Title	フレーム問題と世界の因果的理解
Author(s)	中山, 康雄
Citation	大阪大学人間科学部紀要. 1998, 24, p. 45-70
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/3970
rights	
Note	

フレーム問題と世界の因果的理解

中　山　康　雄

目　次

フレーム問題と世界の因果的理解

中山康雄

はじめに

McCarthy＆Hayes（1969）は知的な機械を作ろうとし、そのために「能力」、「原因」、「信念」、「反事実的条件文」などの概念を明らかにしようとした。彼らによれば、これらの概念を明らかにすることは哲学の課題であり、人工知能（AI）研究はこれらの哲学的問題を明らかにすることを通してでなければ発展できない。そして、彼らは、この研究の過程で「フレーム問題」という知識表示の問題に突き当たった。

我々は、世界を因果的に理解している。雨が降れば、濡れてしまうので傘をさして外出し、ボールをラケットで打てば、ボールは来た方向と逆の方向に飛んでいくと我々は思っている。この世界の因果的理解はいかなるものなのか？

この問いは、Hume 以来の問いであり、その後、分析哲学・科学哲学においても様々な解明の努力がなされてきた。そして、McCarthy＆Hayes（1969）が発見した「フレーム問題」は、我々が持つ世界の因果的理解とは何なのかという問題を分析するための新しい視点を提供した。因果理解については、Goodman（1953）などで議論された様々な難問が知られている。それらの問題を解くための方法がはじめから伝統的なものに限定されていれば、それらの原因を解明することもそれらを解決することも困難になる。

AI 研究は、因果に関する問題を知識表示の枠の中で捉える。この戦略の利点は、知識表示法の選択が容易なことにある。「我々の世界理解を適切に表現するためには、どのような知識表示法が開発されねばならないのか」という問いが AI 研究の基本的問いである。McCarthy と Hayes は、因果理解の細部をある知識表示法に従って明らかにしようとする過程の中で、「フレーム問題」の存在に気づいたのである。

McCarthy＆Hayes（1969）が発見した「フレーム問題」は、ある意味では、AI 研究の中で1980年代後半にすでに解かれているといってもよいだろう。本稿では、中山（1997a）で提案された枠組みを用いて、McCarthy＆Hayes（1969）の「フレーム問題」の解決を記述する。このことは、同時にある知識表示法の提案でもある。また、この枠組みが因果関係の記述や反事実的条件文の分析にも用いることができることを示す。

1．フレーム問題とは何か

実在する世界を人間が知的に処理する時、そこには、すでにある前提が用いられている。物を見るためには注意が集中され、処理可能な入力の幾つかは用いられない。つまり、我々人間の認識は必要のない情報を捨てることにより初めて実時間の枠で可能となっている。また、情報は、記憶の中から呼び出された他の情報と組み合わされることにより、適切な行為を行うための支えになる。我々の神経組織や我々の思考体系は、生きのびるためにどんな情報を捨てどんな情報を活用すべきかを学習してきたのである。どんな情報を捨てどんな情報を活用すべきかを適切に判断することはいかに可能なのか？ここには、ある一般的問題、人々がときどき「広い意味でのフレーム問題」と呼ぶものが存在する。

フレーム問題は、広い意味では、問題表現（representation）と問題解決に関わる問題である。まず、与えられた問題が何であるかがある表現システム（representation system）において記述されねばならない。第一の問題は、この表現システムの中で与えられた問題が表現可能でなければならないことにある。

(1) 解くべき問題は、与えられた表現システムを用いて表現可能でなければならない。

また、解くべき問題に必要な情報が十分与えられていなければならない。我々人間は、情報が必要な時、その情報をいかに収集すべきかについてのノウハウをいくつかの特定された分野について持っている。コンピューターを用いて問題を解く場合にも、どのデータベースにどの種類の情報が入っているのかを明らかにしなければならない場合が多いだろう。

(2) 問題を解くのに必要な情報がすでに与えられているか、あるいは、そのような情報をいかに獲得するかの手段が知られていなければならない。

(1)や(2)の条件は、すべての問題について満たされているわけではない。問題をいかに表現し、情報をいかに収集し、その中から必要なものをいかに取り出すかということは、すでに深刻な問題を含んでいる。そして、「広い意味でのフレーム問題」は、このような一般的問題も含んでいるだろう。

McCarthy & Hayes（1969）の導入した「フレーム問題」は、(1)と(2)の条件が満たされていることを前提にした上で成立する特定の問題である。これを、「狭い意味でのフレーム問題」と呼ぼう。Winogradのブロック・ワールドは閉じた人工的小世界の問題だったために解決は容易だった。ブロック・ワールドでは、あるブロックに関与する操作がなされないかぎり、ブロックは同じところにとどまっている。そこでは、現実世界と異なり、例外的出来事が起こらない。これに対し、狭い意味でのフレーム問題では、対象世界に関する不完全な知識しか与えられておらずこれを完全化する方策もないという現

実的前提から出発している。

狭い意味でのフレーム問題は、ある特定の状況において行為を起こした時、どのような状況発展があるかを正しく予想しようとした時に起こる問題である。ある行為Aは、ある条件Cを満たす時にのみ効果Eをもたらすという一般的な図式が認められているとしよう。そして、状況 s_0 で状態 C_1 と C_2 が成り立つもとで行為 A_1 が起こり、その後、状況 s_1 で行為 A_2 が起こるとしよう。また、行為 A_1 は状態 C_1 のもとで状態 C_3 を引き起こし、行為 A_2 は状態 C_2 と C_3 のもとで効果 E_1 を引き起こすとしよう。これを一階の述語論理の論理式で表せば次のようになる。

(3) 行為の効果を記述する例

suc は、後続者を表す関数とする。[1]

(a) $s_1 = suc(s_0) \wedge s_2 = suc(s_1)$.

(b) $C_1(s_0) \wedge C_2(s_0) \wedge A_1(s_0) \wedge A_2(s_1)$.

(c) $\forall s\ ((A_1(s) \wedge C_1(s)) \rightarrow C_3(suc(s)))$.

(d) $\forall s\ ((A_2(s) \wedge C_2(s) \wedge C_3(s)) \rightarrow E_1(suc(s)))$.

このような定式化には二つの根本的な問題がある。

(4) 行為の効果を一階の述語論理により定式化する時に起こる根本的問題

(a) (3c) と (3d) の因果関係の記述は、例外を許さない。しかし、一般に、Aが起これば、Eが起こるという関係には例外が存在する。この問題は、哲学においてはよく知られた問題である(Goodman (1953) 参照)。McCarthy＆Hayes (1969) もこのことを指摘している。

(b) 問題は、(3a)-(3d) から $E_1(s_2)$ が帰結しないことにある。それは、(3d) の論理式を適用するには、$C_2(s_1)$ が成り立たねばならないが、これが (3a)-(3d) から帰結しないからである。この問題を解決するには、ある状況で C_2 が成り立てば、その後続の状況でも C_2 は成り立つということを表す (3e) の論理式を認めればよい。

(3e) $\forall s\ (C_2(s) \rightarrow C_2(suc(s)))$.

しかし、(3e) には例外があるであろうから、厳密には (3e) は偽である。また、一般的には、C_2 だけではなく、他のすべての状態についてこのような公理がたてられるべきだろう。

(4b) の問題が McCarthy＆Hayes (1969) が議論した「フレーム問題」、つまり、「狭い意味でのフレーム問題」である。[2] このフレーム問題のポイントは、一つ一つの状態について、それぞれ、状態持続の公理を作るとしたなら、記述が膨大になってしまうということにある。そして、このフレーム問題に伴う問題として、例外を含んだ規則性をいかに表現したらよいかという問題がある。それぞれの例外を一階の述語論理を用いて

明示的に表そうとすると、多くの例外が存在する場合には論理式の数が急速にふくれあがっていく。McCarthy＆Hayes（1969）は、「xがyの電話番号を電話帳で調べれば、xはyの電話番号を知るであろう」という規則には、様々な例外が考えうることを指摘している。彼らは、「xの番号ののったページが電話帳から破り取られている」などのこの規則に対する7つの例外を列挙している（邦訳p.85参照)。

実際、このような規則に対する例外は数限りなく考え出すことができるし、また例外の例外、例外の例外の例外なども考えられる。例えば、(3e）に対するn個の例外を考慮することを考えてみよう。それは、例外となる状態をExc_kで表現すると次のように表せる：

(5) (3e）に対するn個の例外の考慮

(a) $\forall s((C_2(s) \wedge \neg Exc_1(s) \wedge \ldots \wedge \neg Exc_n(s)) \rightarrow C_2(suc(s)))$.

