

インフラ極限性への社会的合意形成

河村 廣

1. 序

日本では言霊信仰が日常的にも根付いている。例えば、結婚式の挨拶で「別れ」という言葉が禁句であるように、不吉な言葉を口にするとその厄を呼ぶと言われている。

個人的な問題では影響が少ないが、東日本大震災の原発事故のようになるとその影響は計り知れない。それまでは原発の安全神話が信じられ、全電源喪失やメルトダウンなどはあり得ないこととされていた。それを口にすることさえ憚られる空気が国中に充満していたのではなかろうか。甚大なる原発事故や巨大地震や大津波発生の可能性は、国や東電をはじめ関連の諸学会でさえ問題にされなかった。

同様に、現行法では建物は略震度 6 強(又は 7 程度)の地震で所定の強度と変形に留まり、人命に損傷を与えないこととされている。しかし現実には震度 7 以上の地震は起こり得るので、その時に建物が崩壊することを設計時に考えなくてよいのであろうか。例によって「想定外」で済ませばよいのであろうか。自分達で作ったものが最終的にどのような条件と状況で壊れるかを想定したいのは、技術者として抱く素朴な思いではなかろうか。

この点について本 HP ではこれまで科学技術的な面から論じてきたが、本稿では視点を拡大し社会的な面からの問題提起を目指し、広くインフラ構造物の極限的な崩壊を想定することの社会的合意形成へ至る道筋について考察を加えることとしよう。

2. 社会的合意形成場モデル

図 1 は地震の震源から地盤、建物そして社会に至る震災の連鎖過程の概略を描いたものである[1]。図 1 を踏まえて社会的合意形成に至るプロセスを円環の場として描いたのが図 2 である。同図は想定外問題を論じた文献[2]に発想の原点があるが、本稿の主テーマであるインフラ構造の極限性の趣旨に合わせて修正を加えたものである。

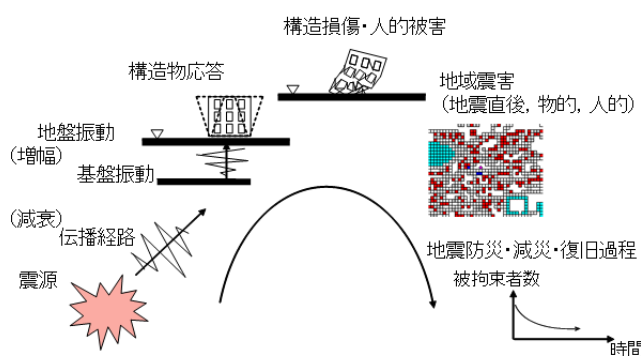


図 1 地震・災害連鎖の概念模式図

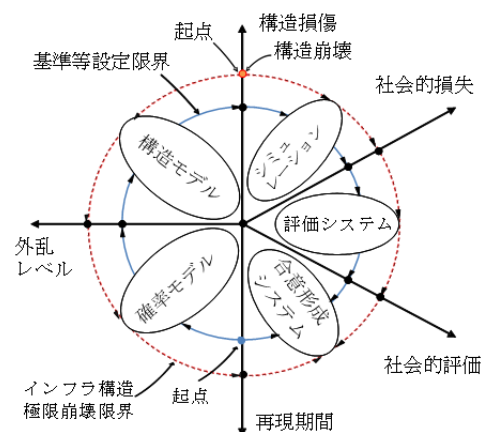


図 2 社会的合意形成場モデル

真上の赤い点はインフラ構造の崩壊に対応し、赤い点線の円環に沿って左回りに構造モ

デル及び確率モデルの逆解析を経て地震の再現期間に至り、右回りでは社会の損失をシミュレーションで予測しその評価システムを経て社会的評価に至る過程を示している。最終的に地震の再現期間と社会的損失の比較からインフラ構造と社会システムの在り様について合意形成を図ることになる。

ちなみに青い実線の円環は現行の建築などのインフラ構造に関する法令による評価過程を示し、起点は真下の青い点となる。構造損傷としては使用限界や損傷限界、安全限界などが設定されており、前章で述べたように極限的な構造崩壊が想定されることは無いので、赤い円環の内側に位置することになる。

尚、本稿ではインフラ構造の崩壊の前に社会システムの地震による崩壊は生じないものと仮定されている。場合によっては環境汚染や疫病などによりその順序が逆転することもあり得るが、ここでは主題から外れるので考慮しないこととする。(逆転する場合については文献[3]で扱ったので参照されたい。)

3. 地震発生確率モデル

本モデルの基本的な考え方は既に本 HP の冒頭のページ「極限崩壊性能設計－自己組織的臨界状態をベースとして－」で考察を加えているが、ここでは前章図 2 の社会的合意形成場モデルへの応用性に配慮し、重複部分や一部変更もあるが、もう少し具体的に論を進めよう。

