



ファジィ理論のリスク評価・リスクマネジメントへの活用

1. はじめに

多様なリスクが生起し、経営環境の不確実性が増している今日において、リスクマネジメントを経営戦略の立案や意思決定に活用していくことが求められている。その考え方は、エンタープライズリスクマネジメント（ERM；Enterprise Risk Management）や戦略的リスクマネジメント（SRM；Strategic Risk Management）として広く知られ、先進的な企業・組織が取り組みを始めている。

ERMやSRMにおいては、リスクを適切に評価することが不可欠であるが、本稿では確率論と並び不確かさ、あいまいさ（uncertainty）を扱う概念である「ファジィ理論」の活用について検討を行った。ファジィ理論を理解する上で最低限必要となる基礎的な概念を解説するとともに、リスク評価やリスクマネジメントへの適用方法の一例として「ファジィFTA」と「ファジィ推論」について述べることにする。

2. 検討の動機

リスクの評価手法には幾つかの方法があるが、例えば過去データや類似事象を基に算定した個別事象の発生頻度から、解析的に重大事象の発生頻度や影響の大きさを算定する確率論的リスク評価（PRA；Probabilistic Risk Analysis）は、事故や災害といった非定常なリスクの評価に用いられている。また、事業経営に影響を及ぼす変動要因を確率分布として表現し、財務モデル上で実験的に事業収益や事業価値等の確率分布を算定するモンテカルロシミュレーション（Monte-Carlo Simulation）は、定常的なリスクの評価に適した手法として大きな成果をあげている。

一方、十分な過去データがない、対象が複雑で確率論を当てはめにくい、比較的新しい技術のために類似事象からの類推が困難といった理由で、定量的なリスク評価が困難なケースも多い。また、ヒューマンエラーに起因するリスク、ストライキや暴動等を含むカントリーリスク、コンプライアンス違反・不正リスク等の場合は、それらが起きている周囲の環境や組織による作用が大きく、かつ発生頻度も多くないため、過去データや類似事象に基づく従来型の方法による定量化が容易ではない。

そこで筆者は、社内外の専門家の知見や認識をリスクの評価や対策立案に反映できる方法の一つとして、ファジィ理論の適用を考えた。

3. ファジィ理論とは

3.1 ファジィ理論の概要

ファジィ理論は、人間の主観的な思考や判断の不確かさ、あいまいさを定量的に取り扱うために提案された。米国のロトフィ・ザデー（L. A. Zadeh）教授が、1965年に、学術専門雑誌に発表した“ファジィ集合（Fuzzy Sets）”という論文に端を発し、ファジィ集合論、ファジィ論理（Fuzzy Logic）、ファジィ測度（Fuzzy Measure）で構成されている。ファジィ理論の応用でよく知られているのはファジィ制御（Fuzzy Control）方式を利用した洗濯機等の家電製品である。また、1987年に開業した仙台市地下鉄の自動運行システムにも利用されている¹。後述するファジィ推論（Fuzzy Reasoning／Fuzzy Inference）は、判断・意思決定を支援するためのエキスパートシステムに応用されている。

同様に不確かさを扱う確率論はランダムネス（randomness）と呼ばれるあいまいさを扱っており、振る前のサイコロの目の数のように振る前はあいまいであるが、起きてしまえば何が出たかが明確になるといった現象である。そこでは、イエス（1）かノー（0）のいずれかを取りうる。一方、ファジィ集合で扱う不確かさは、時間の経過や実験の試行によっても解消されない本質的なあいまいさであり、イエス（1）ともノー（0）とも答えられない中間の度合いを取りうる。ファジィとは、もともと「羽毛のようにふわふわして境界がはっきりしない」という意味であり、人間の主観に起因するあいまいさ、人間が

日常使う言葉（自然言語）や概念に含まれるあいまいさ（意味や解釈の広がり）、対象が複雑で全体像が把握できないことに起因するあいまいさを対象とする。これらは、ファジィネス（fuzziness）やベイグネス（vagueness）と呼ばれるが、「背が高い」「温度が低い」といったあいまいな情報も扱えることが特徴である（なお、人間の判断におけるあいまいさについては、確率概念を拡張したファジィ測度で扱われる）²。

3.2 ファジィ集合とメンバーシップ関数

ファジィ集合は、境界のぼやけた集合である（図1）。一方、従来の集合は、境界が明確なのでクリスプ集合（crisp sets）と呼ばれる。ファジィ理論では、あいまいさの程度を測る尺度としてメンバーシップ関数（membership function）を導入することで、関連する情報を定量的に取り扱う（図2）。メンバーシップ関数は、ある状態が「大きい」とか「小さい」といった人間の経験や知識に基づく主観的なあいまいさを、その状態量の全定義域で0～1までの値を取得する関数を用いて定量化したものである。メンバーシップ関数のよく知られたものに、三角型、台形型、釣鐘型がある。