(b) $1 \leq k \leq n$なるすべてのkについて、$\forall s\ ((C_2(s) \wedge Exc_k(s)) \rightarrow \neg C_2(suc(s)))$.

これに例外の例外などを考慮していくと、公理の数が爆発することになる。また、新しい例外を考慮するたびに、すでにある公理のいくつかに手直しをほどこさねばならない。この問題を分析し、一般的解決を与えることが以下に続く本稿の試みである。

2．狭い意味でのフレーム問題

狭い意味でのフレーム問題は、例外を含んだ規則をいかに表現するかという問題と深く関わる。例えば、「状況sにおける状態は、普通、その後続の状況suc(s）においても成り立っている」というような主張を適切に表現できれば、状態の継続に関する一般的記述が可能なように思われる。

例外を含んだ規則を用いた推論体系は、普通、非単調推論の体系となる。ただし、非単調な推論体系とは、新しい情報が加えられることにより、それまで認められていたことが否定される可能性を持つ推論体系のことである。非単調の推論体系は次のように定義される。

(6) 単調推論体系と非単調推論体系

Lをある言語の全論理式の集合とする。

(a) $\vdash$ は単調な推論体系 $\Leftrightarrow \vdash \forall X \subseteq L, \forall Y \subseteq L, \forall p \in L((X \vdash p\ \&\ X \subseteq Y) \Rightarrow Y \vdash p)$.

(b) $\vdash$ は非単調な推論体系 $\Leftrightarrow \vdash$ は単調な推論体系ではない。

rという論理式がある例外を含んだ規則を表しているとしよう。rの適用に反する情報がない限り、rが適用され、その帰結pが受け入れられる。しかし、rは例外を含むので、実は、pの否定である¬pが事実であったと判明することがありうる。すると、最初のpの受け入れは単なる推測だったのだから、確認の後に受け入れられた¬pの方が

確実であるため、信念総体の無矛盾性を保つためには、以前認められていたpを消去しないといけなくなる。だから、例外を含んだ規則を用いた推論体系で受け入れられたことの整合性を保とうとするシステムは、非単調推論の枠組みとなるのである。

非単調推論の体系は、1980年頃から提案されはじめ現在にいたっている。中山(1997a)の分類に従えば、それらは、現段階で、閉世界仮説、無矛盾性に基づくアプローチ、最小モデルに基づくアプローチ、認識論的アプローチ、条件論理、信念改訂の理論の六つに分類できる。

非単調推論体系の導入は、例外を含む知識の表現を部分的に可能にした。このことにより、「フレーム問題」の新しい解決へのアプローチが可能となったように見えた。Dennett(1984) は、非単調推論が人間の意識的考察のメカニズムを明らかにしていないという理由から、非単調推論のアプローチがフレーム問題解決のための進歩を示しているにしても「フレーム問題」の完全な解決には不十分であると指摘している (cf. p.164)。しかし、人間による問題解決の手法が唯一可能な問題解決の手法ではないのだから、Dennett の前提を反駁することによりこの批判は避けられる。このアプローチに対する根本的な批判は、Hanks&McDermott(1986) によりなされている。彼らは、イエール射撃問題 (Yale Shooting Problem, YSP 問題) という小問題を考察し、この問題が、それまで提案された非単調推論の枠組みを用いても解けないことを主張した。

YSP 問題が、従来の非単調推論体系で解けないという指摘は、この体系に対する破壊的批判を意味する。非単調推論の体系は、どれも、コンピューター・プログラムを用いてそれを実現させることが容易でない複雑な体系である。これに対し、YSP 問題は、数行で表現できる単純な小問題にすぎない。また、YSP 問題は、状態の持続を問題の中に含んでいるので、「狭い意味でのフレーム問題」の小さな例題である。つまり、「狭い意味でのフレーム問題」が解けるかどうかの最初のテストとして、YSP 問題を考えることができるのである。

YSP 問題は、射撃に関するある物語からその結末を予測する次の問題である。

> (YSP 問題) :物語のはじめでは、A は生きている。そして、銃に弾が込められる。次にしばらく時間がたってから、A は銃により撃たれる。その後、A はまだ生きているだろうか?

YSP 問題において期待されている答えは、A が死んでいるというものだが、従来の非単調推論からは、A が生きているという解も得られてしまうということを Hanks& McDermott は指摘したのである。[3] YSP 問題が提出されて以来、その解法に関する多数の提案がなされている。もっとも有名なものに Shoham による時間最小原理によるものがある (Shoham(1990) 参照)。他には、中島他 (1993)、中山(1997a)、Pollock (1997)、そして、その他 YSP 問題の解法を提案する数えきれないほどの論文を見つけることができる。中山 (1996, 1997a, 1997b) に見られる仮説推論に基づくアプローチ

を用いれば、継承推論に関する問題もYSP問題も、特殊な仮説ほど優先されるべきだという考えを用いて統一的に解決できる。また、YSP問題などの時間発展する系の記述においては、それに加えて、時間的順序に従って系の発展が規定されねばならない。継承推論に関する記述法については、中山（1996, 1997a, 1997b）に詳しく述べれらているので、本稿では、時間発展していく系における問題に焦点を絞って議論しよう。

3．順序づけられた仮説を用いての推論

次節で狭い意味でのフレーム問題を解決するために我々が用いる推論体系は、中山（1997a）で定義された「順序づけられた仮説を用いての推論」（reasoning with ordered hypotheses, ROH）である。今、事実言明の集合Fと仮説図式の集合Δが与えられているとしよう。すると、ROHは、FのΔによる無矛盾な拡張$Ext_k(F, \Delta)$を順次形成していく。このROHを時間発展していく系の問題に適用すると、$Ext_0(F, \Delta)$から$Ext_k(F, \Delta)$の拡張の列は、0という出発点の状況から数えてk番目の後続状況にいたる状況発展の歴史のうちもっともありえるものを記述していることになる（中山（1997a）参照）。ROHの推論を時間発展していく系に適用する時、仮説図式は、一般に（$p(s) \rightarrow q(s)$）というsという状況の変項を持つ論理式として表現される。仮説は、k+1の段階において、k段階の拡張に仮説図式の代入例の前件が含まれている時にのみ生成される。例えば、$p(s_n) \in Ext_k(F, \Delta)$であれば（$p(s_n) \rightarrow q(s_n)$）はk+1段階の仮説となる。

FとΔの第0段階における拡張である$Ext_0(F, \Delta)$は、仮説図式を考慮せず、Fのみからの帰結の集合として定義される($Ext_0(F, \Delta) := \{p \mid F \vdash p\}$)。第k+1段階における拡張を計算するためには、まず、(F, Δ)に関するk+1段階の仮説領域である$S_{k+1}(F, \Delta)$を計算する。$S_{k+1}(F, \Delta)$は、Δ中に含まれる仮説図式のうち、第k段階の拡張を用いて前件を満たすことがわかっているものから仮説を作りこれを集めたものである($S_{k+1}(F, \Delta) := \{(p(s_n) \rightarrow q(s_n)) \mid (p(s) \rightarrow q(s)) \in \Delta \& p(s_n) \in Ext_{k+1}(F, \Delta)\}$)。$Ext_k(F, \Delta)$に特殊な仮説ほど優先させながら$S_{k+1}(F, \Delta)$の仮説のうち無矛盾に加えうるものすべてを加えて集めたものを「(F, Δ)に関するk+1段階の優先部分理論」と呼ぶ。[4] $Ext_{k+1}(F, \Delta)$は、どの(F, Δ)に関する第k+1段階の優先部分理論からも帰結する論理式をすべて集めたものと定義される。そして、EXT(F, Δ)は、段階を上る操作を繰り返して可能な限り上りつめた時の推論の結果の集合を表す（$\cup\{Ext_k(F, \Delta) \mid k \in N\}$）。

