ファジィ理論の誕生とその発展

—— 日本への期待 ——

Birth and Evolution of Fuzzy Logic —Expectations of Japan's Role—[†]

ロトフィ A. ザデー*

記録・編集 片井 修^{§1}・和多田 淳三^{§2}

はじめに

菅野先生、日本経済新聞社、国際ファジィ工学研究所、日本ファジィ学会、ご列席の皆様、本日ここでお話をする機会を得ましたことを大変うれしく思います。当初の予想を超えてこれだけ大勢の方々に来ていただきましたことを大変感謝しております。あえてお名前は申しませんが、よく存じ上げている友人の方々にもお越しいただいております、これも嬉しい限りです。ファジィ集合の理論と応用の展開に多大な貢献をしていただいた方々にもご列席いただいているようです。日本は、このファジィ理論の発展に非常に重大な貢献をしてきたということで、日本の皆様もこれを誇りに感じているのではないかと思います。

先ほど菅野先生からもお話のありました本田賞に関してですが、昨日の式典でも申し上げました

ように、これも非常に重要な応用技術の貢献が日本から成されたということでこのような受賞の運びとなったのではないかと感じています。私がこの本田賞を受賞することができたのも大方日本の皆様のお陰だと感じています。

ファジィ論理とは

それでは、ファジィ論理とは何かということから説明を始めたいと思います。先ほど菅野先生から基本的な概念に関して明確なご説明をいただきました。ここに、国際ファジィシステム学会会長のサンチェス(Sanchez)教授の描いてくれた図(図1)にありますように、コンピュータの行う推

By ELIE SANCHEZ

図1 Computer Reasoning, Human Reasoning and Fuzzy Logic

* Lotfi A. ZADEH
カリフォルニア大学バークレー校 電気工学・計算機科学科
Division of Computer Science, Dept. of EECS, University
of California, Berkeley

§¹ Osamu KATAI
京都大学 工学部精密工学科
Dept. of Precision Mechanics, Faculty of Engineering,
Kyoto University

§² Junzo WATADA
大阪工業大学 工学部経営工学科
Dept. of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Osaka Institute of Technology

† 本記録は、1989年11月18日に日本経済新聞社東京製作センターにて、同社主催、国際ファジィ工学研究所ならびに日本ファジィ学会後援により開催された「ザデー教授講演会」の記録テープより起こしたものである。会誌掲載を承諾していただきましたザデー教授、日本経済新聞社ならびに国際ファジィ工学研究所に對しまして深謝いたします。

論は非常に正確であり、イエスかノーか、真か偽かということで全てを見ていきます。一方、人間の推論は極めて不正確なもので、いくぶん (more or less)、やや (rather)、それ程でなく (not very)、多く (many) といったように非常にあいまいな形をとっています。したがってファジィ論理の目的としては、これら両者をいかにして近づけるかということにあります。

ここに示しますように(図2)、一般に、論理は二つに分けることができます。古典論理とファジィ論理です。古典論理は、記号操作に基づいて非常に正確な推論を行います。一方、ファジィ論理は、記号を操作することのほかに、より重要なものとして数値処理があります。これは“近似的な推論(近似推論 approximate reasoning)”を可能にするものです。

図2 Fuzzy Logic and Classical Logic

正確さの伝統

ファジィ論理は、従来もまた現在でもかなりの論争的であります。「ファジィ論理が好きだ。」という人もいれば「こんなものは嫌だ。」という人もいます。この理由は、ファジィ論理が、かなり根深い伝統と照らし合わせてみたとき、どうしても対立と矛盾を起こしてしまうということにあります。この伝統というのは、正確なものを尊重し、不正確なものは尊重しないという考えに立っています。我々の文化にはそのような伝統があります。西洋の文化の場合はこれがもっと根強いのではないかと感じております。もちろんデカルトやアリストテレスの流れを汲んでいるということもありますが、人間の行う推論は正確な推論のみであると考えているわけです。過度に正確であるべきだという間違った傾向があるのではないかと思います。一般的に、精密さあるいは正確さというものが強く求められているわけです。

ここで一つの例をご紹介します。先だっのサンフランシスコ大地震に関連して、かなりの新聞記事が出ました。その内で特に目立った物を抜いてまいりました。この記事では、10月17日の地震の1/10以上の破壊力を持つマグニチュード6の地震が今後2カ月以内に発生する可能性は11%であるという調査結果を載せています。また、別の記事ですが、メンロパークの地震学者によりますと、震度5以上の地震が今後2カ月以内に起こる確率は45%であると述べています。ここで大切なのは、出てきている数字11%とか45%とかいう正確な予想が、我々が地震のことを分かっているわけではないのにどうして立てられるのかということです。同じ新聞の記事をまた引用してみると、これだけの規模の地震がでてくるといことは別に珍しいことではなく、ホルツァー(Holzer)博士は、地質学者達は正確な地震発生の予測および活断層の発見に対する彼ら自身の能力に疑いをもち始めていると述べています。つまり地質学者達は彼らの能力に疑いをもち始めているにも関わらず、例えば11%といったような数字を出しているわけです。この記事を読んだ人は、こ

れは10%あるいは12%ではなくて11%だと、おそらく地震のことを十分に分かっているが故に11%というような数字が出てきたのだろうと間違った印象を持つということになるわけです。

