ICOT Technical Report: TR-721

TR-721

アブダクションの原理

井上　克巳

December, 1991

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191～5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

アブダクションの原理

Principles of Abduction

井上 克巳
Katsumi Inoue
(財) 新世代コンピュータ技術開発機構　第5研究室
Fifth Research Laboratory, ICOT
email: inoue@icot.or.jp

1991年11月12日

概要

ある公理集合に対して問い合わせを行ったときに, その問い合わせを満足するために十分な仮説を引き出す推論として, アブダクションが近年注目されている. 本稿ではアブダクションの背景と原理について解説し, 近年の様々な形式化をアプローチ別に分類し, さらに応用について述べる.

1　はじめに

ある性質や観測事象の説明を求めることは多くの知的活動において重要な役割を果たしている. 科学者であり哲学者, 論理学者でもあった Charles Sanders Peirce (1839–1914) [35] は, 説明を求める推論を**アブダクション** (*abduction*, 仮説生成) と名付け, 演繹 (deduction) や帰納 (induction) とは明確に区別した. Peirce が述べたように, アブダクションは世界に関する知識の拡大をもたらす拡張的 (amplicative) 推論である. それゆえ, 単に説明の生成にとどまらず数多くの応用の可能性を持っている. 実際, 人工知能の分野においても近年急速に研究が進んできており, 現在までに数百の論文が発表されている. なお, アブダクションと類似する用語として**仮説推論** (hypothetical reasoning) [24, 20, 14, 10] が人工知能では用いられることがある. 本稿では Peirce の使い方に準じて, 仮説あるいは説明の生成過程をアブダクションと呼ぶ. これに対して仮説推論は, 仮説の生成・選択・利用を含めた総合的な問題解決過程の意味で使われることが多い. ただしアブダクションに仮説の評価や更新までを含める場合や, 仮説推論を仮説生成やまったく別の意味で用いる場合もあり, これらの用語の定義が研究者によって異なっていることは問題点の一つ [10] でもある. 本稿の目的はこのように混沌としたアブダクションの研究動向を, (筆者自身がアブダクションを行うことによっ

て) 統合整理して解説することにある. このためにPeirceによるアブダクションの理論を基盤にして議論を進める.

以下ではアブダクションに関して, 主としてその背景と原理についてできるだけ対象領域に依存しない形で解説する. したがってアブダクションの高速化手法や応用の詳細は割愛する. 第2 章でPeirceによるアブダクションの最も簡潔な形式化について紹介し, 演繹や帰納との違いについて説明する. またアブダクションが提案された背景としてPeirceの認識論を取り上げ, その後の哲学的議論への影響について論じる. 続く第3 章では人工知能で用いられるアブダクションの論理をアプローチ別に分類し, Peirceによる形式化との対応付けを行う. また第4 章ではアブダクションと非単調推論との双方向的な関係について述べる. 第5 章でアブダクションの計算原理とその計算量について考察する. 第6 章ではアブダクションの応用と仮説の選択基準について簡単に述べ, 第7 章でまとめる.

2 パースのアブダクション

2.1 演繹・帰納・アブダクション

アブダクションという用語を最初に用いたのはPeirceであると言われているが, その概念は古くAristotleがPrior Analyticsにおいて三段論法形式で示したものが起源とされる[35, pp.497] [1]. Peirceは彼の研究の初期段階では, 推論の三分法として演繹, 帰納, アブダクションを区別しその違いを指摘した. 彼が好んだ「豆」の例においてアブダクションによる推論をみてみよう:

(大前提)	この袋に入っている豆はすべて白い.
(結論)	これらの豆は白い.
(小前提)	これらの豆はこの袋から取り出された.

これに対して, 演繹は大前提と小前提とから結論を導き, 帰納は小前提と結論とから大前提を求める推論である. 記号を使って表すと, Peirceによるアブダクションの論理は次のように与えられる:

1. ある (驚くべき) 事実として, C が観察されている.
2. しかし, もし A が真であれば, C であることは当然の事柄である.
3. それゆえ, A は真ではないかと考える理由が存在する.

[1] 実際Aristotleは ἀπαγωγή (apagogy [ギリシャ語], abductio [ラテン語];「誘い出す行為」の意味) という用語を使った. またPeirceはアブダクションの意味で, 遡及的推論 (retroduction), 仮説 (Hypothesis), 仮定 (presumption) という用語も使っている.

これを形式化すると，伝統的論理学において後件肯定の虚偽 (*Fallacy of affirming the consequent*) と呼ばれる妥当でない (invalid) 推論:

$$\frac{C \quad A \supset C}{A} \tag{1}$$

となり，その意味でもアブダクションは非演繹的推論である．(1) 式は観測から後向きに仮説に到達していく形式を取っており，人工知能においてアブダクションが使われるのはほぼこの意味に限定されている．ところで，アブダクションおよび帰納による推論結果は提示された仮説である．ともに拡張的推論であるところの帰納とアブダクション[2]との違いはどこにあるのであろうか? Peirce によれば，帰納は観測された事例からそれらの事例が属するクラス全体について一般化を行う推論であり，事例の中に見出される規則性と同様の現象の存在を推論する．これに対しアブダクションでは，観測事象とは違う種類の原因を追及し，事例の中からは直接的に観測できない現象の可能性についても推論する．例えば，内陸部から魚の化石が発見されたときに，そこが過去に海であったという仮説を立てることはアブダクションである．しかしその地方の太古の状態を現実に観測することは不可能であり，観測事実の一般化である帰納からは説明できない．それゆえ，アブダクションは「新しい観念を提供する唯一の推論形態であり，その意味で唯一の綜合的な (synthetic) 推論形態」[35, 段落 777] なのである．

2.2 後期のパースのアブダクション

Peirce のアブダクションの理論は彼の研究の後期段階において，三つの独立した推論形態の一つとして捉えられていた前期のものとは違いを見せている．彼はアブダクションを彼の認識論 [5] あるいは哲学，特に彼が創始者と言われるプラグマティズム [21] (その中でも彼の記号学 [50] に基づいて再構築され，彼が晩年プラグマティシズムと呼んだ哲学) の中核をなす理論として用いた．さらに彼は科学的探求の方法論を考える上で帰納の役割を再考した結果，演繹や帰納とアブダクションは独立に存在するのではなく，アブダクションによって得られた仮説は，その後に続く演繹と (狭義の意味での) 帰納によって検証されるものであると考えた．つまり提示された仮説から演繹により新たな帰結を導き，これらの仮説やその帰結が事実に適合するかどうかをサンプルを集めながら帰納的に検証する．この過程で新たに仮説が提示されることもあり，仮説生成 – 演繹 – 検証というサイクルの形成こそが科学における (伝統的に哲学者が使っていた広義の意味での) 帰納的な探求方法である [46]．しかしながら，アブダクションが (1) 式で示されるとすれば，観測事象 C を説明するような仮説 A はほとんど無数に存在する可能性がある．したがって Peirce の後期におけるアブダクションの中心的議論では，「仮説の提起」と「合理的な仮説の選択」という共に論理の外に位置付けられる要因が扱われることになる．

---

[2] 類推 (analogy) も拡張的推論であるが，アブダクション (または帰納) と演繹の組み合わせにより定式化できるとされている [35, 段落 513]．また現在の機械学習の研究のいくつかは，Peirce のいうアブダクションと帰納の両方に関係していると言える．

まず, いかにしてわれわれは重要な仮説に辿り着くかという点であるが, これは「自然の光」, 「発想」, 「洞察」という言葉で語られている. つまり最初に仮説が提示されるのは突然のひらめきによるものとされ, (1) 式の論理形式を越えている. Einstein も認めるように, 科学における重大な発見は単なる実験の繰り返しによる (狭義の意味での) 帰納的な過程で経験的に生まれるのではなく, このような神秘的ともいえるアブダクティブな天啓による. アブダクションにおけるこの重要な問題は人工知能ではほとんど扱われていない. この点に関しては第 7 章で再度取り上げる.

