

数学的側面からみた状況理論 Mathematical Aspects of Situation Theory

向井国昭

新世代コンピュータ技術開発機構

概要

状況理論は、情報のモデルとコミュニケーションの理論を目指した領域理論である。そのアイデアの核心は、われわれが、本来、状況内に組み込まれた (situated) 存在である、と言うことである。本稿は、状況理論の枠組の要点を解説する。¹

1 はじめに

状況理論の解説は、その母胎である状況意味論の解説の中でもすでに、幾つかなされている。また、理論の進展に応じて、今後ともなされることであろう。状況理論は、多くの側面があって捉えかたが難しいが、本解説では、筆者がとらえた範囲ではあるが、状況理論の最近の考え方を伝え、また、さまざまな基礎論的パラダイムにおける状況理論の位置付けを明確にするよう努力して見る。本解説は、状況理論の中心である CSLI(スタンフォード)からの最近のドラフトを含めた資料(参考文献参照)、とくに Barwise[3,5]に基づいている。

自然言語で表されたり伝えられたりする情報は多種多様である。この多種多様な情報理論的オブジェクトを記述する枠組とはどのようなものであろうか。状況理論は、このような枠組を目指した新しい挑戦である。状況理論はオブジェクトを豊富に持ち、それらが相互に関連性をもつので、理論全体の整合性が問題になる。また理論のスコープが広いので、集合論や論理などの他の基礎理論あるいは基礎パラダイムとどのような関係にあるのかということも関心である。

状況理論は、状況、事実、命題などの基本オブジェクトとその間の関係を明らかにすることにより、状況依存性を捉えている。とりわけ、(Barwise の) 状況理論の核心は、命題とは、視点の付いた事実であるということである。これが、アイデアの中心である。

多様体(manifold) のことばを使えば、事実は、局所座標系による記述であり、世界は制約を座標変換系として持つ、ある種の多様体である。本解説のタイトルにおける 数学的側面というのは、このように、良く知られた数学的基本構造との類推を利用して、説明することを意味している。現在のところ、自家製のイメージの範囲を越えておらず、この類推が成功しているかどうか自信があるわけではない。しかし、本解説で用いた類推のうちのいくつかについては、今後詳細を詰める意義があると考えている。

状況理論の解説が目的であるが、その母胎である状況意味論 [2] からの動機も、例を使って説明する。本解説では、状況理論と状況意味論とを、とくに区別しない。本稿の範囲では、有害にはならないであろう。内容の配列は次のとおりである。まず状況理論の核心である、命題の概念を説明し、それをよく知られた数学的な構造との類推の助けを借りて説明する。集合論、型理論、通信理論との類推や比較も試みる。状況理論の将来性とその難しさにもふれる。状況理論が一種の強力なメタ理論であることが納得されるであ

¹本稿は、次の研究集会で、チュートリアルとして発表したものを、加筆・訂正したものである：ソフトウェア科学 / 工学における数理的方法 研究集会、京都大学数理解析研究所、1988 年 9 月 20 - 9 月 22 日

ろう。状況理論の豊かなオブジェクトを概観し、また、オブジェクトが存在するとはどういうことかについての注意も述べる。状況理論の形式化についての見とうしについての議論も紹介し、また、状況理論と論理の関係をオブジェクトの結合法則という観点からながめてみる。そして、可能世界意味論と比較して、部分性と内包性の観点から、両者のモデルの数学的性質の違いを指摘する。

状況理論は、状況意味論を支えるためのオブジェクトの領域の理論でもある。そこで、文の意味、情報の流れ、間接分類 (indirect classification)、など、関係論的意味論としての状況意味論の考え方を紹介する。特に、心の枠 (frame of mind) を用いた意味論のパラドックスの解決法や、循環的状况を用いた共有信念の取り扱いなど、代表的な例を用いて紹介する。最後に、ZFC/AFA という、基礎の公理の成り立たない集合論を使った、状況理論のモデルの構成を紹介する。

2 状況理論の諸側面

どんな理論も、おおかれすくなかれ、この実在世界 (Reality) の記述を目的としていると見ることができ。状況理論は、それをより徹底して、われわれ生体が順応 (attune) して生きているこの生態学的世界の、現実感のあるモデルを記述するための理論、あるいはそのための枠組と理解して良いだろう。自然言語の意味論を作る時も、命題とは何か、状況とは何か、事実とは何か、情報とは何か、論理とは何か、などなど、基本的な問題がずらりと関係してくる。状況理論は、これらの問いに、体系的に答えること、あるいは、それに答えるための数学的枠組を目指している。そして、それは、フレーゲ以来の言語哲学的な議論の歴史における、意味論への新しい挑戦と位置付けることもできる。

状況理論を解説する立場から見た場合、困ることのひとつは、理論の対象の困難に加えて、理論の基礎がかなりまだ流動的なことである。たとえば、ZFC (公理的集合論のひとつ) のような安定した理論には、とても至っていない。以下の本節の説明も、ひとつの解釈に過ぎないことを念のためにお断りしておく。Barwise らの計画によれば、ここ数年の内に、状況理論の基礎と応用を含めた全貌がシリーズで公開されることになっているので、正確な内容は、そちらに期待していただきたい。

本節においては、便宜上、事実 (fact) と事態 (state of affairs) は区別しない。また、視点 (point of view) をそこからの眺め (perspective) あるいは焦点 (focus) を含めた広い意味で用いている。いずれにしても、その厳密な定義は本解説の範囲の外である。なお、片桐 [15] は、文の働きにおける視点の働きを状況意味論を使って分析している。

2.1 視点付きの事実

状況理論のアイデアの核心は、われわれ生体を、この実在世界に組み込まれた存在である、ととらえることにある。われわれは、神のように、外からこの世界を見ることはできない。われわれが認知する事実は、おおかれすくなかれ、いわば視点がくっついている。どの視点からみた事実か、すなわち、視点と事実の組を一つの実体としてとらえる [5]。これがポイントである。

