

主観的概念推論システムの開発 ～主観的確率概念の推論～

坂谷内 勝
国立教育研究所

人間がどのような主観的概念を保有しているかを推論するシステムを開発している。システムの対象領域は、硬貨投げ実験の確率判断である。システムは、出題する問題に対しての回答者からの応答をもとに、回答者が持つ主観的確率概念を推論する。本稿では、まず、主観的確率概念に関する認知科学的研究を紹介する。次に、この研究成果を踏まえ、開発中のシステムの知識構造、具体的には、回答導出のためのプロセスルールの構造について述べる。最後に、プロセスルールを適用し主観的概念を推論する際の課題を述べる。本システムは、パーソナルコンピュータ上で開発しており、開発言語は、GCLISPである。

Development of the System Inferring Subjective Understanding Concepts

Masaru SAKAYAUCHI
National Institute for Educational Research
6-5-22 Shimomeguro, Meguro-ku, Tokyo 153, Japan

I am developing the system which infers man's subjective understanding concepts. The object domain of the system is a probability judgment of the tossup experiment. The system infers man's subjective concepts from the response of the questions. First, in this paper, studies of cognitive science are introduced. Next, the knowledge structure of the system is described. Concretely, the structure of the process rule to lead the answer is described. The problem of the system will be described at the end. This system is developed on a personal computer. The development computer language is GCLISP.

1. はじめに

認知科学の進展により、人間の心を科学的に解明しようとする研究が盛んに行われている。人間が持つ知識構造は「メンタル・モデル (mental models)」と呼ばれており、この研究の1つのアプローチとして、心理学や教育への人工知能応用を考える研究がなされている⁽¹⁾。知的CAI研究やITS(Intelligent Tutoring System)研究では、メンタル・モデルを学習者モデルと称し、知的な教授・学習支援システムを構成する1つの重要なモジュールとして研究が進められている⁽²⁾。

2. 学習者モデル

クランシー (W.J.Clancey)⁽³⁾ は、学習者をモデル化する目的を、「学習者の思い違いや最適でない実行方略に関する仮説を形成することであり、これにより、指導方略モジュールは誤りを指摘し、誤りの理由を示し、そして訂正を示唆することができる。」と述べている。代表的な学習者モデルとして、①オーバーレイ(overlay)モデル⁽⁴⁾、②差異モデル⁽⁵⁾、③バギー(buggy)モデル⁽⁶⁾がある。これら3つの学習者モデルを図式化すると図1のようになる。オーバーレイモデルは学習者をエキスパート(正しい知識構造を持つ者)の部分集合で知識表現している。差異モデルはエキスパートとの差異比較によって、そしてバギーモデルは誤った知識であるバグ(bug)の部分置換によって、学習者を知識表現している。

これらの学習者モデルは共通して、基本的には、理想的な専門家が持つ正しい知識構造をベースに表現されている。したがって、専門家と全く異質

な学習者の理解状態や振舞いに対しては、誤りの説明が不十分であり、誤り原因に関する説明の妥当性がないという問題点を持つ。この問題を克服するために、専門家と異なる学習者の理解状態を透明な(articulate)知識でモデル化することが必要である。

3. 理解段階

一般に、学習者の理解状態は、専門家の理解状態に至るまでに、いくつかの段階を経るといわれている。教育心理学における理解や認識の発達段階に関する研究では、ピアジェ (J.Piaget) の発達の認識段階やブルーナー (J.S.Bruner) の認知発達段階が有名である⁽⁷⁾。認知心理学研究における理解段階に関する研究では、物理的現象を短期間に理解する場面で、いくつかの理解段階が存在することが明らかになっている。フォーバス (K.D.Forbus) ら⁽⁸⁾ は、熱流の理解を例に、4種類のメンタル・モデルを提唱し、各モデルの系列が発達的であると論じている。

教育心理学的な発達段階と認知心理学的な理解段階を比較すると、一方では子どもの知的成長と呼ばれる長期間に渡る知能の発達段階に対し、他方では大人がある原理や現象を理解する場面での短期間における理解段階である。共通していることは、「学習者が完全な理解に至るまでにはいくつかの段階が存在する」という視点である。