さらに, 仮説がたとえ洞察により提起できたとしても, いく通りも考えられる可能性がある. そこで Peirce は仮説の中から合理的なものを選択するいくつかの基準を考察した. この**仮説選択**の問題は (1) 式による仮説生成とは一応独立した問題ではあるが, 生成する仮説の数を制限するためにはアブダクションにおいても考慮されなければならない. 最小限の条件としては, 上で述べたように仮説は後に続く演繹や帰納による検証可能性を有していなければならない点が挙げられる. しかし探求のプラグマティックな方法論としてはこれだけでは十分とは言えない. 合理性の基準には費用, 価値, 効果といった経済的側面が関わる [46, 21]. 例えば基準の一つとして **Occam の剃刀**があるが, これは最も単純な理論 (この場合仮説) を優先するものである. 単純さの基準は量のみならず質にも関係するとされており, 単に最も少ない数の仮説で説明できるものが最良であるとは限らない. このような経済性は心理的側面を持つために前の仮説発見の過程と同時に起こるのである.

2.3 ポパーとヘンペル

それでは Peirce のアブダクションは, ときおり指摘されるように, 前期と後期で本質的に異なっているのであろうか? この問いに対する答としては, 前期の (1) 式で表現される部分と後期の仮説の発見・選択の部分は, それぞれアブダクションの論理と論理外の側面を表す相補的なものであるということになる. 重要なことは, いかに仮説の発見が困難であっても, 一旦得られた仮説は事象を演繹的に説明するため (1) 式を満たす. したがって, Peirce のアブダクションによる推論結果は観測事象を**仮説演繹的** (*hypothetico-deductive*) な方法で説明する[3]. このような性質を持つ Peirce のアブダクションの理論は Popper [41] の科学方法論の先駆的研究であることが今日では認められている. さらに Hempel [12] が自然科学における説明の役割を唱えた中で, **演繹法則的** (*deductive-nomological*) 説明と名付けたものも仮説演繹的説明であり, Peirce の理論がやはりその先駆となっている. Hempel の演繹法則的説明とは「その結論が説明されるもの (explanandum) であり, その前提の集合 — 説明するもの (explanans)— が一般的法則と特殊的事実からなるところの演繹的な論証」[12, pp.51] である. 実際この Popper や Hempel らの理論形成 (theory formation) の概念は, Poole, Goebel

[3] ここでアブダクションによる仮説が演繹を通じて事象を説明することとアブダクションが非演繹的推論であることは矛盾していないことに注意されたい. アブダクションは拡張的推論であり, その結果得られる仮説はあくまで蓋然的な (plausible) ものだからである.

らの Theorist [38, 37] の哲学的背景として参照されている.

ところで, アブダクションを一般に説明の生成と捉えたときに, 必ずしも演繹法則的説明の妥当性に対して合意が得られているわけではない. 人工知能においても McDermott [30] はこれを全面的に否定し, 演繹法則的説明は必要でも十分でもないと主張している. これに対する反論は Poole ら Theorist 派や Hayes ら論理主義者から数多く出ているが, 彼の主張は演繹が中心的役割を果たさない (つまり論理外の思考が働く) 部分では演繹法則的説明は機能しないと解釈するのが自然であろう. つまり Peirce や Hempel が科学方法論において論じた説明の演繹法則的性質が, McDermott が指摘したような日常生活における説明においては必ずしも成り立たない. また彼の批判はアブダクションではなく, 演繹のみを絶対視する姿勢に向けられているものである. これは Peirce が後期のアブダクションの理論で論じた論理外の情報の重要性と対応している.

3 アブダクションの論理

アブダクションの中の仮説演繹的性質は, 演繹推論の機械化が可能になった現在, 演繹に基づいたアブダクションの論理の確立と計算手続きの実現を可能にした. 本章では Peirce のアブダクションと人工知能における三種類のアブダクションの論理 (説明の定義) を対比する. これらの論理のそれぞれでは, 仮説が観測を説明するための条件として, 無矛盾性, 因果関係, 認識状態が挙げられているが, いずれのアプローチにおいても Peirce による (1) 式が基礎となっている. なお特定の計算方法に依存したアブダクションの形式化は第 5 章で取り上げ, 論理外の仮説選択の基準 (良い説明の定義) については第 6 章で扱う.

3.1 一階述語論理上でのアブダクション

人工知能において最初に Peirce のアブダクションの機械化を行ったのは Pople [39] であり, 一階述語論理の定理証明技法を用いて計算できることが示された. その後一階述語論理上の演繹をベースにしたアブダクションに関する定式化や計算方法がこれまでに数多く提案されている [4, 38, 9, 45, 49, 16, 7]. これらの多くにおいては, 概して次の共通する仮定が用いられている. すなわち, 世界に関する知識は**問題固有の公理** (*proper axioms*) 集合として, 一階述語論理式の集合で表されるものとする. この公理集合を以下 Σ で表し, **事実** (*facts*) 集合と呼ぶ. このとき, (1) 式に現れる 2 番目の式 (大前提, $A \supset C$) は, Σ 内の公理として, あるいは Σ からの演繹によって得られるもの ($\Sigma \models A \supset C$) と考えられる. また, C を説明する A は一般には必ず成立するとわかっているわけではなく, Σ を含む言語のあるサブセット (**仮説** (*hypotheses*) 集合と呼ばれる) から構成されると考える. さらに, 仮説 A の妥当性を検証するために十分な知識が Σ に含まれているとすると, 仮説の検証は A が Σ と**無矛盾** (*consistent*) であるという条件に置き換えられる. これらの仮定を考慮すると, Peirce のアブダクションを次の Poole らによる **Theorist** [38, 36, 37] の定義によって理解することができる.

事実集合 Σ, 仮説集合 $\mathcal{H}$, および閉論理式 G が与えられたとき, 論理式の集合 E が G の $\Sigma,\mathcal{H}$ からの説明 (*explanation*) であるとは,

1. $\Sigma \cup E \models G$,

2. $\Sigma \cup E$ が無矛盾である,

3. E の中の各式は $\mathcal{H}$ の要素である,

を満たすことをいう[4]. また, G の説明 E が極小 (*minimal*) であるとは, E のいかなる真部分集合 E' も $\Sigma \cup E' \models G$ を満足しないことをいう.

上の定義を Peirce の理論と比べると, 仮説を発見する部分がなく $\mathcal{H}$ として問題に与えられていること, 事実集合 Σ が仮説の無矛盾性を検証するために十分に記述されており帰納的な側面が不要であること, および極小の仮説集合を優先することで量的な基準でのみ Occam の剃刀が表されること, の三点において簡略化がなされており, アブダクションの中で論理によって計算できる部分をカバーしている.

ところで, Theorist の枠組では, 説明に用いられる仮説集合では上のように任意の論理式を許している. しかしながら, これらの仮説を表す式はすべてアトムの集合で表現することができる. すなわち, $\mathcal{H}$ に含まれるすべての論理式 $F(\mathbf{x})$ ($\mathbf{x} = x_1, \ldots, x_n$ は論理式中に現れる自由変数の組) に対して, $\Sigma,\mathcal{H}$ に含まれないアトム δ_F で F を名前付けし,

$$\begin{aligned}\mathcal{H}' &= \{\, \delta_F(\mathbf{x}) \mid F(\mathbf{x}) \in \mathcal{H} \,\} \\ \Sigma' &= \Sigma \cup \{\, \forall \mathbf{x}\, (\, \delta_F(\mathbf{x}) \supset F(\mathbf{x})\,) \mid F(\mathbf{x}) \in \mathcal{H} \,\}\end{aligned}$$

とするとき, G の $\Sigma,\mathcal{H}$ からの説明は, G の $\Sigma',\mathcal{H}'$ からの説明と 1 対 1 対応が付く [36]. このように仮説をアトム [9, 49] あるいはリテラル [39, 4, 16] に制限することにより計算手続きが簡素化されるため, ほとんどのシステムはいずれかの制限を採用している.

