

2505FuzzySoftComp.pdf

2025.5 ブログ：「ファジィの誕生からソフトコンピューティングへ」を読んで、の詳細
(→ <http://www.1968start.com/M/blog/index4.html#2505>)

「ファジィの誕生からソフトコンピューティングへ」を読んで

中所武司

■このエッセイのきっかけ

人工知能学会誌の最新号のファジィに関する解説論文について、
50 年以上前の第一次 A I ブームの時の私の文献調査との関連で気になり、読んでみた。

- ・人工知能学会誌「人工知能 40 巻 3 号 (2025 年 5 月)」p.269-281
特集：「AI とファジィの接点」ファジィの誕生からソフトコンピューティングへ

[参考 1] 過去ブログ&エッセイ

2024.1 「ファジィ理論」を読んで

<https://www.1968start.com/M/blog/index3.html#2401>

<https://www.1968start.com/M/essay/2401FuzzyTheory.pdf>

[参考 2] 私の大学院論文輪講資料

1970.6 「学習機械について (2) : Fuzzy Automata の場合」大学院論文輪講

<http://www.1968start.com/M/bio/olduniv/gakusei.html#7006Fuzzy>

■内容の要約とコメント (→★)

<図 1 ファジィの父 Lotfi A. Zadeh (1921 ~ 2017) >

1. はじめに

- ・ファジィは人間の思考過程で必ず直面する課題で、他の学問領域とも融合しやすい。
以下は、著者の歩んできた道から眺めた周りのファジィに関する景色である。

→★私にとっても修士 2 年の大学院論文輪講 (1970) で、Zadeh の 1965 年の論文を
紹介した経験があり、懐かしいので本解説を読んでみた。冒頭の [参考 2] 参照。

2. ファジィの誕生から成熟まで

2.1 ファジィの産声

- ・用語「ファジィ」は、Zadeh の 1965 年の論文「ファジィ集合」に由来する。
ファジィ論理、ファジィ行列、ファジィ関係、ファジィ推論、ファジィ言語、
ファジィ意思決定などの理論体系 (ファジィ理論) を実システムに応用したものが
ファジィシステムであり、これらすべてを総括した学問領域を「ファジィ」と呼んでいる。

→★fuzzy という英単語の意味：

＊上記の大学院輪講資料（1970）の表紙に使用した当時の英和辞典のページの説明：

1. けばのような、けばでおおわれた、けば立った
2. ぼやけた、ぼやけた輪郭
3. （毛髪が）ほぐれた、縮んだ

多分、2番目の意味で、Zadeh の 1965 年の論文に使われたと思われる。

- ・現在のデジタルコンピュータでは、天文学的な数のワードも容易に識別できるが、60 年前には、人間の思考や知識における「曖昧な表現」、「厳格ではない言葉の意味」の扱いは、永遠の課題だった。
- ・当時、人間の思考に強い関心をもっていた L. A. Zadeh（1921～2017）は、「システムが複雑になればなるほど、それを厳密に記述することが難しくなる」として、1965 年に”Fuzzy sets”という論文を発表した。（本稿寄稿時点の被引用総数, 160, 962 報）
- ・しかし、この論文が日の目を見るまでには紆余曲折を経てきた。

2.2 革新的発想は無視されやすい

- ・1965 年の Fuzzy Sets の論文は、他のジャーナルに投稿したが、不採択となり、自分が編集委員を務めているジャーナルに改めて投稿したところ、同僚の編集委員が査読をしてくれて採択された、と Zadeh は述懐していた。

→★本件とは比べうるものではないが、某学会へ投稿した小生の論文の不採択理由が「実証データがない」というものだったが、別の学会で採択された経験がある。誰かが現状の問題の解決方法を提案し、他の誰かがその方法を現場で試してみるというのが学会の役割と思う。

- ・また、NSF に補助金を申請した際の不採択の理由は、「ファジィ論理というのは、それ程期待できるものではなく、事象を記述する際の不明瞭さに焦点を当てたものであり、その事象に関する不確実性ではない。これは、実際の世の中に、ロジックを当てはめたときに考えなければならないことを無視している。したがって、ファジィ論理というのは、発展する訳がない。以上の理由により、この補助金申請を拒絶する」というもので、審査員はファジィ論理が何たるかを全く理解していなかった。