より詳しく、J. Barwise の状況理論の中心点は、状況、命題、事態の 3 者の関係を次のようにとらえることである：基本命題と呼ぶオブジェクトがあり、それらはすべて状況と事態の対で表される。つまり、基本命題は状況と事態を成分として持つ。この命題を $s \models \sigma$ と書く。ここで、 s は状況、 σ は事態である。この命題を s が σ を支持する (support) と読んだりする。この命題は、実際に、状況 s の中で σ が成り立つとき、真 (True) さもなくば偽 (False) である。

例をあげよう。太郎と花子がテーブルをはさんで座っており、二人の間に食塩瓶とソース瓶があるとする。太郎は、「食塩瓶がソース瓶の右にある」と言い、一方、花子は、「ソース瓶は食塩瓶の右にある」と言ったとしよう。これは、矛盾した情報であるが、命題内容は矛盾していない。太郎の視点を s 、花子の視点を s' とし、それぞれ (1) と (2) という命題を主張しているからである。

- (1) $s \models \langle \text{右にある, 食塩瓶, ソース瓶} \rangle$
 (2) $s' \models \langle \text{右にある, ソース瓶, 食塩瓶} \rangle$

この二つの命題は矛盾していない。もうひとつ例をあげる。次郎のある日の登校に関しての発話 (3) と (4) を見よう:

- (3) 「次郎が学校に行った。」
 (4) 「次郎が学校に来た。」

これらは、空間内の移動という同一の、ある物理的イベントを表しているが、(3) はたとえば、次郎の家族の視点 u から見た発話であること、(4) は、例えば、次郎の先生からの視点 u' からの発話である:

- (5) $u \models \langle \text{行った, 太郎, 学校} \rangle$
 (6) $u' \models \langle \text{来た, 太郎, 学校} \rangle$

そもそも命題とはグローバルに真か偽どちらかの性質を持つようなオブジェクトのことである。事実と真の命題は明らかに、似た振る舞いをするが、果たして同じ実体か、あるいは異なる実体かという伝統的な難問がある。結論からいうと、(J.Barwise によれば) 事実と命題は異なる種類のオブジェクトである [5]。より直観的には、命題は、視点 (状況) 付きの事実といってもよいだろう。

たとえば、 $\langle \text{太郎が走っている} \rangle$ という事実は、命題ではない。なぜなら、その事実が世界 w の限られた視点の小さな範囲 s でのみ成り立っているに過ぎないからである。もちろん、この事実と s の対

$$s \models \langle \text{太郎が走っている} \rangle.$$

は命題である。

しかし、一部の事実は、真なる命題と同一視されうる。真の命題と事実を混同するのは、Barwise によれば、グローバルな状況 (= 世界 = トータルモデル) w により支持される事実 σ と、命題 $w \models \sigma$ とを、實際上、区別する必要がないことからくる、一種の混同であると説明される。たとえば、日常的なたいがいの状況 s で事実 $\langle =, 2, 1+1 \rangle$ が成り立つので、この事実を、命題 $w \models \langle =, 2, 1+1 \rangle$ と、ついつい、同一視してしまうのである。(多くの場合) 自然数 3 と有理数 $3/1$ を区別する必要がないので、便宜上、同一視していることと同様である。

さて、

$$s \models \langle \models, s', \sigma \rangle$$

のようにいくらでも「高階命題」を構成できるので、命題の形を状況と事態の対の形に限定しても一般性を失っていないことはすぐ分かる。

一時、Barwise[3] では、与えられた引き数の構造にのみ依存し、まわりの状況には依存しないで決まる関係 (structurally determinate relation) をみとめ、それを型と見なしていた。たとえば、関係 $=$, $\in$ などをその例と考えていた。しかし、後にこの考えを捨て、ここで紹介したように関係の成立は、状況に依存するという考えに統一した。この結果、型と関係と性質は同じ種類のオブジェクトであり²、一方、事態と命題は、はっきり異なる種類のオブジェクトとなり、体系全体はすっきりしてきた。³

² 素朴な直観によくあっていると思う。

³ Barwise[3] では、命題を抽象化したものを型、事態を抽象化したものを性質と呼んでいた。

2.2 世界

世界を、命題までも含めたあらゆるオブジェクトからなる領域として理解した。それでは、世界に含まれている状況と事実に注目したとき、それらはどうなっているのだろうか。命題の構造から、ある程度決まる筈である。少し古い版 [3] の世界モデルの構成からみて、たとえばつぎのようなクラス X と Y の対として世界をモデル化することが、ひとつ考えられる: X は事態の整合的な集まりで極大なもの、 Y は状況の集まりで、それらが支持する事態はすべて X の要素であるようなもの。

参考のためにその少し古い版 [3] の世界モデルを記す (第 4 節も参照のこと): 現実世界 M は、事態の整合的な集まりである。つまり、世界は、古今東西ありとあらゆる事実 (事態) が書かれた本である。一般的に、 M 自身はオブジェクトではない。 M は、たとえば、「見る」という関係項には立っていない。あまりにも大き過ぎるのである。事態の集合のことを状況とよぶ。集合であることを注意。世界と違って、それはオブジェクトとして、関係項に立つことができる。状況 s の支持 (support) する情報が、すべて「事実」のとき、すなわち s が M の部分集合のとき、 s を現実状況という。事態は、信念や夢の対象のように非現実的な状況を、構成要素として含むことがある。

すなわち、従来は、状況を事実の集合として、外延的に捉えていた。その結果、状況の間の主な関係は一方が他方に含まれるという、包含関係しかなかった。しかし状況は、今度は内包的なものになったので、状況の間に、より柔軟な関係が設定できるようになった。たとえば、projection 関係と imbedding 関係などである。さらには、関係概念はエージェントに対して相対的に変わりうるという興味ある結論をひきだしているが詳細は省く [5]。

2.3 内包 (intension) と部分性 (partiality)

