

インフラ極限性への国家的合意形成

河村 廣

1. 序

2011年3月11日、想定外の規模の東北地方太平洋沖地震が発生し、生じた東日本大震災の規模も想定外であった。多くの教訓が得られたが、社会的な影響力が強く特に公共性の高いインフラの耐震安全基準について、国家的合意形成へのルールが必ずしも明確でなかったこともその一つである。その結果今日においても尚、震害の評価、再建、補強のみならず、新基準や既存不適格、老朽化対策においても、一般市民、専門家、行政などにおける安全性の認識が十分に共有化されておらず、国を分ける議論が先送りされたり、付け焼刃的な処置が繰り返されたりしている。

このような視点から大震災以後、筆者はインフラ耐震計画における想定外を含め社会的でないしは国家的な合意形成について考察を重ねており[1~4]、特に本稿の前ページにおいては、インフラの崩壊を起点としかつ広範な視点から社会的合意形成に関する構想をまとめ直した。本稿はもう少し焦点を絞り実行可能性も視野に入れて国家的合意形成について既報[5]のインフラ損傷をインフラ崩壊に置き換えて再構成するものである。

2. 国家的合意形成法

図1は筆者提唱のインフラ耐震計画における国家的合意形成のフロー図である[5]。

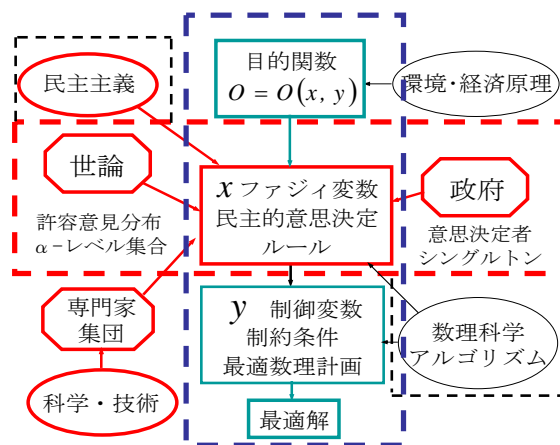


図1 インフラ耐震計画における国家的合意形成

図1では横系に代表民主制の下でのファジィ意思決定[6]を配し、縦系を在来的な最適数理計画としている。環境や経済原理に基づき設定された目的関数 O の変数はファジィ変数 x と制御変数 y に分け、ファジィ変数 x は以下の図2, 3に従い意思決定される[3, 4]。

図2は世論における許容意見分布の求め方を図示したもので、横軸にファジィ変数 x をとり、一市民の許容範囲例を太い実線で記し、該当者数の和を回答総数で除して得た μ_X を縦軸にとっている。図2はファジィ可能性分布[7]に対応する。

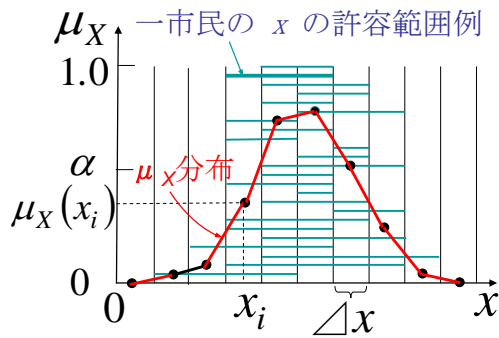


図2 世論における許容意見分布の求め方

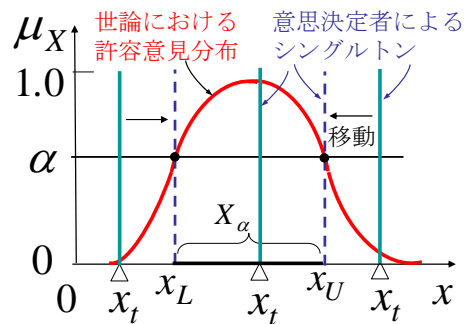


図3 民主的意思決定法（単峰性の場合）

図3は世論における許容意見分布の α レベル集合 X_α とその上下限值 x_U, x_L 及び意思決定者によるシングルトン x_t を示している。

但し、意見分布は単峰性の場合を例示し、専門的な事案については専門家集団によるものが採用される。意思決定者は政府となり、シングルトンは α レベル集合内外の3ケースについて例示したが、政府側の立場から暫定的に提示されるべきものである。