→★ある分野の専門家という自負心の強い人は他人の論文を厳しく評価する傾向がある。私の経験では、応用分野を特定したフレームワークを利用してアプリを開発すれば生産性・信頼性が向上するという論文をソフトウェア工学の分野に投稿したところ、「これはソフトウェア工学の分野の論文ではない」という理由で不採択となった。査読者 3 名のうち 2 名は採択 OK だったが、ソフトウェア工学の専門家であると申告した査読者の強い意見が拒否権の役割を果たしていた。

2.3 ファジィ誕生後の国内外の動き

- ・日本で最初にファジィ集合に興味を示したのは、日本放送協会の上坂吉則で、そのときの手紙（1966年）を Zadeh が見せてくれた。

→★私が大学院の輪講でファジィを紹介したのは1970年6月で、そのきっかけは記憶にはないが、修論の参考文献に記載した下記の文献の可能性はある。

49. 水本、豊田、田中：Fuzzy 言語、電子通信学会誌論文誌 C, 53-C, 5, 333-340, 1970-5

<図2 カルマンフィルタの生みの親 Rudolf Emil Kálmán (1930 ~ 2016) >

<図3 1984年、ハワイ、カウアイ島で開催されたファジィに関する最初の国際会議>

- ・ファジィの誕生後、すぐに実社会に応用されるというわけにはいかなかったが、日本国内でも、1972年に東京で「あいまいシステム研究会」が発足し、1980年に大阪で「あいまい科学研究会」が発足した。
- ・国内での専門用語としての正式の呼称を「ファジィ」と定めた。
- ・1984年のハワイでの IFSA 設立総会后、ファジィの応用が目立ってきた。特に、ファジィ予見制御を応用した仙台市地下鉄（日立製作所）に関しては、その運転の滑らかさ、乗り心地の良さ、停止精度の良さ、運行ダイヤの実行能力など、それまでの人間運転士を凌駕する性能を示し、国内外の研究者の注目を浴びた。

→★本件は、私が在籍していた日立の研究所の成果として、当時、所内でも話題になった。

<図4 ファジィ誕生後の国内外の動き>

<図5 倒立振子によるファジィコントローラの性能評価とファジィ推論ボード（1987）>

2.4 ファジィの応用研究の開花

- ・1980年代は、国内企業は、研究開発に乗り出し、それぞれ成果を上げた。1980~90年の間に商品として企業が開発した商品は150件を超える（図6）。

以下は、図6の内容：

- ・自動学習ファジィコントローラ（日揮；1983）
- ・油圧システムの自動診断システム（新日鉄；1984）
- ・ファジィ予見制御（日立製作所；1983）⇒ 仙台市地下鉄に実用（1987）
- ・浄水場薬品注入制御（富士電機；1984）
- ・糖分抽出プロセス（日本甜菜製糖・芽室製糖所；1987）
- ・自動車の定速走行自己調整装置（日産自動車；1987）
- ・ファジィ音声認識装置（リコー；1987）
- ・エレベータの群管理（三菱電機；1988）
- ・ステップ位置合わせシステム（キヤノン；1988）
- ・汎用ファジィコントローラ（立石電機；1988）
- ・トンネル掘削機（奥村組；1988）

- ・ポンプ浚渫船（明電舎；1988）
 - ・ガラス熔融炉の温度制御（日本電気硝子；1989）
 - ・オートアイリス・システム（三洋電機；1989）
 - ・オートフォーカス（キヤノン；1990）
 - ・全自動洗濯機（松下電器産業；1989，日立製作所；1990）
- 以降，各社から掃除機，調理機器等，ファジィの家電製品への応用が多数発表された。

2.5 ファジィからソフトコンピューティングへ

- ・通称 IIZUKA 会議と呼ばれる国際会議を 1988 年から 2000 年まで，隔年に 7 回開催した。最後に「ソフトコンピューティング」という形にまとめ，現在に至っている。
- ・科学研究費補助金の申請では，ファジィやソフトコンピューティングは審査員も理解できないので，評価も低くなり，不公平感が否めなかったが，1997 年度から 3 年間の時限付き分科細目に採択された後，分科細目表に取り込まれ，申請総数も増え，採択数も格段に増えることになった。