また、ここで、$F \vdash \forall s\ (p(s) \rightarrow q(s))$が成り立ち、（$p(s) \rightarrow r(s)$）と（$q(s) \rightarrow t(s)$）がそれぞれ$\Delta$の要素となる仮説図式である時、「（$p(s) \rightarrow r(s)$）は（$q(s) \rightarrow t(s)$）に対して（F, Δ）におき優先される」と言う。つまり、前件が特殊な状況を表している仮説図式ほど優先されるのである。仮説図式（$p(s) \rightarrow r(s)$）が仮説図式（$q(s) \rightarrow t(s)$）に対して（F, Δ）におき優先されるなら、その代入例となる仮説（$p(s_n) \rightarrow r(s_n)$）

は仮説 $(q(s_n) \rightarrow t(s_n))$ に対して (F, Δ) におき優先される。時間発展する系を扱うために、事実言明と仮説図式の基本的なものを認めることにする。

(7) 基礎的事実言明

任意の C_k について、時間発展する系の事実記述 F は、次の公理図式および公理系を含んでいる。

(a) $\forall s\ \neg(\mathrm{hold}(C_k, s) \wedge \mathrm{hold}(\mathrm{non}(C_k), s))$.

(b) $\mathrm{state}(C_k) \rightarrow \mathrm{state}(\mathrm{non}(C_k))$.

(c) $\mathrm{state}(C_k) \rightarrow \forall s\ (\text{persistent–property}(C_k, s))$.

(d) $\mathrm{event}(C_k) \rightarrow \forall s\ \neg(\text{persistent–property}(C_k, s))$.

(e) 状況と関数 suc に関するペアノの算術の公理系

(8) 基礎的仮説図式

任意の C_k について、時間発展する系の仮説図式集合 Δ は、次の仮説図式を含んでいる。

$$((\text{persistent–property}(C_k, s) \wedge \mathrm{hold}(C_k, s)) \rightarrow \mathrm{hold}(C_k, \mathrm{suc}(s))).$$

(7)と(8)で用いられた persistent–property という関係語は、(8)の仮説図式からも読みとれるように、継続傾向を表す関係語である。また、(7)の規定によれば、状態は継続傾向を持つが、出来事は継続傾向を持たない。これは、言語学的意味論におけるアスペクト研究の結果とも一致する考えである（Comrie(1976) 参照）。persistent–property(C_k, s) とは、状況 s において C_k が継続して成り立つ傾向を持つことを表している。この関係語をあえて導入したのは、動的継続傾向の帰属を可能にするためである。[5] また、C_k は状況の集合を指示する語と解釈し（$V(C_k) \subseteq$ [全状況の集合]）、$V(\mathrm{hold}(C_k, s))$ が真になるのは $V(s) \in V(C_k)$ の時とする。

4．狭い意味でのフレーム問題の解決

すでに第2節で述べたように、狭い意味でのフレーム問題が解けるかどうかの最初のテストに相当するものとして、YSP 問題を考えることができる。この節では、ROH の使用により YSP 問題が解けることを示そう。まず、YSP 問題を ROH の枠組みを用いて記述することにする。

(9) YSP 問題の記述

$\mathrm{FYSP} := (7) \cup (9a) \cup (9b) \cup (9c) \cup (9d) \cup (9e)$, $\Delta\mathrm{YSP} := (8) \cup \{(9f), (9g)\}$, とおく。

事実記述

(a) $\{s_1 = \mathrm{suc}(s_0),\ s_2 = \mathrm{suc}(s_1),\ s_3 = \mathrm{suc}(s_2),\ s_4 = \mathrm{suc}(s_3)\}$.

(b) {state(loaded), state(alive), event(load), event(shoot)}.

(c) {hold(non(loaded), s_0), hold(alive, s_0)}.

(d) {hold(load, s_1)}.

(e) {hold(shoot, s_3)}.

仮説図式

(f) ((hold(load, s) ∧ hold(non(loaded), s)) → hold(loaded, suc(s))).

(g) ((hold(shoot, s) ∧ hold(loaded, s) ∧ hold(alive, s)) → hold(non(alive), suc(s))).

(9a) は、状況間の順序について述べ、(9b)は、何が状態であり、何が出来事であるかを表している。(9c), (9d), (9e) は、YSP問題の物語を表現している。(9f) と (9g) は、前提されている因果関係を表現している。(9f) は銃に弾を込めると銃は装填されるということを、(9g) はAが生きており銃が装填されている状況で銃を撃つとAは死ぬということを表している。ここで、次の関係が成り立つことに注意しよう。

(10) (7c)を要素として含む事実言明集合Fの性質

(7c) ∈Fならば、任意の出来事 A_1, ..., A_m と状態 C_1, ..., C_k, ..., C_n について、次の関係が成り立つ。

F ⊢ state(C_k)→∀s((hold(A_1, s)∧...∧hold(A_m, s)∧hold(C_1, s)∧...∧hold(C_k, s)∧...∧hold(C_n, s))→(persistent–property(C_k, s)∧hold(C_k, s))).

(10)は、(7c) から一階の論理を用いて直ちに帰結する。そして、(7c) ∈F_{YSP} なので、(9f) の仮説図式が(8)の C_k に non(loaded) を代入して得られる継続傾向の仮説図式に優先され ((11)の図の[1]から[2]への移行に対応する)、(9g)の仮説図式が alive に関する継続傾向の仮説図式に優先されることがわかる ((11)の図の[3]から[4]への移行に対応する)。特に、後者の事実は、YSP問題の解決に重要な意味を持つ。YSP問題は、Ext_0 (F_{YSP}, Δ_{YSP}) から Ext_4 (F_{YSP}, Δ_{YSP}) までの拡張により記述され、n≧4 ならば、Ext_n (F_{YSP}, Δ_{YSP})＝Ext_4(F_{YSP}, Δ_{YSP}) が成り立つ (中山 (1997a) 参照)。(hold(A_1, s)∧...∧hold(A_m, s)∧hold(C_1, s) ∧ ... ∧hold(C_n, s))を [A_1, ..., A_m, C_1, ..., C_n] (s)と略記すると、(F_{YSP}, Δ_{YSP}) からの帰結は次のように図示できる (出来事を表す表現は、下線により強調されている)。

(11) (F_{YSP}, Δ_{YSP}) からの帰結

[0]⇒[1]⇒[2]⇒[3]⇒[4]という発展が見られる。下線は、出来事であることを表している。

[0]：[non(loaded), alive] (s_0) ∈ Ext_0(F_{YSP}, Δ_{YSP}).

[1]：[non(loaded), alive, <u>load</u>] (s_1) ∈ Ext_1(F_{YSP}, Δ_{YSP}).

[2]：[loaded, alive] (s_2) ∈ Ext_2(F_{YSP}, Δ_{YSP}).

[3]：[loaded, alive, <u>shoot</u>] (s_3) $\in Ext_3(F_{YSP}, \Delta_{YSP})$.
[4]：[loaded, non(alive)] (s_4) $\in Ext_4(F_{YSP}, \Delta_{YSP})$.

(11)に見るように、(F_{YSP}, Δ_{YSP}) からは、銃を向けられた者が状況 s_4 で死亡するという唯一の結論が得られる。これに対し、優先順序が表現できないシステムでは、銃を発砲しても相手が死なない場合も拡張の一つとして認められてしまうことになる。また、[2]から[3]への移行において装填されていた銃が装填されていなくなるという例外も除去できない。我々の枠組みでは、これらの非典型的時間発展は、すべて、仮説の優先に反するので最初から排除されているのである。

今や、(3)で議論された行為の効果をROHで推論できることは明らかである。ROHでは、因果効果を表す図式は仮説図式として表現される。このことに注意すると(3)の問題は次のように記述できる。

(12) 行為の効果を記述する例の記述（(3)参照）
$F_1 := (7) \cup (12a) \cup (12b) \cup (12c) \cup (12d)$, $\Delta_1 := (8) \cup \{(12e), (12f)\}$, とおく。
事実記述
(a) $\{s_1 = suc(s_0),\ s_2 = suc(s_1)\}$.
(b) {state(C_1), state(C_2), state(C_3), state(E_1), event(A_1), event(A_2)}.
(c) {hold(C_1, s_0), hold(C_2, s_0), hold(A_1, s_0), hold(non(C_3), s_0), hold(non(E_1), s_0)}.
(d) {hold(A_2, s_1)].
仮説図式
(e) ((hold(A_1, s) $\wedge$ hold(C_1, s) $\wedge$ hold(non(C_3), s)) $\rightarrow$ hold(C_3, suc(s))).
(f) ((hold(A_2, s) $\wedge$ hold(C_2, s) $\wedge$ hold(C_3, s) $\wedge$ hold(non(E_1), s)) $\rightarrow$ hold(E_1, suc(s))).