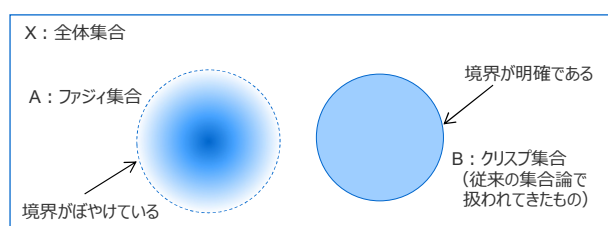


図1 ファジィ集合の概念図

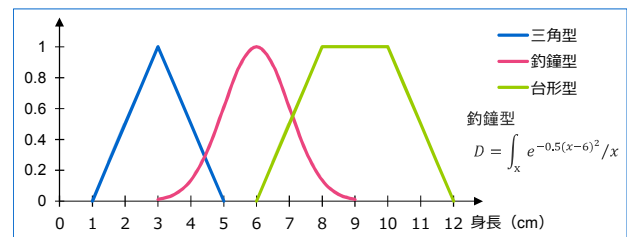


図2 メンバーシップ関数（例）

図3、図4は、日本人の身長を表す定義関数の例である。図3は『低い身長』『中背』『高い身長』等の言葉を多くの日本人の主観に合ったメンバーシップ関数で表すことができる。図4のクリスプ集合の場合、例えば165cmを境に1cm違うだけで『低い身長』と『中背』が急に変わることになり、主観とは合わなくなることがわかる。

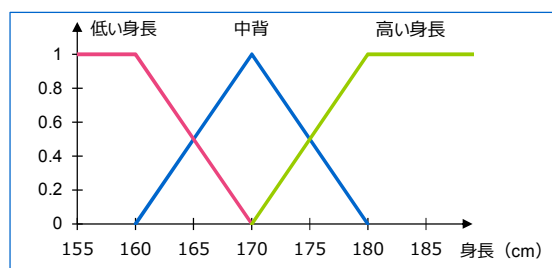


図3 背の高さを表すファジィ集合の定義関数（例）

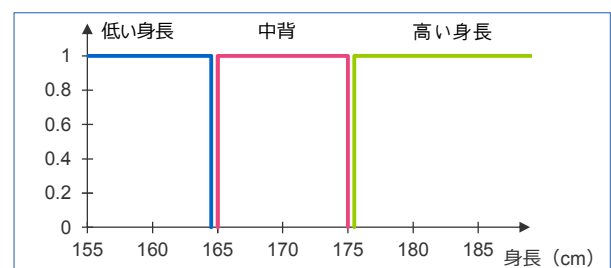


図4 背の高さを表すクリスプ集合の定義関数（例）

人間は、言葉によって考えることが多いので、この言葉をファジィ集合のメンバーシップ関数に変換して数値化した上でコンピュータに入力できれば、コンピュータ内で人間の思考・判断の過程がモデル化できることになる。人間の用いる言葉には大局的・概括的な表現が多く、これによって情報を要約できるため、情報処理の容量と時間の節約につながる。また、メンバーシップ関数は、評価や判断をする人の主観によって変わるものであるが、このことが専門家や熟練者の経験や知識を反映する上での柔軟性に結びついている。

4. ファジィ理論のリスク評価・リスクマネジメントの応用 ①ファジィ FTA

4.1 ファジィ FTA の概要

ファジィ理論のリスク評価への適用が早くから検討されてきたのは FTA（Fault Tree Analysis／故障の木解析）である。FTA は、システムに起こりうる望ましくない事象（特定の故障や事故、危険状態）を最上位（頂上事象）に置き、それを発生させる原因事象を順次下位に論理展開して基本事象にまで分解し、フォールトツリー（FT／故障の木）と呼ばれる樹形図を作成する。ブール論理の演算（主に論理積 AND、論理和 OR）を用いて、基本事象の発生頻度から頂上事象の発生確率を算出するとともに、故障や

事故の因果関係を明らかにする手法である。

FTA は、原子力施設や化学プラント、航空機等の大規模システム等の高い信頼性が求められる施設のリスク評価に利用されることが多いが、基本事象の発生確率（例えば、機器の故障確率）については収集できるデータ数が非常に少ないため、公的機関が発行している標準データや類似の機器・システムの故障確率を参考に設定されている。このため、FTA の利用は上記の分野以外には、データの蓄積が比較的容易な工業製品の設計・開発等に限定されているのが現状である。また、人間の操作に起因するトラブル等の事象を信頼性・安全性解析に反映するために、人間信頼性解析（HRA ; Human Reliability Analysis）の手法が開発され、同様に原子力施設等に適用されている。しかし、作業者の経験年数や心理状態、周囲の作業環境等のヒューマンファクターによって、ヒューマンエラー（人的過誤）の発生確率は大きく変わるため、活用範囲は限られているのが現状である。

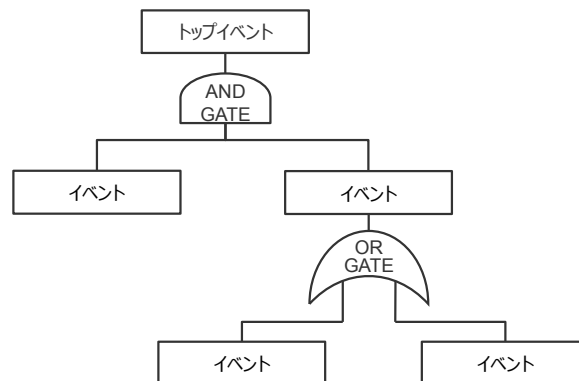


図5 FTA（故障の木解析）の例

FTA にファジィ理論を導入し、その弱点を補足したり、適用範囲を広げるために、基本事象の発生確率を専門家の経験や知識に基づいてファジィ数として扱うファジィ FTA（FFTA）が提案されている。Y. A. Mahmood らは、FFTA の適用に関する学術論文の発行件数が、2005 年以前は 5 年間で 10 件未満であったのに対し、2005～2011 年の 5 年間で 60 件に急増したことを報告している³。筆者は、2012 年以降に 30 件を超える FFTA の学術論文を確認している。