そこで筆者は、学習者の理解状態は、①完全な理解に至るまでいくつかの理解段階が存在し、②完全な理解に至っていない段階での知識構造は専門家の知識構造と異質であるという視点で、学習

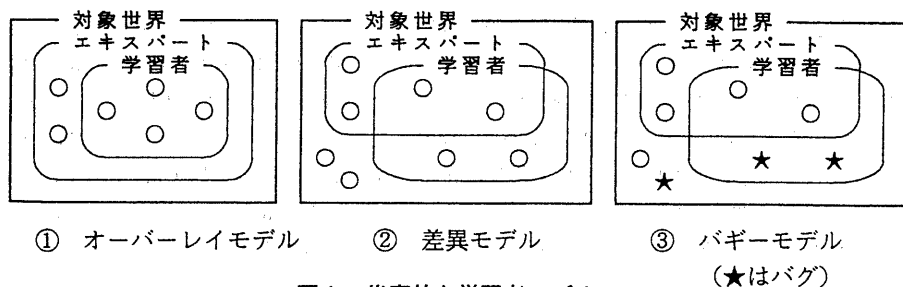


図1 代表的な学習者モデル

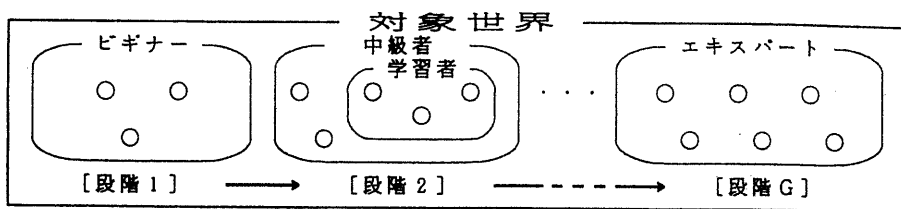


図2 理解段階を考慮した学習者モデル

者モデルを考案している⁽⁹⁾。このモデルを図式化すると図2のようになる。

4. 主観的概念

科学的概念の理解において、完全な理解に至っていない段階における知識構造の中には、主観的概念が存在し、完全な理解段階への移行を阻止または遅滞する原因であると考えられる。

主観的概念は、学校教育で教える正しい概念の知識（学校知と呼ばれている。）とは異なり、日常生活で得た概念の知識（日常知と呼ばれている。）であり、インフォーマルな知識である。理科教育学で盛んに研究されている「構成主義」は、学習者に学校知を形成させるにあたり日常知を十分考慮すべきであるという考え方に立脚している⁽¹⁰⁾。認知心理学では、インフォーマルな知識内容を素朴概念と呼び、素朴概念を克服するメカニズムの研究がなされている⁽¹¹⁾。この研究は、いわば、「既有知識から新たな知識を獲得する」メカニズムについての研究であり、知識を操作する知識、即ち、「メタ知識」の研究である。素朴概念のもつ性質の1つに、「素朴概念は科学理論におけるのとは異なる信念体系を含んでいることがある。」といわれている。

筆者が本稿で述べる「主観的概念」とは、素朴概念のもつ性質である「信念体系から成る知識内容」を意味しており、主観的概念を透明な知識でモデル化することをねらっている。主観的概念を取り入れた学習者モデル構築研究の最終目標

は、個々の主観的概念と理解状態に応じて知的に個別指導を展開する教授・学習支援システムの開発にある。しかし、本システムの開発する前に、まず、①主観的概念の抽出調査、次に、②主観的概念の知識構造の解明とコンピュータプログラミング可能な知識表現、そして、③学習者とのやりとりによって主観的概念を推論する方法を確立しなければいけない。本稿では、本システム開発に向けて、これまで進めてきた研究①～③について報告する。

本研究で扱う主観的概念は、図3に示すような硬貨投げ実験の確率判断の際に学習者が持つ主観的概念である。

5. 主観的確率概念の抽出調査

中学生70名、高校生109名、大学生88名、合計267名に、確率概念（硬貨投げ問題）に関する調査を実施した⁽¹²⁾。その結果、1つの正しい確率

10円玉を9回投げて、おもてが出たとき“表”，うらが出たとき“裏”を記入しました。10回目におもてが出る確率（出やすさ）はどのくらいでしょうか。確率がわからないときは、どちらが出ると思いますか。