次に、状況理論 (状況意味論) と可能世界意味論 [8] はどこが違うか? それを、内包 / 外延および部分 / 全域の観点から説明してみよう。可能世界意味論は、可能世界と個体と真偽値をプリミティブとして、それから集合論的に構成されるもののみが言語表現の意味オブジェクトである。性質なども個体の集合として定義される。いわゆる外延的な意味論である。(可能世界意味論で言う内包も可能世界全体を定義域とする関数として外延的に解釈される。) しかし、このような外延的なオブジェクトでは、信念などの内容を表すには粗過ぎて、うまくいかない。すなわち、可能世界意味論が用いている古典的な集合論の外延性が状況理論との大きな差であると指摘できる。状況理論は外延性を仮定しない。

つぎに、われわれが見たり聞いたりする情報はそもそも断片である。いつ、誰が、どこで、何を、などの情報の要件の幾つかは欠けて伝わる。しかし、可能世界意味論が用いているトータル意味論では、この半端な情報をわざわざトータルなもので表すということになる。たとえてみれば、多項式 (全実数区間で定義された関数すなわちトータルオブジェクト) を用いて有理式 $1/x$ を表現するようなものである。ここで $1/x$ は $x=0$ で定義されていない部分的オブジェクトとみる。一般にそれは、不可能ではないにしても自然ではない。たとえば、もし割り算を許さなければ不可能である。一方、状況理論では、部分的な情報も最初から一級市民として導入している。しかし、両者は対立する理論ではなく、状況理論は可能世界意味論の自然な発展形であると解釈すべきと思う。モンタギュ文法 [8] では、言語表現は内包論理の式に変換され、それは、さらに、可能世界意味論で解釈される。ここで論理と意味論は別物であるから、内包論理式を状況理論のモデルで解釈してもよいわけである。そこから有意義な結論が出るかどうかは直ちには分からないが、検討してみる意義は有ると思う。なお、情報の部分性のについての議論が橋田 [17] にある。

2.4 数学構造との類推

状況、命題、事態の 3 者の関係を上のようにすっきりととらえていることは、最近の成果として評価したい。その理由は、ほかの数学的な理論とのおもしろい関連性がでてきたように思うからである。表面的

ではあるが、その兆候をあげて見よう。

構成的型理論における Proposition as Type の思想を、命題が正しいとは、その証明が存在することすなわち、命題はその証明分だけ存在すると読むことができる。これは、事実(事態)はそれを支持する状況(あるいは視点)分だけ正しいという読みに対応する。

D. Scott の情報システム [13] の枠組は、命題の整合的な集まりでオブジェクトを分類する理論のひとつとみることができる。状況理論は状況が事実を支持するという基本関係をつうじて、状況というオブジェクトを、事実により分類しているとみることができる。また記号が示唆しているように、 s をモデル論における部分モデル、 σ を文とすれば、 s が σ を満たすと読める。情報がある状況で persistent であるという概念は、ある条件が言明を force するという Cohen の forcing 関係と似ている。

数学の複素解析において、べき級数を、その定義域を込みにして、より詳しくオブジェクト化することにより、解析接続などを武器として、リーマン面の美しい理論がでてくる。あるいは、もっと一般的にいて、状況はある意味で層理論あるいはファイバーバンドル理論 [14] における底空間の位相の開集合と似た役割をもっているようにみえる。さらに、ファイバーバンドルは、物理における場の概念と同一(あるいは等価)であること [18] を思えば、関連性は、物理にまで広がる。

想像がたくましく過ぎるだろうか。夢を見過ぎてはいけませんが、このような観察からも、状況理論は、他の精密科学の基礎理論とも比較しうる、あたらしいパラダイム理論として、とくに認知科学のひとつのパラダイム理論としても、育って行くであろうと期待される。

2.5 集合論と型理論

状況理論と立場が比較的似ているものとしては、たとえば、集合論と型理論がある。集合論は、この世界の一断面、すなわち、数学的構造を記述するものである。世界を集合というオブジェクトとその間のメンバシップ関係に分節して、その制約を研究するものである。そして、実際、とくに数学において絶大な成果をおさめたことは、よく知られている。型理論は集合論と似ているが、より構成的であること、Proposition as Types の原理により論理を自然に内部化できることからプログラミングの分野 [6] あるいは、構成的数学と呼ばれる分野で、古典的な ZFC 集合論に取って代わる基礎理論としての位置を占めつつあるといっても、それほど見当はずれではないだろう [9]。

状況理論は、型理論 [11] や集合論などの establishment に匹敵するぐらいの重要な理論に成長すると期待される。その意味でこれら 3 者の理論的性格の対比はおもしろいし、これらの対比によれば、状況理論の考え方も決して難しくはないと思っている。

状況理論からみて、集合論に対する不満のひとつは、それが、情報論的なオブジェクトとその間の関係の記述に関して、理論が粗過ぎるということである。たとえば、集合論では、集合というオブジェクトは、その要素で一意に決定されるという外延性公理をもっている。ところが、情報論的オブジェクトは、一般に、全体が要素に還元されない性質いわゆる内包(intension)を持っていることは、良く知られている。関数でいえば入力と出力の関係と等しくても、それを計算する手続きが違えば異なる関数オブジェクトを指すと考える。このような、きめこまかい見方が、古典的な集合論には苦手なのである。

おおざっぱに言って、集合論や型理論が形式言語の意味論を目的とするのに対して状況理論は、自然言語の意味論的オブジェクトを記述するものと考えられる。しかし、代表的な型理論の提唱者である Martin-Löf 自身、構成的型理論の自然言語への応用も考え始めている (1988 年 4 月私信)。確かに状況理論の関心は、状況と情報の間の支持関係であり、一方、型理論の興味は要素と型の帰属関係(of-type)であるという、表面的な相違はある。また、状況理論はむしろ無型(type free)理論である。しかし、上述したように状況に支えられた情報と言う考えも、やはり構成的なものを含んでいる。計算機の上に状況理論を実現する場合、計算機の論理としての型理論とインタフェースをとることは自然であるし、実際にも、両者は、密接につながっているように見える。