(3e)の $\forall s(C_2(s) \rightarrow C_2(suc(s)))$ に相当する内容は、(8)の仮説図式によりすでに述べられているので、ここで特別に考慮する必要はなくなる。また、(12e)によれば、A_1 は C_1 の条件のもとで non(C_3) から C_3 への移行を引き起こし、(12f)に従い、 A_2 は C_2 と C_3 の条件のもとで non(E_1)から E_1 への移行を引き起こすと考えることができる。すると、ROHの推論の結果として次のものが得られる。

(13) 行為の効果を記述する例についてのROHによる推論の結果
[0]⇒[1]⇒[2] という発展が見られる。
[0]：[C_1, C_2, non(C_3), non(E_1), A_1] (s_0) $\in Ext_0(F_1, \Delta_1)$.
[1]：[C_1, C_2, C_3, non(E_1), A_2] (s_1) $\in Ext_1(F_1, \Delta_1)$.
[2]：[C_1, C_2, C_3, E_1] (s_2) $\in Ext_2(F_1, \Delta_1)$.

さらに、第2節で論じられた例外の記述の問題も解決される。 C_2 の継続傾向に対する n 個の例外の考慮も、 Δ_1 を単純に拡張することにより得られるのである。

(14) 例外の考慮((5) 参照)

$\Delta_2 := \Delta_1 \cup \{(14a1), \ldots, (14an)\}$ とおく。

仮説図式

(a1) $((hold(C_2, s) \land hold(Exc_1, s)) \rightarrow hold(non(C_2), suc(s)))$

...

(an) $((hold(C_2, s) \land hold(Exc_n, s)) \rightarrow hold(non(C_2), suc(s)))$.

ここで、$F_1 \vdash (hold(C_2, s) \land hold(Exc_k, s)) \rightarrow (persistent\text{-}property(C_2, s) \land hold(C_2, s))$ が成り立つので、例外を持つ仮説図式は(8)の継続傾向を表す仮説図式に常に優先されることがわかる。つまり、(5a)にあたるようなアド・ホックな規則を導入する必要がなくなるのである。また、同様に、例外の例外に関する仮説図式は例外に関する仮説図式に優先されることを容易に示すことができる。[6]

我々は、この節で、YSP 問題と McCarthy & Hayes (1969) で議論されている例の一般化に関して ROH が解を与えることを示した。松原 (1990) は、狭い意味でのフレーム問題を次のように規定している。「世界のある状態に対してなんらかの働きかけがなされると世界はふつう他の状態に移る。...その二つの状態の間で何が変化し何が変化しないかをどのように (効率的に) 記述すればよいかという問題のことを最初はフレーム問題と呼んでいた」(p. 194f)。この記述の問題としての狭い意味でのフレーム問題は、我々のアプローチにより解かれたと言ってよいであろう。また、この狭い意味でのフレーム問題は、優先順序を何らかの形で考慮した非単調推論の枠組みの提案により、1980年代後半頃からすでに解かれていたと言ってもよいだろう。[7]

5. 因果関係の表現と予測

ROH では、「C という出来事が起こったなら E という状態が生起する」ということを仮説図式により表現できる((15b) 参照)。

(15) 因果的連関の記述

$F_2 := (7) \cup (15a)$, $\Delta_2 := (8) \cup \{(15b)\}$ とおく。

事実記述

(a) $\{event(C), state(E)\}$.

仮説図式

(b) $((hold(C, s) \land hold(non(E), s)) \rightarrow hold(E, suc(s)))$.

このことにより、次のことが言える。

(16) (F_2, Δ_2) からの帰結

F_2' :=F_2∪{hold(non(E), s_0), s_1 = suc(s_0)} とおく。

(a) s_1 でCが起これば、suc(s_1)でEが生起する。

hold(E, suc(s_1)) ∈Ext_1(F_2' ∪{hold(C, s_1)}, Δ_2).

(b) s_1 でCが起こらなければ、suc(s_1)でEは生起しない。

hold(non(E), suc(s_1)) ∈Ext_1(F_2' ∪{hold(non(C), s_1)}, Δ_2).

(16b)の結果は、(8)の継続傾向の仮説図式の適用によるものである。また、(16a)の結果は、(15b)の仮説図式が(8)の継続傾向の仮説図式に優先されるため得られる。(16)に見るように、(F_2, Δ_2)という状態においては、Eの生起はCの生起に依存する。「Cが起これぱEが生起する」という記述は、普通、例外を許すものだと考えられている。因果関係に関わるコンテクストにおいて例外を扱う方法は、すでに第4節で述べたものと同じになる。(15b)に対する例外は、((hold(C, s) ∧ hold(Exc, s) ∧ hold(non(E), s))→ hold(non(E), suc(s)))という仮説図式で表現できる。そして、この仮説図式の方が(15b)より特殊なため、その前件が満たされた時には、この仮説図式が優先されて適用される。例えば、マッチは、普通、擦れば火がつくが、湿ったマッチは擦っても火がつかない。このことは、今の議論で、Cをマッチを擦ること、Eをマッチに火がつくこと、そして、Excをマッチが湿っていることとすれば表現でき、適切な予測をえることができる。また、マッチについて明示的に言及したいなら、関数表現を用いることもできる。

(17) 関数表現を用いた仮説図式の例

仮説図式

(a) ((マッチ(x) ∧ hold(擦る(x), s) ∧ hold(non(火がついている(x)), s))→ hold(火がついている(x), suc(s))).

(b) ((マッチ(x) ∧ hold(湿っている(x), s) ∧ hold(擦る(x), s) ∧ hold(non(火がついている(x)), s))→ hold(non(火がついている(x)), suc(s))).

ここで、「擦る」や「火がついている」や「湿っている」は物から状況の集合への関数と考えることができる。このように、ROHを用いれば、一階の述語論理を用いて因果関係を表現する時に生じる困難(Sosa & Tooley (1993) 参照)を克服することができる。次に、ROHの枠組みで因果連鎖がいかに描かれるかについて触れておこう。今、A_1という行為が遂行され、それが、EV_1, ..., EV_nという出来事を次々に引き起こして、最終的にE_1という結果をもたらしたという場合について考えてみよう。

(18) 因果連鎖の例の記述

F_2 :=(7)∪(18a)∪(18b)∪(18c)∪(18d), Δ_2 :=(8)∪{(18e), (18f).[1], ..., (18f).[n−1], (18g)}とおく。

事実記述

(a) $\{s_1 = suc(s_0),\ s_2 = suc(s_1), \ldots,\ s_n = suc(s_{n-1}), s_{n+1} = suc(s_n)\}$.

(b) $\{state(E_1),\ event(A_1),\ event(EV_1), \ldots,\ event(EV_n)\}$.

(c) $\{hold(non(E_1), s_0)\}$.

(d) $\{hold(A_1, s_1)]$.

仮説図式

(e) $(hold(A_1, s) \rightarrow hold(EV_1, suc(s)))$.

(f). [1] $(hold(EV_1, s) \rightarrow hold(EV_2, suc(s)))$.

...

[n−1] $(hold(EV_{n-1}, s) \rightarrow hold(EV_n, suc(s)))$.

(g) $((hold(EV_n, s) \wedge hold(non(E_1), s)) \rightarrow hold(E_1, suc(s)))$.