3.2 因果関係

前節における仮説 A とそれらが説明する観測事象 C とは単純に含意 ($\supset$) で結ばれているだけであるが, 原因と結果の関係にあると考えることが自然な場合がある [2]. 人工知能における説明生成のいくつかの定式化 [40, 42, 22, 34] では, アブダクションは結果から原因を求める推論であるとされる. このアプローチは特に診断と結び付いたアブダクションのためのエキスパートシステムに見られ, やはり Pople らによる INTERNIST [40] に端を発している. これらは論理を基盤にしているというよりは, 確率統計に基づいた証拠の収集あるいはグラフ理論的アプローチであるが, 最近では論理的アプローチとの対応も付けられている [44, 1].

[4] Theorist における定義においては, 説明は基礎式 (ground formula) の集合に限定されている. また Hempel の演繹法則的説明の定義に準じて, $\Sigma \cup E$ を説明としているものもある [36, 37] が, ここでは, オリジナル [38] および Goebel [10] の使用法に従って E を説明と呼ぶ.

Bylander ら [1] による定義では，アブダクションは四つ組 $\langle \mathcal{D}, \mathcal{H}, e, pl \rangle$ で表され，

1. $\mathcal{D}$ は説明される事象の集合，

2. $\mathcal{H}$ は仮説の集合，

3. e は $2^{\mathcal{H}}$ から $2^{\mathcal{D}}$ への関数 ($H \subseteq \mathcal{H}$ は $e(H)$ を説明する)，

4. pl は $2^{\mathcal{H}}$ からある半順序集合への関数 ($H \subseteq \mathcal{H}$ はもっともらしさ $pl(H)$ を持つ)，

を表す．$H \subseteq \mathcal{H}$ が説明であるとは，$e(H) = \mathcal{D}$ かついかなる H の真部分集合 H' も $e(H) \subseteq e(H')$ を満足しないことをいう．さらに，説明 H が**最良** (*best*) であるとは，他のいかなる説明 H' も $pl(H') > pl(H)$ を満たさないことをいう．

この定義と 3.1 節の定義との大きな違いは背景知識 Σ の存在に関する点にある．すなわち，Peirce による (1) 式の大前提 $A \supset C$ が上の定義では関数 e として公理として直接与えられている．これは [42, 22] においては因果関係として陽に表現されており，もはや演繹法則的説明によらなくても与えられる．ただし [1] によれば e はある公理集合から論理的に帰結される関係や無矛盾性を満たす関係であってもよく，その場合は因果関係に限定されない．また，ここでも Occam の剃刀が量的に表現されており，説明が観測事象の**極小集合被覆** (*minimal set cover*) として定義されている．さらに仮説の極小性に加えて，最良の説明には何らかの順位付けがメタ的に表されている．

3.3 知識あるいは信念

Levesque [25] は前の 2 節のアプローチを一般化する形で**知識レベル** (*knowledge-level*) のアブダクションを提案している．これは，問題固有の公理の意味は変えずに，信念に対する解釈の仕方を変えることによって異なる種類 (タイプ) の信念を扱うものである．いま，ある認識状態 (epistemic state) ε において α が λ なるタイプの下での信念であるときに $\varepsilon \models \mathbf{B}_\lambda \alpha$ と書く．このとき，α が β を ε に関してタイプ λ で**説明する**とは，

$$\varepsilon \models [\mathbf{B}_\lambda(\alpha \supset \beta) \wedge \neg \mathbf{B}_\lambda \neg \alpha], \tag{2}$$

が成立することをいう．すなわち，$\alpha \supset \beta$ が信じられており，$\neg\alpha$ が信じられていなければ α は β を説明する．ここでは省略するが，やはり Occam の剃刀が量的に導入され説明の極小性が定義されている．

まずこの定義が 3.1 節の定義の一般化になっていることを見てみよう．タイプ $\mathbf{I}$ で表される信念を**潜在的** (*implicit*) 信念と呼び，公理集合 Σ で表現される認識状態 ε との関係を

$$\varepsilon \models \mathbf{B_I}\alpha \Leftrightarrow \Sigma \models \alpha$$

で定義する．このとき (2) 式は

$$\Sigma \models \alpha \supset \beta \quad かつ \quad \Sigma \not\models \neg\alpha$$

となり，仮説集合を言語全体としたときの Theorist の説明の定義と同値になる．

次に [25] では具体的に述べられていないが，3.2節の定義とは次のように関係する．いま，タイプ E で表される明示的 (*explicit*) 信念と公理集合 Σ で表現される認識状態 ε との関係を，$\varepsilon \models \mathbf{B}_{\mathrm{E}}\alpha$ であれば，またそのときに限り，α はトートロジーであるか Σ の中に α と同値である式が存在する，と定義する．このとき (2) 式は，(a) $\alpha \supset \beta$ がトートロジーであるか Σ の中に $\alpha \supset \beta$ と同値な式が公理として含まれており，(b) $\neg\alpha$ がトートロジーでなく Σ の中に $\neg\alpha$ と同値な公理が存在しない，となる．ここでトートロジーの場合を除くと，明示的な信念によるアブダクションでは仮説と観測事象との関係が Σ の公理として陽に記述されているものだけを求め，Σ からの演繹の連鎖を行わない．すなわち，前節で因果関係としてリストアップされている場合はこの定義の一例となる．

4 アブダクションと非単調推論

3.1 節で論理的に定義されたアブダクションについて，本節ではその性質を非単調推論との関係を論じることにより調べてみよう．アブダクションが拡張的推論であるということは，その帰結が蓋然的であるために，新しい事実が付け加えられたときに以前の推論結果が成立しない可能性がある．したがって推論は非単調 (*nonmonotonic*) である．アブダクションにおける極小の説明は，説明の無矛盾性を仮定しない場合でも，新しい事実の付加によってより単純な説明が見つかる可能性があるため非単調性を持つ．また，アブダクションにおいて得られた説明が無矛盾性を満たすことを要請するならば，ある論理式が付け加えられるともはや無矛盾性を満たさなくなる可能性があるために，説明は極小でなくても非単調性を持つ．

ところで非単調推論が人工知能において提案された背景には，われわれの常識的思考が世界に関する不完全な知識の下での蓋然的な推論をともなうという事実を定式化するという動機があった．これに対して Peirce のアブダクションは，主として科学的探求の方法として演繹法則的説明を行うものであって，日常的推論のための道具とはしていない[5]．しかしながら常識推論も拡張的である以上，その機械化においてはアブダクションと何らかの関係が付くことが予想される．

以上の議論は，アブダクションと非単調推論との双方向的な関係として集約できる．つまり，アブダクションがある種の非単調論理（とくにデフォルト推論のために提案されたデフォルト論理 [43]）を用いて定式化でき，いくつかの非単調推論の定式化（とくに常識推論のために提案された極小限定 [29]）がアブダクションを用いて計算できる．すなわち，前者の関係からはアブダクションの非単調性が裏付けられ，後者の関係からはアブダクションが科学方法論における説明の生成のみならず，常識推論にも使えることが言える．以下簡単にこれらの関係を述べるが，より詳細で形式的な議論については別の解説 [18] を参照されたい．

[5] しかしながら日常的推論については Peirce によって，単純帰納 (crude induction) と名付けられた，反証が見つからない限り経験に基づいた文が全称限量された規則として採用されるような一般化の手法として語られており [46]，現在の常識推論の研究に通じる概念がすでに言及されている．

4.1 デフォルト論理との関係

Reiter の**デフォルト理論** (*default theory*) [43] は (D, W) で表され, W は一階述語論理で表される公理集合であり, D は次に定義されるデフォルトの集合である. いま $\alpha(\mathbf{x}), \beta_1(\mathbf{x}), \ldots, \beta_m(\mathbf{x})$, $\gamma(\mathbf{x})$ を自由変数の組 $\mathbf{x}$ を持つ一階述語論理式とするとき, **デフォルト** (*default*) とは次の形の推論規則のことである:

$$\frac{\alpha(\mathbf{x})\ :\mathsf{M}\ \beta_1(\mathbf{x}), \ldots, \beta_m(\mathbf{x})}{\gamma(\mathbf{x})}, \tag{3}$$

