的防火システムが作動しないと仮定したときの予想損失。例えば 2 基のスプリンクラーシステムがあった場合、防火効果が大きい方の主スプリンクラーシステムが作動せず、しかるべき時間経過後に消防隊が消防活動に入るとことを仮定し、その際の損失を算定する。
- **MFL (Maximum Foreseeable Loss)**
あらゆる能動的な防火システムが作動せず、しかるべき時間経過後に消防隊が消防活動に入ることを仮定した場合の予想損失。建物の防火構造や建物間の防火帯などのみが考慮される。
- **MPL (Maximum Possible Loss)**
あらゆる能動的な防火システムが作動せず、かつ一切の消防活動が行われなことを仮定した場合の予想損失。建物の防火構造や建物間の防火帯などのみが考慮される。

1.1.3 地震リスク評価

爆発による災害と同様に地震による災害においても、決定論的手法が専門家に長い間影響を与えてきた。地震災害に直接関連した専門知識は、建築・土木工学と地質学であった。建築・土木工学のエンジニアは伝統的に、決定論的な考え方に慣れており、建築規格ガイ

ドラインに従って絶対的な安全を追求してきた。また不確実性に対しては、それを定量化することではなく、明らかに安全と思われるファクターを設計手順に含めることにより安全性を追求してきた。リスクの評価は、伝統的な建築・土木工学の教育では扱われていなかったし、また地質学のフィールド調査における標準的な語彙やトレーニング・マニュアルにもリスクの評価は含まれていなかった。

地震ハザードの評価を担当していた地質エンジニアも、決定論的な思考法に慣れていた。不確実性が含まれるために実際のハザードの評価が困難な場合には、法律の解釈でよく行われているように、過去の事例が引用された。また、実施された調査に基づく分析よりも、過去の分析や考え方が重視される場合もあった。

利用されていた手法のうち代表的なものを設計用地震動の評価を例として以下に示す。

- ① 地域の断層図の中から、危険度の高い断層を特定する。この判断には、フィールド・データと地震活動度の分布図を活用する。
- ② 断層の長さやマグニチュードに関する相関式を使って、最大マグニチュードを安全側に見積もる。相関関係におけるばらつきは考慮しない。ただし、相関式を使って求めたマグニチュードの値が過去の最大値を下回る場合には、過去の最大値を採用する。
- ③ 地震動の距離減衰モデルを使って、各断層が最大限にずれた場合のサイトの基盤レベルでの地震動の大きさを見積もる。
- ④ 基盤レベルの数値を表層地盤による増幅分を加えて修正し、サイトにおける地表地震動を計算する。
- ⑤ 対象とした断層ごとに、サイトでの地震動の大きさをランク付けする。
- ⑥ 最上位にランクされた地震動値を選択し、耐震設計に活用する。

決定論的な PML 評価に関してよく引き合いに出されるのが、カリフォルニア州におけるアルキスト・プリオロ活断層地帯法（文献 2）の規定であり、この法律には、当時の決定論的なアプローチにおける PML の考え方が含まれている。この法律の目的は、活断層の上に住居用建造物を建てることを禁じ、断層破壊による被害を減少することにある。ただし活断層の定義は、地表の移動が過去 1 万 1,000 年以内に発生していた場合ということであり、特に発生頻度については触れていない。一方、この法律により、州の地質調査官がカリフォルニアの断層図を編纂し、公開することが義務づけられた。これらの図を使うことにより、他の地質エンジニア達は、上述の PML 手順を実行する場合に必要となるマッピング作業を行なう必要はなくなった。

これらの調査結果をもとに、CDI（California Department of Insurance：カリフォルニア

ア州保険庁) は、ゾーンAにおける PML を 1906 年のサンフランシスコ地震に相当するマグニチュード(リヒタースケール)8.25 までの地震に対応する保険損失と定義した。

当時の決定論的アプローチにおいては、その地域に隣接する断層の活動を示す証拠が僅かしかなく何千年にもわたって目立った地震が発生していないにもかかわらず、潜在的な損失の評価が非常に大きくなることがある。反対に、活断層から離れた地域では潜在的な損失の評価がかなり控えめなものになることがあるが、近くに未確認の断層が存在している可能性や、限られたデータだけで断層が活動を停止していると判断されている可能性もある。したがって、一部のデータの解釈に関する地質学的な意見の相違や論争もよく起こり、多くの決定論的地震動評価においてもその結論が変更されることがよくあった。