なぜファジィ論理がこのような根深い伝統と対立してしまうのかということがお分かりいただけたかと思います。また、なぜ今まで大勢の人々がファジィ論理に対して敵意をむき出してきたのかもお分かりいただけたかと思います。もう一つの例ですが、1975年にカリフォルニア大学の計算機科学・数学科のウィリアム・カーハン(Kahan)教授は「ファジィ理論というのは非常に間違っていてしかも有害だ。」と語っています。実は、彼は私の良き友人で、エバンスホールでの彼の部屋は私の部屋からほんの数室離れているだけです。彼は、「通常の論理で解けないような問題は考えられない、通常の論理の方がうまく解ける。」と述べています。また彼は、「我々が用いている技術というのが、我々を混乱に導いており、我々はこのような混乱から抜け出すことができないと、ザデー教授は述べているが、技術が我々を混乱へと導いたのではなく、我々の持つ欲望と弱さと心の葛藤の故に混乱に陥るのである。我々が必要としているのは、もっと論理立った思考であり、それ以下のものではない。ファジィ理論の危険性というのは、我々を混乱へと導く一種の不正確な思考を助長することである。」と述べています。

皆さんもおそらく同意していただけたと思いますが、私のいい友人でありますカーハン教授は少なくとも15年前には間違ったことをいっていたわけです。ただ、もっと他にも説得できないような人達がいいます。一つの例として、1988年にIEEEのスペクトラム(Spectrum)にトライバス(Tribus)教授が仙台の地下鉄に関するコメントを載せています。仙台地下鉄は大々的に世界中で知られたということで安信博士、宮本博士等も非常に誇りを感じていらっしやっていないかと思うのですが、この記事によりますと、彼は、「ベイズ論理を用いて大体同じことができる。ただ、ベイズ論理としては今までのところ、こうい

った技術を開発できなかっただけである。」と語っております。

トライバス教授には私も非常に敬意を払っておりますが、非常に面白い点は、トライバス教授は制御の専門家ではないわけです。それどころか、制御のことに関してはほとんど何もご存知ないわけです。ファジィ論理に関しても何もご存知ない。しかも仙台地下鉄に関しても何もご存知ない方なのにそれでもなおベイズ論理を使って同じことができるんだと言い切ってしまう。この点がなかなか面白いと思うのです。このファジィ論理が全然良くないといっている人たちは、ファジィ論理を自分の嫌いなものの象徴と見なす傾向があるのではないかと、基本的にこれは偏見ではないかという気がします。このような意見がいろいろあって、それによってアメリカにおけるファジィ論理の発展が妨げられてきた訳です。非常に影響力のある人たちがこういうことを言うことによって、この分野で活躍している人たちもやる気なくなってしまうとか、なかなかできなくなってしまうというような状況ができてしまうわけです。ただ、最近になりかなりの実用例が見受けられることからトライバス教授のような人もこのファジィ論理には何かあると認めざるを得ないような状況に追い込まれています。例えば、2、3ヶ月前に彼が再度意見を求められた際に、このファジィ論理にも何かあると言われたそうです。

ファジィ論理の普及

最近、いろいろな記事が発表されておまして、むしろファジィ論理に関して非常に肯定的なことが言われておりますが、余り時間をかけたくないのでここでは2、3の例だけを紹介しましょう。週刊誌「エレクトロニクスウィーク」に掲載された記事ですが、ファジィ論理は不確実性に対応する新しい方法を提供していると述べています。また、別の記事では、日本の約45社の企業がファジィ論理の研究を支援する予定であると紹介しております。また、今年の「ビジネスウィーク」の記事ですが、なぜ日本人がファジィ論理の方向に向

かっているのかについて述べています。仙台の地下鉄らしき絵も載せていますが、この中でたとえば山川教授ですとかあるいは戸貝博士の話も出てきております。この戸貝博士は渡辺先生と共にファジィ推論チップを開発なさって、注目を浴びている人で、彼のトガイ インフラロジック株式会社の組織に関する記事も多く出ています。

最近、先ほどの菅野先生の話にも出てきました
が、山一証券のファンドファジィに関する記事も
あります。日本の企業がファジィ論理によるコン
ピュータを使って投資プログラムを走らせるとい
うような見出しがついた記事なんですが、このよ
うにかなりの注目を集めていることから、サウジ
アラビアの新聞にまでこういったものが載るよう
になってきています。

それから、1987年に東京で開催された第2回国際ファジィシステム学会以降、日本での研究・開発活動がかなり加速化されているわけです。廣田

先生は、日本における研究・開発プロジェクトを追跡なさって来ているわけですが、段々と追跡が困難になってきたと言われております。ただ非常に面白いのは、日本においては安定した形でどんどんプロジェクト数が増えているという点です。

日本におけるファジィ論理の研究

ここで重要な点として皆様に覚えておいていただきたいのは、これらファジィ論理に関するプロジェクトは、日本では既に早くから始まっていたということです。実際は1968年頃から始まっているわけで、これは決して新しい現象でもなく、最近始まったわけでもないということなのです。最近色々なものがみられますが、これらは大分前に行われた作業の結果として出てきているわけです。