(18)のような場合においては、状況 s_1 で行為が遂行された後は、それにより引き起こされた出来事が次の出来事を引き起こすというようにして、最後に効果 E_1 が引き起こされるということが、ROH の推論から明らかになる。

(19) 因果連鎖の例の結果

[0]⇒[1]⇒[2] ⇒...⇒[n+1] ⇒[n+2] という発展が見られる。

[0]: $[non(E_1)](s_0) \in Ext_0(F_2,\ \Delta_2)$.

[1]: $[A_1,\ non(E_1)](s_1) \in Ext_1(F_2,\ \Delta_2)$.

[2]: $[EV_1,\ non(E_1)](s_2) \in Ext_2(F_2,\ \Delta_2)$.

...

[n+1]: $[EV_n,\ non(E_1)](s_{n+1}) \in Ext_{n+1}(F_2,\ \Delta_2)$.

[n+2]: $[E_1](s_{n+2}) \in Ext_{n+2}(F_2,\ \Delta_2)$.

(19)の例は、最も簡単な因果連鎖のタイプを表している。さらに、ある出来事の成立により他の出来事が起こるための条件となっている状態が生成するという段階も含んだ因果連鎖も考えられる。後者のタイプの因果連鎖も、(12)と(18)の記述を混合することにより、ROH の枠組みで適切に表現できる。

6．反事実的条件文と因果関係の受容条件

伊藤(1997)が指摘するように、反事実的条件文の意味の解明に向けての有力なアプローチの一つに Stalnaker により定式化された「ラムジーのテスト」がある。

(20) ラムジーのテスト

「まず、あなたの信念のストックに（仮定的に）前件を加えよ。次に整合性を保つ

ために必要とされる調整を行え（ただし、前件にたいする仮定的信念を除いて）。最後に、その場合に後件が真となるか否かを考察せよ。」(伊藤（1997）p. 285, Stalnaker（1968）p. 102)

ラムジーのテストは、我々の枠組みでは直接用いることができない。それは、ROH が仮説を用いているためである。例えば、（p → q）という仮説が信じられており、q の否定が受け入れられており、整合性を作り出した後、なお q の否定が信じられているということがありうる。この時、我々の枠組みでは、「もし、p ならば q」という主張についてのテストができなくなってしまう。それは、p を受け入れた時、q の否定が受け入れられているために、先の条件文は常に拒否されてしまうからである。また、我々の枠組みでは、調整後の信念状態が一意に定まることを一般的には保証できない。[8)]

以上の二点を考慮すると、ROH の枠組みについては、次のようなテストが適切に思われる。

(21) ROH における条件文のテスト

「もし、p ならば q」という条件文についてその妥当性を確かめるために、まず、あなたの信念のストックから、前件 p と後件 q からの影響力をすべて消すような極小の調整をせよ。そして、そのような調整のどの結果についても、p を加え、そこから q が推論できるかどうかを確かめよ。もし、調整後のどの結果からも q が推論できれば、この条件文は受け入れ可能であり、そうでなければ受け入れ可能ではない。

後に示すように、この調整の結果は必ず整合的になる（命題 P1. (a) 参照)。だから、ラムジーのテストを広く解釈すれば、(21)における調整も「整合性を保つために必要とされる調整」と考えることもできるかもしれない（命題 P1. (b) 参照)。

(F, Δ) に対して p と q からの影響力をすべて消すような極小の調整を、「p と q に関する (F, Δ) の中立化」と呼ぼう。つまり、p と q に関し中立化された拡張は、p も q も ¬p も ¬q も含まないものとする（定義 D2. (a) 参照)。また、この中立化により得られる調整後の信念ストックの全集合を max-SB (F, Δ, p, q) で表そう（定義 D2. (b) 参照)。すると、(21)に従えば、「もし、p ならば、q」が (F, Δ) で受け入れ可能とは、p と q に関する中立化により得られる調整後の信念ストックのどれに p を加えても必ずそこから q が推論できるということになる（定義 D2. (c)参照)。これを厳密に表現すると、定義 D2 のようになる。定義 D1 は、定義 D2 を適切なものにするために必要となる定義である。

定義 D1

一階の論理式の集合 F が与えられている時、次の操作を繰り返して F から構成され

る集合 F* を「Fの標準事実集合」と呼ぶ。

(a) F中のすべての論理結合子→, ≡を論理的に同値な論理式を用いて消去する。即ち、$(p \equiv q)$ は $(p \rightarrow q) \wedge (q \rightarrow p)$ で置き換え、$(p \rightarrow q)$ は $(\neg p \vee q)$ で置き換える。

(b) (a)の操作で得られた論理式集合に含まれるすべての論理式を連言標準形の形に変形する。即ち、$(p_1 \vee \ldots \vee p_m) \wedge \ldots \wedge (q_1 \vee \ldots \vee q_n)$ で、すべての p_k, q_k が原子文または量化文またはそれらの否定となるよう論理的に同値の式を代入して変形する。

(c) このように得られた論理式集合中のすべての $p_1 \wedge \ldots \wedge p_m$ という形の論理式をその集合から取り除きあらたに集合 $\{p_1, \ldots, p_m\}$ との和をとる。

定義 D2

F* を「Fの標準事実集合」とする。また、pとqは、原子文またはその否定、選言文またはその否定、あるいは内部が連言標準形になっている量化文またはその否定とする。

(a) $SB(X, F, \Delta, p, q) \Leftrightarrow [X \subseteq (F^* - \{p, q, \neg p, \neg q\})\ \&\ not(p \in EXT(X, \Delta))\ \&$
$not(q \in EXT(X, \Delta))\ \&\ not(\neg p \in EXT(X, \Delta))\ \&\ not(\neg q \in EXT(X, \Delta))]$.

(b) $max\text{-}SB(F, \Delta, p, q) := \{X \mid SB(X, F, \Delta, p, q)\ \&$
$\forall Y\ [[SB(Y, F, \Delta, p, q)\ \&\ X \neq Y] \Rightarrow not(X \subseteq Y)]\}$.

(c) 「もし、pならば、q」は、(F, Δ) で受け入れ可能 ⇔
$\forall X\ [X \in max\text{-}SB(F, \Delta, p, q) \Rightarrow q \in EXT(X \cup \{p\}, \Delta)]$.

この定義から次の命題が帰結する（付録2参照）。

命題 P1

(a) $X \in max\text{-}SB(F, \Delta, p, q)$ ならば、$X \cup \{p\}$ は無矛盾。

(b) $max\text{-}SB(F, \Delta, p, q)$ が唯一の要素 F' を持つ時、
「もし、pならば、q」は (F, Δ) で受け入れ可能 ⇔ $[q \in EXT(F' \cup \{p\}, \Delta)]$.

(c) $not\ (p \in EXT\ (F, \Delta))\ \&\ not\ (q \in EXT(F, \Delta))\ \&\ not\ (\neg p \in EXT(F, \Delta))\ \&\ not\ (\neg q \in EXT(F, \Delta))$ ならば、

(i) $max\text{-}SB(F, \Delta, p, q) = F$.

(ii) 「もし、pならば、q」は(F, Δ)で受け入れ可能 ⇔ $[q \in EXT(F \cup \{p\}, \Delta)]$.

(c).(ii)に見るように、(F, Δ) がpとqに関してすでに中立化されている場合は、「もし、pならば、q」という文の受容条件は未来について予測をする場合や現在判明していない過去の状況について推測する場合と同じになる。[9)]

条件文の分析を基礎に因果的関係に関する信念を表現することができる。pがqの原因と受け入れられる時には、pが成立しなかったらqは成立しなかったということと

もに、pが成立したのでqが成立したと言える時だと考える。つまり、「pはqの原因の一つである」という文が、「pだからq」という説明と「もし、pでなかったらqでなかっただろう」という反事実的条件文を含意すると考えるのである。

定義 D3

「pはqの原因の一つである」は、(F, Δ) で受け入れ可能

⇔ [p と q は (F, Δ) で事実である] &

[「もし、pならば、q」は、(F, Δ) で受け入れ可能] &

[「もし、¬p ならば、¬q」は、(F, Δ) で受け入れ可能]

⇔ $[\{p, q\} \subseteq F]$ &

$[\forall X\ [X \in \text{max-SB}(F, \Delta, p, q) \Rightarrow [q \in \text{EXT}(X \cup \{p\}, \Delta)$ &

$\neg q \in \text{EXT}(X \cup \{\neg p\}, \Delta)]]$.