<図 7 科学研究費補助金申請に必要な「系・分野・分科・細目表」付表キーワード一覧>

2.6 FLSI の解散

- ・著者は，1990 年に財団法人「ファジィシステム研究所」（FLSI）を設立し，本年（2025 年）3 月末に解散した。

<図 8 ファジィシステム研究所の公益法人設立許可証（1990. 3. 15）>

3. 人間の思考過程から生まれたファジィ集合

3.1 豊富な経験を要約すると少数の知識となる

- ・日本語や英語などの自然言語の意味は往々にして「曖昧」である場合が多い。
- ・例えば，投手がいろいろな球筋や球速を実現できるようになったとき，10000 球にも及ぶ投球の試行の過程で，10000 個の IF-THEN ルールが脳内をかすめたはずである。そのノウハウは，少数の，境界のぼやけた集合になっているはずである。
- ・経験を要約した「知識」は，輪郭のぼやけた「曖昧な言葉」（ラベル）で表現され，その意味を特性付ける特性関数は，メンバシップ関数（帰属度関数）と呼ばれ，その値域は 0～1 で，連続関数表記と離散表記があり，1 は真を，0 は偽を表す。
- ・160km/h は「速い」ので，曖昧な言葉「速い」に帰属する度合いは 1（100%）である。130km/h は「速い」とはいえないから，0。140km/h は「速い」とも「遅い」ともいえないので，0.5。145km/h は，0.8 の度合いで「速い」といえる。

150 km/h は、0.9 の度合いで「速い」といえる。

このように、知識を獲得した人の脳裏には、メンバシップ関数が形成される。

- ・ファジィ情報処理は、ラベルで記号処理、メンバシップ関数で意味処理を並行して行い、非合理的な結果は、バックトラッキングによって、どこで問題が生じたかを突き止められることは、システム設計をするうえで、極めて重要なポイントである。

＜図 9 経験や実例、ぼやけたデータ集合、輪郭の曖昧な言葉、メンバシップ関数＞

3.2 ランダムネスとファジネス

- ・ファジィは、事象が「曖昧な言葉」に属する程度を 0 ～ 1 のグレードで記述するが、確率とは違う。確率はランダムネスを取り扱う数学的道具で、曖昧さ（fuzziness）も不確かさ（uncertainty）の範疇にあるものであるが、以下の三つの点で異なる。

- (1) 確率は、未生起の事象の不確かさであり、時間がたてば、事の実偽が明らかになる。曖昧さは、主観、直観、感性に基づく不確かさであり、真偽は明らかにならない。
- (2) 確率には客観性があり、誰が計算しても同じ結論になる。
メンバシップ関数は主観によるところが大きい。
- (3) 事象の確率を規定する特性関数は確率密度関数であり、積分すれば 1 になる。
曖昧な言葉の特性関数であるメンバシップ関数は積分しても 1 になるとは限らない。

＜図 10 曖昧さを示す 2 種類の特性関数：確率密度関数とメンバシップ関数＞

3.3 ファジィ専用電子回路とその集積化

- ・ファジィでは、メンバシップ関数の概形の大きな変化や位置ずれがなければ、その意味はほとんど変わらないので、アナログ技術を使ったファジィ専用電子回路は、少々精度が悪くてもよいが、回路構成が単純でスピードの速い電子回路が求められる。
- ・ファジィは、人間の知識や思考過程の主観的曖昧さをディジタルコンピュータで扱うために提案されたものなので、ソフトウェアによる処理が前提とされていたが、著者は、ファジィ情報処理専用のファジィコンピュータの開発を試みた。
- ・チップは、配線の線幅が $20\ \mu\text{m}$ で、当時の最新鋭の半導体集積回路の寸法には劣るが、動作原理は全く同じであり、寄生効果のチェックも可能であった。

＜図 11 肉眼で見えるファジィ専用集積回路。1984 年～1986 年試作＞

4. 因果関係（入出力関係）の記述

- ・因果関係やシステムの入出力関係を記述する主な方法には、関数による表現、パラメータの分布による表現、IF-THEN ルールによる表現などがある。

4.1 関数による表現

- ・このシステム記述方法では、入出力関係は、主に関係方程式や微分方程式で表現される。

<図 12 n 入力 1 出力のシステム>

4.2 パラメータの分布による表現

- ・パラメータ（重みやしきい値）の分布によるシステム表現の一例は、多層フィードフォワードニューラルネットワークである。

<図 13 多層フィードフォワードニューラルネットワーク>

4.3 IF-THEN ルールによる表現

- ・多入力 1 出力システムの挙動（特性）の記述方法として、IF-THEN ルールの集合がある。もし前件部（IF 節）と後件部（THEN 節）の命題がすべて真（1）か偽（0）であれば、記号処理しかできず、意味処理をすることはできない。