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10円玉	表	裏	裏	表	裏	裏	表	裏	裏	？

図3 硬貨投げの問題（例）

概念の他、以下に述べる誤った主観的確率概念（誤り概念）を7つ抽出した。これらの概念を、確率判断の際の「原因系の概念」と呼ぶ。

(1)賭博者の誤謬⁽¹³⁾

【例】連続5回も裏が続いたので（表が出てない）ので今度は表が出る。

(2)頻度説の適用

【例】連続5回も裏が続いたので（表が出てない）ので今度も裏が出る。

(3)頻度の計算

【例】3回中1回表が出たので、表が出る確率は $1/3$ で、今度は裏である。

(4)パターン則の適用

【例】表裏裏のパターンが続いているので、今度もそのパターンになる。

(5)逆パターン則の適用

【例】表裏裏のパターンが続いているので、今度はそのパターンにならない。

(6)誤った計算化

【例】今度は3回目なので表が出る確率は $1/2$ の3乗（ $=1/8$ ）で、今度は裏が出る。

(7)直観的な考え

【例】消しごむをころがしたら表が出たので、今度は表が出る。

発達の傾向として、中学生に多いのが(1), (4), (5), (7), 高校生に多いのが(2), (3), (4), (6), 大学生に多いのは(2), (3), (6)の誤り概念である。直観的・賭博者の判断（傾向や規則に逆らう）から、パターンの・頻度的・計算的判断へと移行している。

この調査結果を分析し、確率概念の科学的な理解に至るまでの過程に、4つの理解段階があり、これをモデル化することを試みた⁽¹⁴⁾。本稿では、この4つの理解段階のモデル化については言及しないで、誤り概念から導かれる個々の「プロセスルール」について詳しく述べる。

6. 主観的確率概念の知識構造

主観的確率概念の知識構造は、8つの「原因系の概念」と92個の「プロセスルール」で構成し、

プログラミング可能な形式で知識表現することができる。本システムはパーソナルコンピュータ上で開発しており、開発言語はGCLISP（憐シーイーシー）である。

原因系の概念は、確率判断の際に使用するプロセスルールの起動原因であり、正しい概念と先に述べた7つの誤り概念の計8つの概念で構成している。プロセスルールは、確率判断の際の学習者の心的過程を表現する規則である。個々のルールは、原因系の概念と関係付けされており、ある原因系の概念が決定すると、適用可能なルール集合が決まる。そして、各々のプロセスルールを実行した結果、確率判断の結果、即ち、回答が導出される。

プロセスルールは前提部と動作部から成る。前提部は、学習者がこのルールを適用しようとするときに考慮する問題の一部あるいは全体に関する記述がなされている。動作部は、ルール起動後に得られる結論である。プロセスルールは、各原因系の概念毎にグループ化されている。つまり、どのプロセスルールも、対応する原因系の概念が必ず存在する。原因系の概念の配下にあるプロセスルールの数を図4に示す。

記号	原因系の概念	ルール数
W1	賭博者の誤謬	18
W2	頻度説の適用	18
W3	頻度の計算	4
W4	パターン則の適用	10
W5	逆パターン則の適用	8
W6	誤った計算化	16
W7	直観的な考え	17
C1	正しい概念	1
合 計		92

図4 原因系の概念とルール数

6. 1 プロセスルールの記述形式

1つのプロセスルールは、ルール名(RULE-NO)、前提部(IF)、動作部(THEN)から成る。

【例】 RULE-NO : IF [...] THEN [...]

前提部は、①変数、②関数、③論理演算子(NOT, AND, OR)等の記述である。変数は、論理値(T or NIL)または、着目する事象の値(HEAD or TAIL)が代入される。関数は、大別すると、論理値を返す関数(例:F-試行回数多)、数値を返す関数(例:F-頻度)、変数を返す関数(例:F-直前事象)、問い合わせ関数(例:F-好みの事象)がある。また、これらの関数を融合した関数や組合せした関数も存在する。融合した関数の例として、“F-連続3回”という関数は、連続して同じ事象が3回出ているときに、論理値Tとその事象の値を返す関数である。組合せした関数の例として、“F-頻度(F-直前事象)”という関数は、“F-直前事象”によって返された事象の値を、“F-頻度”の関数に渡し、直前事象の値とその頻度の両方を返す関数である。