定義 D3 に従い、マッチを擦ることがマッチに火がつくことの原因となることを示すことができる。

(22) 因果記述の例

s_0ではマッチ d に火がついておらず、s_1 でこのマッチを擦り、s_2 でマッチに火がついたとする。

(a) $\{s_1 = suc(s_0),\ s_2 = suc(s_1)\}$.

(b) {∀x(state(火がついている(x))), ∀x(event(擦る(x)))}.

(c) {マッチ(d), hold(non(火がついている(d)), s_0)), hold(擦る(d), s_1)}.

(d) {hold(火がついている(d), s_2))}.

$F_3 := (7)^* \cup (22a) \cup (22b) \cup (22c) \cup (22d)$, $\Delta_3 := (8) \cup \{(17a), (17b)\}$ とおく。ただし、$(7)^*$ は (7) の標準事実集合とする。ここで、「hold(擦る(d), s_1) は hold(火がついている(d), s_2) の原因の一つである」という主張が (F_3, Δ_3) で受け入れ可能かどうかを調べることにする。

(e) max-SB(F_3, Δ_3, hold(擦る(d), s_1)), hold(火がついている(d), s_2))

= {F_3− {hold(擦る(d), s_1)), hold(火がついている(d), s_2)}}

ここで、$F_3' := F_3$− {hold(擦る(d), s_1)), hold(火がついている(d), s_2)} とおくと、次の関係が成り立つことを示すことができる。

(f) [{hold(擦る(d), s_1), hold(火がついている(d), s_2)} ⊆ F_3] &

[hold(火がついている(d), s_2) ∈EXT(F_3' ∪ {hold(擦る(d), s_1)}, Δ_3)] &

[hold(non(火がついている(d)), s_2) ∈EXT(F_3' ∪ {hold(non(擦る(d)), s_1)},

Δ_3)].

よって、定義 D3 と (22f) より、次の結論が帰結する

(g) 「hold(擦る(d), s_1) は hold(火がついている(d), s_2) の原因の一つである」

は、(F_3, Δ_3) で受け入れ可能である。

我々の因果理解の分析は、Humeの見解に近いものである。Hume（1748）は、因果関係を規則性と反事実的条件文の二面から考えている：

「原因を、他の対象により後続されるある対象として定義できるだろう。つまり、そこでは、最初の対象に類似したどんな対象も第二の対象に類似した対象により後続される。また、言葉を変えれば、そこでは、もし、最初の対象がなかったとしたなら、第二の対象はけっして存在しなかっただろう。」（Hume（1748）sect. 7）

このように、Humeは、実在論的因果関係の解釈を避け、規則性に基づく因果理解を基に因果性の分析をし、その分析を反事実的条件文の理解と関連づけている。ROHでは、事象Cとそれに後続する事象Eとの典型的連結は((hold(C, s)∧ hold(non(E), s))→hold(E, suc(s)))という仮説図式により表され、因果の規則説を弱めた形で因果的連関が捉えられている。また、定義D3に見るように、「Aという事象がBという事象の原因の一つである」という文は、「もし、Aが起こらなかったらBは起こらなかっただろう」という反事実的条件文を含意していると規定している。つまり、本稿の分析も、因果関係が規則性と反事実的条件文の特徴を含むものであるとしている。

本稿における反事実的条件文の分析は、時間的発展を明示的に表現している点で、Stalnaker（1968），Lewis（1973），Gärdenfors（1988）などの分析と大きく異なっている。YSP問題の議論で見たように時間的発展にそって推論することは、不必要な拡張を除外するのに重要な役割を果たす。ROHでは、時間順序は、後に付け加えればよいような要素ではなく、推論の順序を規定するような根本的なものである。

7．自律的エージェントとフレーム問題

「フレーム問題」について一般的に考察する時、重要な問題を今まで論じてこなかった。それは、現実世界の中に在るということが、どのような処理やどこまでの処理の効率化を要求するかを決定するという問題である。そして、このような問題を考えるのに便利なのが、ロボットのような自律的エージェントという問題設定である。Dennett（1984）も、フレーム問題を説明するにあたって自律的エージェントとしてのロボットの例を用いた。自律的エージェントという視点は、行為の目的という新しい問題を持ち込む。本稿で我々は「狭い意味でのフレーム問題」を世界の因果的理解の問題として考えることを提案した。しかし、自律的エージェントは何をなすべきかを自分で選び出すべき存在者である。彼は、状況に応じて可能な行為のうち自分の目的設定に最も合うものを選び出さねばならない。また、与えられた状況においてどのような目的設定を選択すべきなのかを判断しなければならない。このような自律的エージェントは価値の優先

順序を必要とするだろう。また、ロボットによるサッカー・ゲームなどを可能にするためには、他の自律的エージェントへの態度帰属に相当するものが必要になってくるだろう。このような問題を解くためには、信念を表現する方法だけではなく、願望や意図などの態度を表現し、それらを関連させることが必要になるのは明らかである。Dennett（1984）の考えるような「フレーム問題」は、この問題を解決した時、初めて解けたと言えるだろう。

ま と め

McCarthy & Hayes（1969）の狭い意味でのフレーム問題は、あるエージェントが行為した時の変化を適切に予測するのに必要な記述を表現する時、その記述の量が膨大にふくれあがってしまうという問題だった。これは、Goodman（1953）などでも触れられている問題にも共通する側面を持っている。それは、因果関係を表現し、それを用いて適切に推論するという問題である。その背後には、一階の述語論理を用いて因果理解を表現することの困難さが横たわっている。この問題は、1980年頃から提案された非単調推論の枠組みでは直接解くことができなかった。しかし、1980年代後半から非単調推論の中で特定の仮説やモデルを優先する考えが提案され、狭い意味でのフレーム問題の解決にいたったと言える。それでも、現在、狭い意味でのフレーム問題が解決されたか否かについて意見が分かれるのは、「狭い意味でのフレーム問題」が何を意味しているかについて見解が分かれるであろう。

本稿では、中山(1997a)で提案された順序づけられた仮説を用いての推論 ROH の枠組みを使用して McCarthy & Hayes(1969)のフレーム問題、Hanks & McDermott(1986)のイエール射撃問題の解法を提案した。ROH では、出来事 C の生起と状態 E の生起の間の因果的連関を((hold(C, s)∧ hold(non(E), s))→ hold(E, suc(s)))という仮説図式で表す。そして、これらの仮説図式を活用することにより ROH の枠組みで予測や過去の事象の推定を実行できることを示した。さらに、第6節では、反事実的条件文をも含めた条件文の受容条件を提案し、これに基づき、すでに生起した事象間の因果連関の受容条件を示した。そして、中山(1997a)は、Hempel の二つの説明概念——即ち、演繹・法則的説明と帰納・統計的説明——とが、 ROH により明らかにできることを示唆している。[10] このように、非単調の推論体系 ROH を用いることにより、時間発展する系の記述に関する統一的把握が可能になったのである。

付録1

中山（1997a）からの重要な定義および命題をあげておく。なお、命題の証明は中山

(1997a) に与えられているので省略する。また、定義1と定義3については、中山 (1997a) に対する多少の一般化が施されている。以下の定義において、$\underline{x}$ は自由変項の列を、そして、$\underline{d}$ は定項の列を表すとする。

定義1（事実記述，仮説図式集合，仮説領域）

(1) 以下、等式を含んだ一階の述語論理を論理体系として用いる。任意の無矛盾な閉論理式の集合を「事実記述」と呼び F で表わす。また、$(p(\underline{x})\rightarrow q(\underline{x}))$ という形の自由変項を持つ開論理式の集合を「仮説図式集合」と呼び Δ で表わす。

(2) $\mathrm{Ext}_0(F, \Delta) := \{p \mid F \vdash p\}$ とおく。$\mathrm{Ext}_k(F, \Delta)$ は定義1から定義7までにより再帰的に定義される。

(3) $S_k(F, \Delta) := \{(p(\underline{d})\rightarrow q(\underline{d})) \mid (p(\underline{x})\rightarrow q(\underline{x}))\in\Delta \ \&\ p(\underline{d})\in \mathrm{Ext}_k(F,\Delta)\}$ と定義される文集合 $S_k(F, \Delta)$ を「(F, Δ) に関する k 段階の仮説領域」と呼ぶ。