自己組織的臨界状態の好例としてよく引用される地震発生確率モデルの Gutenberg-Richter の式 1 は有名である。ある地域と期間内に発生した地震マグニチュード M の度数分布 n への直線近似性を示しており、 M 以上の累積度数分布 N を求めると式 2 になる。

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

$$\log N(M) = a' - bM \quad (2)$$

観測例として、日本付近の 1965 年～1974 年の n と N の分布例が図 3 に示されている[4]。

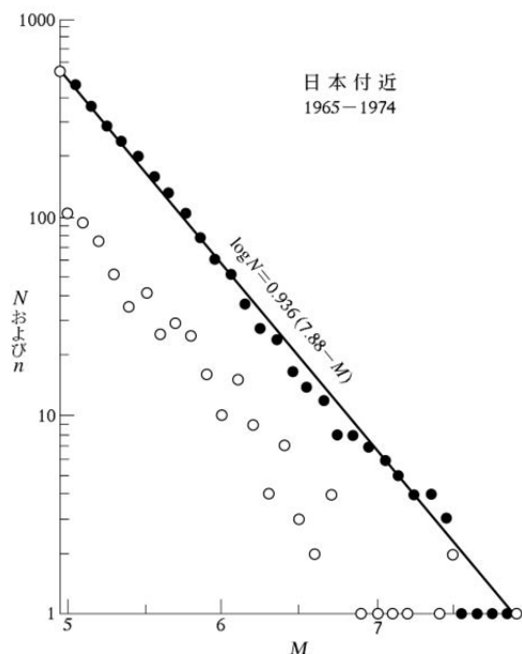


図 3 日本付近の浅発地震の M の分布[4]

式 1, 2 共に M の指数関数になっているが、 M は地震の最大振幅 A やエネルギー E などの対数の一次式で与えられるので、 A や E に関してはべき乗分布となる。

他方、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 $n(M)$ と最大振幅 A の関係について 下式を見出していた。

$$n(A) = kA^{-m} \quad (3)$$

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。

$$m = b + 1 \quad (4)$$

ただし、上記の一連の式 3, 4 の記述は宇津の文献[4]より引用したものである。

ここで図 3 などを参考に、式 4 で $b \div 1$ とすれば式 3 は式 3' となり、図 4 に実線で示されている。

$$n(A) = kA^{-2} \quad (3')$$

上式から累積度数分布を求めると下式を得、図 4 に破線で示されている。

$$N(A) = \int_A^{\infty} n(A) dA = kA^{-1} \quad (5)$$

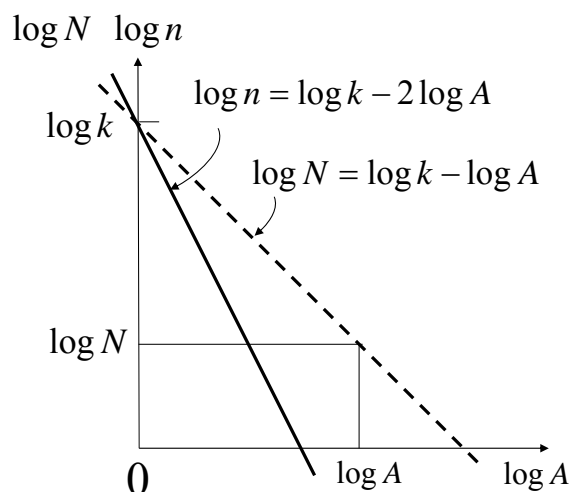


図 4 地震の最大振幅 A の分布

図 4 の $n(A)$ の負勾配が図 3 と異なるのは、 $n(A)$ が密度分布であることからカウントの範囲が図 4 では dA であるが、図 3 では dM 即ち最大振幅 A については $d \log A$ であることによる。

ここで、式 3', 5 を観測地震の総度数で割ればそれぞれ確率密度分布及び累積確率分布になり、図 4 では単に縦軸の座標が変わるだけであることに注意したい。

地震発生の確率モデルについては建築学会の文献[5]に詳しく論じられているが、理論は精緻でも地震が対象ではどうしても仮定を大胆にせざるを得ず、ここでは分かり易さを旨として、更に式 5 を基本に以下のように更に大胆かつ単純に考えることとする。