つぎに系統図を皆さんにお見せしようと思います。これは(図3)私の方からの要請で国際ファジィ工学会の皆様にお願いしたものです。

☒ 3 Genealogical Tree of Japanese Researchers

完全なものではありませんが少なくともどの様な形でこのファジィ論理が日本で発生したかというのを表していると思います。この genealogical というのは家族ということです。まず、大阪府立大学を見てみますと浅居先生がいらっしゃいます。浅居先生(現日本ファジィ学会会長)は1968年にファジィに関する初めての論文を発表されています。それから彼の生徒であります田中(英夫)先生、そのまた生徒であります奥田先生と和多田先生と市橋先生となっています。大阪大学の方では、もうすでに故人となられましたが、田中(幸吉)先生がいらっしゃいます。それから水本先生と江澤先生は彼の生徒です。そのまた生徒が本日お越しいただいている馬野先生です。東京工業大学の方では寺野先生がいらっしゃいます。寺野先生は国際ファジィ工学研究所所長でいらっしゃいます。それから菅野先生と廣田先生がいらっしゃいます。お二人の間が点線なのは、博士論文を書く際に監督をしたけれども、正式な形で生徒ではないと

いうことで何かファジィなつながりだということですのでそうなっているようです。それから本日お越しいただいている塚本先生ならびに村上先生がいらっしゃいます。さらに、鬼沢、高木、室伏先生となっています。明治大学の方では向殿先生、九州工業大学では山川先生、京都大学の岩井、片井、古田先生、それから広島大学の坂和先生となっています。これらの方々はもう少し最近の人たちということになります。先ほども申しましたように大阪府立大学、大阪大学、東京工業大学というのが三つの中心となって研究が始まり現在に至っているということです。この系統図は完全なものではありませんが、日本におきましてファジィ関係の仕事がどの様に始まったかということが少なくともお分かりいただけたと思います。現在の系統図を作ればかなり大きな物になってしまうと思うのですが、少なくとも当初においてはこのような形をとっていたということです。

つぎの図(図4)は、初期の段階で(日本から)発

- Hirai,H.,Asai, k.,and Katajima,S.(1968),Fuzzy automaton and its application to learning control systems, Memo,Fac. of Eng., Osaka City University,10, 67-73.
- Mizumoto,M., Toyoda, J., and Tanaka,K.(1969), Some considerations on fuzzy automata, *Jour.of Comp.and System Sci.*,3, 409-422.
- Kitajima,S., Asai,K.(1970), Learning controls by fuzzy automata, *Jour.of JAACE*,14,551-559.
- Mizumoto,M.,Toyoda,J., Tanaka,K.(1970), Fuzzy languages,*Trans.IECE*,53-c,333-340.
- Tanaka,K. Toyoda,J., Mizumoto,M., Tsuji,H.(1970), Fuzzy automata theory and its application to automatic controls, *Jour.of JAACE*,14,541-550.
- Asai,K., and Kitajima,S.(1971), Learning control of multi-modal systems by fuzzy automata, *Pattern Recognition and Model Learning*, Plenum Press, New York.
- Mizumoto,M., (1971), Fuzzy sets theory, 11 th Prof. Group Meeting on Control Theory of SICE.
- Sugeno,M.,(1971), On fuzzy nondeterministic problems, *Annual Conference Record of SICE*.
- Tamura,S., Higuchi, S., and Tanaka, K.(1971), Pattern classification based on fuzzy relations, *IEEE Trans. on Systems,Man and Cyber.SMC-1*, 61-66 ; also in *Trans.IECE*, 12, 937-944.
- Terano,T.,(1971), Fuzziness and its concept,Proc.of Symp. on Fuzziness in Systems and Its Processing, Prof. Group of System Engineering of SICE.
- Mizumoto,M., "Fuzzy Automata and Fuzzy Grammars," Dr.Thesis, Osaka University,1971.

図4 List of Early Papers by Japanese

表された論文のタイトルです。時間の都合で詳しくは述べられませんが、最初のものは1968年に平井、浅居、北嶋先生により「ファジィオートマトンとその学習制御システムへの応用」と題する論文です。次に、水本、豊田、田中(幸吉)先生の論文があります。菅野先生は1971年に最初の論文を発表されていますが、先生が学位を取られたのが74年で、その前に既にこういった論文が発表されているということになります。ここで興味深い点は、最初の段階ではオートマトンに関連した言語あるいは学習が話題の中心となっていたということです。最近ではむしろファジィ論理に基づいた制御に関する研究が多くなされておりますが、当初におきましてはこのファジィ論理の制御に関するものではなかったということです。今後数年の間にこれらに基づいたかなりの実用例が出てくるのではないかと考えています。一般に実用化というのは早い段階での理論研究がベースになっております。したがって、理論が出てきてそれが実用に移るまでに時間のずれがあるわけで、実際に我々の目に見える形になるまでにはまだ何年か掛かるわけです。