最終的な意思決定では、暫定シングルトンが α レベル集合内にある場合は問題ないが、外側にある場合は政府側が譲歩して最も近い上限値又は下限値を採用値とすることになる。 α については多数決の原理に従えば、0.5以上の場合、政府への世論の支持は維持され、民主主義が保障されるであろう。

3. 地震ハザード関数の拡幅とファジィ化

日建築学会の建築物荷重指針・同解説[8]によれば旧指針（93年版）では、ある地域と期間内に発生した地震について、Gutenberg-Richterの式1[9]を始めとする地震カタログを参考にし、年最大の極値分布として第II種のFrechet分布を用いて得た地震ハザード曲線の更に単純化のためべき乗分布近似から、最大加速度 α の再現期間換算係数100年を基準値として式2で与えていた。

$$\log n(M) = A - bM \quad (1)$$

$$k_{rE} = (T_r/100)^{1/k} \quad (2)$$

但し、式1で $n(M)$ は地震発生度数、 M は地震マグニチュード、式2で T_r は再現期間であり、 $1/k$ として0.54が与えられているが本稿では略0.5とする。現指針（04年版）[8]では地域性も考慮して与えるようになり、詳細は同文献を参照されたい。

地震の再現期間 T_r 年に対する最大加速度 α の年超過確率を p_1 とすれば、日本建築学会荷重指針[8](p.524)や神田[10]により示されているように、以下の関係式が成り立つ。

$$p_1 = 1/T_r \quad (3)$$

ここで一先ず学会荷重指針に倣い地震ハザード関数を次式のように単純化しよう。

$$\alpha = \lambda T_r^n \quad (4)$$

但し n はここでは上記のように0.5としておこう（注：式4の α は最大加速度であり、前章の α -レベル集合の α とは異なるが、オリジナを尊重し併用した。）

一方、石本と飯田はある地点で観測された地震動において、発生度数 $n(M)$ と最大(変位)振幅 A の関係について 下式を見出していた[11]。

$$n(A) = kA^{-m} \quad (5)$$

その後、浅田、鈴木、友田は式 1 の b と式 2 の m について、下式の関係を誘導した[12]。

$$m = b + 1 \quad (6)$$

ただし、上記は宇津の報告[13]にその概要が記述されている。

ここで、 $b \div 1$ とすれば式 3 は式 3' となる。

$$n(A) = kA^{-2} \quad (5')$$

上式から超過累積度数分布を求めると下式を得る。

$$N(A) = \int_A^{\infty} n(A) dA = kA^{-1} \quad (7)$$

式 7 を観測期間の総度数で割れば超過累積確率分布になる。従って、式 7 の逆数は年超過確率になりその値が観測地域において不変と仮定すれば、再現期間 T_r (年) (振幅 A 以上の地震が始めて発生する期間の期待値) に関するハザード関数として次式を得る。

$$A = k' T_r \quad (8)$$

式 4, 8 をまとめて本稿では、再現期間 T_r 年における最大地震入力 α は下式の幅で与えることとしよう。

$$\alpha = \lambda T_r^n = \lambda T_r^{1/2} \sim \lambda T_r \quad (9)$$

式 4 と 8 を式 3 の年超過確率に直すべき乗指数 n をパラメータとして図示すれば図 4 となる。

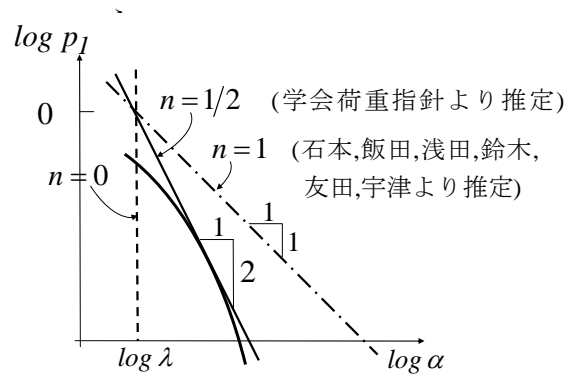


図 4 地震ハザード関数

即ち、日本建築学会荷重指針[8] (pp. 479-481) では図 2 中 $n = 1/2$ の太い実曲線が右下がりの細い実直線に概略近似されていることになる。