式 5 は観測 T 年間において最大振幅 A 以上の地震は N 回発生することを意味しており、そのような地震の再現期間 T_r は平均すれば式 5 を考慮して次式で与えられる。

$$T_r = T/N(A) = T/k A^{-1} \quad (6)$$

ここに、 k は式 5 より地震観測時の A の最小単位値以上の地震総数であるから、観測期間 T に比例すると仮定できるものとする。更にその比 T/k は地域によって異なる特性値であると仮定すれば式 7 とおけるので、式 6 は式 8 となる。

$$k' = k/T \quad (7)$$

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

再度確認すると、式 8 は最大振幅 A 以上の地震の起きる再現期間は T_r 年であることを意味しており、図 2 において外乱レベルを A とすれば T_r が求まることになる。

4. 構造崩壊モデル

本モデルについては、考え方の基本として本 HP の 2 番目のページ「極限地震応答(逆)解析」の応用が可能であり、参照されたい。但し、構造モデルが質点系と単純化されており、崩壊条件が幾種類も与えられていることから、実際の 3 次元建物に適用するには数々の創意工夫が必要であろう。

一例として、建物の崩壊時においても死者は出さないことが極限崩壊性能設計における最大の目標であるが、従来においてはこのような考え方も無ければ設計例も無く、まさに言うは易く行うは難しである。

この難点を回避するために、人命保護と建物の崩壊とを分けて考える耐震シェルターの採用も一法と言えるが[6]、土木構造物のような巨大で公共的なインフラストラクチャーになると、構造崩壊から完全な人命保護は不可能であろう。しかし、ここでは本題から少し外れるので紹介と問題提起に留めておきたい。

5. 社会的損失シミュレーション

5-1 マルチエージェントシステムの応用

社会的損失をもたらす要因としては、人的損失、インフラストラクチャー的損失、フロー的物損と物流システム障害、環境破壊、疫病、経済恐慌、そして最悪の場合は国際紛争から戦争に至る可能性もある。

更に震害の様相や社会的損失の推定手法は多岐に亘るが、大きく分けて、複雑系の自己組織化モデルの一つであるマルチエージェントシステム[7]を応用するシミュレーション、又は、マクロな数理モデルによる人口移動や物流などの解析を挙げることが出来る。

ここでは家屋及び人的損失のマルチエージェントシステムによるシミュレーションとして、建物の崩壊と救助活動を対象とする事例的研究[8]の概要を紹介する。

マルチエージェントシステム[7]は図 5 に示すように、振る舞いに関するルール (if ~ then ~) を有するエージェントが多数存在し、それらの自律的活動により全体的な秩序が自己組織的に創発される仕組みのことである。

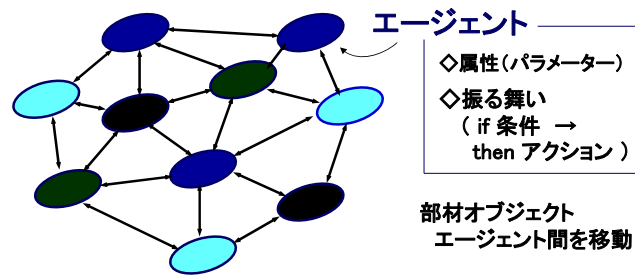


図5 マルチエージェントシステム

地震終了直後から倒壊した建物に閉じ込められた被災者の救出活動が開始される。当初の救助には、自力で屋外に逃れた無傷の住民及び消防署などから派遣された専門の救助隊が当たることになるが、住民と救助隊を個々のエージェント見做すことが出来る。

議論を単純化して、住民は自分の倒壊建物に閉じ込められている家族のみ救助するものとし、救助隊は図6に示されるように「移動」「探索」「救助」の活動を各々のルールに従って継続的に行い、例えば街路における移動については図7のルールに従うものとする。

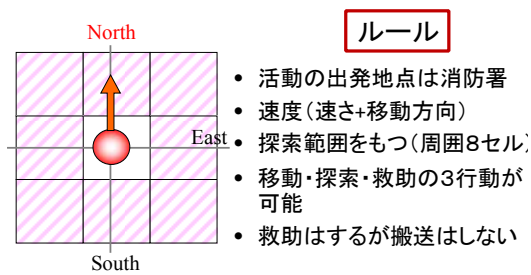


図6 救助隊エージェント

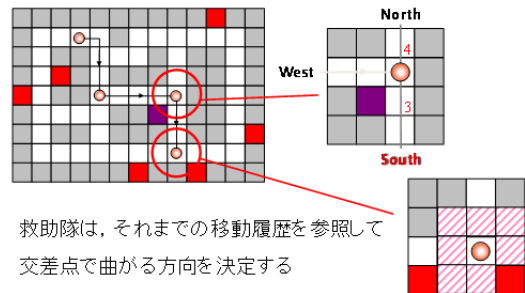


図7 救助隊エージェントの移動

更なる詳細な条件設定は文献[8]を参照して頂くものとして、シミュレーション結果の一例であるが一つの消防署(黄色の丸印)近辺の住戸における救助完了と未完了の地図上の推移状況を、0、4、8時間後について図8に示す。0時間後は地震直後に対応する。