<図 14 多入力 1 出力システムの挙動（特性）を記述する IF-THEN ルールの集合>

→★IF-THEN ルールは、第二次 A I ブームの 1980 年代には主要な知識表現だった。専門家の知識をルール化したエキスパートシステムが主な応用分野だった。

- ・1982 年にスタートした「第五世代コンピュータプロジェクト」は、これに属する。IF-THEN ルールの例：

もし、温度 (x_1) が 90°C ($A11$) で、温度変化 (x_2) が $+10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ($A12$) ならば、
燃料コック (y) を CLOSED ($B1$) にせよ。

この方法でのシステムの入出力特性記述には、膨大な数の IF-THEN ルールが必要になる。

- ・そこで、ファジィ集合（「曖昧な言葉」）で表現すれば、ルール数が劇的に少なくなる。

もし、温度 (x_1) が「中程度に高く」、温度変化 (x_2) が「急上昇している」ならば、
燃料コック (y) を「少し閉めよ」。

そして、「中程度に高く」、「急上昇している」、「少し閉めよ」の三つのラベルに対して、設計者がメンバシップ関数を定義すればよい。

→★メンバシップ関数の定義は簡単でない場合が多いと思われるが、実験を繰り返して調整することになるのかな。あるいは最近の A I 技術で自動化する？

5. ファジィ推論

- ・IF-THEN ルールの集合で表現された知識に、外から「条件節」の情報を入れ、それに該当する答えを引き出すことを「推論」という。

→★この推論は前向き推論。THEN 部分から IF 部分を検索するのは後ろ向き推論

5.1 メンバシップ関数の形状

- ・温度、速度、距離、重さ、力、明るさなどの物理量に関する「曖昧な言葉」の意味付けは、メンバシップ関数によってなされ、その言葉の区別は、ラベルによってなされる。

<図 15 「およそ 50℃」を表現するメンバシップ関数の形状>

5.2 非ファジィ化による物理的意味の抽出

- ・ファジィ推論の結果、得られるメンバシップ関数の形は通常非対称なので、そのまま制御信号として使用できないため、その広がりのある情報から確定値（スカラ量）を絞り出す必要がある。この操作を非ファジィ化と呼ぶ。

<図 16 「およそ 50℃」を表現するメンバシップ関数の形状>

5.3 Exact Matching と Soft Matching

- ・IF-THEN のルールセットに外から入力情報を入れ、出力を得るには、入力情報と各ルールの前件部とを照合し、合致するルールを検索する必要がある。
- ・前件部がファジィ集合（「曖昧な言葉」）での表現の場合、当該ルールの結論の採否は、1（採用）か 0（否）とは限らず、部分的に採用することもあり得る。その際、前件部がどの程度似ているかという比較（Soft Matching）が必要になる。

<図 17 確定値入力（シングルトン）とメンバシップ関数との Soft Matching>

5.4 ファジィ論理積とファジィ論理和

- ・入力とルールの命題との Soft Matching の度合いは、各ルールに変数の数だけ存在する。変数ごとの命題は and で結合されているので、それをファジィ論理積で解釈する。ファジィ論理積で最もよく使われているものは、Minimum 演算である。
- ・IF-THEN ルールは、通常、or で結合されているので、これをファジィ論理和で解釈する。ファジィ論理和として最もよく使われるものは、Maximum 演算である。
- ・通常、ファジィ推論で得られる結果は、メンバシップ関数の形（ベクトル量）であるが、ファジィ制御などの実用では、推論結果を確定値（スカラ量）として得たい場合が多い。その場合は、重心法を利用する。

6. マウススタビライゼーション

- ・ファジィ IF-THEN ルールが複雑なシステムに適していることを示す例がファジィ制御で、システムの非線形性も時間遅れによる応答も、自然言語で記述できる。状況の場合分けも容易にできる。それを利用したマウススタビライゼーションについて述べる。