一方、石本と飯田が見出したある地点で観測された地震動における発生頻度と最大(変位)振幅の関係式[11]を用い、最大変位を最大加速度に読み替えて、いささか大胆であるが地震ハザード関数を導いたが、図 4 に示せば $n = 1$ の一点鎖線のようなになる。

図 5 は再現期間のべき乗指数 n のメンバシップ関数表現である[3, 4]。過去のデータや数理モデル、主観的判断による曖昧性を表わしており、ゼロ側は再現期間の無視、1 側は再現期間の長い地震の過大評価に繋がる。

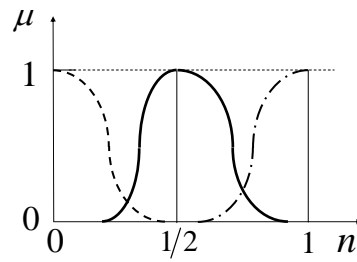


図5 地震再現期間のべき乗指数 n のメンバシップ関数例

4. インフラ崩壊地震発生確率の拡幅とファジィ化

インフラの寿命 T_l 内の地震発生確率 p を用いてインフラの損傷を評価する場合には、その確率が当該地震入力以上の入力が生じる(超過)確率であることに注意しなければならない。従ってインフラの崩壊によって生じる損失を評価する場合には、インフラの崩壊をもたらす地震入力 α_f (以上) に対応する確率 p_f を用いれば物理的な意味が整合する。同様に再現期間 T_r としても崩壊をもたらす地震の T_{rf} を用いる必要がある。

その確率を $0 \sim p_f (=T_l/T_{rf}) \sim 1$ の範囲について考えてみよう。常識的には $T_l < T_{rf}$ であるから発生確率 1 は上限値であるが、計画において悲観的に考えるタイプの人々の評価や或いは生じた損失が壊滅的な規模である場合においては、主観的な確率として十分に説得力があると思われる。逆に全く楽観的か鈍感かまたは利己的なタイプの人々の評価や或いはある意図を持った「為にする議論」においては、これも主観確率とすればゼロも十分有り得る話である。現に、東日本大震災で想定外を標榜する人達にとっては、ゼロであったことになる。

図 6 はインフラ崩壊地震発生確率のメンバシップ関数例である[3, 4]。評価者の人生観、社会観、更には、社会的損失の甚大さの評価の主観的な曖昧性を表わしている。一般にゼロ側は楽観的、1側は悲観的な評価と言える。

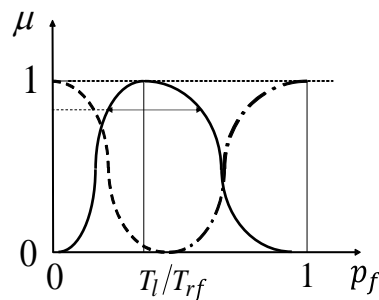


図 6 最適計画におけるインフラ崩壊地震発生確率のメンバシップ関数例

5. 最適数理計画の基本式

目的関数 SD^e を最も簡単な場合として、下式のように与える。

$$SD^e = X + Y \quad (10)$$

$$X = iq \quad (11)$$

$$Y = Dp = (\alpha/q)p \quad (12)$$

但し、 X はインフラ建設の初期コスト、 Y はインフラ損傷による人的社会的損失 $D(= \alpha/q)$ に p を乗じた期待値である。更に、 SD^e はインフラ崩壊によるインフラ及び人的社会的期待損失、 q はインフラの頑健性、 α はインフラへの地震入力、 p はインフラの寿命 T_l 間における地震発生確率、 i は係数である。