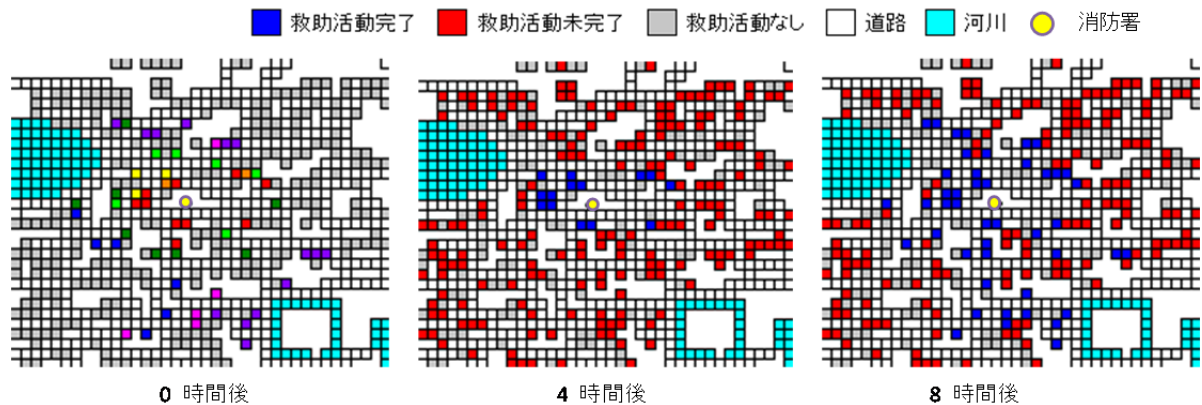


図8 シミュレーション結果

設定対象都市全域において閉じ込められた人の数の推移を図 9 に示す。その曲線の減少分は被救助者の数に対応する。同図パラメータの gal 数は想定した入力地震動の最大加速度である。人命救助を第一に考えるならば、図 9 は地震による社会的損失の評価に不可欠の因子となろう。

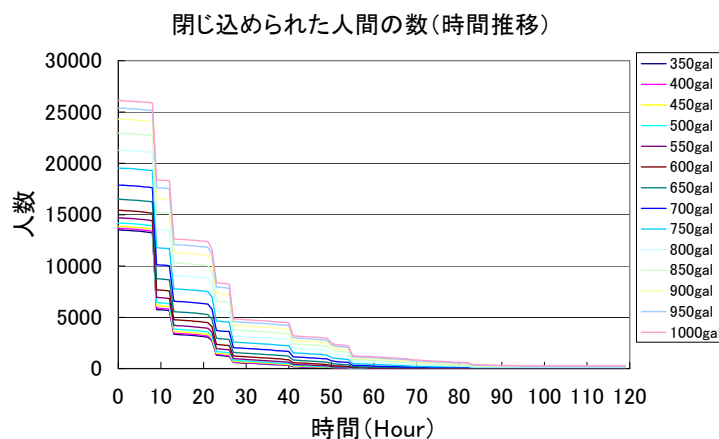


図 9 シミュレーション結果—閉じ込められた人間—

本シミュレーションの応用として、防災資源の要素となる救助隊や消防署の数の影響を調べることが容易に可能である。

尚、本シミュレーションは 12, 3 年以前に、筆者現役時代の研究室で院生が修論の一環としてソフトを作って行ってもらったものである[8]。従って想定された建物の損傷状態は現行及びそれ以前の基準法に従って設計された建物についてであって、本HPにて提唱した終局崩壊性能設計法によるものではないことを断っておきたい。

社会的損失の因子として人的災害の次に物流システムの損失を挙げることができる。

筆者は現役時代にリカレント建築システム[9]を提唱し、その応用例として建築部材の循環をマルチエージェントシステムによるシミュレーションを院生の修論の一環として行ってもらったものがある[10]。地震により生じた建物、資材ストックヤード、運搬道路事情などの損壊をこのシステムに入力すれば、リカレント物流システムとしての損失状況が時系列的にシミュレートできる。建築部材の循環ネットワークシステムを図 10 に示す。詳細は文献[10]に譲るが、地震時への応用は未だ行っていないので、ここでは可能性の示唆のみに留めておきたい。