動作部は、予想回答である①事象の値(HEAD or TAIL)、②硬貨のおもて(HEAD)が出る確率、または、③前提部の関数に束縛された変数の記述である。記述される確率はパーセント(%)表記の数値で、0~100である。

6. 2 プロセスルール具体例

下記の例に示すRULE-130は、硬貨投げの問題において、「直前の事象Aの反対の事象Bが出るであろう。」というプロセスルールを表現している。システムは、“F-直前事象”を実行し、その結果を“A”の変数に代入する。次に、関数“F-反対”を実行し、“A”と反対の事象を“B”の変数に代入する。図3の問題では、直前の事象Aは“TAIL”であるため、結論Bは“HEAD”になる。同様に、RULE-132は、「連続5回も事象Aが出たので、今回はその反対のBが出るであろう。」というプロセスルールを表現している。

プロセスルールの一覧(一部)は付録に掲載する。

【例】 RULE-130:

IF [F-反対 (F-直前事象→A) →B]
THEN [B]

RULE-132:

IF [F-反対 (F-連続5回→A) →B]
THEN [B]

7. プロセスルールの適用

硬貨投げ実験の問題パターンQは0または1の数値列で表現する。10円玉の表を“表が出る確率”である“1”で表現し、同様に裏を“0”で表現すると、問題パターンQ₁ (図3の問題)は、Q₁=(1 0 0 1 0 0 1 0 0)になる。そして、システムがプロセスルールを実行した結果、得られる回答Tは、 $0 \leq T \leq 1$ の範囲である。同様に、学習者回答Sは、 $0 \leq S \leq 1$ の範囲である。

Q₁=(1 0 0 1 0 0 1 0 0)に各プロセスルールを適用し回答Tを求めると、図5の結果になる。92個用意したルールの内、Q₁に適用可能なルールは45個である。例えば、RULE-455の“〔事象数〕分の1を〔試行回数〕乗する”というルールの場合、 $T_1 = 1/512$ になる。 $T_1 = 1/512$ になるルールが他に見当たらない場合、 $S_1 = 1/512$ の回答に対して、この学習者のプロセスルールはRULE-455と推論し、原因系の概念を「W6: 誤った計算化」と推論することができる。

しかし、 $S_1 = 2/3$ のように複数のルールが候補になる場合がある。このときは、Q₁と異なる問題を出題してルールを絞り込む必要がある。例えばQ₁の問題に対し $S_1 = 2/3$ のとき、候補ルール群G₁は、以下の6個のルールから成る。

G₁={RULE-320, RULE-322, RULE-340, RULE-341, RULE-342, RULE-590}

次にQ₁と異なる問題Q₂=(1 1 0 1 0 0 0 0 0)の場合、適用可能なルールは54個になり(図6参照)、 $S_2 = 1/3$ のとき、候補ルール群G₂は、以下の12個のルールから成る。

G₂={RULE-330, RULE-332, RULE-333, RULE-334, RULE-335, RULE-341, RULE-350, RULE-352, RULE-500, RULE-580, RULE-420, RULE-440}

記号	ルール 数	適用可 能な数	ルール適用後に得られる予想回答Tの分布					
			0	1 / 3	1 / 2	2 / 3	1	その他
W1	1 8	1 0	0	5	0	0	5	0
W2	1 8	1 0	5	0	0	5	0	0
W3	4	3	0	2	0	1	0	0
W4	1 0	1	0	0	0	0	1	0
W5	8	1	1	0	0	0	0	0
W6	1 6	1 6	0	2	2	0	0	1 2
W7	1 7	3	1	0	1	0	1	0
C1	1	1	0	0	1	0	0	0
合計	9 2	4 5	7	9	4	6	7	1 2

図5 $Q_1 = (1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0)$ の実行結果

記号	ルール 数	適用可 能な数	ルール適用後に得られる予想回答Tの分布					
			0	1 / 3	1 / 2	2 / 3	1	その他
W1	1 8	1 6	1	7	0	1	7	0
W2	1 8	1 6	7	1	0	7	1	0
W3	4	3	0	2	0	1	0	0
W4	1 0	0	0	0	0	0	0	0
W5	8	0	0	0	0	0	0	0
W6	1 6	1 6	0	2	2	0	0	1 2
W7	1 7	3	1	0	1	0	1	0
C1	1	1	0	0	1	0	0	0
合計	9 2	5 5	9	1 2	4	9	9	1 2