2.6 メタ理論としての状況理論

状況理論は他の基本パラダイム理論とどんな関係にあるか。これについて、すべての理論は次のようにオブジェクトの結合法則の研究と見ることができる、ということを手掛りにして私見を述べてみたい。

まず集合論は集合の結合法則の研究である。論理(証明論とモデル論と帰納論)は命題の結合法則の研究である。型理論は型の結合法則の研究である。圏論は矢の結合法則の研究である[10]。

状況理論は、これらのオブジェクトをより抽象化した、情報というオブジェクトの結合法則を、制約という形で研究する。この意味で状況理論は、いわば強力な領域理論(domain theory)あるいはメタ理論であるといつて良いだろう。

読者は、(今まで)状況理論と論理との関係が明らかでないとして不満を持たれたかも知れない。確かに、状況理論は自身の論理をほとんど語っていないように見える。繰り返しになるが、しかし、これは決して異常ではない。たとえば、型理論が proposition as type の原理で論理を取り込むことができると同様に、logic as constraint のかたちで状況理論は論理を取り込むことができるのである。Devlin[7]も、状況理論を、古典的な論理の拡張であると説明している。上述のように、論理とは、突き詰めると、命題と呼ぶオブジェクトの結合に還元される。たとえば、分離法則(modus ponens)は p と $p \rightarrow q$ を結合して q を得ることである。この意味で、状況理論は論理を含んでいる。

2.7 情報通信理論

状況理論は情報のモデルを目指すものである。シャノン流の古典的 情報理論では(通信)量は問題にされても、情報とは何かという視点はなかった。

シャノン理論の構造はエンコーディング E とデコーディング D とチャネル C からなる。 E と D はそれぞれ、確率統計的構造、たとえば分布 (X, p) を点とする空間である。 C は E から D への関数である。通常の応用では、 E または D の点は、数のベクトルであり、チャネルは行列的なものとして具体的に表現される。そして、これらの表現を通じて エントロピーなどの 通信量の制約が研究される。

状況理論の情報概念と通信理論とを統合することは、状況理論の進展状況からみて、まだまだ早い気がするのかもしれないが、しかしある程度の展望は欲しい。例えば、上の古典的な通信論において、確率的構造を点とする空間(多様体)を考えており、チャネルはその多様体の間の関数の役割をもっている。

状況理論も世界を視点付きの情報の多様体と見ていると考えられる。確率的構造を、たとえば、サイコロを振るというイベント型と見なし、チャネルを制約、と見ることなど、ある程度の対応関係の類推が働くのではないだろうか。

2.8 状況理論のオブジェクト

状況理論の研究対象すなわち domain of discourse は何か? 状況理論の大きな特徴はその対象がきわめて豊かであることである。ありとあらゆる対象をオブジェクトとしているといつてよい: 個体, 状況, 事態(事実), 命題, 関係, 性質, 制約, 型, 集合, 関数, 概念, イメージ, パラメータ, 引き数位置, ロール, アンカー, 時間空間領域, etc. しかも、状況理論はこれらのオブジェクトが他のタイプのオブジェクトに還元されるものとは考えない。つまり

Everything is a first class citizen.

なのである。これは、集合論において、関係や関数が集合概念に還元吸収されてしまっていることと較べて対照的である。また、集合論は、メンバシップ関係を研究の対象とするが、メンバシップ関係それ自身は、集合論の領域の要素ではない。いわゆる集合論にとってはメタな対象であり、オブジェクトではない。一方、状況理論では、メンバシップ関係はオブジェクトである。しかし、これは矛盾ではない。通常の集合論

では、関係概念を、対の集合として外延的に構成するが、状況理論は、関係を集合論的に構成されるものとは仮定していない。

状況理論は、自然言語の意味記述やコミュニケーションなどの枠組になることを目標としている。そのためにこのような「気前の良い」オントロジーになっていると考えて良いだろう。しかしながら、注意しなければならないのは、関係、性質などを含めて、あらゆるものを取り込む結果、通常はメタレベルのオブジェクトであるものが、理論の対象としてのオブジェクトになってしまう。そのため、この二つのレベルの間の関係が、判然としないことがある。一階述語論理でいえば、述語のレベルと項のレベルの区別がないというイメージである。あるいは、すべてのものが、ベタッと、一層にオブジェクト化されている世界である。この意味で状況理論はメタ理論の一種と理解してよいであろう。

こんなに気前よくオブジェクトを導入してはたして、理論は矛盾を引き起こさないか？ タイプフリーなラムダ計算は、論理的に解釈できないことは、良く知られた古典的な結果であるが、状況理論もタイプフリーな理論なので、その恐れがある。実際にもこれは、G. Plotkin が、ラムダ計算における β -変換に相当する規則が成り立たないモデルを P. Aczel の Frege 構造 (述語論理 + λ -計算) を用いて示した：

$$\langle\langle [x|p(x)], a \rangle\rangle \neq p(a)$$

しかし、ほぼ同じくして Barwise は ZFC 集合論から、基礎の公理を取り除き、代わりに反基礎の公理と呼ばれる公理を導入した集合論、ZFC/AFA の中ではすなわち、non-well-founded sets の世界で状況理論の型と命題のモデルを構成し、その上に、状況理論のモデルを構成したので、ZFC/AFA に対しての相対的無矛盾性は証明された。因みにこの ZFC/AFA も P. Aczel [1] により、提案されたものである。より詳しくは、第4節 (状況理論のモデル) を参照。

2.9 存在という性質

状況理論の哲学は、実在主義、もっと詳しくは生態学的実在主義 [2, 16] である。すると、一角獣や、お化け、あるいは、夢の中の状況はどうなのか？ シーザなど過去に生きた人、あるいは、これから生まれるひとは存在するのか？ などの、もっともな疑問が湧いてくる。たしかに、これらは存在する。しかし、生き生きとした現実感をあたえるものとしては存在しない (実在しない)。あるいは、概念としては、存在するが実体としては、存在しない — と状況理論は考えているように見える：生体にとって意味のあるものはすべて実体である。