FFTA の方法論には幾つかの種類がある。例えばトップ事象の発生確率を基本事象のファジィ数の AND 演算、OR 演算により直接求める方法や、基本事象の発生確率をファジィ数から非ファジィ化

（defuzzification）して求め、従来の FTA の演算方法を用いてトップ事象の発生確率を求める方法等、様々な方法が提案されている⁴。ちなみに近年では、鬼沢（1988 年）⁵、ならびに Lin と Wang（1997 年）⁶が提案した方法の採用が増えている（これは前述のうちの後者の方法である）。エキスパートの意見により求めたファジィ数を集計、非ファジィ化した後、式①を用いて基本事象の発生確率を求める方法である。この場合、発生確率の過去データや標準データが利用可能な基本事象と、それらが使用できない基本事象を混在させて同じフォールトツリーで扱うことができる利点がある。

$$\text{Pr} = \begin{cases} \frac{1}{10^k}, & \text{FPS} \neq 0 \\ 0, & \text{FPS} = 0 \end{cases} \quad k = \left[\left(\frac{1 - \text{FPS}}{\text{FPS}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \textcircled{1}$$

（FPS : Fuzzy Possibility Score）

なお、鬼沢はファジィ数を用いた機器の故障率の算定手法⁷に加え、ヒューマンエラーの起こりやすさをファジィ数で表すとともに、影響因子 PSF（Performance Shaping Factor）として機器の操作性、環境、適性、疲労度、作業に取り組む気持ちの 5 因子を検討し、ファジィ積分を用いたモデリングを行っている⁸。

4.2 ファジィ FTA の適用事例の検証

筆者は、幾つかの適用事例を選定して検証を行った。ここでは、Sivaprakasam Rajakarunakaran らによる LPG 燃料補給施設への FFTA の適用について取り上げる⁹。LPG の漏洩事故にかかわる FTA において、基本事象の故障確率の算定には、『とても低い』『低い』『やや低い』『中程度』『やや高い』『高い』『とても高い』といった言語変数 (linguistic variable) からなるメンバーシップ関数を用いている。また、前述の鬼沢氏の手法を用いてエキスパート意見からファジィ故障確率 (Fuzzy Failure Probability) への変換を行っている。図 6 は、同論文で設定されたメンバーシップ関数であり、表 1 は、設定された言語変数とファジィ故障確率の関係である。

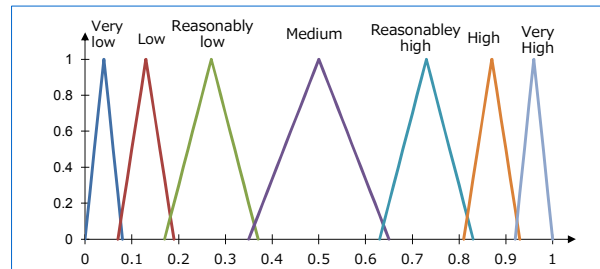


図 6 設定されたメンバーシップ関数と言語変数⁹

表 1 設定された言語変数とファジィ故障確率の関係⁹

Linguistic variables	Triangular fuzzy numbers (a, b, c)	Failure probabilities (/year)
Very low (VL)	(0, 0.04, 0.08)	$< 6.40 \times 10^{-6}$
Low (L)	(0.07, 0.13, 0.19)	$3.55 \times 10^{-6} \sim 1.86 \times 10^{-4}$
Reasonably low (RL)	(0.17, 0.27, 0.37)	$1.25 \times 10^{-4} \sim 1.79 \times 10^{-3}$
Medium (M)	(0.35, 0.5, 0.65)	$1.48 \times 10^{-3} \sim 1.34 \times 10^{-2}$
Reasonably high (RH)	(0.63, 0.73, 0.83)	$1.18 \times 10^{-2} \sim 4.40 \times 10^{-2}$
High (H)	(0.81, 0.87, 0.93)	$3.81 \times 10^{-2} \sim 1.07 \times 10^{-1}$
Very high (VH)	(0.92, 0.96, 1)	$> 0.96 \times 10^{-1}$

筆者は、ファジィ数から基本事象のファジィ故障確率を求め、トップ事象の発生確率を算定する一連の算出過程を検証した。計算には、ネットワーク構造をもつ確率モデルの計算に使用されるベイジアンネットワークソフトウェア AgenaRisk を使用し、同論文の算定結果と一致する結果が得られることを確認している (図 7、図 8)。

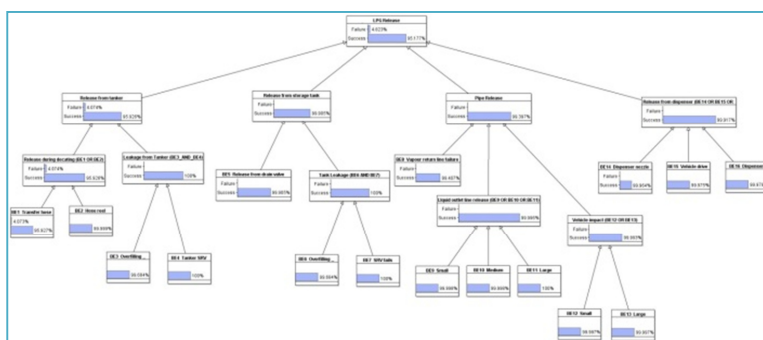


図 7 AgenaRisk による FT 図のベイジアンネットワーク表現

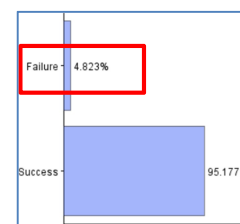
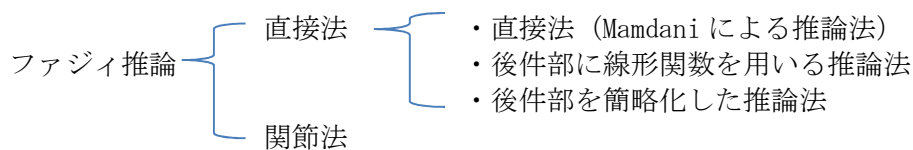