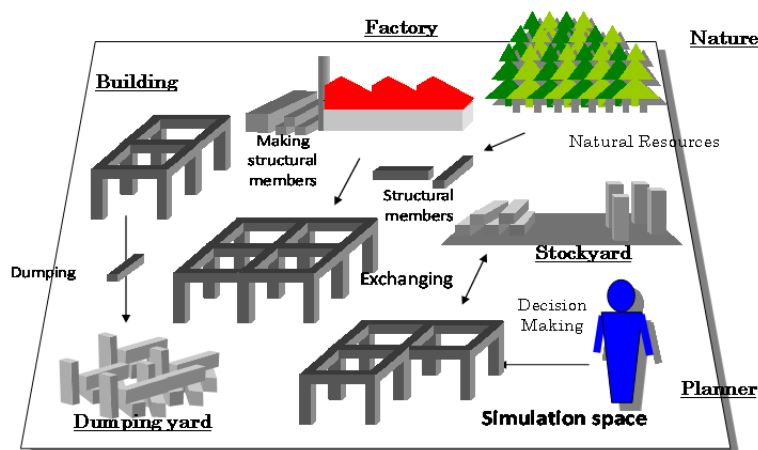


図 10 建築構造部材の循環システム

5-2 マクロ数理モデルの応用

地震直後における被拘束者の救助に関するマクロ数理モデルによる解析例は、本 HP における別の小窓「免疫防災論」の「防災減災ネットワークの変容と進化」のページで紹介した。詳細は当該ページに譲るが、参考までに基本的なネットワークモデルを図 11 に再掲する。

マクロの数理物流モデル解析については、筆者の既往の資源循環に関する文献[11]を参照して頂きたいが、地震後のシステム損傷についての解析例は未だ行っていないので、参考までに基本的なネットワークモデルを図 12 に再掲するに留めたい。

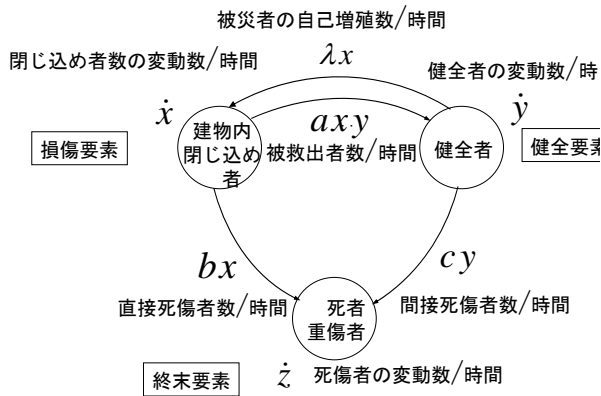


図 11 防災数理モデル（地震被害者救助の場合）

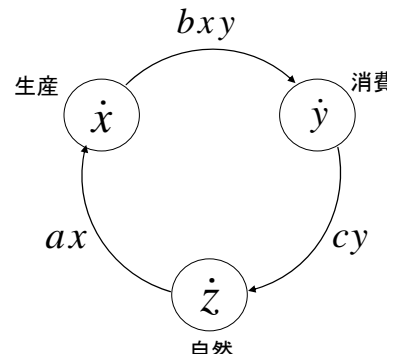


図 12 資源循環モデル

6. 社会的損失評価システム

ここでは本 HP における別の小窓「免疫防災論」の「防災、減災、復旧の評価」のページで紹介したリカレント評価モデルと評価尺度の位相関係の応用を図ることとし、図 13、14 に再掲する。