デフォルト (3) は, 任意の基礎項 (ground term) の組 $\mathbf{t}$ に対し,「もし $\alpha(\mathbf{t})$ が成立しており, $\beta_1(\mathbf{t}), \ldots, \beta_m(\mathbf{t})$ が矛盾しなければ, $\gamma(\mathbf{t})$ が成立する」と解釈される. デフォルトの適用においては各 $\beta_i(\mathbf{t})$ の無矛盾性が要請されており, **拡張** (*extension*) と呼ばれるデフォルト理論の定理の集合において $\neg\beta_i(\mathbf{t})$ が含まれないことがその条件となる. ここでデフォルトが $\alpha = true$ のとき, **無前提** (*prerequisite-free*) と呼ぶことにする. またデフォルトにおいて $m = 1$ でありしかも $\beta_1 = \gamma$ であるとき, **正規** (*normal*) であるといい, 正規でないデフォルトを非正規 (*nonnormal*) デフォルトという. **正規デフォルト理論**はデフォルトがすべて正規であるデフォルト理論である. このとき, 無前提正規デフォルト理論 (D, W) の拡張 X は, 以下の条件を満たす最小の論理式の集合と等しい:

1. $W \subseteq X$,
2. $Th(X) = X$, ここに $Th(X)$ は X の論理的帰結の集合を表す,
3. D の任意の無前提正規デフォルト : $\mathsf{M}\,\gamma(\mathbf{x})/\gamma(\mathbf{x})$ の任意の基礎例 (ground instance) に対して, もし $\neg\gamma(\mathbf{t}) \notin X$ ならば, $\gamma(\mathbf{t}) \in X$ である.

正規デフォルト理論に対しては必ず拡張が存在することが保証されるが, 一般に拡張は一つに定まるとは限らない. デフォルト論理においては, それぞれの拡張は, デフォルト推論を行った結果としての一つの可能な信念の集合を意味する.

さて, 3.1 節におけるアブダクションにおいて事実集合 Σ と仮説集合 $\mathcal{H}$ が与えられたとき,

$$D_{\mathcal{H}} = \left\{ \left. \frac{:\mathsf{M}\ w(\mathbf{x})}{w(\mathbf{x})} \ \right| \ w(\mathbf{x}) \in \mathcal{H} \right\}$$

とおき, 無前提正規デフォルト理論 $(D_{\mathcal{H}}, \Sigma)$ を考えてみよう. このとき次が成立する.

定理 4.1 [36] 閉論理式 G が $\Sigma, \mathcal{H}$ からの説明を持てば, かつそのときに限り, G は正規デフォルト理論 $(D_{\mathcal{H}}, \Sigma)$ のある拡張に含まれる.

この定理は三つの点に関して有用である. まず, 説明の存在が拡張と結び付いているため, アブダクションによる仮説演繹的説明が一つの可能な信念と対応することを裏付ける[6]. 次

[6] ただしこの事実から, 仮説が常にデフォルトであると解釈することはできない. 設計 [9] への応用のように, ある目標を達成するために可能な仮説を加えて説明を構成する過程はデフォルト推論ではない. デフォルト推

に，正規デフォルト理論が持つ種々の非単調な性質がそのままアブダクションで成立し，特にアブダクションの計算方法が，Reiter の**トップダウン・デフォルト証明** [43] (5.1 節を参照) によって与えられることが帰結される．実際，3.1 節で示した論理に基づくアブダクションの計算手続きの多く [4, 9, 38, 49] はトップダウン・デフォルト証明の変形である．

三番目の効果は Poole [36] が示したように，アブダクションの枠組がデフォルト推論に対しても使えることにある．すなわち，もし仮説集合 $\mathcal{H}$ が典型的な性質を導く規則を表しているならば，ある式 G がデフォルト推論によって導かれることを示すためには，G の説明が存在することを示せばよい．

ところで Poole [36] は Theorist の枠組の上で，Reiter の**非正規デフォルト理論**についても摸擬を試みている．また，非正規デフォルト理論と関係が深い論理プログラミングの形式については，Eshgi と Kowalski [8] が非単調な効果を持つ **negation as failure** を計算するためにアブダクションの枠組を用いたトップダウン手続きを提案している[7]．なお 3.1 節ではアブダクションとして事実集合 Σ，仮説集合 $\mathcal{H}$ ともに一階述語論理で表されることを仮定していたが，最近ではこの枠組自体を一階述語論理以外の言語 (特に非単調な論理プログラム) で表現する試み [23, 17] も行われている．

4.2 極小限定との関係

極小限定 (*circumscription* [29, 26]) は，古典論理の枠内で非単調推論を実現しようとするアプローチの代表的なものであり，「ある性質を満たすものは，まさに与えられた問題固有の公理からそれを満たさなければならないことが結論付けられるものだけに限定する」という考えを定式化したものである．極小限定は，Lifschitz [26] による定義では，問題固有の公理を一階述語論理式の集合 Σ で表したとき，Σ に上記の考えを表現した二階式の公理を加えて拡張した理論 $Circum(\Sigma; P; Z)$ として与えられる．ここで，P と Z は Σ の中に現れる述語記号の組を表し，P は「限定しようとするある性質」を表す**極小化される**述語の組を表し，P の極小化にともなって述語の定義を変化させることができる**可変**述語の組が Z で表される．また，P と Z 以外の残りの**固定される**述語の組を Q で表すことにする．このとき極小限定のモデル論 [26] により，$Circum(\Sigma; P; Z) \models G$ であれば，またそのときに限り，Σ のすべての**極小モデル**が G を満足する．ここに Σ のモデル M が極小であるとは，Σ の他のいかなるモデル M' に対しても，M と M' は Q からの述語の解釈が異なるか，M における P のすべての述語の外延が M' における外延の部分集合となることをいう．

[11] に基づいて極小限定とアブダクションの関係を示そう．以下では，Σ を関数定数を含まず，個体定数の数が有限であるような言語の上での一階述語論理式の集合とする．また Σ

論と説明生成の違いは Poole [37] を参照されたい．また診断への応用においては，デフォルト的な解釈と 3.2 節のようなアブダクションによるアプローチが，完備化 (completion) を通して等価になることが Reiter [44] によって示されている．

[7] しかし実際には，これらのトップダウン手続きで非正規デフォルト理論における証明を局所的に行うことは不可能であり [43]，何らかのボトムアップ計算を導入する必要があることがわかっている．

は等号に関する公理を含むものとし，さらに領域閉包仮説 (DCA) と単一名仮説 (UNA) を仮定する．これらの制限は非常に強く命題理論と等価になるが，データベースにおいてはしばしば用いられる．いま，R を述語の組とするとき，R^+ (R^-) により R のすべての正の (負の) 基礎式の集合を表すことにする．このとき，アブダクションにより説明を求めるときの仮説集合を次のようにする：

$$\mathcal{H}_{circ} = P^- \cup Q^+ \cup Q^- .$$

つまり直感的には，極小化したい述語の具対例の否定を仮説として用い，固定される述語は各基礎例について正負両リテラルを仮定可能とすることで定義を変えない．

このような条件の下では，ある式 G が正規デフォルト理論

$$\left(\left\{ \left. \frac{:\mathsf{M}\, w}{w} \,\right|\, w \in \mathcal{H}_{circ} \right\},\ \Sigma \right)$$

のある拡張に含まれることと，G を満足する Σ の極小モデルが存在することが同値であることが知られている．定理 4.1 により，式 G が $\Sigma, \mathcal{H}_{circ}$ からの説明を持つことと G を満足する Σ の極小モデルが存在することが同値となる．ところが極小限定に対してはすべての極小モデルで満足されることを示さなければならない．これは次の定理で与えられる．