数学においても、必要なもの、役に立つものはどんどん実体化してしまう。例えば射影幾何学における無限遠点や、複素数などがその実体化の例であることはよく知られている。一角獣の概念、お化けのイメージ、シーザという個体、空想的状況、等々、必要なものは、みな取り込む訳である。実在 (Reality) というのは、このように自由にオブジェクトを分節化することを許すような、物理でいう一種の場と見たい。そして、存在するあるいは実在するというものを事物の性質として、この場を基に、相対的なものとして理解したい。

これに関連して Barwise は 集合論的なイメージを借りて現実的 (actual) 状況と単なる状況の違いを、次のように示唆している。実在 (Reality) のモデルとして、すべてのオブジェクトのクラスを U とおこう。現実的な状況は、 U の要素である (*in* U) と同時に U のある部分 (*a portion of* U) でもある。これに反して、単なる (空想的な) 状況は U の要素としては存在するが、 U の部分ではない。たとえば、一角獣、夢の中の空想的な状況などは、 U の一点としては存在するが、広がりを持つ面 (即ち、 U の部分クラス) としては存在しない。 U のすべての部分クラス (すなわち面) が U の要素 (すなわち点) となるとも、限らない。これは、極大の現実世界は、もやは、大き過ぎて対象にならないという、集合論おなじみの現象と考えられる。すなわち、部分であることの方が、要素であることよりも存在度が高いととらえるわけである。

この「存在論」に関して、少しばかりの私見を述べたい: もっとあっさりとして、存在するということも一種の性質である、と考えられないだろうか? すると、性質もオブジェクトであったから「存在する」と言う性質は「存在する」かと言う自己適用的な事実ある命題の「存在」も議論することができる。いま理論のオブジェクト、たとえば数5について、5が存在するというのは無意味である。それは、すでに存在していることが分かっているからである。但し「4と6の間の素数」という概念の外延が空でないかと問うことは無意味ではない。犯人がどこかに存在するといった日常言語の用法にも合っている。すなわち、存在するということ、熱いとか冷たいなどの性質などと同じく、事物の性質(一属性)と理解したい。状況理論の性格からこのような議論は、可能であり理論の一貫性からも必要と思われる。しかし、今までのところ、このような議論は聞いていない。おそらくそれは、性質の理論とか関係の理論[12]などと呼ばれる形でなされる独立した議論なのであろうかと推測している。

2.10 理論の形式化

ヒルベルトは、幾何学における点・線・面という基本オブジェクトを無定義概念とし、点とは何か等の疑問を封じてしまい、そのかわり、公理でそのオブジェクトの制約を規定するという方法をあみだした(形式主義)。これは、根本的疑問を、数学の表面からは隠してしまうという偉大な知恵であろう。しかし、それでも、研究者の心の中では、点・線・面に対する直観的なイメージを持つことは必要である。現在の状況理論は、この意味で形式化の前の段階にあり、その基本オブジェクトであるところの状況、世界、命題、制約、情報などをどのようにとらえるかを議論している。それでは、カントールの素朴集合論がZFCで形式化できたように現在の素朴状況理論も何らかの形式化はできるのか? 次にそれを見よう。結論から言うと: 一階の古典的な論理体系では、それは、無理であろう。またその不完全性定理ははっきりと証明できる、と予想されている(Barwise)。そのひとつの傍証がある。それは算術の体系(PA)における、Löbの定理:

$$PA \vdash B(H) \rightarrow H \quad \text{ならば} \quad PA \vdash H$$

とのアナロジーである。これは、PAでは、自分(H)が証明可能であるとき、自分(H)が真であるということが保証されているような体系では、Hがもともと証明可能であることを意味している。これを、状況理論の形式化にあてはめるのである。簡単な仮定のもとで、つぎのように読みかえることができる(T. Fernando, 1987): 命題の情報内容が事実として存在するならば、その命題は真である、ということを保証するような形式体系では、実は、そのような命題は、もともと真である。

言い換えると、これは、情報内容に関する deductive な体系が、新しい定理をもたらないという意味で、役に立たないことを示唆していると解釈できる。Barwise 自身は、状況理論の形式化のため、文脈付きの形式言語を構想している、とのことである。上に説明した、状況と事実の対としての命題モデルと関係がありそうだが、詳細はまだ明らかでない。

状況理論は、素朴状況理論の段階を経て、現在、状況のモデルの構成が Barwise や Plotkin らを中心に試みられている。形式化前夜の段階にあるとみることができよう。

3 状況意味論

3.1 文の意味

文の意味は、状況の間の関係[2]である。より正確には、イベント型の間の関係である。これは、状況意味論の初期における定義である。現在は、発話の持つ情報内容はどのようなものかという形で、より精密に、次のように定義されている。すなわち、それを記述内容(descriptive content)と命題内容(propositional content)に分けられる。いま、J.B. が“I am standing”と発話したとしよう。そのときこの発話は次の二つの情報内容を持つ:

記述内容: $\langle\langle \text{STANDING, J.B., 3:40p; 1} \rangle\rangle$

命題的内容: $s \models \langle\langle \text{STANDING, J.B., 3:40p; 1} \rangle\rangle$

ここで s は発話者が参照 (refer) している状況である。

3.2 情報の流れ

状況意味論の主張のひとつは、文の意味を真理値ではなく状況間の関係と見ることである [2]。すなわち、情報の伝達機能の重視である。例を示そう。C が、A と B からそれぞれ、次のような話を聞いたとする：