式 9 の地震ハザード関数を式 12 に代入すれば、 Y は次式で与えられる。

$$Y = D p = \left(\lambda T_r^n / q \right) p \quad (13)$$

式 3 より p は次式で与えられるが、ここでは主観確率として決定する際の参考式とするに過ぎないものとする。

$$p = T_l / T_r \quad (14)$$

式 10~14 の基本式について q を最適数理計画の制御変数とし、 n 、 p 、 T_l は一定としよう。 q に関し最小 SD^e を与える最適点 $M(q_{op}, SD^e_{op})$ を求めると図 7 のようなる[2~5]。但し、本図は定性的な傾向を示すもので座標軸の数値には意味は無いことを断っておく。

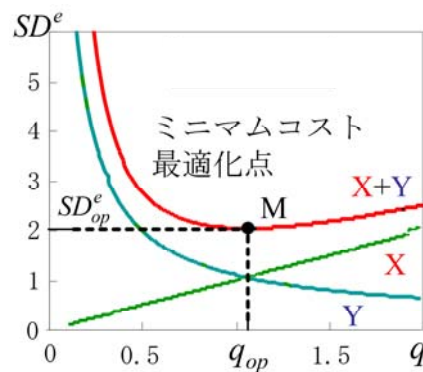


図 7 $SD^e - q$ 関係と最適化

最適点 M の座標は式 15、16 で与えられる。

$$q_{op} = \left(\lambda / i \right)^{1/2} T_r^{n/2} p^{1/2} \quad (15)$$

$$SD^e_{op} = 2 \left(i \lambda \right)^{1/2} T_r^{n/2} p^{1/2} \quad (16)$$

最適時のインフラ損傷による人的社会的損失を D_{op} とおけば次式で与えられる。

$$D_{op} = \alpha / q_{op} = \left(i \lambda T_r^n p^{-1} \right)^{1/2} \quad (17)$$

6. インフラ崩壊損失最小化数理耐震計画への応用性

第 4 章でも述べたように、超過確率は当該地震入力以上の地震の生じる確率であるから、損失の期待値を目的関数とする式 10~14 の基本式は数理的にも妥当ではないが、インフラの崩壊をもたらす最小の地震入力 α_f 以上の地震入力の生じる確率 p_f を用いれば、数理

的にも整合性が成り立つ。

図 8 では赤い星印がインフラ崩壊時における地震入力 α_f とインフラ崩壊によって生じる人的、社会的損失 D_f の関係を示している。但し、 q_f は仮定のインフラの崩壊時における頑健性に相当するものである。

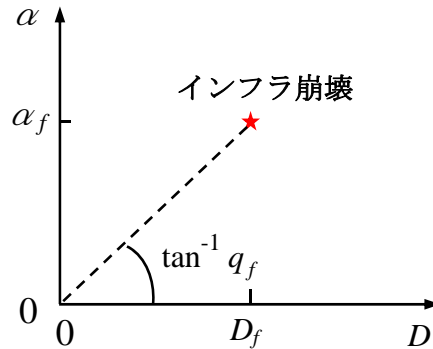


図 8 インフラ崩壊時の $\alpha - SD$ 関係

最適数理計画において用いた記号について、一覧すれば下記のように下付サフィックス f を付すことにより、基本式の応用が可能となる。

$$\alpha \rightarrow \alpha_f, \quad p \rightarrow p_f, \quad SD \rightarrow SD_f, \quad D \rightarrow D_f, \quad q \rightarrow q_f,$$

$$T_r \rightarrow T_{rf}, \quad q_{op} \rightarrow q_{opf}, \quad SD^e_{op} \rightarrow SD^e_{opf}, \quad D_{op} \rightarrow D_{opf}$$

T_l, n については定義上、崩壊には関係が無いので f は不要である。

下記にインフラ崩壊時の最少(最適)損失の期待値を求める手順の一例を概略であるが以下に記す。(諸常数関係の説明は本筋から外れるため省略している。)