もう少し歴史的な話をしますが、第1回ファジィ集合とその応用に関する日米シンポジウムが1974年にカリフォルニア州バークレーで開催されています。このときの出席者を見ますとなかなか興味深いと思います。日本側の出席者では、浅居、福村、本多、稲垣、北川、小川、水本、中村、那須、織田、志村、菅野、田中(幸吉)、田中(英夫)、寺野の諸先生方となっております。これらの方々は、今日におきましてもファジィ論理とその応用に関する研究に非常に重要な役割を果たしている方々なのです。今日見られるいろいろな実用例なども、そもそものルーツというのはここまで遡っていけるんだという点を強調しておきたいと思います。

今までのお話は、皆様に背景知識ならびに現在ファジィ論理がどういうところにあるのかということをご理解していただくためのものでした。ファジィ論理の主な特徴点とそれがどのようにして

実用の領域にまで浸透することができたのかを説明いたしました。

ファジィ論理の表現力

つぎに、このファジィ論理を用いて何ができるかということについてお話したいと思います。ここに示しますように(図5)、ファジィ論理を用いて基本的に表現できることといたしましては、“ファジィ述語(fuzzy predicate)”を用いて、例えば、「高い」、「小さい」、「このような」、「ずっと大きい」といったような表現が可能となります。あるいは、“ファジィ真理値(fuzzy truth value)”によって、「正しい」、「極めて正しい」、「あまり正しくない」、「大体正しい」といったもの、それから“ファジィ限量子(fuzzy quantifier)”によって、「ほとんど」、「数個の」、「ほぼ」、「通常は」などの表現が、また“ファジィ確率(fuzzy probability)”を用いて、「起こりそうな」、「非常に起こりそうな」、「殆ど起こり得ない」などの表現が、そして“ファジィ可能性(fuzzy possibility)”によって、「極めて可能性がある」、「殆ど可能性がない」などが、さらに“言語ヘッジ(述語修飾)(hedge, predicate modifier)”を用いて、「非常に」、「極めて」、「いくぶん」、「極端に」などの表現が、可能

fuzzy predicates
tall, small, kind, much larger, . . .
fuzzy truth values
true, quite true, not very true, mostly true, . . .
fuzzy quantifiers
most, few, almost, usually, . . .
fuzzy probabilities
likely, very likely, highly unlikely, . . .
fuzzy possibilities
quite possible, almost impossible, . . .
hedges (predicate modifiers)
very, quite, more or less, extremely, . . .

図5 Principal Capabilities of Fuzzy Logic

となります。古典論理システムの中には無かったこういった概念あるいは表現技法がファジィ論理の中に組み込まれているわけで、ファジィ論理に基づくことによって、問題解決の際に、我々の知識があまり正確でなかったり、不確実な場合にも対応できることになります。

先ほども申し上げましたように、古典論理は記号に基づいて構成された、記号処理(symbolic computation)的なものであります。人工知能(AI)は、ここにも示しますように(図6)、ほとんどがこの記号処理の中に入ってくるわけです。すなわち、記号あるいは象徴に基づいて処理を行っているわけです。AIにはいろいろな目的があったわけですが、それらをほとんど達成することができませんでした。これは、やはり処理を記号に限定したためではないのかと思われます。

図6 Artificial Intelligence, Neural Network, and Fuzzy Logic

一方、ニューラルネット(NN)の方では、ほとんど数値計算的(numerical computation)であり、記号、象徴を操作したりはしないわけです。ところでファジィ論理(FL)はどうなっているのかというと、この双方のちょうど中間ぐらいにあり、一部は記号処理的であって、一部では数値演算を取り扱うというわけです。ですから、ファジィ論理とニューラルネットとが丁度図のように交錯

していて、この交錯した所から今後いろいろなものが期待できるのではないかとと思われるわけです。

ファジィ論理の応用

このファジィ論理の応用ですが、これを分類すると大きく二つのレベルのものに分けられるのではないかと思います。まず第一のレベルのものは、ファジィ論理による制御です。実用化されたもののかなりのものがこちらに入るのではないかと思います。その実用化例としては、例えば先ほどの仙台の地下鉄、セメント炉、エレベータ制御、菅野先生の車、廣田先生のロボット、山川先生の倒立振子、それから原子炉、自動車の変速機、ブルドーザの制御、エタノール生成などがあります(図7)。そして、ここで注目すべきことは、こういったファジィ論理による制御の場合は、すべて熟練した人間のオペレータに代わってファジィルールベースシステム(fuzzy rule-based system)が導入されているという点であります。

level one – fuzzy logic control

replacement of a skilled human operator by a fuzzy rule-based system

Sendai subway (Hitachi)
cement kiln (F.L.Smith)
elevator control (Fujitec, Hitachi, Toshiba)
Sugeno's car
Hirota's robot
Yamakawa's inverted pendulum
nuclear reactor (Hitachi, Bernard)
automobile transmission (Nissan, Subaru)
bulldozer control (Terano)
ethanol production (Filev)

図7 Applications of Fuzzy Logic – Level One

それから第二のレベルですが、ここに示しますように(図8)、こちらでは人間の専門家に代ってファジィ論理に基づく意思決定システムが導入されているところに特色があります。これは高次の応用ということが出来ます。つまり、先ほどのものはオペレータに代わってということでありまし