図6 $Q_2 = (1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$ の実行結果

そこで、 $G_1 \cap G_2$ を求めることによって、この学習者が回答導出のために適用したプロセスルールと原因系のルールを推論することができる。

$G_1 \cap G_2 = \{\text{RULE-341}\}$ より、この学習者のプロセスルールは RULE-341(前半の頻度が大きい事象の全体の頻度を求める)、原因系の概念は「W2: 頻度説の適用」と推論することができる。

8. おわりに

今後の課題は、複数の問題パターンによってプロセスルールを絞り込む場合の効率良い方策、即ち、次に出す問題をどのように設定し、最少回数でプロセスルールを推論する方法について検討しなければならない。

もう1つの課題は、原因系の概念及びプロセスルールが推論できない場合(矛盾または一貫性の

ない回答を行う場合)である。このときは、推論に必要な情報を得るために、①学習者に与える問題内容の変更、②弁別度の高い多肢選択式問題の生成、③直接学習者にプロセスルールの確認、によって、推論の信頼性を高める必要がある。また、過去の記録を利用し、確認の問題を再度出題することによって、推論の信頼性を高めることができる。

本研究では、「硬貨投げの問題」という、極めて狭い領域における主観的概念を取り扱った。このように対象領域を限定しても、人間のインフォーマルな知識をコンピュータ上で推論する難しさを痛感した。しかし、本研究を通して、もっとも「人間らしい」知識の核心に触れたような印象を受けた。

〔参考文献〕

- (1) 淵一博監修, 古川康一, 溝口文雄編: 「メンタル・モデルと知識表現」, 共立出版, pp.1-14, 1986.
- (2) Park, O., Perez, R.S. and Seidel, R.J. : "Intelligent CAI: Old Wine in New Bottles, or a New Vintage?", in Kearsley, G. (ed.), *Artificial Intelligence and Instruction*, Addison-Wesley Publishing Co., pp.11-45, 1987.
- (3) Clancey, W.J., Bennett, J.S. and Cohen, P.R. : "Applications-oriented AI Research: Education" in Barr, A. and Feigenbaum, E.A. (eds.), *Handbook of Artificial Intelligence*, Rep. No. STAN-CS-79-749, Computer Science Dept., Stanford University, pp.1-56, 1979.
- (4) Goldstein, I.P. : "The Genetic Graph: A Representation for the Evolution of Procedural Knowledge", in Sleeman, D. and Brown, J.S. (eds.), *Intelligent Tutoring Systems*, Academic Press, pp.51-57, 1982.
- (5) Burton, R.R. and Brown, J.S. : "An Investigation of Computer Coaching for Informal Learning Activities", *Int. J. of Man-Machine Studies* 11, pp.5-24, 1979.
- (6) Brown, J.S. and Burton, R.R. : "Diagnostic Models for Procedural Bugs in Basic Mathematical Skills", *Cognitive Science*, pp.155-192, 1978.
- (7) 広岡亮蔵: 「ブルーナー研究」, 明治図書, pp.62-79, 1977.
- (8) Forbus, K.D. and Gentner, D. : 「物理学の定性的学習」, in Michalski R.S. et al. (eds.), *Machine Learning*, 電総研人工知能研究グループ他訳, 知識獲得と認知科学, 共立出版, pp.123-163, 1988.
- (9) 坂谷内勝: 「発達的概念形成に基づく確率概念の学習者理解状態モデルの構築」, 電子情報通信学会技術研究報告 ET90-1, pp.1-6, 1990.
- (10) 荒川博利, 下條隆嗣: 「自然認識における概念形成研究の問題点」, 研究会研究報告, 日本科学教育学会, Vol.8, No.3, pp.71-76, 1986.
- (11) 鈴木宏昭, 鈴木高士, 村山功, 杉本卓: 「教科理解の認知心理学」, 新曜社, pp.99-151, 1989.
- (12) 坂谷内勝: 「主観的確率概念の学習者理解状態モデルに関する研究～中学生・高校生・大学生に対する確率概念調査の結果について～」, 日本教育工学会, 第6回大会, pp.41-42, 1990.
- (13) Cohen, J. : 「現代心理学の展開 第2巻 心理的確率」, 北村晴郎, 佐藤怜訳, 誠信書房, pp.56-89, 1976.
- (14) 坂谷内勝: 「確率概念理解状態を表現する学習者モデルの構築」, 三輪辰郎先生退官記念論文集・編集委員会, 数学教育学の進歩, pp.188-203, 1993.

