# 矛盾を許容する知識管理データベース

## Paraconsistent Knowledge Management Database

中 山　陽 太 郎

**要　約**　データベースは情報を蓄積する知識ベースであり，エージェントの頭脳となるものである．矛盾の許容とは，不確実な情報やあいまいな情報に対して情報の適切さを認識し，内省的認識の上に成り立つ論理の解釈である．従来のデータベースは，厳密な整合性に基づきデータを管理するが，現実世界の不整合な情報への耐性を備えていない．矛盾を許容する知識管理データベースは，増加する新たな情報によって既存の知識やルールを更新し，また不確定な情報や矛盾する情報に対し，適切さの可能性を認識して管理する．この実現に向け，粒状推論により拡張した認識状況計算を抽象化と具象化の思考プロセスに適用した．

**Abstract**　A database is a knowledge base for storing information and is the brain of an agent. Inconsistency tolerance is an interpretation of logic based on the recognition of the appropriateness of information for uncertain or ambiguous information, and on introspection. Traditional databases manage data based on strict consistency, but are not provided to tolerate real-world inconsistent information. A knowledge database that allows for inconsistency updates existing knowledge and rules with increasing amounts of new information and also recognize and manage the possibility of appropriateness for uncertain or contradictory information. To realize this, we applied the epistemic situation calculus extended by granular reasoning to the process of thinking for abstraction and embodiment.

## 1. は じ め に

近年の深層学習の急速な発展を契機として，人工知能（以降，AI）へのアプローチに機械学習を用いることが主流となっている．しかし，それは現状では限定された用途において有効であるものの，情報に対する自律的な認識を備えて不確実な現実世界に対応することはできない．AI と計算機との関係は深く，「計算可能数について―決定問題への応用」（1936 年）[1]において示されたプログラムの実行とは計算機による定理の証明の過程に他ならず，まさに推論の自動化を目指したものであった．

AI 研究におけるデータベースは，推論エンジンを備えた知識と命題の集合（以降，知識ベース）であり，データベース管理システムの一般化と考えられてきた．知識ベースは，知識表現としてのデータ定義やデータ構造に対する問合せによる演繹を実行し，答えを導出する知的な推論システムである．初期の AI 研究においては，知識表現と推論を実現するデータベースとして，論理データベース，または演繹データベースの研究が進められた[2]．論理データベースは，RDB（Relational Database）を一般化したモデルである．データベースに格納される情報は基本的に真理の確定した情報であり，確定していない不整合な情報や矛盾する情報は扱うことができない．しかし，知識ベースがより高度な認知能力を備えた人の知能のような働きをするためには，情報に対する背景知識に基づき，不確定さや，あいまいさ，さらに矛盾した状態

にあるのかなど，情報に対する正しさの様相を認識しなければならない．

本稿では，自律的に活動する主体をエージェントと定義し[*1]，エージェントの行動計画の記述に認識状況計算とよばれる理論を用い，これに抽象化と具象化の思考の定式化を提案する．これらは，人工知能の研究や人間の認識や志向性と自律性などの研究の中から発展してきたものであり，このような理論をこれまでの論理データベースの基礎として適用することにより，新たな知識ベースを創り出すことが期待される．2章で認識世界と思考プロセスについて述べ，3章で準備として関連する基礎理論，および認識状況計算の概要を説明する．4章で粒状推論と思考プロセスについて説明し，5章で認識アクションの役割について簡単に述べる．

## 2. 認識世界と思考プロセス

### 2. 1　フレーム問題と知識表現

人間の意識の中に存在する仮想化された世界を，認識世界と呼ぶ．認識世界は，不完全で矛盾する情報を許容できる．理想的な知的推論システムにおいては，データが矛盾する場合でも不合理な判断を引き起こさず，エージェント自身の置かれた状況を自律的に判断し，自動化と異なる主体的な判断と動作を遂行できることが求められる．しかし，最適な判断を行うために，現実世界の情報をすべて収集，認識して利用することは物理的に困難であり，部分的な情報から現実の状況に応じて適切な判断を行う仕組みが望まれる．このような現実世界における無限の情報に対する認識の限界は，AI 研究の初期の時代に「フレーム問題」として McCarthy と Hayes（1969）[3][*2] により提起された．その後，Dennett（1984）[4]によって，認識論の観点から新たなフレーム問題として再定義され，現在も未解決とされる．

フレーム問題が想定される状況において，人間は合理的に行動することができる．これは，現実世界のビッグデータに対するエージェントの認識処理においても，不整合や矛盾によりシステムが破綻することなく，健全な推論や意思決定が実現できることを示唆している．エージェントの知的推論の実現に向け，フレーム問題への対応は重要であり，情報の部分性に対応する理論の確立が求められる．

### 2. 2　ズーム推論による抽象化と具象化の思考プロセス

思考のプロセスごとの認識対象に対する焦点を志向性として捉え，焦点の当て方を動的に変更する認識的な行為を，ズーム・アクションと呼ぶ．エージェントは，ズーム・アクションによる対象の詳細な認識と，俯瞰による全体的な認識をもつことができる．対象に対する焦点の変化による認識状態を定式化するため，粒状計算の枠組みを用いる[5]．粒状計算とは，情報を背景知識により分類し，認識に応じた多様な粒度に分割する仕組みである．Murai ら（2003, 2018）[6, 7, 8]は，粒状化された可能世界を用いて，ズーム推論（zooming reasoning）と呼ぶ推論の枠組みを提案している．ズーム推論は粒状化可能世界による命題の解釈を推論に適用し，思考の対象に対する焦点の調整を遠近のズーミングとして捉えたものである．抽象化と具象化は，エージェントの認識対象に対して，思考の焦点の合わせ方によって，認識の変化を与えることができる（図 1）．

これらに関連する理論の構成は，エージェントの認識プロセスのため，認識状況計算に粒状推論を適用した粒状推論フレームワークを想定する．基礎となる理論は，ラフ集合理論と非古典論理と呼ばれる様相論理，多値論理である．ラフ集合は様相論理と密接であり，また多値論

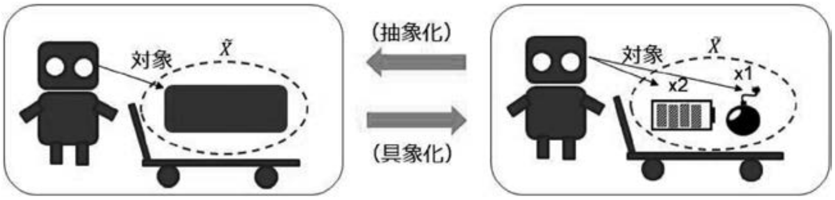


図１　ズーム・アクションのイメージ

理の意味解釈としてラフ集合理論を仮定する．様相論理のラフ集合による拡張である粒状推論を用い，思考プロセスにおける認識状態の焦点の更新の定式化を行う．これらの基礎理論の適用として認識状況計算を用いる．状況計算の行為を認識的行為に拡張することでエージェントの認識状態を記述できる．さらに認識状況計算において，認識の焦点対象の動的変化を捉えるズーム推論を組み込むことで，エージェントの認識状態の変化を定式化する．図２に本稿で関連する理論の構成イメージを示す．