1.2. 決定論から確率論へ

1.2.1 リスク定量化に向けた最初のステップ

上述したとおり、当初は決定論的アプローチが主流であったが、地震危険度評価を行うにあたり地震の活動度(再現期間)を考慮しない方法が正しい評価となり得るのかという不安が徐々に広がってきた。そのため、リスクベースの手法の開発が 1960 年代後半に開始された。1970 年代には、確率論的地震ハザード分析の研究が、原子力施設、石油化学プラント、液化天然ガスプラント、ダムといった潜在リスクの高い産業施設を対象として行われ始めた。

しかし、その流れは、規制当局が確率論的手法の導入といった大改革の後押しをためらったために停滞してしまった。一つの例としては、カリフォルニア州 Vallecitos にある実験用原子炉において地震ハザードの評価における従来の決定論的手法と地震活動度を考慮した手法の間に大きな法的対立があった(文献 3)。この実験用原子炉の近くに活断層があることが判明し、その危険性(安全性)をめぐる法廷論争にまで発展し、1981 年に公聴会が開催された。最終的には、この断層の再現期間は非常に長いこと、また活断層が動いても砂地であることから原子炉自体に大きな被害が発生しない、すなわちリスクの確率が非常に小さいことが認められ、6 年間の停止期間を経て 1983 年に原子炉の運転が再開された。

法廷において確率論的考えが認められたことを契機に、それ以後リスクの定量化の考えが受け入れられるようになってきた。

1.2.2 断層活動率をベースにした最大想定地震

保険業界においても、決定論的アプローチを使うことは技術面での問題点が指摘されていたが、地震リスクの研究は 1980 年代に開始された。というのは、1980 年代に入ってデ

ストップ・コンピューターによるポートフォリオ分析が現実的なものとなったためである。これらの研究は、主として保険会社が採用した地震工学分野出身の専門コンサルタントにより行われた。地震災害のコンサルタントたちは、断層の活動度を考慮していないことが決定論的アプローチの欠点であると認識し、それまで地質学者によって、純粹に決定論的な意味で使われていた MCE (Maximum Credible Earthquake : 最大想定地震) という用語にリスクベース的な意味を持たせた。すなわち、ある断層における MCE は、50 年間の超過確率が 10%となる地震と定義した。断層における地震の発生がポアソン過程とすると、再現期間は 475 年となる ($1 - \exp(-50/474.56) = 0.1$)。

このように、発生確率の考えを取り入れることにより、従来の決定論的アプローチの問題点が解決された。仮に発生すれば大きな被害になるかも知れないが、活動する確率の低い断層よりも、活動がより明白な断層に注意を向けることが可能になったためである。MCE についてのこの定義はリスクベースであるが、幸いなことにそれほど計算が複雑ではなかった。マグニチュード別地震頻度分布に関する Gutenberg-Richter の式による推定や、断層すべりデータを地震学的にマグニチュードへの変換を行うことにより容易に計算することができたのである。カリフォルニアや日本といった地震活動の活発な地域については、断層の長さから推定される最大マグニチュードに近い地震が発生することが多いため、主な断層に対する再現期間 475 年という地震の推定は信頼性が高いものと考えられる。また、過去の地震活動に関する記録や古代に発生した地震の痕跡なども、マグニチュードについての推定をより正確なものとするための科学的な根拠となった。

危険度の高い断層ごとに MCE を特定した後の次のステップは、その地震が資産ポートフォリオに及ぼす影響を評価することである。この作業は、災害後のフィールド調査を通じて過去の地震による教訓を学んでいる建築エンジニアが関わる部分である。最も簡単な方法は、MCE によって引き起こされる地震動の分布図を基にして、ポートフォリオの損害に関する上限を決定論的に安全側に見積もることである。この見積りが異常に大きくなってしまう場合には、MCE によるポートフォリオの損失に関して高い信頼領域 (90%など) を計算すればよい。この作業には、発生確率を考慮した建物の脆弱性に関する統計的な分析が必要となる。このような 90%の損失領域を断層ごとに計算すれば、ポートフォリオの全体的な PML は、各断層の地震の大きさを再現期間 475 年の MCE とした時、その中での最大のポートフォリオ損失 (90%信頼領域) となる。

リスクベースの MCE を PML の決定に活用したことは、明らかに欠点があると認識されながら、当時一般的に使われていた決定論的な手順からの大きな改善であったのは確かである。幸いこの改善には、複雑なリスク計算用ソフトウェアや高価なハードウェアを必要としなかった。その結果、リスクベースの MCE は、地震コンサルタントやその顧客の間はかなり普及し、1980 年代と 1990 年代には、この標準的な手法に基づいた商業的な PML レポートが多数発行された。