図 8 トップ事象の発生確率の計算結果

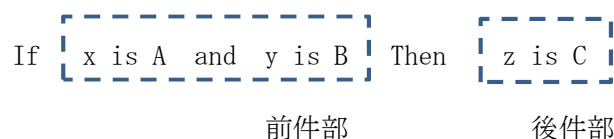
5. ファジィ理論のリスク評価・リスクマネジメントの応用 ②ファジィ推論

5.1 ファジィ推論の概要

「部屋の中が少し寒くなったから、暖房の設定温度を少し上げよう」といったように人間が日頃行っている推論は、ファジィ集合を用いて表すことができる。これをファジィ推論と呼び、ファジィ制御、ファジィエキスパートシステム (Fuzzy Expert System)、ファジィ意思決定 (Fuzzy Decision Making) 等の多様な分野で重要な役割を果たしている。ファジィ制御は、例えば「反応炉内の温度が高い」「攪拌速度がかなり低い」というような情報をファジィ集合により表現し、熟練した作業者がもっている経験や知識を基に、「反応炉内の温度が高く、攪拌速度がかなり低いければ、冷却水バルブを大きく開くべき」といった判断・操作方法をファジィ規則 (Fuzzy Rule) の形で記述し、ファジィ推論によって熟練した作業者と同一ような巧妙な制御をコンピュータで実現しようとするものである¹⁰。ファジィ推論における推論規則は If-Then 形式で記述される。「もし……ならば、……である」のうち、「もし……ならば」の部分は前件部、「……である」の部分は後件部と呼ばれる。ファジィ推論には、以下の種類がある。



一般的なのは直接法の一つである Mamdani の推論法であり、min 演算と max 演算による比較的簡単な推論機構で構成されている。推論規則として次のような If-Then ルールを用いる。



『講座ファジィ 第2巻／ファジィ集合』（日刊工業新聞社刊）¹⁰で、ファジィ推論を理解するのにわかりやすい事例を紹介しているので、以下に引用する。風呂に入ろうとして湯加減が「ちょっと熱い」と感じたとき、蛇口をひねり適温になるように調節するときのことを考える。

- ルール①：湯加減が適温よりも非常に熱ければ、蛇口を給水側（強）に回せ。
- ルール②：湯加減が適温より熱めならば、蛇口を給水側（弱）に回せ。
- ルール③：湯加減が適温よりもぬるめならば、蛇口を給湯側（弱）に回せ。
- ルール④：湯加減が適温よりも非常にぬるければ、蛇口を給湯側（強）に回せ。

人間は、経験的に上の4つのルールと「ちょっと熱い」という事実を比べながら適当に蛇口調節を行っている。この制御をファジィ推論で行う場合の手順を以下に示す。

- (1) 湯加減が「ちょっと熱い」という事実が、ルール①の前件部「湯加減が適温よりも非常に熱い」にどの程度一致するかについて考える（図9(a)）。図から、この場合の一致度（適合度）が0.5であることがわかる。
- (2) 次に、事実とルール①前件部の一致度0.5に応じてルール①の後件部である給水側（強）をとる。すなわち、一致度0.5でルール①の後件部のメンバーシップ関数の頭を削り、図9(b)の斜線部のみを採用する。
- (3) 同様に事実をルール②～④と比べてそれぞれの結果を求める。
- (4) 4つの結果を合成する。この例ではルール④の一致度は0であるため、3つの結果を重ねればよい（図10）。
- (5) 最後に、図10から確定的な数値を抽出する。これは前述の非ファジィ化と呼ぶ。この方法として、図の重心をとることがしばしば行われる。図の面積を二分する位置として確定値（この場合は蛇口の調節位置）が決められる。この場合は、蛇口を少しだけ給水側へ調節せよということになる。