たが、今度は専門家に代わってということになっているわけで、この点がかなり違っております。この二つのレベルの境界線は、かなりファジィで曖昧なわけですが、主だったところは両者でかなり違っているといえます。図にも示しますように、第二のレベルには、例えば、医療診断システム、あるいは山一、日立の証券投資、信用保証、損傷評価、故障診断、さらに生産計画などがあります。

level two — fuzzy logic based decision analysis

replacement of a human expert by a
fuzzy logic based decision-making system

medical ((CADIAG, Adlassning), Arita, OMRON)

securities (Yamaichi, Hitachi)

credit-worthiness (Zimmermann)

damage assessment (Yao, Hadipriono)

fault diagnosis (Guangzhou)

production planning (Turksen)

shells, languages and programming environments

FLOU (Osaka Univ., Tanaka, Mizumoto, Umano)

L-FUZZY (Le Faivre)

REVEAL (Jones)

FLOPS (Siler/Tucker/Buckley)

FPS (Umano)

FRIL (Baldwin)

F-Prolog (Mukaidono, Shen, Dubois/Prade, Hinde)

TELUS

MILORD (de Mantaras)

NFS (ETL)

FUZZY C-COMPILER (Togai)

FUZZY RULE/EDITOR (Hitachi)

RULE GENERATION (OMRON)

図8 Applications of Fuzzy Logic — Level Two

それに加えてシェル、言語、プログラミング環境というものもあります。その例としては大阪大学の初期のシステムであるフルー(FLOU)、それからLISPを使用したL-ファジィ、そしてリヴィール(REVEAL)、フロップス(FLOPS)、ファジィ・プロダクション・システム(FPS)、フリル(FRIL)、それにF-プロログといったものがあります。そ

れから、システム設計を容易にするための環境に関わってくるものがあり、例えばファジィ-C-コンパイラ、ファジィルールエディタ、ルールジェネレーションといったようなものであります。これらも完全なリストではありませんが、専門家あるいは設計者にとって替わるといったことが強調されています。

ファジィ論理の進展を見てきたわけですが、これもまだどんどん変化しております。現在、ほとんどの応用は分類型(categorical)の論理の上で考えられています。これは限量子(quantifier)や確率の限定子(probability-qualifier)を含まない論理で、例えば「圧力が低い。」といったように、分類可能な知識表現を可能とするものです。一方、確率型の(確率に基づく)論理は、限量子や確率の限定子を含んでおり、例えば、「ほとんどのスウェーデン人は金髪である。」とか、「圧力が低いということが起こり得る。」といった表現を可能とするものです。

ファジィ論理と確率

つぎにこの“傾向的(dispositional)”な表現について考えてみましょう。これは“通常性(usuality)”として捉えられれるものです。例えば、「通常は、パークレーからスタンフォードまで余り交通量が多くなければ車で一時間で行ける。」という表現があります。この「通常は」(usually)というのは、分類型(categorical)の表現ですが、「いつでも」とは違い、例外を含みますので、傾向的なものとして捉えた表現ということが出来ます。このように、命題に限定子をつけることが出来るということは、日常的な推論において非常に大切な事であり、こういった表現がエキスパートシステムなどにおいて今後ますます注目されるてくるのではないかと思います。

ファジィ論理には、このように確率論が入ってくるわけですが、確率論はファジィ論理の外にあるということではなく、その中に含まれているということです。ところが一部の人は、「ファジィ論理=確率論」だというようなことを言っており、

私はそれは違うのではないかと思います。この二つの違いを対比させて説明したいと思います。

確率は、確信の持てない、何か事件を予想したりする場合に使うわけです。例えば、「サンフランシスコで今後5年間に大地震が発生する確率は？」というような表現が典型的な例として挙げられます。ところがファジィの方はこういった場合に使われるかと申しますと、例えば、「今見た映画の評価(rating)を0から1までの尺度(scale)で行なえ。」といった形で使われます。これは確率ではないと考えられます。この映画を見たということに対して自分を表現する、それを尺度化して表現するということになるわけです。また、「メアリーが魅力的な女性と考えられるか否か0から1までで評価せよ。」といったような例も考えられますが、この尺度化する、すなわちグレード化することとは、難しくはないと考えられます。むしろ一般には、確率を測定する方が難しいと思います。それから、例えば「0から1までの尺度でこの車がどの程度信頼できるか？」といった評価も考えられます。これに対して、同じ車の例を用いて、例えば、「どのくらいの確率でこの車が盗まれるか？」といった、確率による評価を考えますとその測定は極めて難しくなり、答はなかなか見つかりません。しかし、車の盗まれる確率は保険会社に尋ねれば分かるのではないと言われるかもしれません。保険会社としては今までに累積された統計情報を持っているだけであり、この車というふうに、一つの車を特定された場合に、その車自体に関する情報は持っておりません。したがって、保険会社からそういった確率に関する情報は得ることはできないということになります。また車を持っている本人にとっても自分でこの確率を測定するといったことはできません。このように、注目すべき点といたしましては、確率を用いて現実の世界をとらえた場合、その値を測定する方法がないということです。そこで、一つ出てくる概念が主観確率(subjective probability)です。この主観的というのは人間の感情に基づいており、感覚的にどのように感じるかあるいは考えられる

かということに行き着きます。ところがこの際に問題になるのは、どうしてそのような感覚を得たのかということです。つまり、主観的であろうとなかろうと車が盗まれる確率というのは何れにしても出せないということになってしまいます。このように、確率の場合には、その測定が非常に難しいこと、答えがなかなか出てこないこと、それに加えてその測定をする方法がないことが大きな問題となります。