しかしながら MCE は、現在用いられているような地震リスク評価手法に向けた 1 つのステップにすぎない上、本質的な問題を抱えていた。再現期間を 475 年にしているのは特に根拠がなく、他の長い再現期間を選択することも可能であった。また再現期間とは別の問題として、個々の断層ごとの地震の再現期間を基に PML を算出するのは、ポートフォリオに対する地震リスクを考える場合、断層が多数あることを無視していることになる。再現期間 475 年の地震が起きることによって大きなポートフォリオの損失が発生する可能性を持つ断層は 1 つだけではなく、かなりの数に上る。また、震源が多数あることを考慮に入れる必要があった。

1.2.3 地域ハザードに基づいた最大想定イベント

一つの建物でなく、人口集中地域のように様々な危険に晒されている特定の場所の建物について考える場合、1 つの特定のハザードによる PML を算出する代わりに、すべてのハザードを含んだ地域ハザード超過曲線を使って PML を算出することが行なわれる。これは、ある地域において一定のハザードレベルを超える年間確率を表した曲線で、その地域の災害源がすべてこの曲線に集約されているので、再現期間ごとに PML を求めることができる。

その地域の記録として、長期間にわたり、大きなハザードについてのデータが残っている場合には、そのデータに適応した最大発生確率を利用することによって、再現期間ごとのハザードの程度を容易に算出できる。残念ながら地震に関しては、何世紀にもわたる長いスパンの精度良い記録が存在していないため、分析的な手法を活用する必要がある。だが暴風に関しては、大規模な災害が発生する間隔が地震に比べてかなり短いため、100 年程度の期間のデータがあれば、地域におけるハザード超過曲線を算出することは充分可能である。

この PML アプローチの一つの事例として、カリブ地域のハリケーン災害の例を紹介する(文献 4)。それは、米州機構と米国国際開発庁が支援するカリブ地域災害低減プロジェクト (Caribbean Disaster Mitigation Project) の中で行われた研究である。このプロジェクトの目的は、地域の保険産業を強化し、リスクに晒される度合の減少と設備の脆弱性の低減により災害に強い地域にするための対応策の概略プランを作成することであった。その目的に対する重要なステップとして、PML の計算が行われた。以下、その一部を紹介する。

約 100 年のデータを統計分析して、再現期間 50 年と 100 年の場合の風速値を求めた。ワイブル分布を適用することによって、信頼区間を中間 (50%) にした場合と 90% にした場合の風速を各再現期間について求めた。さらに、これら 4 つの最大風速値のそれぞれについて、建物・設備が破損する確率を計算し、破損確率と再調達価額を掛け合わせることによって予想損失額を求めた。すべての建物・設備に関する損失を合計することによって、PML が求められる。風速値の再現期間や信頼区間を変えて、4 つの PML を求めた。一例

としてドミニカにおける 4 つの最大風速値および PML を以下に示す。

- 50%信頼区間、再現期間 50 年 — 最大風速 106 ノット、PML 44.1%
- 90%信頼区間、再現期間 50 年 — 最大風速 119 ノット、PML 64.0%
- 50%信頼区間、再現期間 100 年 — 最大風速 118 ノット、PML 63.7%
- 90%信頼区間、再現期間 100 年 — 最大風速 134 ノット、PML 68.3%

風速超過曲線における 50%と 90%の間の差は、風速推定において不確実性が存在していることを示している。より信頼できる結果を求めるには、更に長期的な災害データが必要であることが分かる。データが比較的少ない場合には、気象モデルを構築し、定量的に分析することによりハザード超過曲線を作成することが望ましい。そのようなアプローチは暴風に限らず、地震に関しても世界的に導入されている。

1.2.4 ハザード超過確率曲線

ある地域に影響を及ぼす震源の多様性を考慮するための手法は、Cornell によって 1968 年にまとめられた（文献 5）。この手法は、確率論的な耐震設計や地震に対する安全マージンの確率論的評価において広く活用された。だがコンピュータや人手による計算を比較的多く必要としたため、この手法が保険分野において利用されるまでには数十年を要した。

この手法の基礎になったのは、全確率の定理である。すなわち、 $f(M, \mathbf{x})$ をマグニチュード M の地震が震央 \mathbf{x} で発生する頻度とし、 $P(A \geq a | M, \mathbf{x})$ をこの地震が発生する時の A （加速度）が a 以上であるという条件でのその地域における地表地震動の確率とする。したがって、1 年間にこの地震動レベルを超過する回数は、 $f(M, \mathbf{x})$ と $P(A \geq a | M, \mathbf{x})$ の積を M と \mathbf{x} について積分することによって求められる。ポアソン過程の場合、地表地震動の年超過確率 α は、 $1 - \exp(-\nu)$ となる。ここで、 ν は再現期間（年）の逆数である。例えば、年超過確率 α を 0.1 とすると、 $\nu = 0.10536$ となり、再現期間は 9.49 年となる。