定理 4.2 [18] $Circum(\Sigma; P; Z) \models G$ であれば，またそのときに限り，G の $\Sigma, \mathcal{H}_{circ}$ からの説明 $K_1, \ldots, K_n$ $(n \geq 1)$ が存在して，$\neg(K_1 \vee \ldots \vee K_n)$ が $\Sigma, \mathcal{H}_{circ}$ からの説明を持たない．

定理 4.2 は G が極小限定における定理であるかどうかを調べる計算が，アブダクションの計算に還元できることを示す．つまり，いくつかの説明の論理和を取ることによって，これらの合成された説明がすべての極小モデルによって満足されるかどうかを，その否定が説明されないことを確認することにより行っている．このように，まず説明を生成し次に説明の組み合わせが論駁されないかどうかを求める計算は，極小限定のみならず，説明に基づく論証 (argument) システム [37] や，閉世界仮説のさまざまな変形の計算に用いられる．また上の計算に基づいて，Helft ら [11] は与えられた質問が存在限量された変数を含むときにその解代入を答えるための方法を提案している．

5 アブダクションの計算

本章では，3.1 節で示した命題論理あるいは一階述語論理に基づくアブダクションを計算するために，**融合原理** (*resolution principle*) に基づく定理証明技法について説明する．以下では，言語中に現れるリテラルの集合を $\mathcal{L}$ で表し，仮説集合 $\mathcal{H}$ を $\mathcal{L}$ の部分集合とする．また，$\mathcal{H}$ の要素の部分集合で与えられる説明をそれらの要素の論理積と同一視する．

5.1 結論発見問題としてのアブダクション

4.1 節で述べたように，[9, 38] など融合原理に基づくアブダクションの計算手続きの多くは Reiter のトップダウン・デフォルト証明の変形となっている．この原理を以下では，[16]

に基づいて少し別の角度から説明する. まず 3.1 節で与えたアブダクションの問題が, 結論発見問題 (*consequence-finding problem*) と呼ばれる, 与えられた公理集合 Σ の定理を求める問題で表されることを示そう. いま, $G_1, \ldots, G_n$ を観察されている事象とし, すべてリテラルであるとする. これらすべての観察事象 $G = G_1 \wedge \ldots \wedge G_n$ を節で表される事実集合 Σ および基礎リテラルの集合である仮説集合 $\mathcal{H} = \{H_1, \ldots, H_m\}$ から説明したい. G の任意の説明を $E = E_1 \wedge \ldots \wedge E_k$ とすると定義により以下が成立する:

1. $\Sigma \cup \{ E_1 \wedge \ldots \wedge E_k \} \models G_1 \wedge \ldots \wedge G_n$,
2. $\Sigma \cup \{ E_1 \wedge \ldots \wedge E_k \}$ は無矛盾である ,
3. 各 E_i は $\mathcal{H} = \{H_1, \ldots, H_m\}$ の要素である .

これらの式は次で書き換えられる:

1'. $\Sigma \cup \{ \neg G_1 \vee \ldots \vee \neg G_n \} \models \neg E_1 \vee \ldots \vee \neg E_k$,
2'. $\Sigma \not\models \neg E_1 \vee \ldots \vee \neg E_k$,
3'. 各 $\neg E_i$ は $\overline{\mathcal{H}} = \{\neg H_1, \ldots, \neg H_m\}$ の要素である .

$1'$ より, 節で表される $\neg G$ を節集合 Σ に加えて帰結される節は, G の $\Sigma, \mathcal{H}$ からの説明の否定であり, その計算を節集合上の演繹で行える. この節は $2'$ により Σ の帰結であってはならず, しかも $3'$ によりすべてのリテラルが $\overline{\mathcal{H}}$ に属していなければならない. また E が $\Sigma, \mathcal{H}$ からの極小の説明であるためには, $\neg E$ は $\Sigma \cup \{\neg G\}$ の極小の定理でなければならない. したがってアブダクションの問題は, $\overline{\mathcal{H}}$ のみから構成される節で Σ の定理ではないような, $\Sigma \cup \{\neg G\}$ の極小の定理を発見する問題に帰着される.

上の問題は次のように形式化できる. 節 C が節 D を**包摂する** (*subsume*) とは, $C\theta \subseteq D$ となる代入 θ が存在し C が D よりもリテラルを多く含まないことをいう. いま, $\mathcal{P} \subseteq \mathcal{L}$ をあるリテラルの集合とし, $Th(\Sigma)$ の中で, そのすべてのリテラルが $\mathcal{P}$ の要素である節の集合を $Th_{\mathcal{P}}(\Sigma)$ で表す. このとき, Σ の $\mathcal{P}$ に関する**特徴節** (*characteristic clauses*) の集合を

$$Carc(\Sigma, \mathcal{P}) = \mu\, Th_{\mathcal{P}}(\Sigma)$$

で定義する. ここに μT は T を節の集合とするとき, T の中でそれと同値ではない他の T の要素によって包摂されない節の集合を意味する. 特に言語が命題論理であるときは, $Carc(\Sigma, \mathcal{L})$ は命題節集合 Σ の定理の中で極小の節 (Σ の **prime implicate** [45, 15] と呼ばれる) の集合を表す.

次に, Σ にある式 F が加わったときに, この式の追加が原因となって新たに導かれる極小の定理集合を考える. F の $\Sigma, \mathcal{P}$ に関する**新特徴節** (*new characteristic clauses*) の集合を特徴節集合の差分

$$Newcarc(\Sigma, F, \mathcal{P}) = Carc(\Sigma \cup \{F\}, \mathcal{P}) - Carc(\Sigma, \mathcal{P})$$

で定義する. さらに, T を節の集合とするとき, T 中の各節の否定を取ることにより形成される式の集合を

$$\overline{T} = \{ \neg C \mid C \in T \}$$

と書くことにすると，上の議論からアブダクションは次のように特徴付けられる．

定理 5.1 [16] 事実集合を Σ, 仮説集合を $\mathcal{H} \subseteq \mathcal{L}$ とし，生成領域を $\mathcal{P} = \overline{\mathcal{H}}$ とおく．式 G の $\Sigma, \mathcal{H}$ からのすべての極小説明の集合は次式に等しい：

$$\overline{Newcarc(\Sigma, \neg G, \mathcal{P})}.$$

定理 5.1 において結論発見の計算を用いることにより，得られた説明の中に変数付きの仮説を含むことができる．このとき $\Sigma \cup \{\neg G\}$ の節形式がスコーレム関数を含んでいれば，その帰結も持つ可能性がある．その場合帰結の否定から全称限量された一階述語論理式で表される説明を得るためには，**逆スコーレム化** (*reverse Skolemization*) アルゴリズム [4] が必要となる．例えば，新特徴節として $\neg P(x, \varphi(x), u, \psi(u))$ (φ, ψ はスコーレム関数) が得られたとき，これに逆スコーレム化を施すことにより，$\exists x \forall y \exists u \forall v\, P(x, y, u, v)$ と $\exists u \forall v \exists x \forall y\, P(x, y, u, v)$ の二つの説明を得る．