A: 「もし太郎と花子が同学年ならば、花子は一年生である。」

B: 「もし太郎と花子が同学年ならば、太郎は二年生である。」

そのとき C は、どんな情報を掴むか？あるいは、A と B から、C にどんな情報が流れたか？結論からいうと、C に《太郎は一年生》と《花子は二年生》という情報が流れる。なぜか？A の発話にふさわしい状況は何かと考えてみる。すると、適当な「会話の公準」を仮定すると、A の発話の状況には情報《太郎は一年生》があることが分かる。同じく、B の発話の状況には、情報《花子は二年生》がある。それぞれの情報をマージすることにより、《太郎は一年生》と《花子は二年生》を得る。一方、質料含意 (material implication) で考えると、A と B の情報内容は矛盾しているので、C は高々《太郎と花子は同学年でない》を得るのみである。この例は、極端に単純化してあるが、相手の置かれている状況から情報を掴む例である。つまり、文の働きを、情報の流れとしての、状況間関係として見ている。

3.3 意味論的パラドックス

古典述語論理のモデル論が自然言語の意味論に不十分であることが、状況意味論の背景にある。それを復習しよう。まず、代入原理は成り立たない。つぎの (1) と (2) における、それぞれの信念の対象は、たとえ事実性においては等価でも、一方を他方で置き換えることは、できない。なぜなら、主題 (subject matters) が異なるからである。つまり、情報として異なるからである。

(1) Believes that Jackie is a nice dog.

(2) Believes that Carson City is west of Los Angeles.

同様にして、情報論的な観点からは、排中律や三段論法も一般には成立しないことが分かる。

3.4 間接分類 (indirect classification)

行為の予測や説明に、メンタルステートの間接分類 (indirect classification) というアイデアを使う [2]。ゴキブリ退治用の殺虫剤の缶に、ゴキブリのラベルを貼って、間接分類するのと同じである。メンタルステートを、行為との関係において分類するというアイデアである。同じ型の行為をするエージェントのメンタルステートは同じラベル (uniformity) を持つ。逆に、同じラベルを持てば同じ型の行為をする。つぎの (1) の表す制約 C は、行為とメンタルステートの間の間接分類 (制約) の例になっている：

(1) A mother who believes that her baby is hungry will feed it.

$$C := \langle\langle \text{involves, } E_1, E_2; 1 \rangle\rangle$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 E_1 &:= \langle\langle \text{mother}, b; 1 \rangle\rangle \wedge \langle\langle \text{believe}, b, E; 1 \rangle\rangle \\
 E_2 &:= \langle\langle \text{feeding}, b, a; 1 \rangle\rangle \\
 E &:= \langle\langle \text{child_of}, a, me; 1 \rangle\rangle \wedge \langle\langle \text{hungry}, a; 1 \rangle\rangle \\
 me &:= x \mid \langle\langle \text{present}, x, loc; 1 \rangle\rangle \quad (me \text{ は「自分」を表すためのルール})
 \end{aligned}$$

3.5 心の枠理論

メンタルステートを, パターンとしてのイベント型 (枠) と, そのパターンに含まれるパラメータのバインド (セッティング) の対で 分類(classify) することである. これにより, たとえば, 同一のオブジェクトに対する矛盾した信念をもつメンタルステートを表現できる: ピエールというある少年が, バリで (当然フランス語の中で, 英語を知らずに), Londres (英語で London のこと) が汚い (not pretty) と信じて育ち, 後年, 突然 London (ロンドン) で暮らすことになった. そこがロンドン (Londres) であることも知らず, 彼は, ロンドン (London) はきれい (pretty) だと思った.

$$\begin{aligned}
 e_0 \models & \langle\langle \text{believe}, \text{Pierre}, \langle\langle \text{of_type}, \text{londres}, E_1 \rangle\rangle, L; 1 \rangle\rangle \wedge \\
 & \langle\langle \text{believe}, \text{Pierre}, \langle\langle \text{of_type}, \text{london}, E_2 \rangle\rangle, L; 1 \rangle\rangle \wedge \\
 & \langle\langle \text{of}, \text{londres}, \text{ロンドン} \rangle\rangle \wedge \\
 & \langle\langle \text{of}, \text{london}, \text{ロンドン} \rangle\rangle
 \end{aligned}$$

ここで londres と london, E_1 と E_2 はそれぞれ次の複合不定項 (complex indeterminate) と型である:

$$\begin{aligned}
 \text{londres} &:= x \mid \langle\langle \text{city}, x \rangle\rangle \wedge \langle\langle \text{named}, x, \text{Londres} \rangle\rangle \\
 \text{london} &:= y \mid \langle\langle \text{city}, y \rangle\rangle \wedge \langle\langle \text{named}, y, \text{London} \rangle\rangle \\
 E_1 &= [z \mid \langle\langle \text{pretty}, z; 1 \rangle\rangle] \\
 E_2 &= [z \mid \langle\langle \text{pretty}, z; 0 \rangle\rangle].
 \end{aligned}$$

すなわち, 同一のオブジェクト, ロンドンについての異なる信念を持っていることを表現している. しかし, Pierre の信念の枠の中では, londres と london は異なる不定項であるから, 矛盾していない.

3.6 循環的状况

コミュニケーションにおいては, 共有知識 (common knowledge) が大切である. それに対するモデルには三つある. 繰返し法 (iterate approach), 不動点法 (fixed-point approach), 環境共有法 (shared environment approach) である. 状況理論は, 環境共有法の自然なモデルをあたえる. 次の条件を考える:

$$s_0 \cup \{ \langle\langle \text{know}, \text{太郎}, s \rangle\rangle, \langle\langle \text{know}, \text{花子}, s \rangle\rangle, \langle\langle \text{know}, \text{次郎}, s \rangle\rangle \} \subset s$$

$$\begin{aligned}
 s_0 = \{ & \langle\langle \text{have}, \text{太郎}, \text{クラブのエース} \rangle\rangle, \\
 & \langle\langle \text{have}, \text{花子}, \text{ハートのエース} \rangle\rangle, \\
 & \langle\langle \text{have}, \text{次郎}, \text{スペードのエース} \rangle\rangle \}
 \end{aligned}$$