次章以降では関連する理論を簡単に紹介したのち，認識状況計算の枠組みにおける認識的行為としてズーム推論が適用できることを示す．

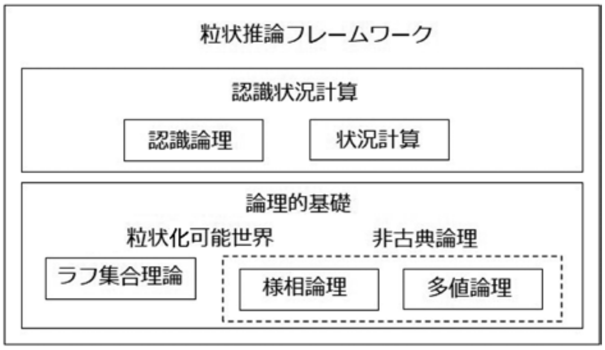


図２　関連理論の構成イメージ

## 3.　関連理論

ズーム推論の論理体系は，認識状況計算における可能世界に粒状推論を適用したものになる．粒状推論はラフ集合理論を基底とする粒状計算に基づいており，その論理体系は様相論理や多値論理として解釈できる．本章では，ラフ集合理論と関連する様相論理，多値論理，およびラフ集合と様相論理との関係について説明する．

### 3.1　ラフ集合理論

ラフ集合理論は，知識とは分類であるという根本的な思想に基づき，不確実な領域を対象とする研究手法として80年代初期に登場した．ラフ集合理論は，Z. Pawlakにより1982年に提唱され，近似概念に基づく集合の理論的基礎を提供する．ラフ集合では，同値関係による集合を知識と考え，与えられた集合をこの知識で表現するために上近似と下近似という二つの近似空間を提案した[9]．情報のあいまいさや不整合，情報の欠落を含むデータ処理に適合し，近年さまざまなデータ分析等に応用されている．

一般的なラフ集合理論の意味的な枠組みは，次の知識ベースの概念で示される．

定義 1.　知識ベースはタプル $S=(U,\mathbf{R})$ で表わされる．

- $U$ は対象から成る全体集合.
- $\mathbf{R}$ は U における対象の同値関係の集合.

部分集合 $X \subseteq U$ に対して同値関係 $R$ が生成する同値類により，2 種類の近似部分集合を次のように定義する：

定義 2.

$R \in \mathbf{R}$ を知識ベース $S=(U,\mathbf{R})$ の同値関係，および $X$ を $U$ の任意の部分集合とする．$R$ に対する $X$ の下近似，および上近似は次のように定義される：

$$\underline{R}X =_{\mathrm{def}} \cup\left\{Y \in U/R \,\middle|\, Y \subseteq X\right\} = \left\{x \in U \,\middle|\, [x]_{\mathrm{R}} \subseteq X\right\},$$

$$\bar{R}X =_{\mathrm{def}} \cup\left\{Y \in U/R \,\middle|\, Y \cap X \neq \varnothing\right\} = \left\{x \in U \,\middle|\, [x]_{\mathrm{R}} \cap X \neq \varnothing\right\}.$$

直観的に，$\underline{R}X$ は，知識 $R$ における $X$ の要素として確実に分類できる $U$ の要素の集合である．一方，$\bar{R}X$ は，$X$ の要素として分類できる可能性がある $U$ の要素の集合である．

次に，ラフ集合による 3 種類の集合を定義する．$S=(U,\mathbf{R})$，および $X \subseteq U$ のとき，$R$ に関する $X$ の領域はそれぞれ，$R$- 正領域（$R$-positive region），$R$- 負領域（$R$-negative region），$R$- 境界領域（$R$-boundary）であり以下のように定義する．

$$POS_R(X) = \underline{R}X,$$

$$NEG_R(X) = U - \bar{R}X,$$

$$BN_R(X) = \bar{R}X - \underline{R}X.$$

ラフ集合の正領域と負領域が論理式の真理値に対応すると解釈する場合，境界領域は，真か偽が決定できない曖昧さ（ambiguity）に対応する（図 3）．

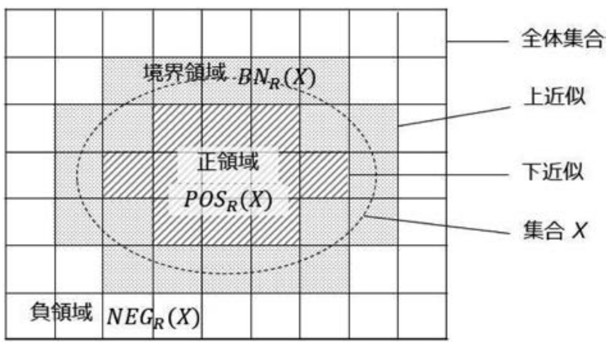


**図 3　ラフ集合：下近似と上近似**

ラフ集合理論は，ファジィ・ラフ集合や可変精度ラフ集合（Variable Precision RoughSet：VPRS）などの拡張がある．例えば VPRS では，$\beta$ 包含関係を用いて $\beta$ 下近似と $\beta$ 上近似を定義する．また VPRS は実データに即して未定義や矛盾の程度を扱えるため，実世界のデータが含む異常値などへの耐性を備えるとともに，より細かい粒状化の分析ができる．

### 3. 2　様相論理

本節では，認識状況計算の概略を説明する．またその基礎となる非古典論理を簡単に紹介する．様相論理や多値論理は非古典論理と呼ばれ，古典 2 値論理とは異なる論理体系であり，いずれもズーム推論の基礎となるラフ集合理論と深く関連している．様相論理とは，古典論理に様相記号を追加した体系であり，多値論理は，古典論理の規則を制限し真理値を 3 値以上としたものである．

様相理論は，内包概念を表現するために古典論理を拡張した論理体系である[10]．内包概念では，真と偽の概念をより分析するため，一般的に□（必然性）と◇（可能性）の様相記号が用いられ，$\Box\alpha \leftrightarrow \neg\Diamond\neg\alpha$ という関係がある．また，様相論理の意味論は，S. Kripke（1959）により提案されたことから Kripke モデルと呼ばれる．Kripke モデルは，タプル $M = \left\langle W, R, V \right\rangle$ で定義される．ここで，$W$ は可能世界の集合，$R$ は $W \times W$ 上の到達可能関係，$V$ は評価関数 $W \times PV \to \left\{0, 1\right\}$（$PV$ は命題変数）である．以下に推論規則と公理を示す．