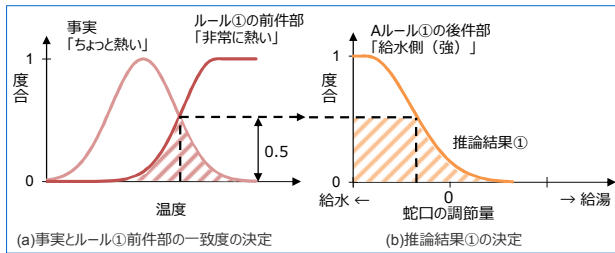


図9 事実とルール①から推論結果①を導く方法

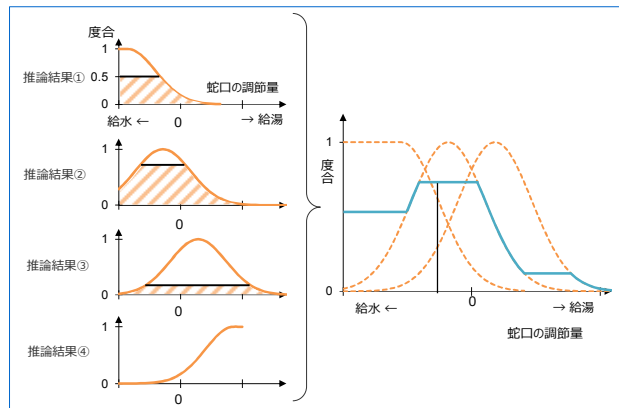


図10 推論結果の合成と確定値の抽出

実際のファジィ推論は、入力値として複数のメンバーシップ関数を設定するため、図11のようになり、min-maxの演算により推論がなされる。

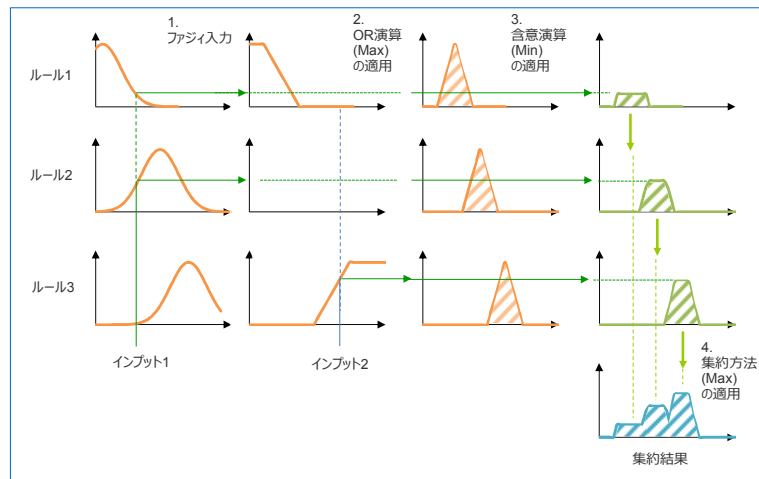


図11 ファジィ推論のプロセス

ファジィ推論の全体概念図を図12に示す。推論対象に寄与する影響因子を洗い出し、ファジィ入力（言語変数）としてメンバーシップ関数により定義する。また、推論対象についてもメンバーシップ関数により定義する（ファジィ出力）。専門家の知識や経験に基づいて、ファジィ入力とファジィ出力の関係を If-Then ルールで記述することで推論エンジンを構築する。

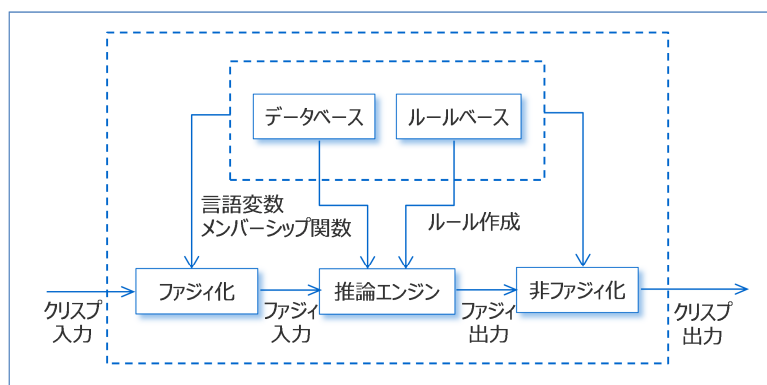


図12 ファジィ推論の概念図

5.2 ファジィ推論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用

ファジィ推論をリスク評価やリスクマネジメント、その周辺領域に適用している学术论文等は、筆者がインターネット上で検索した範囲で310件あることがわかった（発行年または雑誌等への掲載年が不明なものは、引用論文等の発行年から類推している）。発行論文数の推移を図13に示す。2011年以降に増加し、年に40件程度の学术论文等が発行されている。概念の整理や試行的な内容の論文も多いが、一部は企業や地域のリスク評価やリスクマネジメントに実際に適用されているものもある。

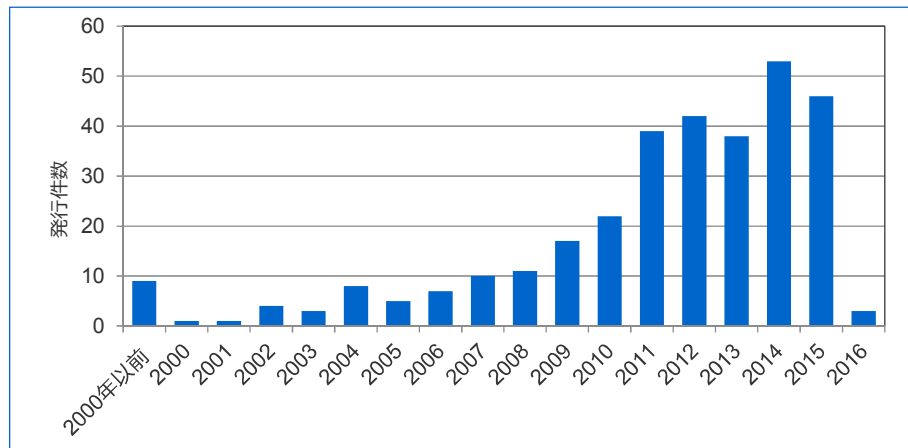


図13 ファジィ推論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用にかかわる学术论文等の発行件数の推移（筆者調べ）