先ほどのトライバス教授の例ですが、ベイズ論理を用いて仙台地下鉄のようなものが作れると言われたわけですが、ここで用いられるのは確率論で、先ほども述べましたように、これにはかなりの欠点があります。繰り返しになりますが、まず現実の世界には定量化できないものが沢山あります。確率論は、あくまでも数字を用いて定量化しようとしているわけで、現実の世界に当てはめることが出来なくなってしまいます。例えば、先ほども述べましたように、車が盗まれる確率というのは数字で表わすことができません。つまり、数字というものは余りにも正確すぎるが故にそれを用いて表わすことができないことになってしまうのです。ところがファジィの方はどうかと言いますと、これくらいの可能性があるとか、あまり可能性がないとか、それは半々だとか、そういった表現になってくるわけで、これらをファジィな数で表わして、実際の数では表わさない、つまり実数では表わさないということになります。そのため、明確な表現を用いるとかなり限定されてしまうような場合、例えば「箱の中に幾つもの大きな玉が入っている。」といった、確率論では表現できないものも表現可能となります。また、「数年以内に、心臓疾患の発病率が急激に減少することは起こりそうにもない。」といったようなことの意味を表そうと思ったときにも、確率論に基づいて表わすということは大変困難であると思われます。

我々が現実の世界で用いる知識の大半はファジィなものです。いろいろなものが具体的、正確、クリスパ(crisp)であると言われたりするわけですが、それらをもっとよく見てみると、陽には表

現されていませんが(implicit に)、意味の“弾性(弾力性 elasticity)”が付与されているのが分かります。ここにも示しますように(図9)、例えば「ホテルのチェックアウト時刻が11時である。」とか、「制限速度が40 km/hである。」とか、あるいは「失業率が12.4%である。」といった場合、一見これは厳密な数字のようにとらえられがちですが、そうではないこと、すなわち、クリस्पな数字ではないことが分かります。つまり12.4%と言ったからといって、この失業率が12.4%ぴったりのというわけではないことは明らかです。表面的には正確、精密にとらえられるものの多くが、実はそうではないということが分かります。また、陽に(explicit に)表現された(意味の)弾性に関わるものとしては、図にもありますように、例えば「メアリーは大変若い。」であるとか、「背の高い女性はほとんどの場合あまり太っていない。」、あるいは「数分で戻って来ます。」といったような、ファジィな表現があります。また、不明確(vague)な表現としては、例えば「いつか帰ってきます。」だとか、「彼は金持ちかもしれないし、そうでないかもしれません。」といったものが考えられます。非常に多義的(ambiguous)であって、そして不明確であるというわけですが、「ファジィ=不明確」と「ファジィ=多義的」というようなとらえ方はできなくて、こういう沢山のファジィ性がある、

crisp statements with implicit elasticity

check-out time is 11 a.m.
speed limit is 25 mph (40 km/h)
unemployment rate is 12.4 percent

fuzzy statements with explicit elasticity

Marie is **quite** young
most tall women are not **very** fat
I will be back in a **few** minutes

vague statements

I will be back sometime
He may or may not be very rich

図9 Elasticity (Fuzziness) of Meaning

全体としてあいまいさを構成しているのだと考えられます。

ファジィ論理における3つの基本概念

つぎの図(図10)に示しますように、ファジィ論理の応用は次の三つの基本的な概念の上に成り立っています。まず第一のものは“言語変数(linguistic variable)”です。その値は自然言語あるいは人工言語(synthetic language)の言葉あるいは文章です。例えば、「若い」、「非常に若い」とか、「あまり若くない」、あるいは「年をとっている」といったようなものが考えられます。第二の概念は、“標準形表現(canonical form)”です。これは、命題を変数上の“弾性的(elastic)な制約”として表すものです。例えば、命題 p は、「 X は R である」に変形できる($p \rightarrow X \text{ is } R$)、といった場合の X が変数であり、 R が(その上の)制約となるわけです。そして第三の概念として、“内挿推論(interpolative reasoning)”があります。これはファジィな関係(fuzzy relation)の内挿に基づく推論で

linguistic variable

the values of a linguistic variable are words or sentences in a natural or synthetic language

young, very young, not very young, old, ...

canonical form

express a proposition as an elastic (fuzzy) constraint on a variable

$p \rightarrow X \text{ is } R$

interpolative reasoning

interpolation of a fuzzy relation which is partially defined by a collection of fuzzy if-then rules

図10 Three Key Concepts Which Underlie Most of the Applications of Fuzzy Logic

あり、このファジィ関係はファジィ if-then ルールの集まりとして部分毎に定義される (partially defined) ものです。これら言語変数、標準形および内挿推論の三つが、ファジィ論理が今まで成功してきたことの背後にあるわけですが、とりわけ注目していただきたいのは、この内挿を行うことによって、部分的な情報でも十分に推論ができるという考え方です。近年注目されているニューラルネットの場合も同様の考え方があり、例えばバックプロパゲーションは、基本的には内挿のアルゴリズムの一つとして考えることができます。すなわち、これは、一部の情報があれば、後は内挿すればよいという考え方に基づくものです。両者の間にはこのような特徴が共有されており、ニューラルネットおよびファジィ論理はこの内挿というメカニズムを組み込んでいると考えることができます。

言語変数

この図(図 11)にも書いてありますように、言語変数は人間の間のコミュニケーションにおいて極

linguistic variables play a key role in human communication

motivation

1. non-quantifiable

taste: sweet, sour, tangy, ...

appearance: beautiful, pretty, handsome, ...

pain: slight, strong, mild, ...