新特徴節を計算するために [16] では，**Skip** と呼ぶ操作を順序付き線形融合 (*ordered linear resolution*) に追加した **SOL 融合**が提案されている．Skip 操作とは選択されたリテラルが $\mathcal{P}$ の要素であれば，そのリテラルに対しては融合 (resolution) 操作を行わず次のリテラルを解くために退避させるものであり，そのリテラルを仮定することに相当する．このようにして反駁 (refutation) が行えたときに，その演繹過程で Skip されたリテラルを節として出力する． SOL 融合においては，Skip 操作と融合操作とがどちらも適用可能な場合は非決定的に選択される．これにより，節 C の $\Sigma, \mathcal{P}$ に関する任意の新特徴節 S に対して，C を入力節とし S を出力する SOL 演繹が必ず存在することが証明されている．定理 5.1 による説明の計算において SOL 融合を用いれば，新特徴節の発見に関する SOL 融合の完全性によって，説明の完全性 (説明が存在すれば必ず見つかる性質) が一階述語レベルで保証される．これに対して，Cox と Pietrzykowski [4] によるアブダクションの手続きでは，リテラルを仮定する場合はそれに対して融合が不可能な場合に限定されており，この場合説明の完全性は成立しない．融合できなかったリテラルのみからなる説明は，観測から後向きに到達できる行き止まりであるために**最も詳細な** (*most-specific* [49]) 説明と呼ばれる． SOL 融合において融合操作を優先させる変形 (SOL-R 融合 [16]) を用いれば，[39, 4] と同様の結果として最も詳細な説明を得ることができる．これに対して，観測からの推論の連鎖が最も短いような説明は，**最も一般的な** (*least-specific* [49]) 説明と呼ばれる． SOL 融合において Skip 操作を優先させる不完全な変形 (SOL-S 融合 [16]) を用いれば，Stickel [49] と同様に最も一般的な説明を得ることができる．これらの詳細度の異なるアブダクションの応用に関しては 6.1 節で考察する．

5.2 アブダクションのボトムアップ計算

Reiter と de Kleer [45] が示すように，**ATMS** [6] は仮説集合を命題集合とし事実集合を命題ホーン節集合に限定したときのアブダクションとみなすことができる [25, 47, 15].

ATMS において仮説集合をすべてのリテラル集合 $\mathcal{L}$ とし，命題非ホーン節集合に拡張したシステムは **CMS** (*Clause Management System*) [45] と呼ばれる．CMS/ATMS のタスクは命題節集合 Σ, 仮説集合 $\mathcal{H} \subseteq \mathcal{L}$, およびある命題式 G が与えられたときに，G の $\Sigma, \mathcal{H}$ からのすべての極小説明 (**ラベルと呼ぶ**) を求めることである．

ATMS のラベル計算アルゴリズム [6] はボトムアップに説明を求める．これは次のような融合による不動点計算として理解できる．仮説集合 $\mathcal{H}$ をある命題の集合とし，Σ を命題ホーン節集合とする．ここで N を $\mathcal{H}$ に含まれないアトムあるいは *false* とし，N_i $(1 \leq i \leq m;\ m \geq 0)$ を任意のアトム，$A_{i,j}$ $(1 \leq i \leq m;\ 1 \leq j \leq n_i;\ n_i \geq 0)$ を $\mathcal{H}$ の要素とするとき，

$$\frac{\begin{array}{l} N_1 \wedge \ldots \wedge N_m \supset N \\ A_{i,1} \wedge \ldots \wedge A_{i,n_i} \supset N_i \,, \text{ for all } i = 1, \ldots, m \end{array}}{\left(\bigwedge_{1 \leq i \leq m,\ 1 \leq j \leq n_i} A_{i,j} \right) \supset N}$$

という多重の融合 (衝突, *crash*) を考える．ATMS のラベル計算アルゴリズムは Σ の節を順次増加させながら，上記の衝突を可能な限り適用し，他の定理によっては包摂されないような定理をすべて求める．この計算の結果求まる Σ の極小の定理はすべて Σ の prime implicate であり，アトム N のラベルはこの定理集合に含まれる節において N を含意する $\mathcal{H}$ の要素の連言の集合として求まる．なお，一階述語論理上のアブダクションにおいて上の融合に類似した完全な手続きが [7] で与えられている．

ところで，[6] のラベル計算アルゴリズムは Σ がホーン節集合のときは完全であるが，非ホーン節集合に対して適用した場合には完全性は失われる．また CMS に対しては Σ の prime implicates を計算するために，融合原理に基づく飽和法 (saturation) の適用が [45] で示唆されている．これに対して，[15] で示される SOL 融合に基づく計算を用いれば，非ホーン節に対する CMS/ATMS のラベル計算に関する完全性を保証できる．さらに prime implicates および CMS の効率的な計算方法として，融合アルゴリズムの中では最も広く使われかつ効率的であるとされる順序付き線形融合を用いることができる．

5.3 アブダクションの計算量

以上述べてきたアブダクションの計算に関して，その計算量について言及しておこう．まず，3.1 節のように背景知識 Σ が一階述語論理式で表される場合，Σ と無矛盾である説明を求める問題は半決定可能 (semi-decidable) ですらない．すなわち，充足可能であることを調べる問題は一階述語論理に対して決定不可能であるため，説明を求める問題はたとえ説明が存在する場合でも決定可能ではない[8]．また，5.1 節で表される結論発見問題についても，Σ の

[8]実際，アブダクションの計算手続きとして使われるトップダウン・デフォルト証明では，線形反駁によって求まる仮説集合の計算は $\mathcal{H}$ に関して局所性があるのに対して，無矛盾性に関する条件は事実集合 Σ 全体に関係している．この性質は半単調性 (*semi-monotonicity*) [43] と呼ばれており，正規デフォルト理論の非単調性を特

特徴節集合は帰納的可算 (recursively enumerable) であるが, 説明であるところの新特徴節は無矛盾性の検査と同じく有限時間では決定できない. したがってトップダウン・デフォルト証明あるいは SOL 融合で求められた仮説集合 E について $\Sigma \cup E$ が無矛盾であることを実際に調べるためには, 例えば, 反駁に関して完全な定理証明器がある有限時間で $\neg E$ の証明に成功しなければ無矛盾であるという近似を必要とする.

次に話を決定可能なクラスに限定し, 5.2 節で示した CMS/ATMS のような命題論理のアブダクションについて計算量の考察をしておこう. まず prime implicates の理論から, 説明の数は節の数あるいは命題の数に対して指数オーダーで増加することが知られており, 説明を完全に求める問題は計算量が非常に大きい. さらに Selman ら [47] は ATMS のように Σ をホーン節集合, 仮説集合 $\mathcal{H}$ をアトム集合に限定した場合でも, 一つの説明を求める問題が NP 困難であることを示している. すなわちこのクラスの問題は説明の完全性を捨てても, 入力サイズの多項式オーダーの時間では解けない. ところが仮説集合 $\mathcal{H}$ を限定せず任意のアトムを使って説明を構成する問題は多項式時間で解ける. よって仮定可能なアトムの制限は難しさに影響している一因である. また Bylander ら [1] による解析によると, 3.2 節で表されるアブダクションの定義において, **組み合わせ禁止** (*incompatible*) である仮説の組を与え, それらの組をいずれも包含してはいけないという条件を関数 e に対して含めた場合, 説明の存在を決定する問題は NP 完全となる. これに対して, 組み合わせ禁止条件を含まず, 各仮説が説明する事象の和がそれらの仮説の和が説明する事象と一致する問題では, 説明が存在すればそれを見つける多項式アルゴリズムが存在する. ここで 3.2 節の定義では Σ における演繹の連鎖を想定しない, すなわち因果関係が明示されている問題であることに注意されたい. つまり本質的な難しさは無矛盾性の検査にあり, Σ が負節を含んでいるか否かで計算のオーダーが変わる.

したがって命題論理のアブダクションでは, $P = NP$ でない限り説明を求める多項式アルゴリズムを持つことはできない. 高速なアルゴリズムを得るためには健全性か無矛盾性を満たさない何らかの近似が必要になる. 健全でない説明というのは, 説明の中に仮定可能でないアトムを仮説として含んでいる場合も含み, 例えば 3.3 節における明示的な信念から導かれる説明である. この議論に関しては [16] も参照されたい. 別の方向としては [27] に見られるように, 一階述語論理を用いても対象とする問題に特化した表現形式に限定することで効率的なアルゴリズムを得ることもできる. ただし注意すべきことは, アブダクションの計算量が大きいことはそれが役に立たないことを意味するわけではなく, Peirce も認めるようにアブダクションが本質的に難しいという事実を裏付けている. 仮説を検査するためには膨大な時間を費やすこともあり, これは無矛盾性と関係している. われわれが高度な問題解決を機械化したいのであれば, 次章で紹介する仮説選択の問題を考慮した仮説生成の制御も含め, さまざまな高速化技術を駆使して問題に臨むべきであろう.