推論規則：RN：$\dfrac{\alpha}{\Box\alpha}$（必然化規則）

公理：（カッコ内は到達可能関係）

K：$\Box(\alpha \to \beta) \to (\Box\alpha \to \Box\beta)$（無条件）

T：$\Box\alpha \to \alpha$　信念の公理（反射的）

B：$\alpha \to \Box\Diamond\alpha$　Brouwer の公理（対称的）

D：$\Box\alpha \to \Diamond\alpha$　無矛盾性の公理（連鎖的）

4：$\Box\alpha \to \Box\Box\alpha$　正の内省公理（推移的）

5：$\neg\Box\alpha \to \Box\neg\Box\alpha$.　負の内省公理（Euclid 的）

これらの公理を組み合わせて正規体系を構成し公理体系を定義する．代表的な体系として，KT4（S4）や KT5（S5），また偽を信じることを認める自己認識論理 K45（弱い S5）や信念に矛盾を認めない信念の体系 KD45 などがある．

Kripke による様相論理はエージェントの認識状態と解釈され，そのような論理体系を認識論理と呼ぶ．認識論理では，一般的に□を「知っている」，◇を「信じている」と解釈する．認識論理は人工知能分野でも研究が進んでおり多様な体系が提案されている．

### 3. 3　多値論理

多値論理は，古典論理の 2 値に対して 3 値以上の真理値をもつ論理体系であり，真偽以外の可能性などの意味を表現する．基本的な多値論理としては，3 値論理や 4 値論理がある[11]．

3 値論理の代表的なものは，Kleene による $K_3$ がある．$K_3$ では真でも偽でもない真理値「N」により未定義を意味する．$K_3$ の真理値表（表 1）を示す．

**表 1　$K_3$ の真理値表**

| ~ | T | F | N |
|---|---|---|---|
| | F | T | N |

| ∧ | T | F | N |
|---|---|---|---|
| T | T | F | N |
| F | F | F | F |
| N | N | F | N |

| ∨ | T | F | N |
|---|---|---|---|
| T | T | T | T |
| F | T | F | N |
| N | T | N | N |

| → | T | F | N |
|---|---|---|---|
| T | T | F | N |
| F | T | T | T |
| N | T | N | N |

$K_3$ では恒真式が成り立たないため，ヒルベルト体系を定義することができない．そのため自然演繹やシークエント計算などによって公理系を定義する．

4 値論理は不完全情報と矛盾情報を扱う論理であり，計算機やデータベースの論理として適している．Belnap (1977)[12]は，計算機の内部状態を形式化するために4値論理を導入した．データベースへの入力情報（命題として与えられる）を認識するには，4 種類の状態，True（ **T** ），False（ **F** ），None（ **N** ），Both（ **B** ）がある．これらは次の意味がある．

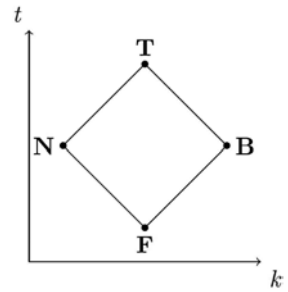


**図 4　近似束 4 と論理束 4**

（ **T** ）：命題は「真」である．　（ **F** ）：命題は「偽」である．

（ **N** ）：命題は「真」でも「偽」でもない．　（ **B** ）：命題は「真」かつ「偽」である．

ただし（ **N** ）は不完全性，（ **B** ）は矛盾を表す．

Belnap は二つの 4 値論理を提案しており，それぞれ A4（近似束），L4（論理束）と呼ばれる（図 4）．L4 は論理記号 ∼，∧，∨．をもち，真理値の集合 $4 = \{T, F, N, B\}$ とする．論理式は，論理束 4 への写像として解釈される．また 4 値論理の真理値表を示す（表 2）．

**表 2　4 値論理の真理値表**

| ∼ | T | F | N | B |
|---|---|---|---|---|
| | F | T | N | B |

| ∧ | T | F | N | B |
|---|---|---|---|---|
| T | T | F | N | B |
| F | F | F | F | F |
| N | N | F | N | F |
| B | B | F | F | B |

| ∨ | T | F | N | B |
|---|---|---|---|---|
| T | T | T | T | T |
| F | T | F | N | B |
| N | T | N | N | T |
| B | T | B | T | B |

4 値論理のように真理値として真かつ偽である解釈を許す論理体系を矛盾許容論理と呼ぶ．また，3 値論理の場合も 3 番目の値を矛盾と解釈するものは矛盾許容論理である．代表的なものとして，G. Priest による矛盾の論理 LP（Logic of Paradox）がある．LP は $K_3$ の N を矛盾と解釈する．$K_3$ では排中律（$\vDash A \vee \neg A$）が成り立たず，LP では矛盾律（$A \wedge \neg A \vDash$）が成り立たないという双対の関係がある．

多値論理の真理値を曖昧さや不確実性に対応したラフ集合によって解釈することは自然であり，Nakayama ら（2018）[13, 14]では，それらの基底となる論理体系と意味的な関係について研究を進めている．

### 3. 4　様相論理とラフ集合

3. 2 節で様相論理について説明したが，本節では様相論理とラフ集合との関係について説明する．様相演算子□と◇はそれぞれ必然性と可能性を表し，それぞれ$\Box p$:「$p$ は必然である」，$\Diamond p$:「$p$ は可能である」と読む．Kripke フレーム $\mathcal{F}$ はタプル $\langle L, R \rangle$ であり，$U$ は非空集合，$R$ は $U$ 上の二項関係である．

$R$ を同値関係とすると Kripke フレーム $\mathcal{F}$ は Pawlak 近似空間に対応し，ラフ集合理論からこれを一般化近似空間と呼び，$U$ の元は可能世界（または単に世界）である．二項関係 $R$ は参照関係または到達可能関係と呼ばれ世界間の見え方を規定する．世界の見え方は関係の数学的性質で規定され，様相論理の公理と密接な関係がある[15]．

世界：$x \in U$ から到達可能な世界の集合を $U^R(x) \equiv \{ y \in U \mid xRy \}$ で定義する．$R$ が同値関係なら，これは $x$ を含む $R$- 同値類である：

$$U^R(x) = [x]_R = \{ y \in U \mid xRy \}.$$

これは，Pawlak 近似空間における下近似と上近似として定義できる．

$$\underline{R}X =_{\mathrm{def}} \cup \{ Y \in U/R \mid Y \subseteq X \} = \{ x \in U \mid [x]_{\mathrm{R}} \subseteq X \},$$

$$\bar{R}X =_{\mathrm{def}} \cup \{ Y \in U/R \mid Y \cap X \neq \varnothing \} = \{ x \in U \mid [x]_{\mathrm{R}} \cap X \neq \varnothing \}.$$