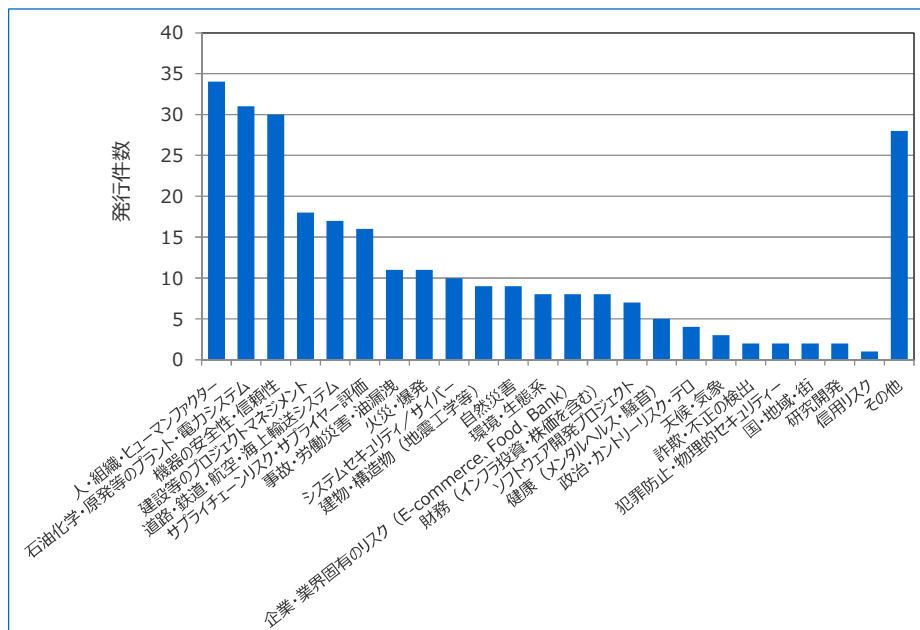


図14 ファジィ推論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用にかかわる学术论文等での適用領域（筆者調べ）

図14にファジィ推論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用にかかわる学术论文の適用領域を示す。最も多いのは『人・組織・ヒューマンファクター』にかかわるリスク評価へのファジィ推論の適用であり、ヒューマンエラーを誘発する作業環境や、組織の安全マネジメント、教育・訓練等を影響因子とした検討が行われている。次に多いのは『石油化学・原発等のプラント・電力システム』のリスク評価への適用であり、例えばLPGのパイプラインのリスク評価において、ガスの放出時間や放出孔の大きさが火災・爆発の過酷さに及ぼす影響の評価に適用された事例もある。『機器の安全性・信頼性』に対する適用も多く、FTAやETA（Event Tree Analysis）によりリスク分析を行い、それらの結果をファジィ推論を用いて統合する、といった使用方法も提案されている。また、『建設等のプロジェクトマネジメント』に対する適用では、建設コストやプロジェクト遅延に影響を及ぼす因子の検討や、販売戦略の検討に利用されている。その一つの事例では、建設コンサルタントや建設会社、設計、作業員、資材、自然災害等の外部要因がプロジェクト遅延に及ぼす影響が検討されている。

5.3 ファジィ推論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用に関するケーススタディ

筆者は、ファジィ推論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用を試行し、その有用性や課題を確認するために幾つかのケーススタディを行った。ここでは、大地震発生時の製造工場における従業員の負傷リスクをファジィ推論を用いてモデル化したものを紹介する。

はじめに、製造工場において金型等の物品が落下して従業員が負傷するリスクを、評価対象のエリアごとに10段階で評価するためのファジィ推論の構築を試行した。なお、モデル構築には数値計算ソフトウェア MATLAB を使用し、Mamdani の推論法によって計算を行った。本項では、試行したモデルのうち、特徴的な部分について紹介する。

(試行1) 落下物による負傷の可能性に関するファジィ推論

金型や治工具、部品や資材等の保管場所を想定し、これらの物品の落下によって地震発生直後ならびに避難行動中に従業員が負傷する可能性を評価するため、5つの因子（落下物となりうる物品の保管状況やそれらの特性、教育・訓練や落下防止対策の実施状況、避難経路と当該エリアの距離、緊急地震速報

（EEW；Earthquake Early Warning）の受信・放送設備の有無）で構成されるファジィ推論を構築した。図15は、5つの影響因子（インプット）から If-Then ルールを介して一つの推論結果（アウトプット）を導出している構造を示している。図16は、その影響因子の一つとして落下物となりうる物品の設置高さをメンバーシップ関数で表現したもの、図17および表2はアウトプットの一部であり、当該エリアの避難経路からの距離と教育・訓練や落下防止対策の実施状況の2つの因子が、落下物による負傷の可能性にどのように寄与しているかを表したものである。