徴付けている. これは一階述語理論の定理とは異なり Reiter の正規デフォルト理論の定理は帰納的可算ではないこととも対応している.

6　アブダクションの応用と仮説の選択

すでにこれまでの章で，科学的探求における方法論として提案されていたアブダクションが，デフォルト推論，極小限定，CMS/ATMS などの計算と関係していることを述べてきた．したがってこれらの技術の応用分野にはそのままアブダクションが適用できる．ここでは詳しく述べないが，代表的な応用としては，診断 [40, 42, 38, 22, 44]，設計 [9]，プラン認識 [27]，物語理解 [2]，自然言語理解 [13, 32]，データベースにおける条件付き解答 [7] などがある．さらにアブダクションの科学への応用は [48] にいくつか見られ，ATMS の技術あるいは応用の文献は [28] でまとめられている．また [33] では学習その他への応用が数多く見られる．なお帰納推論のための逆融合 (inverse resolution) [31] も規則を形成する一種のアブダクティブな手法である．

さて本章では仮説選択の問題について再考してみよう．これは 3.2 節における関数 pl を定める問題でもある．第 3 章におけるアブダクションの論理で示したように，対象に依存しないような説明の良さの唯一の基準は，量的な単純さ (*simplicity*) に相当する Occam の剃刀である．つまり極小の仮説集合からなる説明を好ましいとする基準である．しかしながら一般にはこの基準だけでは選択の幅が大きく，仮説選択の問題は応用とする対象領域に依存せざるを得ないことが認識されている [10]．対象問題における特定のヒューリスティックスは最も強力な基準ではあるが，以下ではある程度一般性を持ついくつかの基準を挙げるに留める．

6.1　説明の詳細度

5.1 節において，SOL 融合の変形が詳細度 (*specificity*) の異なる説明を求めることができることを述べた．最も詳細な説明は，診断において仮説選択の基準の一つとして用いられることが多い [39, 4]．これに対して，最も一般的な説明は自然言語理解 [49] のほか，定理 4.2 による極小限定の計算 [16] にも用いることができる．一般には説明はある適切な詳細度を持つレベルにおいて求められる [32, 16]．しかしながら詳細度自体は構文に依存する部分が大きく，説明の質的評価は以下に述べる信頼性や首尾一貫性から決まることが多い．

なお，リテラルからなる仮説集合 $\mathcal{H} \subseteq \mathcal{L}$ を言語から設定することも詳細度を決める説明選択方式の一つと考えることができる．設計 [9] や制約充足問題ではその基礎例が仮定可能な述語をあらかじめ設定でき，診断に対する論理的アプローチ [44] やデフォルト推論においても同様である．また，述語に極小化する優先順序を付けた優先順序付き極小限定 (*prioritized circumscription*) [29, 26] はメタ的な情報を意味論に反映させた定式化である．継承や行動計画など常識推論への応用ではある程度優先順位を定めることができ，これを最も詳細な説明に基づく帰結を求めるために用いることができる．しかしながら一般的にはデフォルト推論に対して，デフォルトの優先度をどのように割り当てるかという方法論の問題は未解決である．

6.2 説明の信頼性

確率理論は不確実な情報を扱うものであるから，いくつもの証拠を寄せ集めて蓋然的な結論を導くような診断 [40, 42, 34] の評価に使われることが多い．説明の信頼性 (*credibility*) は仮説が起こる確率と仮説が観測を説明する確率の両方に関係している[9].

また自然言語理解では，各仮説に重みを付け最小コストの説明を求めるアブダクション [13, 49] が提案されており，Charniak と Shimony [3] はそのような説明を求める過程が確率的に解釈できることを示している．このような重み付けは説明生成過程の中で候補の絞り込みに使われ，最良の説明を求める問題はヒューリスティック探索の問題に帰着される．仮説空間の探索については [19] も参照されたい．ただしどのようにして重みを割り当てるかという問題はやはり議論の余地が残されている．

6.3 説明の首尾一貫性

説明が首尾一貫性 (*coherence*) を持つとは，複数の観測事象が互いに説明と関連付けられていることをいう．この基準は特に自然言語理解において重要になる．例えば，「花子は喜んだ．試験は易しかった」という文を解釈するときに，「花子は試験がよくできた」という説明は，「花子は楽観的である」という説明よりも好ましい．なぜなら後者の説明では花子が喜んだことと試験が易しかったことの間の関係が示されていないからである．Ng と Moony [32] は Occam の剃刀は十分な鋭さがないと主張し，首尾一貫性に関するヒューリスティックな基準を導入した．しかし [32] の基準も意図しない説明を好ましいと解釈してしまう例があることが報告されており，現在のところ首尾一貫性に関して決定的な基準は得られていない．

7 おわりに

本稿では Peirce のアブダクションの理論が人工知能にどのように関わるかを論じてきた．このために，(1) 式で表される論理の部分の定式化，その論理の持つ非単調性，演繹法則的性質から導かれる計算手続き，メタ的に付加される仮説選択基準，という順を追って説明を行ってきた．しかしながら「仮説の提起」に関わる問題が残されている．実はこの問題は人工知能におけるさまざまな問題と関係している．これまでに述べてきた人工知能におけるアブダクションの枠組では，観測事象の説明を行うために背景知識を用いていた．しかし背景知識から説明が得られない場合は，欠落した知識を補う仮説を形成するために帰納や類推を用いることができる．その過程で仮説形成に関わるヒューリスティックスを明らかにすることはまさに知識表現の問題にほかならず，ヒューリスティックスを用いた仮説形成は探索の問題になる．このような知識は蓋然的であるため得られた仮説は何度も再考されるが，これ

---

[9] しかし確率自体は説明を順序付けるには必ずしも適していない．最も好ましい説明は最も確からしい説明ではない．例えば「太郎は病気である」は「太郎は風邪を引いている」よりも高い確率を持つ．しかし前者は太郎が咳をしていることのより良い説明とは言えない．

は仮説の更新の問題である. つまり Peirce のアブダクションの問題は人工知能の問題そのものなのである. 第 2 章ですでに述べたが, 後期の Peirce の帰納的探求の理論は, 実験, 更新, 観察, 検証などの繰り返しによる「仮説生成 - 演繹 - 検証」サイクルである. この理論は一世紀を経た現在, 計算機科学の進歩によってようやく実現への手掛りが見え始めたばかりである. したがって [24, 20, 14] で提案されているように, 高度な知的活動の実現にはアブダクションがその基礎となることが予想できるのである.

謝辞

本稿の執筆にあたり, 貴重な資料を提供していただいた Alberta 大学の Randy Goebel 氏および British Columbia 大学の Alex Kean 氏, 有益なコメントをいただいた ICOT の佐藤健氏, ならびにアブダクションに関して類推, 帰納との関係を含めて議論いただいた ICOT の有馬淳氏および古川康一氏に感謝します. またいつも仮説推論の研究に関して討論していただく ICOT の太田好彦氏, 長谷川隆三氏および JIPDEC の中島誠氏, 日頃ご教示いただく京都大学の茨木俊秀教授および長谷川利治教授, ならびに本研究の機会を与えて下さった ICOT の淵一博所長に感謝します.

参考文献

[1] T. Bylander, D. Allemang, M.C. Tanner and J.R. Josephson, The computational complexity of abduction, *Artificial Intelligence* **49** (1991) 25–60.

[2] E. Charniak and D. McDermott, *Introduction to Artificial Intelligence* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1985).

[3] E. Charniak and S.E. Shimony, Probabilistic semantics for cost based abduction, in: *Proceedings of AAAI-90*, Boston, MA (1990) 106–111.