Kripke フレームに真理割当関数 $V$ を追加した構造 $\langle U, R, V \rangle$ を $\mathcal{F}$ 上の Kripke モデル $\mathcal{M}$ と呼ぶ．真理割当関数とは，各原子文の各世界における真偽を与える関数である．すなわち，世界 $x \in U$ において原子文 $p$ に対し，$V(p, x) = 1$ or $0$ であり $p$ は $x$ で真（または偽）と読む．

様相演算子を含む文$\Box p$，$\Diamond p$ は，次のように定義される．

$$V(\Box p, x) = 1 \Leftrightarrow \forall y \in U \left( xRy \Rightarrow V(p, y) = 1 \right),$$

$$V(\Diamond p, x) = 1 \Leftrightarrow \exists y \in U \left( xRy \text{ and } V(p, y) = 1 \right).$$

また，到達可能な世界の集合 $U^R(x)$ と真理集合 $\|p\|^{\mathcal{M}}$ を用いて，様相演算子の定義を以下のように書き換えることができる．

$$V(\Box p, x) = 1 \Leftrightarrow U^R(x) \subseteq \|p\|^{\mathcal{M}},\quad V(\Diamond p, x) = 1 \Leftrightarrow U^R(x) \cap \|p\|^{\mathcal{M}} \neq \varnothing.$$

これより真理値集合の解釈に従ってラフ集合の下近似・上近似はそれぞれ，必然・可能な文の真理集合と解釈できる．

$$\|\Box p\|^{\mathcal{M}} = POS_R\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right),$$

$$\|\neg \Box p\|^{\mathcal{M}} = NEG_R\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right),$$

$$\|\neg \Box p \wedge \Box p\|^{\mathcal{M}} = BN_R\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right).$$

ただし，公理 D が成り立たないことを仮定する．このとき矛盾は次のように表される：

$$\exists p \left( \|p\|^{\mathcal{M}} \subseteq POS_R\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right) \wedge \|\neg p\|^{\mathcal{M}} \subseteq POS_R\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right) \right).$$

これより以下が得られる．

$$\models \Box p \wedge \Box \neg p \Leftrightarrow \models \neg\left(\neg \Box p \vee \Diamond \neg p\right) \Leftrightarrow \models \neg \Diamond p \wedge \Box p.$$

ラフ集合と様相論理の真理値集合の関係を図 5 に示す．

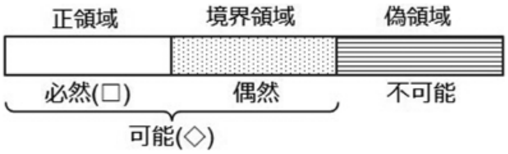


**図 5　ラフ集合と様相演算子の関係**

Pawlak のラフ集合は，様相論理体系 KT45（S5）に対応すると解釈できる．このように，ラフ集合と様相論理，および多値論理は，相互にその解釈や構造において密接な関係があり，多くの研究が行われている．

### 3. 5　認識状況計算

状況計算は，行為とその結果における状態の変化を記述するロボティクスのプランニング言語として 1969 年に McCarthy と Hayes[3] により提案された．認識状況計算は，状況計算を認識論理における様相演算子で拡張した言語であり，状況計算と同じ基本概念に基づく．本節では，状況計算の基本概念[16] を説明し，続いて認識状況計算について説明する．

状況計算は，状況とアクションを示す二つの型（ソート）を持つ第一階述語論理であり，状況 $s$ でアクション $a$ が実行されたとき，その結果生じる後者の状況を関数 $do\left(a, s\right)$ により表現する．状況計算は離散的かつ有限な遷移モデルに基づいており，状況はある時間における世界の状態を示し，アクションの実行により変化する属性は流量（fluent）とよばれ状況の関数として表わされる．流量は，命題型と関数型があるが，ここでは命題流量についてのみ扱う．

状況計算において，記述の対象となる基本要素は以下である．

- 状況（situations）：ある時点における世界の状態
- 流量（fluent）：状態を記述する関数および命題：命題型流量，関数型流量
- アクション（action）：状況において遂行される行動や行為．流量の変化を起こす．

状況計算の理論は基本アクション公理と呼ばれ，アクションの実行に対して，アクション前提条件公理，効果公理，後者状態公理を定義したものである．前提条件公理は，ある状況によりアクションが実行される前提条件を定義し，特別な述語 $Poss\left(a, s\right)$ を用いる．効果公理は，アクションによる流量の変化を，また後者状態公理は，フレーム公理の一般化であり，アクション実行後の不変な流量の状態を定義する．

認識状況計算（Epistemic Situation calculus：ES）は，状況計算を認識論理[17] で拡張した理論であり，Lakemeyer と Levesque（2011）[18] によって提案された．

言語：ES 基本概念は状況計算と同じであり，認識状況計算 ES における $\mathcal{A}$ を空でないアクションの変数，$\mathcal{F}$ を流量，$A$ をアクション定数，述語を $Poss$（possible），及び $SF$（sensed fluent：知覚流量）とする．ES の言語 $\mathcal{L}_{ES}$ を BNF で示す：

$$\varphi ::= p \mid Poss(a) \mid SF(z) \mid a = a \mid \sim \varphi \mid \varphi \wedge \psi \mid \varphi \vee \psi \mid \varphi \rightarrow \psi \mid \mathbf{K}\varphi \mid [a]\varphi \mid \Box\varphi \mid \forall x\varphi$$

ただし $p \in \mathcal{F}$，$a \in \mathcal{A} \cup A$ とする．述語 $Poss$ はアクションの前提条件に対する実行可能性を表し，式 $\Box\, a$ は任意のアクション列の実行を表す．

述語 $SF$ はセンシング・アクションの結果の定義であり，アクションの実行後，エージェントが結果の真理値を知ることを表現し，アクション後の世界における流量の解釈を与える．様相論理と同様に K 演算子は，エージェントの知識を示す．$A^*$ を $A$ からのアクションの連続とし，$a \cdot a^*$ は，$a$ と $a^*$ の結合を示す．$[\cdot]$ はアクションの実行を示し，$[a]$ はアクションの実行後に流量の状態が成り立つことを示す．

意味論：世界 $w \in W$ は基底原子文および一連のアクションから $\{0, 1\}$ への関数，また $Z$ をアクション変数の列とする．一連のアクション $a \in \mathcal{A}$ が実行された後，可能世界 $w$，および認識状態 $e \in w$ において，自由変数を持たない式 $\varphi$ が真であることを次のように表す：

$$e, w, a \vDash \varphi$$

一連のアクションの実行の後，エージェントが認識することの解釈は，一連のアクションに関して，二つの世界の識別不能関係（indistinguishable relation）の関係による．式 $\varphi \in \mathcal{L}_{ES}$ が真であるのは，世界 $w$ においてアクション $a$ の実行結果 $\varphi$ が真であるときであり，以下のように定義される．

$$\langle e, w, a \rangle \vDash \varphi \,\mathrm{iff}\, w(\varphi, a) = 1 \quad \text{ただし } \varphi \text{ は基底原子式.}$$