6.1 数理モデルをつくれな現実

- ・制御方式の性能を評価するのによく利用されるのが倒立振り子である。剛体の棒の底部を移動させ、棒の重心の移動を補償して倒立を保とうとするものである。
- ・台座の上に載るのが小動物で、動き回るとなると、数理モデルをつくれな。この場合も、人間がどう判断を下すかを考え、ファジィ IF-THEN ルールをつくり上げることができる。

<図 18 ファジィコントローラのベンチマークテスト。生きたマウスが動き回る>

6.2 矛盾する二つの制御目標をさばく人間の知恵

- ・ファジィコントローラ的设计では、最初に、コントローラの入力と出力を決める。
- ・次に、コントローラの入力と出力のレンジ（上限値と下限値の間隔）を検討する。
- ・三番目に、入出力信号の最大値と最小値の間に配備すべきラベルの数を決める。
- ・四番目に、各々のメンバシップ関数の形状を決める。
- ・五番目は、制御戦略である一組の IF-THEN ルールのセットを考えることである。

<図 19 入力信号および出力信号に割り当てられた 7 個のラベルとメンバシップ関数>

- ・制御目標は二つあるが、外乱が加わった場合や小動物が動いた場合、それら二つの制御目標の間には相矛盾する状況が生じるので、順位を付けておく必要がある。
 - ①優先目標：台座の付いた棒が倒れないようにする。
 - ②追加目標：台座の付いた棒を目標地点に近づける。

<図 20 マウススタビライゼーション>

6.3 ハードウェア構成と実験結果

- ・制御系全体の構成を図 21 に示す。

<図 21 ファジィ制御システム>

7. おわりに

- ・本稿で述べてきたファジィは、主に温度、速度、重さ、力など、言葉の意味を定義するメンバシップ関数の横軸は、物理的に計測可能な量である。
- ・人間が日常使用している言葉、例えば「美しい」、「危険だ」、「切ない」などのほか、「ツルツル」、「ガチャッ」などのオノマトペ（擬態語・擬音語）、顔の表情やジェスチャなどは、定量空間で定義できる「言葉」ではない。

→★私の大学院輪講資料（1970）の冒頭では「美人」、「右翼」、「大きな数」を例としている。
いずれもメンバシップ関数は文脈によって異なるので、定義は難しいと思われる。

- ・これからの人工知能の分野では、ノンメトリックスペース（感性、感情、オノマトペなどの非定量空間）での曖昧さの表現と取扱いが、重要な課題になっていく。

→★私の前述の資料の冒頭では、

『不正確に定義された概念は、人間の思考に関するもの、とりわけ、人工知能、パターン認識、情報処理などに重要な役割を果たしている』と述べている。

→★また、その資料（1970）の「おわりに」では、

『まだ十分に fuzzy 集合の概念を生かした応用とはいえない。

その点で、既成の意味の拡張ということにとらわれず、

fuzzy 集合の概念だけを原点とした独自の展開が望まれる』と述べている。

→★現在の生成 A I とファジィの技術との相性が気になる。

生成 A I を利用してメンバシップ関数を定義するとか、

そのメンバシップ関数を活用して、生成 A I の能力向上を図るとか・・・

- ・研究者が構築した人工知能が、我々の生活様式に変化をもたらすほど便利であっても、それを使う人間によっては、全人類を民主主義から遠い彼方へ葬り去る危険性さえも内包していることを忘れてはならない。

→★同意

・参考文献の一部を抜粋：

[安信 81] 安信誠二，宮本捷二，井原廣一：Fuzzy 理論による列車自動運転制御，
第 20 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，pp. 467-468（1981）

→★当時、私の勤務していた研究所の同僚のもの

[Zadeh 65]Zadeh, L. A. :Fuzzy sets, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353（1965）

→★私の大学院輪講資料では、本論文のほかに、以下の 2 件（2 と 3）も参考になっている。

1. L. A. Sadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, June 1965.
2. L. A. Sadeh, "Fuzzy algorithms," *Information and Control*, vol. 12, pp. 94-102, 1968.
3. W.G. Wee and K. S. Fu, "A formulation of fuzzy automata and its application as a model of learning systems," *IEEE*, vol. SSC-5, No. 3, July 1969.

以上