Cornell による手法を利用する場合には、地域の震源モデルの開発や地盤の状態に適合した地震動距離減衰関数を求めることなども当然含まれる。そうすることによって、上記の被積分関数の中の $f(M, \mathbf{x})$ と $P(A \geq a | M, \mathbf{x})$ という 2 つの要素をパラメーター化することができる。これらの作業が完了したら、コンピューター・プログラムを実行して、地表地震動に関する年間超過確率を各地震動値ごとに求める。こうすることによって、地域ごとの地震ハザード曲線が作成される。

このハザード曲線において地震工学上注目すべきポイントは、超過確率が $1/475$ になるポイントである。これは、再現期間 475 年に相当するポイントである。この再現期間は、耐震設計についての国際的な建築基準としてかなり頻繁に利用されている。コスト・パフォーマンスをベースとした最近の設計思想では地震発生後の修理費用を抑えることを重視

しているが、建築規格における主要な焦点は人間の安全である。米国の建築基準の一つである UBC (Uniform Building Code) 1994 年版 (文献 6) には、建物や構造物における人命安全設計の要件として、地震動の大きさとして 50 年間に 10% の超過確率 (再現期間 475 年) が定められている。これは、ある地域における建築物がこの地震動に対応した設計になっているならば、このレベルの地震動による損失は、人命を脅かすといったことにはならないはずであるとの考えによるものである。

そのような設計ベースを採用するかどうかは別として、再現期間 475 年の地震動を対象にして PML を算定することは可能である。SEAOSC (Structural Engineers Association of Southern California : 南カリフォルニア構造技術者協会) は、小委員会を設立し、PML 分析についての合理的なアプローチを検討し、以下の考えを推奨した。即ち、ある指定された地域における再現期間 475 年の地震動規模を算出すれば、断層をベースにした MCE の場合と同様に、建築や耐震設計についての知識を活用することによって、最大損失を決定論的に安全側に見積もることが可能である。安全の度合いを減らす場合には、このサイトに特徴的な構造物の脆弱性を参考にしながら、90% 信頼区間の損失を見積もることもできる。この 90% という数字は、Steinbrugge が提唱し (後記 2.2.4 参照)、それを受けて CDI が定めた PML についての定義、すなわち、PML は 10 棟中 9 棟において予想される地震被害を表している必要があるという定義 (後記 2.3.1 参照) を反映したものである。

SEAOSC でも推奨されたこの PML 評価手法は、地域ごとの評価に活用されている。この手法が広く使われるようになったのは、再現期間 475 年の地震動レベルの等高線を表示した地域地震ハザードマップの存在である。民間のエンジニアはその地図を使うことによって、指定されたサイトの震動レベルを読み取って利用することができるため、建物の被害の評価という専門分野に専念することができたのである。

この PML 評価手法で注意すべきことは、地震動 (ハザード) を設定し、その設定された地震動に対して被害を見積もるといのように段階的に評価する形式となっている点である。地震ハザードについては確率論的に定量化され、すべての地震災害シナリオが発生確率に基づいてウェイトづけされた上で、全体的な定量化が実施されている。一方被害については、特定の信頼区間ごとに決定論的あるいは統計的な評価が実施される。したがって、これは擬似確率論的なハイブリッド・アプローチであり、すべての震源を確率論的に評価しているが、損失を確率論的に評価するという目的に対しては、望ましい評価手法となっていない。

以上、リスク定量化への最初のステップを振り返って見たが、リスク定量化を促進する大きな要素は、導入の容易さ、利用し易さという点である。PML 評価を職務とする民間のエンジニアは、ハザード情報をできるだけ簡単に処理する方法つまり、MCE の数値が記載された断層マップや地域ハザード等高線マップなどを望んでいた。しかし、保険業界では

建設業界と異なり、例えば、ポートフォリオの地震危険度評価を行う際にハザードと損失を段階的に処理するのではなく統合的に処理した方が、より合理的な結果が得られる点に注意が必要である。

いずれにしても、過去数十年間に被害地震が発生し、被害データが分析され、研究が進展してきた。一方で、コンピュータの性能が格段に進歩したことが PML 評価の促進に大きく影響している。