また式 $\varphi \in \mathcal{L}_{ES}$ が $\psi \vDash_{ES} \varphi$ で示される $\psi \subseteq \mathcal{L}_{ES}$ の式の集合の妥当な ES の帰結であるのは，すべての $e$ と $w$ に対し，すべての $\psi \in \psi$ で $e, w \vDash \psi$ ならば，$e, w \vDash \varphi$ となる場合である[19, 20, 21]．

知識：与えられた可能世界の部分集合 $e$ のすべての要素は真でなくてもよい．またアクションの実行により知識が獲得されるに従って，初期の知識の一部は可能である保証はなくなる．ES で仮定される知識の論理は，KT45 または KD45 とされる．整合性を保証せず矛盾を許容する場合は，論理体系として K45 を仮定する．

基本アクション公理：有限の流量述語 $F$ に対する基本アクション理論は静的，及び動的部分から構成される．動的公理はアクションが実行可能であること（$\sum_{PRE}$），アクション後の流量の値の変化（$\sum_{POST}$），アクション後の知識の更新（$\sum_{SENSE}$）を表す．$\sum_{POST}$ は後者状態公理とも呼ばれ，アクション $a$ の後の状態を定義する．

## 4. 粒状推論と思考プロセスへの適用

本章では，粒状論理をズーム推論に適用するための定式化について説明する．

### 4. 1　粒状化可能世界モデル

様相論理における可能世界を認識における焦点の変化に対応させるため，可能世界の粒度を扱うための拡張を示す．原子命題の集合 $\mathcal{P}$ が与えられたとき，様相論理の言語 $\mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P})$ は，$\mathcal{P}$ から次の論理記号 ⊤，⊥，¬，∧，∨，→，↔ および様相演算子□，◇から次の規則を用いて帰納的に生成される式の最小の集合である：

（1）$p \in \mathcal{P} \Rightarrow \mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P})$，（2）$\top, \bot \in \mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P})$，（3）$p \in \mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P}) \Rightarrow \neg p, \Box p, \Diamond p \in \mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P})$， （4）　$p, q \in \mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P}) \Rightarrow (p \wedge q), (p \vee q), (p \rightarrow q), (p \leftrightarrow q) \in \mathcal{L}_{ML}(\mathcal{P})$.

また Kripke モデル $\mathcal{M} = \langle W, R, v \rangle$ を仮定する．ここで，$w$ は可能世界の空でない集合，$R$ は可能な任意の 2 項関係，付値 $v$ を次のように定義する：

$v: \mathcal{P} \times W \rightarrow \{0, 1\}$，ただし 0 と 1 は偽と真とする．

Kripke モデル $\mathcal{M}$ が与えられるとき，$\mathcal{M}, w \vDash p$ は，モデル $\mathcal{M}$ において命題 $p$ は $w$ で真であることを表し，付値 $v$ とモデル $\mathcal{M}$ の関係は次で表される：

$$\mathcal{M}, w \vDash p \Leftrightarrow v(p, w) = 1.$$

また，様相命題$\Box p$ は，命題 $p$ がすべての $w'$ で真であることを表す．

$\mathcal{M}, w \vDash \Box p \equiv \forall w' v(p, w') = 1$．また，$p$ を真とする可能世界の集合は次で定義される．

$\|p\|^{\mathcal{M}} = \{ w \in W \mid \mathcal{M}, w \vDash p \}$．したがって，次の関係が成り立つ．

$$\mathcal{M}, w \vDash p \Leftrightarrow w \in \|p\|^{\mathcal{M}}.$$

様相論理の真理値集合とラフ集合による近似空間の関係より，同値類による可能世界の集合族を粒状化された一つの可能世界とする．これを粒状化可能世界と呼ぶ．

### 4. 2　ズーム推論の意味解釈

本節では，ラフ集合における同値類の分割は可能世界の濾過法（filtration）と同値であることに着目し，同値関係により可能世界を粒状化世界として構成することを示す．濾過法とは，可能世界を同値関係により分類することであり，分類された世界は，同じ解釈が可能な世界の集合族として扱うことができる．分類のための参照関係としてスコット・モンタギュー・モデルにおける近傍系を仮定する．可能世界の集合 $U$，付値 $v: \mathcal{P} \times U \rightarrow \{0, 1\}$，可能世界モデル $\mathcal{M} = \langle U, R, v \rangle$ を考える．

$\mathcal{P}$ を原子文の集合とし，$\mathcal{L}_{\mathcal{P}}$ を原子文と様相演算子を含む論理定項から構成される命題言語，$\Gamma$ を $\mathcal{L}_{\mathcal{P}}$ の部分集合，および $\Gamma$ に現れる原子文の集合を $\mathcal{P}_{\Gamma}$ とする．
ここで，$\Gamma$ に対する粒状化可能世界の商集合 $U/{\sim_{\Gamma}}$ を $\tilde{U}_{\Gamma}$ とし，可能世界の集合の粒状化を次のように定義する．

$$\tilde{U}_{\Gamma} =_{\mathrm{def}} U / R_{\Gamma} = \left\{ [x]_{R_{\Gamma}} \middle| x \in U \right\}.$$

これは，$\Gamma$ による粒状化可能世界の集合である．粒状化可能世界における付値は次の通り：

$V_{\Gamma}(p, X) = 1 \text{ iff } p \in \cap X$，但し，$p \in \mathcal{P}_{\Gamma}$，および $X \in \tilde{U}_{\Gamma}$．

また，$\tilde{U}_{\Gamma}$ 上の参照関係 $R'$ が次の条件を満たすならば以下が成り立つ．

- $xRy$ ならば $[x]_{\sim\Gamma} R' [y]_{\sim\Gamma}$，
- $[x]_{\sim\Gamma} R' [y]_{\sim\Gamma}$ ならば，すべての$\Box p \in \Gamma$ に対して，$\mathcal{M}, x \vDash \Box p \Rightarrow \mathcal{M}, y \vDash p$,

- $[x]_{\sim\Gamma} R' [y]_{\sim\Gamma}$ ならば，すべての $\sim\Box\sim p \in \Gamma$ に対して，$\mathcal{M}, x \vDash \sim\Box\sim p \Rightarrow \mathcal{M}, y \vDash p$.