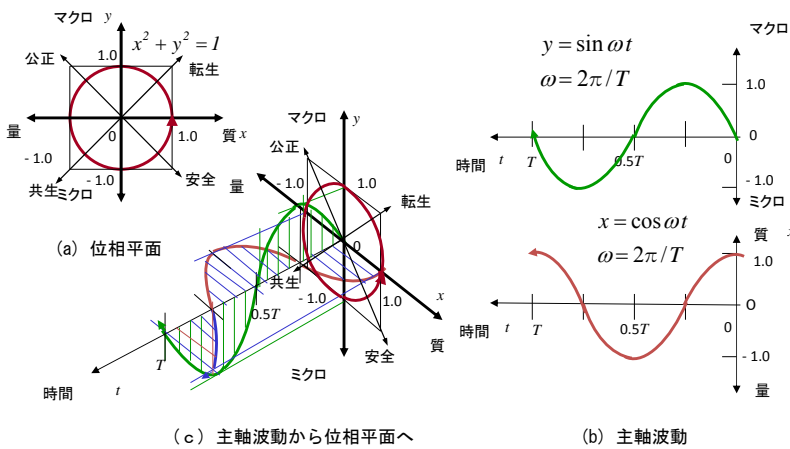


図 13 リカレント評価モデル

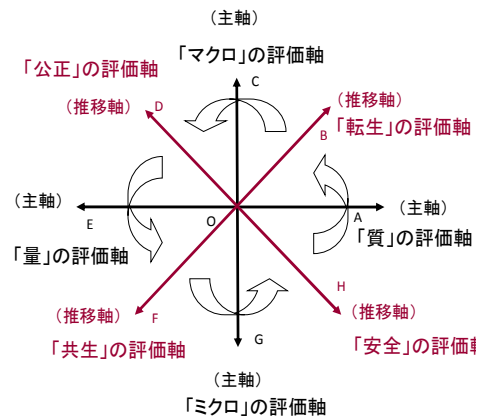


図 14 評価尺度軸の位相関係

震災による社会的損失の中で人的損失はその根幹をなすことは言うまでもなく、その評価法としても一例として同上のページで紹介した図 11 の防災・減災数理モデルと図 15 に示すその解軌道の出力 x, y, z を用いることを提唱したい。防災・減災の評価尺度の位相関係を図 16 に示す。

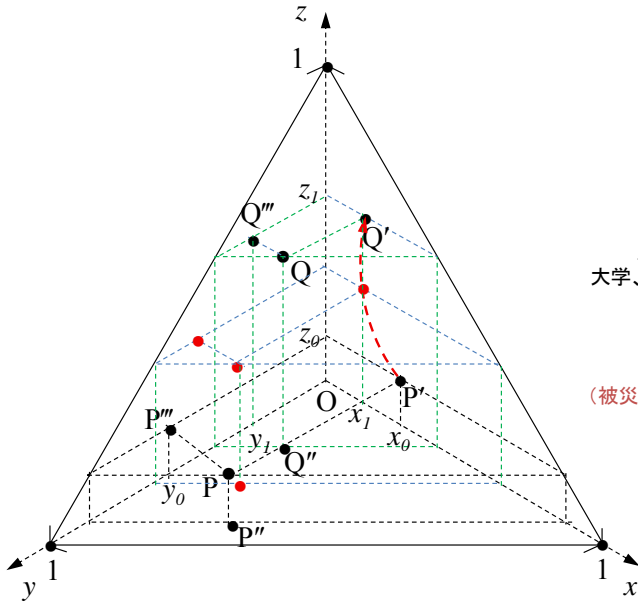


図 15 防災・減災数理モデルの 3次元解空間軌道

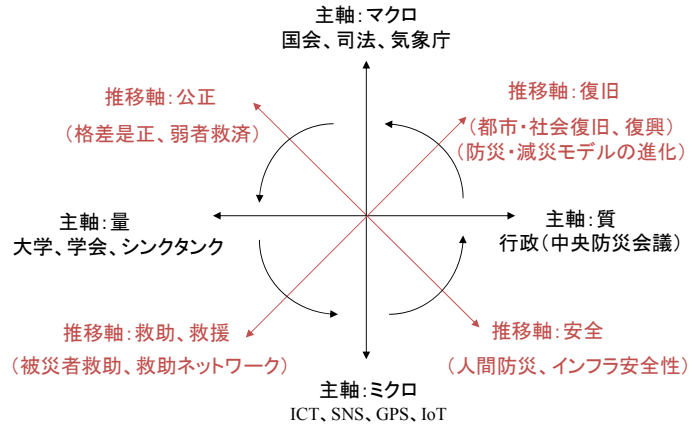


図 16 リカレント評価モデルの防災評価への応用

物流システムは震災後の社会システムの継続上不可欠の要素であり、ここではその評価法としても一例として先述の文献[11]の図 12 の資源循環数理モデルと文献[12]の図 17 に示す解軌道の出力 x, y, z を用いることを提案したい。但し同文献では評価尺度をファジィ化しているが、確信度が高ければ従来のクリスプ的な扱いも可能である。物流の評価尺度の位相関係を図 18 に示す。

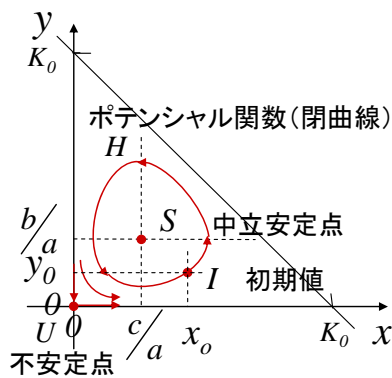


図 17 $x-y$ 位相平面解軌道 (資源総量一定)