定義2（信頼順序，仮説構造）

次の三条件を満たす構造 $\langle HS_k(F, \Delta), >\rangle$ を「(F, Δ) に関する第 k 段階の仮説構造」と呼ぶ。

(i) $\cup\{H \mid H\in HS_k(F, \Delta)\} = S_k(F, \Delta)$

(ii) $\forall H1\in HS_k(F, \Delta), \forall H2\in HS_k(F, \Delta)\ (H1\cap H2=\emptyset)$

(iii) $\langle HS_k(F, \Delta), >\rangle$ は半順序構造である。

定義3（信頼順序） $S_k(F, \Delta)$ は (F, Δ) に関する第 k 段階の仮説領域とする（定義1参照）。

(1) $(p(\underline{d})\rightarrow r(\underline{d}))\in S_k(F, \Delta), (q(\underline{d})\rightarrow s(\underline{d}))\in S_k(F, \Delta)$ の時、

$$(p(\underline{d})\rightarrow r(\underline{d}))\sim_k(q(\underline{d})\rightarrow s(\underline{d}))\Leftrightarrow F\vdash \forall x(p(\underline{x})\equiv q(\underline{x}))$$

と $S_k(F, \Delta)$ のすべての要素について $\sim_k$ を定義する。また、$\{q \mid p \sim_k q\}$を「p の同値類」と呼ぶ。

(2) $HS_k(F, \Delta) := \{H \mid [H$ は p の同値類$]\ \&\ [p\in S_k(F, \Delta)]\}$ と定義される $HS_k(F, \Delta)$ を「(F, Δ) に関する第 k 段階の仮説集合領域」と呼ぶ。

(3) $H1\in HS_k(F, \Delta), H2\in HS_k(F, \Delta)$ の時、

$H1>_k H2 \Leftrightarrow [[(p(\underline{x})\rightarrow r(\underline{x}))\in H1]\ \&[(q(\underline{x})\rightarrow s(\underline{x}))\in H2]\ \&[F\vdash\forall\underline{x}(p(\underline{x})\rightarrow q(\underline{x}))]$ を満たす仮説図式 $(p(\underline{x})\rightarrow r(\underline{x}))$ と $(q(\underline{x})\rightarrow s(\underline{x}))$ が存在する$]$

と $HS_k(F, \Delta)$ のすべての要素について $>_k$ を定義する。以下、$\sim_k$, $>_k$ を省略して、単に$\sim$, $>$と書くこともある。

命題1　定義3における$\sim_k$は同値関係、$>_k$は半順序となる。

定義4（極大無矛盾部分集合，優先部分理論）

(1) 無矛盾な文集Aと任意の文集合Hが与えられているとする。この時、Tが

$A \subseteq T$ & $\forall p \in H([T \cup \{p\}$ は無矛盾$] \Rightarrow p \in T)$

という条件を満たすなら、「TはAを基盤にする$A \cup H$の極大無矛盾部分集合である」と言う。

(2) 今、(F, Δ) に関する第k段階の仮説構造 $\langle HS_k(F, \Delta), > \rangle$ が与えられており、$[S = \{H_1, \ldots, H_n\}]$ & $[H_1 > \ldots > H_n]$ という線型性の条件が満たされているとする。この時、Tが次の条件を満たす時、「Tは $\langle HS_k(F, \Delta), > \rangle$ に関する優先部分理論である」と言う（一般に $\langle HS_k(F, \Delta), > \rangle$ に関する優先部分理論は複数存在する）：

(i) $T_0 := Ext_k(F, \Delta)$

(ii) $1 \leq m \leq n$ ならば、T_m は T_{m-1} を基盤にする $T_{m-1} \cup H_m$ の極大無矛盾部分集合である。

(iii) $T := T_n$

定義5（仮説構造の線型化，優先部分理論集合）

(1) $[> \subseteq >^*]$ & $[\forall H1 \in HS_k(F, \Delta), \forall H2 \in HS_k(F, \Delta)(H1 >^* H2$ or $H1 = H2$ or $H2 >^* H1)]$という条件を満たす仮説構造 $\langle HS_k(F, \Delta), >^* \rangle$ を「$\langle HS_k(F, \Delta), > \rangle$ の線型化」と呼ぶ。（$\langle HS_k(F, \Delta), >^* \rangle$ は$>$の順序を保ちつつ、$HS_k(F, \Delta)$の全要素が比較可能となるように順序づけを付け加えたものである。）

(2) $PS_k(F, \Delta) := \{T \mid [\langle HS_k(F, \Delta), >^* \rangle$ は $\langle HS_k(F, \Delta), > \rangle$ の線型化$]$ & $[T$ は $\langle HS_k(F, \Delta), >^* \rangle$ に関する優先部分理論$]\}$ と定義される $PS_k(F, \Delta)$を「(F, Δ)に関する第k段階の優先部分理論集合」と呼ぶ。

定義6（帰結） $PS_k(F, \Delta)$ は (F, Δ) に関する第k段階の優先部分理論集合であるとする。この時、$\forall T \in PS_k(F, \Delta)(T \vdash p)$ が成り立てば、「pは (F, Δ) からの第k段階での強い意味での帰結である」、あるいは、単に「pは (F, Δ) からの第k段階での帰結である」と言う。また、$\exists T \in PS_k(F, \Delta)(T \vdash p)$が成り立てば、「pは$(F, \Delta)$からの第k段階での弱い意味での帰結である」と言う。

定義7 Fは事実記述、Δは仮説図式集合とする。

(i) $Ext_{k+1}(F, \Delta) := \{p \mid \forall T \in PS_k(F, \Delta)(T \vdash p)\}$

(ii) $EXT(F, \Delta) := \cup \{Ext_k(F, \Delta) \mid k \in N\}$

$Ext_k(F, \Delta)$ を「(F, Δ) の第k段階における拡張」、$EXT(F, \Delta)$ を「(F, Δ) の拡張」と呼ぶ。

命題2 $Ext_k(F, \Delta) \subseteq Ext_{k+1}(F, \Delta)$。

命題３　$\mathrm{Ext}_k(F,\ \Delta)=\mathrm{Ext}_{k+1}(F,\ \Delta)$ ならば、$\mathrm{EXT}(F,\ \Delta)=\mathrm{Ext}_k(F,\ \Delta)$。

付録２

命題 P1

(a)　$X\in \text{max-SB}(F,\Delta,\ p,\ q)$ ならば、$X\cup\{p\}$は無矛盾。

(b)　$\text{max-SB}(F,\Delta,\ p,\ q)$ が唯一の要素 F' を持つ時、

「もし、p ならば、q」は $(F,\ \Delta)$ で受け入れ可能 ⇔ $[q\in \mathrm{EXT}(F'\cup\{p\},\Delta)]$.

(c)　$\mathrm{not}(p\in \mathrm{EXT}(F,\Delta))$ & $\mathrm{not}(q\in \mathrm{EXT}(F,\Delta))$ & $\mathrm{not}(\neg p\in \mathrm{EXT}(F,\Delta))$ & $\mathrm{not}(\neg q\in \mathrm{EXT}(F,\Delta))$ ならば、

(i)　$\text{max-SB}(F,\ \Delta,\ p,\ q)=F$.

(ii)　「もし、p ならば、q」は $(F,\ \Delta)$ で受け入れ可能 ⇔ $[q\in \mathrm{EXT}(F\cup\{p\},\Delta)]$.