このとき，$\mathcal{M}_{\Gamma}^{R'} = \langle U_\Gamma, R', V_\Gamma \rangle$ は，$S_n(\Gamma)$ による濾過である．

またここで，4 値による粒状化可能世界の意味についてのみ述べる．モデル $\tilde{\mathcal{M}}_\Gamma$ に対する意味関係を，次のように定義する．式の評価における意味（真，偽をそれぞれ $\vDash_v^+$，および $\vDash_v^-$ で表記）は，帰納法の仮定による．また $\Gamma$ に対する粒状化可能世界を $\tilde{W}_\Gamma$ とし，立証と偽証により次の関係を仮定する：

$$\tilde{W}_\Gamma^+ \cup \tilde{W}_\Gamma^- = \tilde{W}_\Gamma, \tilde{W}_\Gamma^+ \cap \tilde{W}_\Gamma^- = \varnothing.$$

任意の文 p について，真である文の集合は，Kripke モデルにより p が真である可能世界の集合として定義される：

$$\|p\|^{\mathcal{M}} \Leftrightarrow \left\{w \in W \,\middle|\, \mathcal{M}, x \vDash^+ p\right\}, \left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right)^C \left\{w \in W \,\middle|\, \mathcal{M}, x \vDash^- p\right\}.$$

これより，粒状化可能世界モデルにおいて以下のように定義される：

$$\tilde{\mathcal{M}}_\Gamma, x \vDash_v^+ \Box p \text{ iff } [x]_{=_{\langle\rangle}} \cap \left(\|p\|^{\tilde{\mathcal{M}}}\right)^C = \varnothing,\ \tilde{\mathcal{M}}_\Gamma, x \vDash_v^- \Box p \text{ iff } [x]_{=_{\langle\rangle}} \cap \left(\|p\|^{\tilde{\mathcal{M}}}\right)^C \neq \varnothing,$$

$$\tilde{\mathcal{M}}_\Gamma, x \vDash_v^+ \Diamond p \text{ iff } [x]_{=_{\langle\rangle}} \cap \|p\|^{\tilde{\mathcal{M}}} = \varnothing,\ \tilde{\mathcal{M}}_\Gamma, x \vDash_v^- \Diamond p \text{ iff } [x]_{=_{\langle\rangle}} \cap \|p\|^{\tilde{\mathcal{M}}} = \varnothing,$$

4 値論理による演繹システム，および帰結関係とシークエント計算については，Nakayama らの論文（2018, 2020）[13, 14, 19, 20, 21]を参照のこと．

ここで，粒状化モデルを構築する．$\Gamma' \subseteq \Gamma$ である有限部分集合 $\Gamma', \Gamma$ とし，関係 $R_\Gamma \subseteq R_{\Gamma'}$ のとき $U_\Gamma$ の分割を $U_{\Gamma'}$ とする．このとき，$\Gamma$ に対する $\mathcal{M}$ の粒状化されたモデルを次のように定義する：

$\tilde{\mathcal{M}}_\Gamma =_{\text{def}} \langle \tilde{U}_\Gamma, R, \tilde{v}_\Gamma \rangle$ ここで，写像 $I_\Gamma^{\Gamma'}: \tilde{\mathcal{M}}_{\Gamma'} \to \tilde{\mathcal{M}}_\Gamma$ を $\Gamma'$ から $\Gamma$ へのズームイン（zooming in），写像 $O_{\Gamma'}^{\Gamma}: \tilde{\mathcal{M}}_\Gamma \to \tilde{\mathcal{M}}'_\Gamma$ を $\Gamma$ から $\Gamma'$ へのズームアウト（zooming out）と呼ぶ.

$\{p\} = \Gamma' \subseteq \Gamma = \{p, q\}$ のとき，ズームインとズームアウトの真理値を表 3 に示す.

**表 3　ズームイン真理値表（左）とズームアウト真理値表（右）**

| $\tilde{U}_{\{p,q\}}$ | $p$ | $q$ |
|---|---|---|
| $\|p\|^{\mathcal{M}} \cap \|q\|^{\mathcal{M}}$ | 1 | 1 |
| $\|p\|^{\mathcal{M}} \cap \left(\|q\|^{\mathcal{M}}\right)^C$ | 1 | 0 |
| $\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right)^C \cap \|q\|^{\mathcal{M}}$ | 0 | 1 |
| $\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right)^C \cap \left(\|q\|^{\mathcal{M}}\right)^C$ | 0 | 0 |

| $\tilde{U}_{\{p\}}$ | $p$ | $q$ |
|---|---|---|
| $\|p\|^{\mathcal{M}}$ | 1 | $\{1, 0\}$ |
| $\left(\|p\|^{\mathcal{M}}\right)^C$ | 0 | $\{1, 0\}$ |

これより，次の解釈が得られる．

$\left\|p\right\|^{\mathcal{M}} \subset \underline{R}_{\{R\}}\left(\left\|q\right\|^{\mathcal{M}}\right) \subseteq \left\|q\right\|^{\mathcal{M}}$．それゆえ次の式が成り立つ：

$$\tilde{\mathcal{M}}_{\Gamma}, \left\|p\right\|^{\mathcal{M}} \vDash q \Leftrightarrow \left\|p\right\|^{\mathcal{M}} \subseteq \underline{R}_{\{R\}}\left(\left\|q\right\|^{\mathcal{M}}\right).$$

また，$\Gamma'$ から $\Gamma$ へのズームイン操作により，情報が増加することで，以下が得られる．

$$\Gamma' \subseteq \Gamma \Rightarrow \left(\tilde{\mathcal{M}}_{\Gamma'} \vDash p \Rightarrow \tilde{\mathcal{M}}_{\Gamma'} \vDash p\right).$$

これは，下近似を用いた単調性の推論を示しており，命題 $P$ の真部分集合と解釈できる．

## 5.　認識アクションによる動的なプランニング

### 5. 1　認識としてのアクションとズーム推論

認識アクションとは，物理的なアクションと同様に認識や思考のプロセスをアクションとして捉え，対象とする情報に対して認識の変化を引き起こす事象と考える．アクションとしてのズーム推論をズーム・アクション（zooming action）と呼ぶ．ズーム・アクションとは，認識をアクションとして捉え，対象とする情報に対して認識状態の変化を引き起こす事象であり，ズームアウトは，対象の抽象化，ズームインは具象化（詳細化）の認識的アクションである．

ズーム推論では世界の粒度の変化により式の真偽値が決定されるため，ズーム推論がアクションとして実行される場合，認識における世界の粒度が動的に変更される．従って，認識アクションの実行によって，エージェントの知識の情報である命題の意味が更新される．

ズーム・アクションは構文的に通常のアクションと同様であり，ズーム推論と同様に引数として原子部分式によって分割される世界の集合をとる写像である．ここで，写像ズームイン $I_{\Gamma}^{\Gamma'}$，及び写像ズームアウト $O_{\Gamma'}^{\Gamma}$ をアクションとする．対象とする式の集合 $\Gamma$，および $\Gamma'$ は，ズーム推論と同様に次の関係を満たす：$\Gamma' \subseteq \Gamma \subseteq \mathcal{L}_{ES}$.