これは, 状況 s で, 3 人が, 上を向いたカードの情報を共有し, 3 人が s を共有しているという, s についての条件である. 状況理論によれば, このような状況が存在する. そして, たとえば $\langle\langle \langle\langle \text{太郎がクラブのエー$

スを持っている》ことを次郎が知っている》ことを花子が知っている》という情報もこの条件から容易に導ける。標準の well-founded な集合論ではこのような集合は不可能であった。Barwise と Etchemendy[4] は、言語使用において、このような自己参照状況がありふれていると主張している。

4 状況理論のモデル

型, 命題, 状況, 事態 (= 情報) などのモデルを具体的な集合論的構造として構成する。それを [3] に沿って, 紹介しよう。しかし, [4] の最新の見解を取り込んで説明した。相互参照的に定義が構成される。材料の提供およびオブジェクトの製造は, すべて ZFC/AFA 集合論 [1] の中で行われる。すなわち, いわゆる素朴状況理論の相対的無矛盾性が言えたわけである。なお, 既に注意したように, 性質と型は区別していないので [3] と較べてモデルは, 少し簡単になっている。

モデルの構成は三つのステップからなる:

- ステップ 1: 型と命題のモデル。
- ステップ 2: 型と命題による状況, 事態 (= 情報子 (infon)), 基本型の導入。
- ステップ 3: 情報子の整合的なあつまりとしての世界のモデル。

なお, ここでの命題は, 状況と事態の対としてではなく, 型 $\vdash$ の, 状況と事態の対に対する適用形 (application form), すなわち, 型と割り当ての対として考えている。

4.1 ZFC/AFA 集合論

型と命題の理論に, λ -計算すなわち抽象化と代入(β -変換)を導入するところがポイントである:

$$(\lambda x.p)a = p[a] \quad (\beta\text{-変換})$$

通常の ZFC 集合の世界では, 自分自身を含む集合を含まないので, たとえば集合方程式, $x = \{a, x\}$, は解けない。これが解けるように集合の世界を拡張した集合論が ZFC/AFA である。Barwise は, その λ -計算を保証するモデルを ZFC/AFA 集合論の中に構成した。先の方程式の解は, 直観的には,

$$x = \{a, \{a, \{a, \dots\}\}\}$$

である。 x は無限に「深い」繰り返しの構造を持っている。このあたりは, 実数の世界を複素数に拡張して, すべての代数方程式が解を持つようにした事情と似ている。実際, ZFC/AFA では, ある一般的なクラスの連立方程式系が, 常に解をユニークに持つ [1, 4]。Barwise のモデルはこの性質を使っている。以下この λ -計算を仮定する。便宜上, 通常の λ -計算の記法を代用する。

4.2 命題, 事態, 型

型と命題の理論の基本述語は次の二つである:

approp-for(τ, a): a は型 τ の適切な割り当てである。

of-type(τ, a): 割り当て a は型 τ に属す。

任意の型 τ は引数ロールの集合 $Arg(\tau)$ を持ち, その型が無制限に適用されることを防いでいる。基本の型は, アトムであり, その振舞いがこのふたつの 2 述語により規定される。特別な基本型 *Approp-for* は, 述語 *approp-for* をシミュレーションするためのものである。また, 理論の無矛盾性をいうためにも, 重要であるが, 詳細は割愛する [12]。命題は型 p と割り当て a の対であり, その真偽は $pa \Leftrightarrow of_type(p, a)$ で定義する。

4.3 状況理論のオブジェクト

型・命題・事態・状況を定義する.

(1) 基本型:

$Obj, Type, Proposition, Soa, Bsoa, Sit, Assignment, Approp\text{-}for, \models, \in, \dots, Sitting, Right\text{-}to, \dots$. これらは, すべてアトムである.

(2) 型: 基本型, $\lambda x.p$ いずれかのこと. ここで, p はパラメトリックな命題である.

(3) 基礎命題: 形式 τa のこと. ここで, τ は型である. 通常の infix 記法などの記法は, 適宜自由に用いる. 次は基礎命題の例である:

$$s \models \sigma$$

$$(\lambda x.(x \models \sigma))s$$

(4) 命題: 基礎命題, $\bigwedge P, \bigvee P$ のいずれかのこと. ここで, P は命題の集合である.

(5) 基本事態: 形 $\langle\langle r, a, i \rangle\rangle$ のこと. ここで, r は型 (= 性質 = 関係), a は割り当て, $i \in \{0, 1\}$ は極性 (polarity) である.

(6) 事態: 基本事態, $\bigwedge \Sigma, \bigvee \Sigma$ のいずれかのこと. ここで Σ は事態の集合である.

4.4 状況・世界

ここで紹介する状況と世界のモデルは, 集合論的構成法に基づく極めて簡単なものである. 将来のより本格的なモデルの雛形として紹介する. まず, 状況は基本事態の集合である. 世界は, 基本事態の整合的なクラス M で次の条件を満たすものである. ここで, 極性のみが異なるような基本事態の対を含まない状況あるいは世界を整合的という.

(1) τ が型, $\langle\langle \tau, a; 1 \rangle\rangle \in M$ のとき, $of_type(\tau, a)$.

(2) τ が型, $\langle\langle \tau, a; 0 \rangle\rangle \in M$ のとき, $of_type(\tau, a)$ でない.

状況 s が基本事態 σ を集合の要素として含む時 s は σ を支持するという: $s \models \sigma$. その他の形の事態についても, 基本事態の場合に帰着させることは, 通常のモデルの *satisfaction* の定義と全く同様である.

さて, 事態の形を拡張して, $\exists x.\sigma$ および $\forall x.\sigma$ の形の事態を導入することも可能である. その構成法は, 上の $\lambda x.p$ の構成の場合と同様である. そして, 通常の古典的な一階論理と同様に, 基本事態の極の反転操作を, これらに拡張事態に対しても拡張定義することができる. 事態 σ を反転して得られる事態を σ の否定と呼び $\bar{\sigma}$ と書く.⁴ 支持関係の拡張についても同様である. このあたりは, 古典的な一階論理の構文論と, そのモデル論の扱いと同様である. 但し, 部分モデル (構造) であること, 無限の論理和 / 積を許しているところが違っている.