- ・インフラを現行法規に従って設計する。
- ・インフラの寿命 T_l を設定し、次いでインフラ崩壊時の地震入力 α_f を逆解析し、 T_{rf} をハザード式 9 から求める。
- ・第 3, 4 章で定義されたファジィ変数 n と p_f を第 2 章の代表民主制に基づき決定する。
- ・ p_f については、 T_l/T_{rf} を参考することとどめ、一応独立とする。(第 4 章参照)
- ・第 5 章の数理計画により最適解を求める。
- ・インフラ崩壊による D_{opf} を求め、それを目標にインフラ及び社会環境を追加設計する。
- ・それが達成できれば、下式より q_{opf} も達成できたことになる。

$$D_{opf} = \alpha_f / q_{opf} \quad (18)$$

- ・結果について国民的不満が残れば、代表民主制による決定の再試行を行う。

7. 考察

本稿で提唱の合意形成法には以下のような特色がある。

- (1) インフラの崩壊という極限状態をベースに議論を展開している。
- (2) 多くの合意形成法は理論的にも実践的にも最適解への収束を旨とするが、本報では意

思決定者の責任と権限を明確にし、意思決定プロセスの透明化を図っている。

(3) 意思決定には理論と直感の両面が必要であるが、本報では最適数理計画とファジィ意思決定をクロスさせて融合化を図っている。

8. 結

本稿では、東日本大震災以後最も欠落しているインフラ耐震計画における国家的合意形成法そのものの議論の端緒として、一つの構想を提唱し、更に簡単な応用法を提示することにより、その意義を明らかにした。

文献

- [1]河村廣：インフラ構造計画における想定外と社会的合意形成ー自然災害に対するマクロ合意形成場モデルー、日本建築学会、第 34 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、2011.12, pp.147-150.
- [2]河村廣：インフラ構造計画のマクロ合意形成場モデルにおける合意均衡と合意限界、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 52 号・構造系、2012, 6, pp. 5-8.
- [3]河村廣：インフラ耐震構造計画におけるマクロ合意形成のファジィ最適化ー地震発生確率と地震ハザード関数の拡幅とファジィ化ー、日本建築学会、2012 年大会(東海)、学術講演梗概集、情報システム技術、2012. 9, pp. 85, 86. (DVD, 11039)
- [4]河村廣：インフラ耐震計画におけるマクロ合意形成のファジィ化ー最小期待損失最適解の不安定性と想定外の恣意性ー、日本建築学会、第 35 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、2012. 12, pp. 227-230. (DVD, 報告 H29)
- [5]河村廣：日本建築学会 東日本大震災 2 周年シンポジウム (一般講演) ポスター発表 2013 年 3 月 29 日、Po-15 インフラ耐震計画における国家的合意形成法への一構想.
- [6] Bellman, R.E. and Zadeh, L.A.: Decision-Making in a Fuzzy Environment, Management Science, 17, pp.B-141-B-164, 1970.
- [7]Zadeh, L.A.: Similarity Relations and Fuzzy Orderings, Information Sciences. 3, 1971, pp. 177-200.
- [8]日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)、日本建築学会、2011. 6, 15.
- [9]Gutenberg, B., Richter, C.F.: Seismicity of the Earth, Geol. Soc. Am. Spec. Paper No. 34, 1941. 8, Gutenberg, B., Richter, C.F.: Frequency of Earth- quakes in California, Bull. Seis. Soc. Am., 34, 1944, pp. 185-188.
- [10]神田順：地震動の再現周期と超過確率、技術手帳、土と基礎、53-6 (569), 2005. 6, pp. 38-40.
- [11]石本己四雄、飯田汲事：微動計による地震観測、C-D, 震研彙報、17, 1939, pp. 443-478.
- [12]浅田敏、鈴木次郎、友田好文：地震の頻度とエネルギーについて、地震(ii), 3, 1950, pp. 11-15.
- [13]宇津徳治：地震学、S. 52, 9, 1, 初版、共立出版.