$w$ 上の同値関係 $\simeq$ は，アクションの実行後における世界とエージェントとの識別不能関係であり，ズームインとズームアウトのアクションにより異なる粒度による分割となる．また，式の真理値の評価は以下のとおりである：

$$1 \in \tilde{V}\left(p, \tilde{w}\right) \Leftrightarrow \left\langle e, w, z \cdot a\right\rangle \vDash^{+} p,\ \ 0 \in \tilde{V}\left(p, \tilde{w}\right) \Leftrightarrow \left\langle e, w, z \cdot a\right\rangle \vDash^{-} p.$$

また，粒状化認識世界におけるズーム推論の解釈は以下のとおりである：

$$\left\langle e, w, z\right\rangle \vDash_{ES} \left[\mathcal{I}_{\Gamma}^{\Gamma'}\right] p \Leftrightarrow \left\|p\right\|^{\tilde{\mathcal{M}}} \subseteq \underline{R}_{\{\Gamma\}}\left(\left\|q\right\|^{\tilde{\mathcal{M}}}\right),\ \left\langle e, w, z\right\rangle \vDash_{ES} \left[\mathcal{O}_{\Gamma}^{\Gamma'}\right] p \Leftrightarrow \left\|p\right\|^{\tilde{\mathcal{M}}} \subseteq \bar{R}_{\{\Gamma'\}}\left(\left\|q\right\|^{\tilde{\mathcal{M}}}\right).$$

ズームアウト推論：焦点の変化に対応する式の集合とし，$\left\{p\right\} = e_2 \subseteq e_1 = \left\{p, q\right\}$ とする．ただし，$E = e_1 \cup e_2$ である．ズームアウト・アクションにおいて $\left[\mathcal{O}_{e_2}^{e_1}\right]\left(p \rightarrow q\right)$ が成り立つことは，$\left\langle e_1, e_2, w, z\right\rangle \vDash_{ES} \left[\mathcal{O}_{e_2}^{e_1}\right]\left(p \rightarrow q\right)$ と表現される*3.

粒状化により抽象化された世界 $\tilde{w}$ で前件 $p$ と後件 $q$ がともに真ならば，$p \rightarrow q \in \tilde{w}$ であり $p \rightarrow q$ も世界 $\tilde{w}$ で真である．またこれは，「一般的に（generally or typically）$p$ ならば $q$ である」と解釈され，$\nvDash_{ES}^{-}\left[\mathcal{O}_{e_2}^{e_1}\right] p$ かつ $\nvDash_{ES}^{-}\left[\mathcal{O}_{e_2}^{e_1}\right] q$ である．表 2 より $q$ は $\tilde{v}_{\Gamma}\left(q, \tilde{w}\right) = \left\{0, 1\right\}$ であり，4 値論理の推論においてこれが正しい推論となる．

ズームイン推論：ズームイン・アクションは，認識世界における反抽象化（具象化）であり，相対的に細分化された粒度の解釈のもとで推論を実行する．ズームイン推論より，$\left[I_{e_1}^{e_2}\right](p \to q)$ が成り立つことは，以下のように表現される：

$$\left\langle e_2, e_1, w, z \right\rangle \vDash_{ES} \left[I_{e_1}^{e_2}\right](p \to q).$$

粒度の細かい具象化された世界 $w$ で前件 $p$ と後件 $q$ がともに真ならば，$p \to q \in w$ であり $p \to q$ も世界 $w$ で真である．これは，「具体的に（concretely）$p$ ならば $q$ である」[*4] と解釈される．また，$\vDash_{ES}^{+}\left[I_{e_1}^{e_2}\right]p$ かつ $\vDash_{ES}^{+}\left[I_{e_1}^{e_2}\right]q$ である．正しい推論は，$\tilde{v}_{\Gamma}(p, w) = \{1\}$ かつ $\tilde{v}_{\Gamma}(q, w) = \{1\}$ であり，前件が真，後件が真となるときである．

ズーム推論は非単調推論と呼ばれる古い情報の撤回や更新に応用することができる．既存の知識に対して，矛盾や例外の情報を得ることにより，これまでの知識ベースは適切に更新される．代表的な例として，ペンギンの例外がある（表 4）.

**表 4　ズームイン真偽値表**

| | (1) | (2) |
|---|---|---|
| 前提 | （一般に）鳥は飛ぶ.<br>Tweety は鳥である. | Tweety はペンギンである.<br>ペンギンは飛ばない. |
| 結論 | Tweety は飛ぶ. | Tweety は飛ばない. |

(1) と (2) の推論の結果，矛盾した結論が導かれることにより，論理システムとして整合性が保証されない．しかし，ズーム推論では，(1) にズームアウトを適用することで一般化の推論を表現し，(2) をズームインとして具体的なケースにおける例外として扱うことができる．この結果，(1)，(2) の結論は異なる世界によって解釈されるため不整合とはならない．図 6 では左がズームアウトを，右がズームインによる推論のイメージを示している．

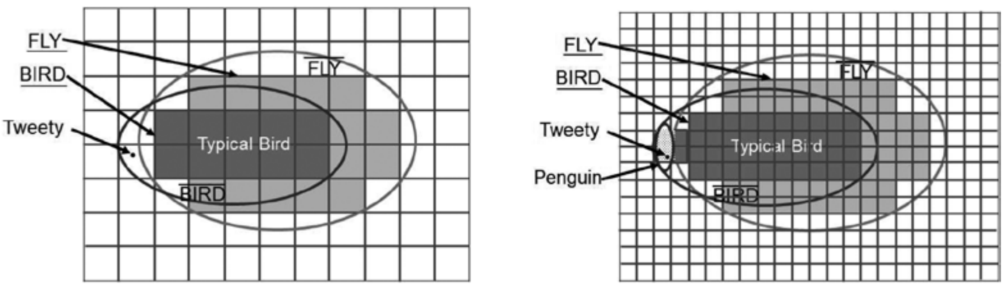

**図 6　ズームアウト（左）とズームイン（右）**

### 5. 2　思考のプロセスと認識世界

認識アクションとしての抽象化と具象化は，志向性により認識の焦点の対象となる属性について，思考のプロセスに伴う認識の変化として定式化され適切な意味解釈が決定される．抽象化と具象化における認識世界の関係を図 7 に示す．