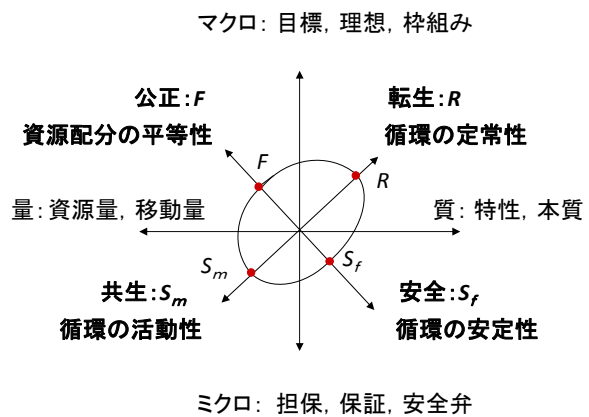


図 18 資源循環型社会の評価尺度

7. 合意形成システム

ザデーが創案したファジィ理論[13]は、確率論よりも柔軟性があり人の主観を確信度として考慮することが出来るので、専門家や門外漢、客観的知見や主観的評価などの混成から

なる社会的合意形成システムに適している。 筆者は現役時代、研究室で開発した建築構造物の最適耐震設計法に本理論をファジィネットワークという形で応用したことがあるが [14]、図 19 はファジィネットワークを応用した合意形成システムの概略図である。

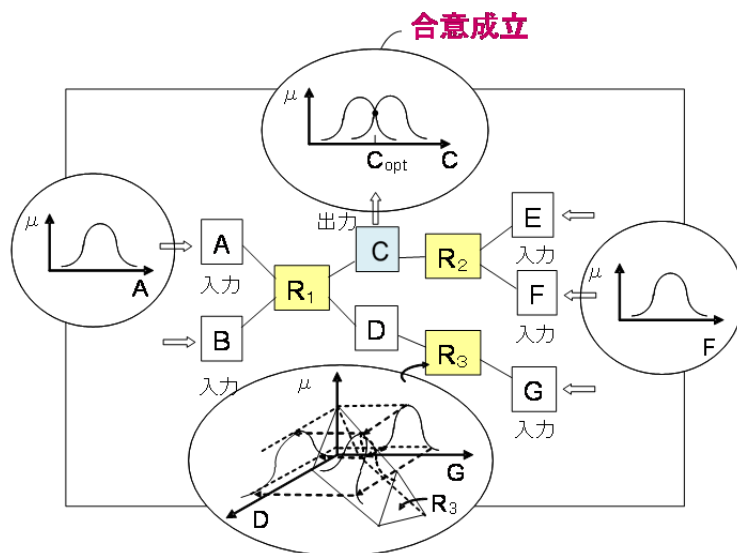


図 19 合意形成システム (概念図) ファジィネットワーク

図 19 は概念的には連立方程式に類するもので、同図中 A ~ G は変数であり、いずれもファジィ集合(例示：釣鐘型)で与えられる。 $R_1 \sim R_3$ はリンクされている変数の関数に該当するが、ファジィ関係として与えられる。例示されているファジィ関係 R_3 と変数であるファジィ集合 D, G との関係性が同図の中央下部に示されている。アルゴリズムとしては行列演算における和・積を $\max \cdot \min$ に置き換えることになる。一例として C が出力に指定されているが、最大化決定[15]により共通集合のピーク値の変数が最適値、言い換えれば諸評価を踏まえた合意形成点となる。

図 19 とのアナロジーとしてインフラストラクチャーの崩壊により生じる社会システムの損失の制御変数を防災資源とする合意形成ネットワークの概略を描いたのが図 20 である。防災資源を水色、ファジィ関係は黄色、ファジィ集合は白色という色表示も図 19 に倣っている。

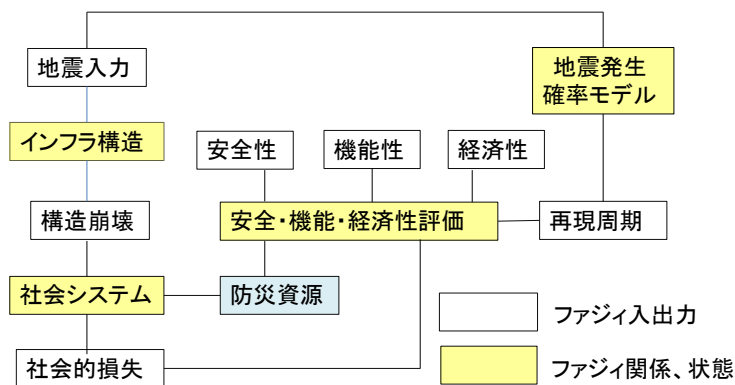


図 20 インフラ構造崩壊による社会システムの防災資源に関するファジィ合意形成システム

8. 考察

第3章から7章に亘り図2の社会的合意形成場モデルの各ステージにおける具体案について順を追って述べてきたが、基本的には筆者が関係してきた手法やシステムである。しかし物理現象としては図1に示されるように震源から社会に至る広範な領域に亘っており、本モデルの趣旨には及ばず不十分な形で終わった提案が部分的ではあるが以下のように3か所あることを改めて断っておきたい。