証明　(a) $X\in \text{max-SB}(F,\ \Delta,\ p,\ q)$ を仮定する。すると、定義 D2より、$\mathrm{not}(p\in \mathrm{EXT}(X,\Delta))$ & $X\subseteq \mathrm{EXT}(X,\ \Delta)$ が成り立つので、X は無矛盾。ここで、$X\cup\{p\}$ は矛盾していると仮定する。すると、$X\vdash \neg p$。これより、$\neg p\in \mathrm{EXT}(X,\ \Delta)$。しかし、これは、$\mathrm{SB}(X,\ \Delta,\ p,\ q)$ の規定に矛盾する。よって、$X\cup\{p\}$ は無矛盾。

(b)と(c)は、定義 D2から直ちに帰結する。

注

1）後続者を表す関数は、ペアノの算術の公理系で表現できる。

2）狭い意味でのフレーム問題が知覚のレベルでも起こることを Pollock（1997）が指摘している。行為者は、瞬間瞬間において世界のごく一部しか知覚していない。この断片的知覚から世界の整合的像を得るには、推論が必要になる。そして、この時、行為者は、何が安定した性質で何が変わりやすい性質であるかを知らねばならない。さらに、安定した性質に関しては、数秒前に知覚されていたものは、今知覚されなくてもそのままの状態にあると仮定されるのである。このことに見るように、我々は狭い意味でのフレーム問題と日常のいたるところで直面している。

3）銃により撃たれた後、A は死んだという解が期待されているということを明らかにするために、例えば、「A は銃の名手により銃で撃たれた」としてもよい。このような書き直しは、YSP 問題の核心に触れるものではなく、問題なく実行できる。

4）優先部分理論は、Brewka（1991）で定義されたものである。

5）動的信念順序の決定については Junker（1997）を参照せよ。

6）1980年代のエキスパート・システムでは、ルールを用いた知識表示が主に用いられ

た。このようなシステムの問題の一つにメインテナンスの問題がある。これに対し、ROH は、新しい仮説図式は単に加えられるだけでよいという長所を持つ。どの仮説図式が優先されるべきかは、ROH により、かってに推論されるのである。

7）松原（1990）は、「膨大な情報を（記述するにしろ処理するにしろ）いかに扱うか」という問題として「一般的フレーム問題」を理解する（p. 221 参照）。彼によれば、非単調推論を用いたフレーム問題の解決案は、単に記述の量を推論の量に転嫁しているにすぎない。しかし、そのようなフレーム問題の解決からも、我々は多くを学ぶことができる。このことを示すことが本稿の目的の一つでもある。

8）Lewis（1973）における Stalnaker（1968）への批判は、調整後の状態が一般に一意に定まらないことに関係している。ただし、Lewis は、可能世界意味論をベースにした条件論理を展開しており、我々のアプローチとは大きく異なっている。これについては、伊藤（1997）の議論が参考になる。

9）中山（1994）でも因果関係と関連した条件文の分析が提案されている。ただし、その時、分析された条件文は「p が起こったとしたなら、その後、（きっと）q が起こるだろう」ということを意味するものであった。これに対し、本稿における条件文の分析は、条件文の受容条件に関するものである。現在、私は、条件文に真理条件を与えうるかについては、懐疑的である。また、実質含意（material implication）$p \rightarrow q$ は、ROH では、$(p \rightarrow q) \in F$ というように表される。つまり、実質含意は、$p \rightarrow q$ が仮説としてではなく事実として受け入れられているということに相当すると解釈される。

10）Tan（1997）は、中山（1997a）と同様に Hempel の説明概念と非単調推論との関係を指摘している。

参考文献

Boden, M. (1990) *The Philosophy of Artificial Intelligence*, Oxford UP.

Brewka, G. (1991) *Nonmonotonic Reasoning : Logical Foundations of Commonsense*, Cambridge UP.

Comrie, B. (1976) *Aspect*, Cambridge UP.

Dennett, D. C. (1984) Cognitive wheels : the frame problem of AI, In : C. Hookway (ed.), Minds, *Machines, and Evolution : Philosophical Studies*, 129–151. Reprinted in Boden (1990), 147–170.

Gärdenfors, P. (1988) *Knowledge in Flux – Modeling the Dynamics of Epistemic States*, MIT.

Goodman (1953) *Fact, Fiction and Forecast*.

Hanks, S. & McDermott, D. (1986) Default reasoning, nonmonotonic logics, and the frame problem. In : *Proceedings of the Fifth National Conference of the American Association for Artificial Intelligence* : 328–333.

Hume, D. (1748) *An Enquiry concerning Human Understanding*.

伊藤邦武（1997）『人間的な合理性の哲学』勁草書房.

Junker, U. (1997) A cumulative–model semantics for dynamic preferences on assumptions, In *IJCAI*–97：162–167.

McCarthy, J. & Hayes, P. J. (1969) Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence, In：*Machine Intelligence* 4：463–502.

松原仁（1990）「一般化フレーム問題の提唱」J. マッカーシー ＋P. J. ヘイズ ＋ 松原仁『人工知能になぜ哲学が必要か』哲学書房 175–245.

中島秀之・松原仁・大澤一郎（1993）「因果関係によるフレーム問題へのアプローチ」『人工知能学会誌』Vol. 8 No. 5：619–627.

中山康雄（1994）「時間と認識－反実在論的世界モデル」『大阪大学人間科学部紀要』20, 185–206.

中山康雄（1996）「仮説推論における信頼順序の自動生成」『1996年度人工知能学会全国大会（第10回）論文集』(127)–(131).

中山康雄（1997a)「仮説推論による常識推論の表現」『大阪大学人間科学部紀要』23, 147–166.

中山康雄（1997b)「仮説を用いた自然な推論」『1 997年度人工知能学会全国大会（第11回）論文集』, 22–25.

Pollock, J. L. (1997) Reasoning about change and persistence： a solution to the frame problem. In：Noûs 31：2：142–169.

Shoham, Y. (1990) Nonmonotonic reasoning and causation, *Cognitive Science*, Vol. 14：213–252.

Sosa, E. &Tooley, M. (1993) Intorduction, In：E. Sosa&M. Tooley(eds.) *Causation*, Oxford UP, 1–32.

Stalnaker, R. (1968) A theory of conditionals, In：N. Rescher(ed.) *Studies in Logical Theory*, Blackwell：98－112.

Tan, Y–H. (1997) Is default logic a reinvention of inductive–statistical reasoning?, *Synthese* 111, No2：357–379.

The Frame Problem and Causal Understanding of the World

Yasuo NAKAYAMA

McCarthy & Hayes (1969) point out that there are difficulties with inferring consequences from an action of an agent. In order that an action has its effect, it requires that certain conditions are satisfied. Suppose that you are convinced that all required conditions are satisfied. In the next second, you will act according to the previous belief, because you think that these conditions are still satisfied. To infer these expectations, we need some axioms for the preservation of believed conditions. The frame problem of McCarthy & Hayes (1969) is how to formulate this preservation of conditions.

Systems of nonmonotonic reasoning proposed in the beginning of the 1980's seemed to solve this frame problem. However, Hanks & McDermott (1986) showed defects of the nonmonotonic reasoning systems. They constructed a small problem called the Yale Shooting Problem, to criticize these systems. What is needed here is a preference of certain solutions. Since the end of the 1980's, several systems of nonmonotonic reasoning have been proposed to overcome these difficulties. They can express preference of certain models or theories and can overcome the difficulties pointed out in Hanks & McDermott (1986). It can be seen that the frame problem of McCarthy & Hayes (1969) has been solved in the current stage.

In this paper, we use a system of nonmonotonic reasoning called reasoning with ordered hypotheses (ROH) defined in Nakayama (1997a). We show, at first, that the frame problem of McCarthy & Hayes (1969) and problems of expressing causal connections are related to the use of first order predicate logic as a representation framework (cf. sect. 2). It is shown, then, how to solve the frame problem within ROH (cf. sect. 4). After that, we discuss a representation method of causal relations and predictions within ROH (cf. sect. 5). Instead of truth conditions, acceptance conditions for conditionals and for the notion of cause are defined in the 6th section. To define acceptance conditions for conditionals, we modify the Ramsey Test. In this modified test, influence of the antecedent and the consequent is removed from the given stock of belief, before examining whether the addition of the antecedent enables inference of the consequent. In the last section, the frame problem of Dennett (1984) is discussed in connection with the problem of an autonomous rational agent. It is pointed out that for solving this problem we need to define a preference relation between intentions.

This paper provides an unified view for nonmonotonic reasoning, conditionals, causal understanding of the world, predictions, and explanations. The concept of cause defined in this paper is similar to the one described in Hume(1748). It would be an interesting future work to apply ROH to contemporary philosophical discussions on causation.