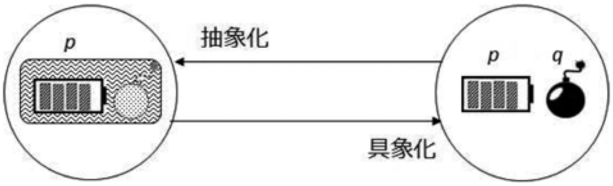


**図 7　抽象化と具象化のイメージ**

蓄積されている知識は背景知識として，観察する世界が決定される世界の粒度に依存する．また，粒度の調整は思考のプロセスにおいて，対象に対する焦点の合わせ方により決定することができる．粒度の調整は，エージェントが対象とする情報を認識しているとき，恣意的に行うことも可能であり，また情報の欠如により粒度が決定される場合もある．

知識管理データベースを知能とするエージェントは，情報に対する認識の状態を情報の粒状化により認識する．対象とする情報に対して抽象化された解釈を与えることにより，例えば，ある行動において，大きな実行計画を立てることができる．また反対に，対象の具象化により，計画を細分化し，抽象化された世界では不可視である例外や新たな情報を認識することができる．現実世界においてアクションを決定する場合，全体的な視点からの計画と詳細化した計画の策定を動的に試行錯誤しながら表現することが可能となる．

## 6. お　わ　り　に

本稿では，AI 時代における将来のデータベースとして従来の知識ベースの発展の可能性を示した．ラフ集合を意味解釈とする論理体系を構築することで，不確実性や矛盾への耐性を備えた論理体系が得られる．これによって拡張された知識ベースでは，認識状態の内省を行い，実世界と認識の差異に適切な意味を与え，不完全な情報や不整合な情報に対応する可能性が示される．

McCarthy により提起され，Dennett により認識論の視点から再定義されたフレーム問題は，自己内省を備えた自律的な仕組みと，情報の部分性と不完全性における認識の問題に立ち向かわなければ解決できないことを示唆している．本稿で扱った認識状況計算や，その基礎としての様相論理および多値論理による認識への対応は情報の部分性への対応であり，不完全な情報におけるエージェントの知識と行動のための理論的基礎となると考えられる．矛盾した状態や不確実な情報を含む状態における確信度に応じた判断への対応は今後の課題である．矛盾に対する真理値についての解釈も提起されており，意味の認識と真理値について，自律性や志向性との関連性も含め，基礎理論とともに自律的な知識ベースへの応用の面から研究を進めたい．

---

＊ 1　人工知能におけるエージェントの定義は目的により異なるが，本稿では目的の遂行のため状況を認識し，アクションを実行することにより状況に作用する主体をエージェントと定義する．

＊ 2　初期のフレーム問題は McCarthy と Hayes[3] によりアクションと状態変化の理論である状況計算の定式化において，状態変化とともに変化しない状態を記述する問題として提起された．

＊ 3　アクション様相記号の上付きと下付き文字（この場合は，$\mathcal{O}$ に対する $e_1$ と $e_2$）については，簡単のため文脈より明らかな場合，省略することがある．

＊ 4　「具体的に」の解釈はコンテキストに依存し，他に「例外として」「正確には」などのように解釈される．例えば「例外として p ならば q」と読める．

**参考文献**
[1] A. M. Turing, On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, Proceedings of the London Mathematical Society, Vol.s2-42, P230-265, 1937.
[2] J. Minker, ed., "Foundations of Deductive Databases and Logic Programming", Elsevier, 1988.
[3] J. McCarthy and P. Hayes, "Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence", Machine Intelligence 4, P463-502, 1969.
[4] D. Dennett, "Cognitive wheels: The frame problem of AI", Minds, Machines and Evolution, Cambridge University Press, 1984.
[5] L. Zadeh, "Fuzzy sets and information granurity". In Advances in Fuzzy Set Theory and Applications. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager (eds). North-Holland Publishing Company. 3-18, 1979.
[6] T. Murai and Y. Sato and G. Resconib and M. Nakata, "Granular Reasoning Using Zooming In & Out Part 1. Propositional Reasoning (An Extended Abstract)", Data Mining, and Granular-Soft Computing RSFDGrC 2003, P421-424.
[7] T. Murai and Y. Sato and G. Resconib and M. Nakata, "Granular Reasoning Using Zooming In & Out Part 2. Aristotle's Categorical Syllogism", Electronic Notes in Theoretical Computer Science Volume 82, Issue 4, 2003, P186-197.
[8] S. Akama and T. Murai and Y. Kudo, "Reasoning with Rough Sets", Logical Approaches to Granularity-Based Framework, Springer International Publishing, 2018.
[9] Z. Pawlak, "Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data", Kluwer Academic Publishers, 1991.
[10] B. Chellas, "Modal Logic: An Introduction", Cambridge University Press, Cambridge University Press, 1980.
[11] A. Urquhart, "Basic Many-Valued Logic, Handbook of Philosophical Logic", Handbook of Philosophical Logic, Springer, pp249-295, vol.2, 2001.
[12] N. D. Belnap, "A Useful Four-Valued Logic", Modern Uses of Multiple-Valued Logic, Reidel Publishing, pp.5-37, 1977.
[13] Y. Nakayama and S. Akama and T. Murai, "Deduction System for Decision Logic Based on Many-valued Logics", International Journal on Advances in Intelligent Systems 11(1&2) 115-126 2018.
[14] Y. Nakayama and S. Akama and T. Murai, "Four-valued Tableau Calculi for Decision Logic of Rough Set", Proceedings of the 22nd International Conference, KES-2018, pp.383-392, 2018.
[15] 村井哲也，工藤康生，粒状性と日常推論，人工知能学会全国大会論文集 JSAI05(0)，76-76，2005
[16] R. Reiter, "Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems", MIT Press, 2001.
[17] H. Levesque and G. Lakemeyer, "The Logic of Knowledge Bases", The Logic of Knowledge Bases, MIT Press, 2001.
[18] G. Lakemeyer and H. Levesque, "A semantic characterization of a useful fragment of the situation calculus with knowledge", Artificial Intelligence, 142.164, 2011.
[19] Y. Nakayama and S. Akama and T. Murai, "Four-Valued Semantics for Granular Reasoning towards Frame Problem", SCIS & ISIS, 2018.
[20] 中山陽太郎，赤間世紀，村井哲也，認識状況計算における粒状推論の適用，知能と情報（日本知能情報ファジィ学会誌)，Vol.32，No.4（8月号)，2020.
[21] 中山陽太郎，"A Study on the Epistemic Situation Calculus in the Framework of Granular Reasoning"，博士論文，公立千歳科学技術大学，2020.

**執筆者紹介**　中 山　陽 太 郎（Yotaro Nakayama）

1988 年日本ユニシス(株)入社．汎用機およびオープン系 DBMS の開発保守に従事．2004 年ユニアデックス株式会社転籍．2010 年より日本ユニシス総合技術研究所へ出向．大規模データ処理，非古典論理やラフ集合に基づく知識表現や知識処理の研究に従事．博士（理工学）．