[4] P.T. Cox and T. Pietrzykowski, Causes for events: their computation and applications, in: *Proceedings of the Eighth International Conference on Automated Deduction* (Oxford, England, 1986), Lecture Notes in Computer Science **230**, Springer-Verlag (1986) 608–621.

[5] W.H. Davis, *Peirce's Epistemology* (Martinus Nijhoff, The Hague, 1972); 邦訳: 赤木昭夫, パースの認識論 (産業図書, 1990).

[6] J. de Kleer, An assumption-based TMS, *Artificial Intelligence* **28** (1986) 127–162.

[7] R. Demolombe and L. Fariñas de Cerro, An inference rule for hypothesis generation, in: *Proceedings of IJCAI-91*, Sydney, Australia (1991) 152–157.

[8] K. Eshghi and R.A. Kowalski, Abduction compared with negation by failure, in: *Proceedings of the Sixth International Conference on Logic Programming*, Lisbon,

Portugal (1989) 234–254.

[9] J.J. Finger, Exploiting constraints in design synthesis, Technical Report STAN-CS-88-1204, Department of Computer Science, Stanford University, Stanford, CA, April 1987.

[10] R. Goebel, Some problems and non-problems of hypothetical reasoning, invited talk at: *The Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence '90*, Nagoya, Japan, November 1990.

[11] N. Helft, K. Inoue and D. Poole, Query answering in circumscription, in: *Proceedings of IJCAI-91*, Sydney, Australia (1991) 426–431.

[12] C.G. Hempel, *Philosophy of Natural Science* (Prentice-Hall, New Jersey, 1966).

[13] J.R. Hobbs, M. Stickel, P. Martin and W. Edwards, Interpretation as abduction, in: *Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Buffalo, NY (1988) 95–103.

[14] K. Inoue, Problem solving with hypothetical reasoning, in: *Proceedings of the International Conference on Fifth Generation Computer Systems '88*, Tokyo (1988) 1275–1281.

[15] K. Inoue, An abductive procedure for the CMS/ATMS, in: J.P. Martins and M. Reinfrank (eds.), *Truth Maintenance Systems, Proceedings of ECAI-90 Workshop* (Stockholm, Sweden, 1990), Lecture Notes in Artificial Intelligence **515**, Springer-Verlag (1991) 34–53.

[16] K. Inoue, Consequence-finding based on ordered linear resolution, in: *Proceedings of IJCAI-91*, Sydney, Australia (1991) 158–164; also an extended version: Linear resolution for consequence-finding, ICOT Technical Report TR-683, ICOT, Tokyo, July 1991.

[17] K. Inoue, Extended logic programs with default assumptions, in: *Proceedings of the Eighth International Conference on Logic Programming*, Paris, France (1991) 490–504.

[18] 井上 克巳, 仮説推論と非単調推論, 日本ソフトウェア科学会「仮説推論」チュートリアル・テキスト, 東京, 1991 年 11 月.

[19] K. Inoue and Y. Ohta, Making dependency-directed search hierarchical, in: *Proceedings of the Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence '90*, Nagoya, Japan (1990) 450–455.

[20] 石塚 満, 不完全な知識の操作による次世代知識ベースへのアプローチ, 人工知能学会誌 **3** (5) (1988) 552–562.

[21] 伊藤 邦武, パースのプラグマティズム — 可謬主義的知識論の展開 (勁草書房, 1985).

[22] J.R. Josephson, B. Chandrasekaran, J.W. Smith and M.C. Tanner, A mechanism for forming composite explanatory hypothesis, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics* **17** (3) (1987) 445–454.

[23] A.C. Kakas and P. Mancarella, Generalized stable models: a semantics for abduction, in: *Proceedings of the Ninth Europian Conference on Artificial Intelligence*, Stockholm, Sweden (1990) 385–391.

[24] 國藤 進, 仮説推論, 人工知能学会誌 **2** (1) (1987) 22–29.

[25] H.J. Levesque, A knowledge-level account of abduction (preliminary version), in: *Proceedings of IJCAI-89*, Detroit, MI (1989) 1061–1067.

[26] V. Lifschitz, Computing circumscription, in: *Proceedings of IJCAI-85*, Los Angeles, CA (1985) 121–127.

[27] D. Lin and R. Goebel, A message passing algorithm for plan recognition, in: *Proceedings of IJCAI-91*, Sydney, Australia (1991) 280–285.

[28] J.P. Martins, The truth, the whole truth, and nothing but the truth: an indexed bibliography to the literature of truth maintenance systems, *AI Magazine*, Special Issue (1991) 7–25.

[29] J. McCarthy, Applications of circumscription to formalizing common-sense knowledge, *Artificial Intelligence* **28** (1986) 89–116.

[30] D. McDermott, A critique of pure reason, *Computational Intelligence* **3** (1987) 151–160.

[31] S. Muggleton and R. Buntine, Machine invention of first-order predicates by inverting resolution, in: *Proceedings of the Fifth Internatinoal Workshop on Machine Learning*, Ann Arbor, MI (1988) 339–352.

[32] H.T. Ng and R.J. Mooney, On the role of coherence in abductive explanation, in: *Proceedings of AAAI-90*, Boston, MA (1990) 337–342.

[33] P. O'Rorke (ed.), *Working Notes of the AAAI Spring Symposium on Automated Abduction*, Stanford, CA, March 1990.

[34] J. Pearl, Distributed revision of composite beliefs, *Artificial Intelligence* **33** (1987) 173–215.

[35] C.S. Peirce, *Elements of Logic*, in: C. Hartshorne and P. Weiss (eds.), *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Volume II (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1932).

[36] D. Poole, A logical framework for default reasoning, *Artificial Intelligence* **36** (1988) 27–47.

[37] D. Poole, Explanation and prediction: an architecture for default and abductive reasoning, *Computational Intelligence* **5** (1989) 97–110.

[38] D. Poole, R. Goebel and R. Aleliunas, Theorist: a logical reasoning system for defaults and diagnosis, in: N. Cercone and G. McCalla (eds.), *The Knowledge Frontier: Essays in the Representation of Knowledge*, Springer-Verlag, New York (1987) 331–352.

[39] H.E. Pople, Jr., On the mechanization of abductive logic, in: *Proceedings of IJCAI-73*, Stanford, CA (1973) 147–152.

[40] H.E. Pople, Jr., The formation of composite hypotheses in diagnostic problem solving: an excercise in synthetic reasoning, in: *Proceedings of IJCAI-77*, Cambridge, MA (1977) 1030–1037.

[41] K.R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Basic Book Inc., New York, 1959).

[42] J.A. Reggia, D.S. Nau and P. Wang, Diagnostic expert systems based on set covering model, *Int. J. Man-Machine Studies* **19** (1983) 437–460.

[43] R. Reiter, A logic for default reasoning, *Artificial Intelligence* **13** (1980) 81–132.

[44] R. Reiter, A theory of diagnosis from first principles, *Artificial Intelligence* **32** (1988) 57–95.

[45] R. Reiter and J. de Kleer, Foundations of assumption-based truth maintenance systems: preliminary report, in: *Proceedings of AAAI-87*, Seattle, WA (1987) 183–188.

[46] N. Rescher, *Peirce's Philosophy of Science: Critical Studies in His Theory of Induction and Scientific Method* (University of Notre Dame Press, IN, 1978).

[47] B. Selman and H.J. Levesque, Abductive and default reasoning: a computational core, in: *Proceedings of AAAI-90*, Boston, MA (1990) 343–348.

[48] J. Shrager and P. Langley (eds.), *Computational Models of Scientific Discovery and Theory Formation* (Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1990).

[49] M.E. Stickel, Rationale and methods for abductive reasoning in natural-language interpretation, in: R. Studer (ed.), *Natural Language and Logic, Proceedings of the International Scientific Symposium* (Hamburg, Germany, 1989), Lecture Notes in Artificial Intelligence **459**, Springer-Verlag (1990) 233–252.

[50] 米盛 裕二, パースの記号学 (勁草書房, 1982).