- ① 社会的損失の内、例示された物流システム損失のシミュレーションについては、定常的な資源循環システムの形成を対象としており、諸条件を入力とする震災時への対応についての応用例は示されていない。
- ② 例示されたリカレント評価モデルの適用においても、上記と同様に形成された定常的な資源循環システムへの評価を行うものであり、震災時への対応についての応用例は示されていない。
- ③ 社会的合意形成システムについては、建築構造物の最適耐震設計システムとのアナロジーでファジィネットワークによる方法論のみ提示しており、インフラストラクチャーの崩壊による社会的損失への合意形成システムに至る応用例は示されていない。但し、最適設計システムも広い意味での合意形成システムの一部に含まれ、本質的に異なるものではない。

しかし、適切な条件設定がなされるならば、いずれも実行が可能なシステムであり、いつか機会があれば応用を試みてみたいと思っている。

9. 結

本ページでは図1に示されるように地震発生からインフラストラクチャーの崩壊、そしてそれによる社会システムの損失の評価、最後にそれらを踏まえた社会的合意形成に至る全プロセスについて具体的なシステムや手法を例示した。各ステージは図2に示されるように論理的一貫性を有していることの他に、本プロセスには以下のような特色がある。

- (1) 本ページのテーマ「新・極限耐震設計論」の趣旨に沿って、現行の設計法では想定外とされているインフラストラクチャーの崩壊を起点としている。
- (2) 提示したシステムや手法は大部分筆者及び筆者の研究室として直接携わってきたものである。

勿論ここで提示したものが唯一の解決法である訳ではなく、完全無欠でもないことは言うまでもない。しかし、阪神大震災や東日本大震災などにおいて地震による社会的な破局現象の一端が生じたにも拘わらず、想定外という言葉で不問に付されてきた事象も多々残されており、本ページでは多少大胆ではあるがその解決法を目指して挑戦を試みた。課題が他分野に亘ると思われるが、関係者の方々にとって何らかのヒントになれば幸いである。

謝辞

本稿で紹介した各種のシミュレーションは、当時大学院で修士論文研究の一環として取り組んで頂いた結果であり、院生諸君には心より謝意を表したい。

参考文献

- [1]河村廣：地震・災害連鎖システムにおける「あいまい性」、日本建築学会，第 31 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，2008, 12, pp.167-170.
- [2]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、—自然災害に対するマクロ合意形成場モデル—、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 Dec.,2011, pp.147-150.
- [3]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—最小期待損失最適解の不安定性と想定外の恣意性—、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)
- [4]宇津徳治：地震学、共立全書 216、共立出版、昭和 53 年、初版 3 刷。
- [5]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, 第 4 版第 5 冊。
- [6]檜原健一、河村廣：木造住宅の耐震設計、リカレントな建築を目指して、技報堂出版、2007,3, 1 版 1 刷。
- [7]例えば、井庭崇、福原義久：複雑系入門、NTT 出版、1998,7,初版第 2 冊。
- [8]山村貴史、河村廣、瀧澤重志、谷明勲：エージェントシステムによる地震被害と救助シミュレーション、日本建築学会近畿支部研究報告集(計画系 43), 2003, 6, pp.293~296.
- [9]リカレント建築・都市研究会ニュースレター、Nos.1-10、神戸大学河村研究室発行、1999.11, -2004.12. URL:<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~a2/recurrent/recurrent.html>
- [10]Tsuji,S., Takizawa,A., Kawamura,H., and Tani,A.: Simulations of Structural Member Calculation of Recurrent Architecture by Multi-Agent System, The 4th International Workshop on Emergent Systems, IWES02, May 9-10,2002, Kobe, pp.231~235.
- [11]河村廣：拡張ロトカ・ヴォルトラモデルの適用による資源循環社会の解析および制御、第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、CD-ROM, 2U4-3, 2008,5, pp.733,734.
- [12]河村廣：資源循環型社会のファジ最適計画法—準ロトカ・ヴォルテラ型・ネットワーク、第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、CD-ROM, F23-1, 2010,5, pp.531,532.
- [13]Zadeh,L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, vol.8, 1965, pp.338~353.
- [14]Kawamura,H.,Tani,A. and Kambara, H.: Aseismic Structural Planning System by Fuzzy Network, Proc. of 10WCEE, Vol.10, 1992, pp.6271-6275.
- [15]Bellman,R.E.,and Zadeh,L.A.: Decision-Making in a Fuzzy Environment, Mangement Science, 17:4, Dec. 1970, pp.141~164.