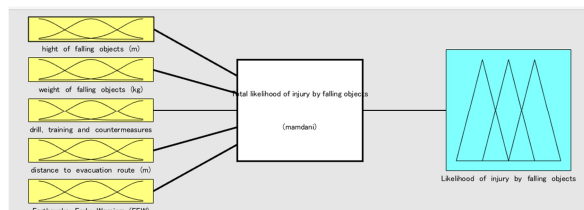


図15 ファジィ推論の構造

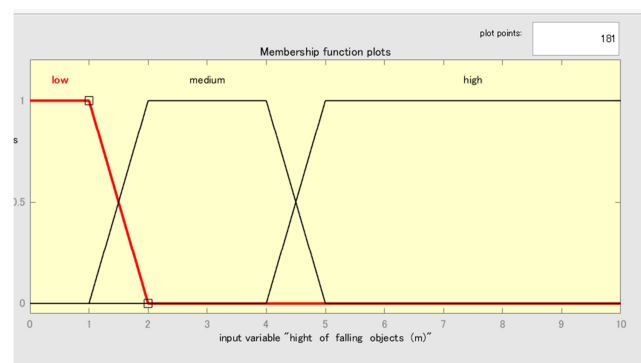


図16 落下物の設置高さに関するメンバーシップ関数

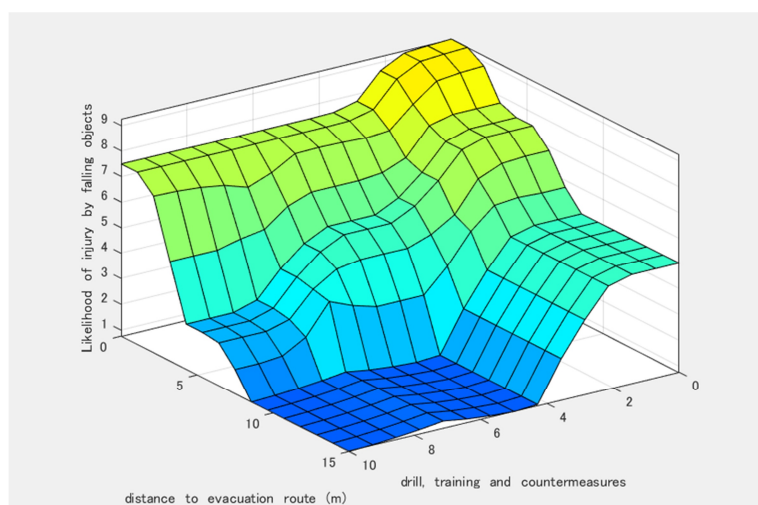


図17 落下物による負傷の可能性に関する surface plot（落下物となりうる物品の設置高さ、落下物となりうる物品の重量、緊急地震速報の受信・放送設備の有無をそれぞれ固定値とした場合）

表 2 落下物による負傷の可能性に関する試行結果

エリア名称	主要な工程・設備と設定条件	リスク値 (0～10)
Aエリア	金型保管エリア (教育・訓練や対策の実施状況：良、距離：2m、EEW：有)	5.00
Bエリア	金型保管エリア (教育・訓練や対策の実施状況：悪、距離：2m、EEW：無)	7.86
Cエリア	資材倉庫 (教育・訓練や対策の実施状況：良、距離：1m、EEW：有)	6.23
Dエリア	資材倉庫 (教育・訓練や対策の実施状況：悪、距離：1m、EEW：無)	6.37
Eエリア	自動ラック倉庫 (教育・訓練や対策の実施状況：良、距離：5m、EEW：有)	5.00
Fエリア	自動ラック倉庫 (教育・訓練や対策の実施状況：悪、距離：5m、EEW：無)	7.48

(試行 2) 二次災害を含めた従業員の負傷の可能性に関するファジィ推論

試行 1 に続いて、大地震の発生直後または避難行動（いわゆる一次避難）における、落下物以外の種々の負傷形態（例えば、設備・機器の滑動による従業員への衝突、避難経路中の転倒、可燃性ガスや引火性液体、高温金属、毒性ガスを扱う工程から生じうる二次災害）を統合的に評価できるファジィ推論の構築を行った。想定する工場として、熱処理設備や溶解炉、機械加工設備等のある金属部品の製造工場を念頭に置いた。また、負傷形態としては次のような事象を想定し、10 段階で評価を行うファジィ推論を構築した。

- ① 落下物、設備・機器との衝突、避難階段での転倒等による（二次災害を伴わない）負傷の可能性
- ② 可燃性ガスの爆発または水蒸気爆発、溶湯の飛散または漏洩に伴う火災による熱傷の可能性
- ③ 引火性液体の火災による熱傷、化学熱傷または酸欠・中毒の可能性

それぞれの事象の可能性を個別に評価し、評価対象エリアごとの従業員の負傷の可能性をトータルで評価できるようにファジィ推論を階層化した。図 18 に、マルチレベルファジィ推論の概念図を示す。

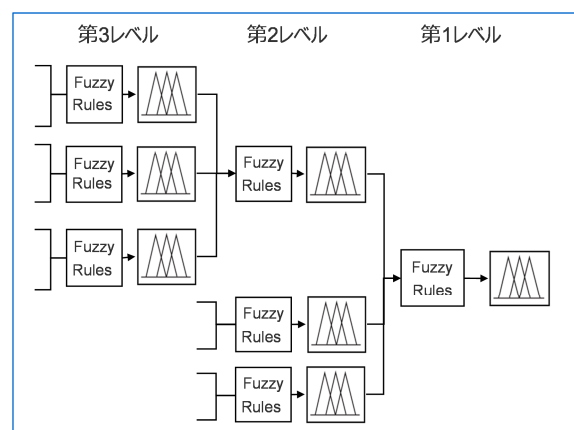


図 18 マルチレベルファジィ推論の概念図

インプットとなる影響因子として、以下のような要素を組み入れた。

- ✓ 設備・機器の固定状況、避難経路の長さ、階段等での転倒の可能性を高める要素の有無
- ✓ 可燃性ガス・引火性液体の漏洩の可能性、遮断の仕組み、着火性、着火源の有無
- ✓ 作業者の経験年数、遮断弁へのアクセス性、作業員と危険工程との距離
- ✓ 炉・容器・配管の破損の可能性、熔融金属への水分侵入の可能性