2. quantifiable but not known precisely

age: young, old, middle-aged, ...

3. principle of minimum specificity

precision carries a cost

hold the precision (specificity) to a minimum

precision carries a cost

hold the precision (specificity) to a minimum

Mary is young rather than Mary is 25 years and 5 months and 3 days old

図 11 Role of Linguistic Variables in Human Communication

めて重要な役割を果たしているといえます。それはなぜかと言いますと、まず第一には、我々が用いる変数は、多くの場合、数量化(定量化)できない、あるいは測定できないと考えられるからです。例えば「味」に関して言えば、「甘い」、「すっぱい」、「びりびりする」といったものがありますし、「外見」について申しますと、「美しい」、「かわいい」、「ハンサム」などがあります。また、「苦痛」の場合には、「僅か」、「強い」、「穏やか」などという表現が用いられます。したがって、この言語変数は測定する(数量化する)ためのメカニズムがないということが言えます。

第二の理由としては、たとえ数量化できるとしても、その値が正確には分からない変数があるということです。例えば、「年齢」について考えますと、「若い」、「年がいつている」、「中年である」という表現があるわけですが、例えば「メアリーはいくつですか?」といった質問に、「メアリーは若い。」というような答え方が用いられます。これは彼女の正確な年齢を知らない場合に用いられるわけで、24 歳かも知れないし、25 歳かも知れないというようなニュアンスが組み込まれていると考えられます。

それから第三の理由は、これが応用上おそらく最も重要と思われるものですが、「最小精密度の原則 (principle of minimum specificity)」と呼ばれるものです。これは、(情報を伝える際には)できるだけ情報の精密度 (specificity) を抑えるべきであるという考え方です。例えば、先ほどの質問に、(たとえメアリーの正確な年齢を知っていても)、「メアリーは 24 歳 5 ヶ月と 3 日です。」という答え方をしないで「メアリーは若い。」という答え方をする背後にある(語用論上の)原則です。確かに、「24 歳 5 ヶ月 3 日」という答え方は非常に具体的かつ正確ではありますが、こういった情報が必要ではない場合に、我々は無意識のうちにいつもこのような原則に従っていると考えられます。すなわち、情報の精密度が過度に要求されない場合には、この最小精密度の原則が用いられるわけです。

それからこの精密度には、ここにも示しますように(図 12)、半値幅(bandwidth)というものを考えることができます。例えば、言語変数を使う場合には、この言語値にはある程度の広がり(spread)があります。この広がり―半値幅―が精密度に関わってくるわけです。言語変数を使う場合には、先ほども申しましたように、その値(言語値)はできる限り精密化されていないものを用いるべきです。その数(言語値の数)も、3つからせいぜい7つ位いまでにとどめておくべきです。これらによって、なるべく精密化を避けた情報の取り扱いが可能となります。

the meaning of a linguistic value, V , is defined by its possibility distribution

$$\pi_v(u) = \text{Poss} \{X=u \mid X \text{ is } V\}$$

$\text{Poss}\{\text{Jhon is } 45 \mid \text{John is middle-aged}\} = 0.8$

bandwidth is inversely related to specificity

図 12 Bandwidth of a Linguistic Variable

それから言語値が正の値に限られる場合には、この図(図 13)の例で示しますように、その値としては3つくらいで良いわけで、メンバーシップ(membership)関数の形としては、三角型の関数がよく用いられます。ファジィ推論チップは、種々の応用に対してこのようなメンバーシップ関数で十分に対応できるという考えの下で作られています。

これは(図省略)、富士重工業(株)の乗用車スバルに関する資料から借用したのですが、ファジィ論理を用いた変速機(トランスミッション)が示

図 13 Linguistic Variables Representing Speed of a Car

されています。この場合もやはりメンバーシップ関数としては、「小(SL)」、「中(MD)」、「大(BG)」と三種のものが用いられています。これはファジィ論理に基づく制御が実用化されている一つの例であり、また言語変数ならびに標準形の例を示すものです。

内挿推論

時間の都合で、標準形についての説明は省略させていただきます。内挿推論について少し説明しておきたいと思います。内挿推論は類推(analogy)よりも一般的に用いられていると思います。類推の方は人工知能(AI)の領域でよく用いられています。これは、この図(図 14)にも示しますように、例えば、「 a という値に対する関数値 $f(a)$ が分かっている場合に、 b に対する値 $f(b)$ はどれ位になるか?」といったときに、値 $f(a)$ から大体類推して $f(b)$ の値を求めるものです。一方、内挿推論の方はもっと一般的なものであると考えられます。図にも示しますように、例えば、「関数 f の曲線があつて、 a と c におけるその値 $f(a)$ と $f(c)$ が分かっているときに、 b における値 $f(b)$ はどれ位になるか?」といった場合に、 $f(b)$ は $f(a)$ と $f(c)$ の大体間にくるものとして求めるのが内挿推論です。ファジィ論理において内挿推論を適用する際には、この図(図 15)に示しますように、例えばファジィな曲線(fuzzy relation)があり、この曲線自体はまたファジィな点(fuzzy point)で成り立つ