【付 録】

プロセスルールの一覧 (一部)

(1) 賭博者の誤謬

- | | |
|---|--|
| RULE-130: IF [F-反対 (F-直前事象→A) →B]
THEN [B] | RULE-332: IF [F-頻度 (F-反対 (F-連続2回→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-131: IF [F-反対 (F-全回の事象→A) →B]
THEN [B] | RULE-333: IF [F-頻度 (F-反対 (F-連続3回→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-132: IF [F-反対 (F-連続2回→A) →B]
THEN [B] | RULE-334: IF [F-頻度 (F-反対 (F-連続4回→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-133: IF [F-反対 (F-連続3回→A) →B]
THEN [B] | RULE-335: IF [F-頻度 (F-反対 (F-連続5回以上→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-134: IF [F-反対 (F-連続4回→A) →B]
THEN [B] | RULE-350: IF [F-頻度 (F-反対 (F-頻度大→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-135: IF [F-反対 (F-連続5回以上→A) →B]
THEN [B] | RULE-351: IF [F-頻度 (F-反対 (F-前半頻度大→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-150: IF [F-反対 (F-頻度大→A) →B]
THEN [B] | RULE-352: IF [F-頻度 (F-反対 (F-後半頻度大→A)
→B) →α]
THEN [α] |
| RULE-151: IF [F-反対 (F-前半頻度大→A) →B]
THEN [B] | |
| RULE-152: IF [F-反対 (F-後半頻度大→A) →B]
THEN [B] | |
| RULE-330: IF [F-頻度 (F-反対 (F-直前事象→A)
→B) →α]
THEN [α] | |
| RULE-331: IF [F-頻度 (F-反対 (F-全回の事象→A)
→B) →α]
THEN [α] | |

(2) 頻度説の適用

- | | |
|---------------------------------------|---|
| RULE-120: IF [F-直前事象→A]
THEN [A] | RULE-320: IF [F-頻度 (F-直前事象→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-121: IF [F-全回の事象→A]
THEN [A] | RULE-321: IF [F-頻度 (F-全回の事象→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-122: IF [F-連続2回→A]
THEN [A] | RULE-322: IF [F-頻度 (F-連続2回→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-123: IF [F-連続3回→A]
THEN [A] | RULE-323: IF [F-頻度 (F-連続3回→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-124: IF [F-連続4回→A]
THEN [A] | RULE-324: IF [F-頻度 (F-連続4回→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-125: IF [F-連続5回以上→A]
THEN [A] | RULE-325: IF [F-頻度 (F-連続5回以上→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-140: IF [F-頻度大→A]
THEN [A] | RULE-340: IF [F-頻度 (F-頻度大→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-141: IF [F-前半頻度大→A]
THEN [A] | RULE-341: IF [F-頻度 (F-前半頻度大→A) →α]
THEN [α] |
| RULE-142: IF [F-後半頻度大→A]
THEN [A] | RULE-342: IF [F-頻度 (F-後半頻度大→A) →α]
THEN [α] |

(3) 頻度の計算

- RULE-500: IF [F-頻度(HEAD)→α AND F-試行回数少]
THEN [α]
- RULE-555: IF [F-頻度(HEAD)→α AND F-試行回数多]
THEN [α]
- RULE-580: IF [F-頻度(HEAD)→α]
THEN [α]
- RULE-590: IF [F-反対 (F-頻度(HEAD)→α) →β]
THEN [β]

(4) パターン則の適用

- RULE-210: IF [F-全て同じ事象→A]
THEN [A]
- RULE-212: IF [F-2回繰り返し返し→A]
THEN [A]
- RULE-213: IF [F-3回繰り返し返し→A]
THEN [A]
- RULE-214: IF [F-4回繰り返し返し→A]
THEN [A]
- RULE-215: IF [F-5回繰り返し返し→A]
THEN [A]