例えば、熱処理設備や溶解炉、乾燥炉等の可燃性ガスを使用する設備に対しては、燃料ガスや浸炭ガスの緊急遮断の可否について複数の因子（例えば、自動遮断弁が付いている場合と手動遮断が必要な場合。手動遮断の場合には、作業者の経験年数や遮断弁へのアクセス性）で構成されるファジィ推論を構築した。表3に、一般的な製造工程を想定して算出したトータルのリスク値を記す。また、fエリアとgエリアのガス浸炭焼入設備とhエリアのガス浸炭焼入設備の違いとして、燃料や浸炭ガスの供給における震動検知・停電検知による自動遮断の有無、焼入油層やダクト配管等の構造やレイアウト等を想定している。

表3 評価対象エリアごとの従業員の負傷の可能性に関する試行結果

エリア名称	主要な工程・設備と設定条件	トータルのリスク値 (0～10)
aエリア	組立設備（設備固定：無）	6.90
bエリア	組立設備（設備固定：有）	4.61
cエリア	組立設備（設備固定：有、3階からの避難を想定）	7.19
dエリア	溶解炉（燃料：LPG）	7.26
eエリア	研磨加工機（加工油：第三石油類、設備固定：有）	5.01
fエリア	ガス浸炭焼入設備（燃料：重油、手動遮断、経験年数：5年）	7.23
gエリア	ガス浸炭焼入設備（燃料：重油、手動遮断、経験年数：1年）	7.37
hエリア	ガス浸炭焼入設備（燃料：都市ガス、自動遮断）	5.62

5.4 得られた結果に対する考察

今回のケーススタディを通して、以下の知見が得られた。

- ① 製造工場にて発生しうる従業員の負傷の可能性について、評価対象ごとにリスクをグレーディングすることができた。今回は試行ではあるものの、その結果が概ね筆者の知見や感覚と合致するものであることを確認した。
- ② リスクを増減させる要素を適切に抽出し、メンバーシップ関数と If-Then ルールを用いて適切に設定することができれば、評価対象の現場の実状に合ったリスク評価を行うことが可能であることを確認できた。
- ③ 教育・訓練の実施状況、作業者の経験年数、遮断弁へのアクセス性、設備・機器と作業者の距離等の人の作業性に影響を及ぼす要素（ヒューマンファクター）を影響因子に加えることができることを確認できた。
- ④ メンバーシップ関数の設定の仕方がトータルのリスク値に影響するため、ファジィ推論の活用には相応の経験や慣れが必要である。また、客観性を確保し、評価結果が恣意的にならないようにするために、ファジィ推論の構築には一定の手順や基準を確立する必要があることがわかった。

6. おわりに

本稿では不確かさ、あいまいさを扱う概念であるファジィ理論のリスク評価・リスクマネジメントへの適用について検討を行い、その一例としてファジィ FTA とファジィ推論を取り上げた。ファジィ理論は、人間の主観的な思考や判断を定量的に取り扱うために提案されたものであり、“リスク”という人間の主観的な思考や判断と密接に関連した概念を表現するのに適している。

ファジィ FTA については、十分な過去データがない、比較的新しい技術のために類似事象からの類推が困難といった場合に、ファジィ数から基本事象の発生確率を類推する方法が有効であることが確認できた。そしてファジィ推論については、現場の実状を考慮に入れることが可能であること、ヒューマンファクターを影響因子に加えた評価を行うことができることを確認した。構築したファジィ推論を応用すれば、例えば、避難計画や各種対応手順の見直し・改善、事前対策への投資優先順位付け、教育・訓練プログラムの作成等に役立てることが可能である。また、エキスパートシステムとして、専門家やベテ

ラン従業員の知見・ノウハウの形式知化と蓄積、さらには経験の浅い従業員への伝承にも応用できることが示唆された。

今後は、ファジィ理論の適用範囲を広げ、複雑かつ十分な過去データが活用できない他のリスク（例えば、カントリーリスクやレピュテーションリスク等）への適用や、既に利用されている確率論的リスク評価やモンテカルロシミュレーション等の手法との組み合わせによるリスクマネジメントの高度化、経営意思決定への活用が期待できる。

参考文献

- ¹ 安信誠二, ファジィ理論の実システムへの応用—仙台市地下鉄列車自動運転—, 日本機械学会誌, 第 91 巻, 第 836 号, pp. 639-644 (1988)
- ² 菅野道夫, ファジィ理論とその応用, 化学と生物 Vol. 26, No. 9, pp. 562-567 (1988)
- ³ Y. A. Mahmood, A. Ahmadi, A. K. Verma, A. Srividya, U. Kumar, “Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application”, International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 4, No. 1, pp. 19-32 (2013)
- ⁴ 辻村泰寛、玄光男、Chang Eun KIM, ファジィ・フォールトツリー解析とその応用, 日本ファジィ学会誌 Vol. 5, No. 5, pp. 1000-1013 (1993)
- ⁵ Takehisa ONISAWA, “An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility”, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 87-103 (1988)
- ⁶ Ching-Torng Lin, Mao-Jiun J. Wang, “Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 58, No. 3, pp. 205-213 (1997)
- ⁷ 鬼沢武久, 菅野道夫, あいまい論理を用いた故障解析, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 6, pp. 498-505 (1984)
- ⁸ 鬼沢武久, 人的過誤の起こりやすさと Fuzzy 積分を用いた Performance Shaping Factor のモデリング, 人間工学, Vol. 22, No. 2, pp. 81-89 (1986)
- ⁹ Sivaprakasam Rajakarunakaran, A. Maniram Kumar, V. Arumuga Prabhu, “Applications of fuzzy fault tree analysis & expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 33, pp. 109-123 (2015)
- ¹⁰ 日本ファジィ学会編, 講座ファジィ第 2 巻／ファジィ集合, 日刊工業新聞社刊 (1992 年)