図 14 Analogy and Interpolative Reasoning

ているという設定で考えることになります。それぞれの点が if-then ルールに対応しておりまして、これらファジィな点が集まって一つの入出力関係であるファジィ曲線ができております。これにファジィな入力を与えると、対応してファジィな出力が得られるという形でファジィ推論チップあるいはファジィ制御システムが構成されることになります。この際に、ファジィな出力を直接もってくると、コンピュータはファジィな命令を実行することはできませんので、非ファジィ化素子が導入されることになるわけです。このようなものが大半のファジィチップの中に組み込まれている構成要素となっています。

より一般的な場合について考えてみますと、いろいろな決定には、つぎの図(図 16)に示すような表、いわゆる決定表(デシジョンテーブル decision table)が用いられます。この場合の言語変数としては、 $X_1, X_2, \dots, X_n$ といったものが対応し、出力としては、ここでは Y が一つという形に

図 15 Fuzzy Relation and Interpolative Reasoning

input variable				output variable
X_1	X_2	$\dots$	X_n	Y
A_{11}	A_{12}	$\dots$	A_{1n}	B_1
A_{21}	A_{22}	$\dots$	A_{2n}	B_2
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
A_{m1}	A_{m2}	$\dots$	A_{mn}	B_m

$X_1, X_2, \dots, X_n, Y$: linguistic variables

A_{ij} : linguistic variables : small
large
:

interpolation

Y is ? B if $X_1 = A_1, X_2 = A_2, \dots, X_n = A_n$

where $A_i \neq A_{ki}$ for some k .

decision table

図 16 Decision Table and Interpolative Reasoning

なっていますが、一般には複数の場合も考えることができます。この決定表で入力値がどの列とも対応しない場合に、内挿推論を実行することになります。実際に、ファジィ推論チップはこのような操作を行っています。時間の関係で詳細な説明はできませんが、処理の概要はこのようなものです。

以上述べましたように、内挿推論は非常に簡単な考え方であり、これが実際に有効に使えることが明らかになったわけです。多くの場合、変数間の関係が正確に分かっていない、あるいは、仮に分かっていてもそれを正確に扱うことができないようなことがあります。例えば、自動車の自動変速機(オートマチックトランスミッション)の場合も、変数間の関係は正確には分かりませんが、先にも申しましたように、ファジィ論理を適用することが可能です。ですから、言語変数を用いて最小限の精密さで十分に表現できる、あるいは精密さが最小限であっても変数として十分に活用できるといった問題の捉え方が、ファジィ論理の応用においては最も重要な考え方になると思います。

今後の展望

そろそろ終わりの時間になりましたので、これ以上お話を進めることはできませんが、ファジィ論理が今後どのようなようになっていくのかという展望について少しだけお話しておこうと思います。先ほども申しましたように、ファジィ論理の応用分

野は、分類型(categorical)の論理から、次第に傾向的(dispositional)な論理によって記述される対象へと移行していくものと考えられます。そして内挿に関する考え方が、今後どのように傾向型の論理とつながってくるのかということが重要なテーマになると思われます。我々の日常行っている推論を考えてみますと、大半が傾向的なものとなっております。したがって、鍵となるのは、推論において、傾向的に表現されたものをどのように内挿してゆくのかということだと思ふのです。人工知能(AI)のもつ問題の一つには、この内挿という考え方がその中に入っておらないことから、しばしば問題が解決できないというところにあると思います。古典論理におきまして、その対象となっているのは記号であり、内挿のメカニズムが組み込まれていないために、多くの問題において解答を導き出すことができないことになります。したがって、内挿の概念がこれからの鍵となってくると思ふのです。内挿の仕組みに関しては、まだ研究が初期の段階で、それほど進んでいないため、今後やらなければならない課題が多く残されております。しかし、ファジィ論理の応用が今後さらに高度になって行くにしたがって、内挿というものが人間の推論における鍵となるものとして、様々なことが解明されてくるのではないかと思っております。

本日は長時間にわたりご静聴有難うございました。

著者紹介

Lotfi A. Zadeh (ロトフィ A. ザデー)

カリフォルニア大学バークレー校電気工学・計算機科学科教授

1921年2月4日生まれ。42年テヘラン大学卒業(電子工学)。46年マサチューセッツ工科大学修士課程、49年コロンビア大学博士課程修了。53～57年コロンビア大学準教授。57～59年同教授(電子工学)。59年よりカリフォルニア大学バークレー校教授(電子工学)、現在に至る。その間、マサチューセッツ工科大学、IBM San Jose 研究所、SRI International 等に出向。IEEE および AAAS フェロー。National Academy of Engineering 会員。Paul-Sabatier 大学(フランス)およびニューヨーク大学 Binghamton 校 名誉博士。IEEE より education medal(73年)および centennial medal(84年)受賞。89年本田財団より本田賞受賞。