4.5 命題と事実の抽象化

本解説では, 型は命題を抽象化してえられるものとした. たとえば状況 s をパラメータとして持つパラメトリックな型 $\lambda x.s \models \langle\langle SHAVING, x, x \rangle\rangle$ は命題 $s \models \langle\langle SHAVING, x, x \rangle\rangle$ を抽象化して得られる.

⁴ 以前は, $\exists$ や $\forall$ 型の事態の否定は認めていなかった.

事態の抽象化を考えよう。⁵ たとえば、 $\lambda x. \langle \langle \text{SHAVING}, x, x \rangle \rangle$ が例である。その意味は x を与えると事態 $\langle \langle \text{SHAVING}, x, x \rangle \rangle$ を返す関数と解釈する。パラメトリックな事態 $\sigma(x)$ の抽象化を、命題レベルの抽象化(型)と区別するために $[x|\sigma(x)]$ と書く。また次の略記法を用いる。

$$\langle \langle [x|\sigma(x)], a; 1 \rangle \rangle = [x|\sigma(x)](a).$$

このように事態のラムダ計算を導入した結果、もちろん、 $s \models \sigma$ をこの形の事態についても、通常どおり拡張しておかなければならない。

事態の間の論理的な同値関係を、この世界モデルに基づいて、例えば次のように導入できる： M のすべての現実的状況(世界 M の部分集合) s について $s \models \sigma \Leftrightarrow s \models \tau$ のとき $\sigma \leftrightarrow_1 \tau$ と書く。

そのとき

$$\langle \langle [x|\sigma], a; 1 \rangle \rangle \leftrightarrow_1 \sigma[a]$$

$$\langle \langle [x|\sigma], a; 0 \rangle \rangle \leftrightarrow_1 \overline{\sigma[a]}$$

が成り立つ [3]。Plotkin が示したモデル [12] のように、この性質が成り立たないモデルがあるので、この結果は、決してトリヴィアルではない。

5 おわりに

状況理論あるいは状況意味論を理解しようとするときに、疑問になると思われる部分で、とくに数学的な枠組としてそれがどんな理論であるか、ということを中心に解説した。その特徴は、非常に豊かなオブジェクトを持っていることと、世界を、局所的な視点を貼り合わせものとして、状況依存性をとらえていることであった。情報理論的な自然言語意味論の強力な枠組を掴みつつあると評価したい。

本解説は、筆者の解釈がかなり入っている。たとえば、状況理論とは、世界を拡張された多様体とみることだ—などという解釈は、筆者の提案である。解説者が異なれば、本解説とは、全く異なった状況理論のイメージになるかもしれない。とくに、本稿で解説した状況と事態(事実)と命題の関係は出発点に過ぎず、今後もっと新しい解釈がでてくると考えた方がよい。応用する側からすれば迷惑な話であるが、問題はやはり単純ではないのである。

本文で一切ふれなかったが、自然言語の文法の意味記述に状況意味論をつかうこと、状況理論の計算モデルを定式化すること、そして談話理解などの実際のプログラムに組み込むことなど、状況理論の応用も行われている。しかし、残念ながら、サーベイ不足のために紹介することができなかった。筆者の同僚など、いくつかのグループがそれを試みている。間もなくなされる予定の、彼らの報告を待ちたい。

謝辞 本稿は、ICOT 意味論研究懇話会の諸氏や同じく ICOT ワーキンググループ NLU/SWG1(状況意味論関係)の諸氏との議論をベースにしている。また CSLI/STASS グループからの、状況理論関係のネットワークメール等の情報が参考になった。しかし、もちろん、ここで述べた見解の誤りの責任は筆者にある。

参考文献

- [1] P. Aczel: Non-well-founded sets, CSLI lecture note, 1988.
- [2] J. Barwise: Situations and Attitudes, MIT Press, 1983.
- [3] J. Barwise: Notes on a Model of a Theory of Situations, Sets, Types and Proposition, draft, August, 1987.

⁵ これは、以前、descriptive property と呼ばれていたものである。

- [4] J. Barwise and J. Etchemendy: The Liar: An Essay on Truth and Circular Propositions, Oxford U.P., May 1987.
- [5] J. Barwise: Situations, Facts and True Propositions, draft, 1988.
- [6] L. Cardelli and P. Wegner: On Understanding Date Abstraction, and Polymorphism, Computing Surveys, Vol.17, No.4, 1985.
- [7] K. Devlin: Logic and Informaiton, A Mathematical Perspective on Situation Theory, draft, 1988.
- [8] D. Dowty 他: Introduction to Montague Semantics, Reidel, 1981.
- [9] S. Hayashi: Constructive Mathematics and Computer-assisted Reasoning Systems, in the proceedings of Heyting, Prenum Press, 1988.
- [10] J. Lambek and P.J. Scott: Introduction to Higher Order Categorical Logic, Cambridge University Press, 1986.
- [11] P. Martin-Löf: Intuitionistic Type Theory, Bibliopolis, 1984.
- [12] G. Plotkin: A Theory of Relations for Situations Theory, draft, 1987.
- [13] D. Scott: Domains for Denotational Semantics, ICALP'82, Aarhus, Denmark, July, 1982.
- [14] N. Steenrod: The Topology of Fibre Bundles, Princeton, 1972. (邦訳有り)
- [15] 片桐恭弘: 談話の世界, , 田中穂積, 辻井潤一 (共編著): "自然言語理解", 第5章, オーム社, 1988.
- [16] 白井英俊: 表象主義と実在論, 人工知能学会誌, Vol.3 No.1, 1988.
- [17] 橋田 浩一: AI とは何でないか — 情報の部分性について, bit, Vol.20, No.8, pp. 896-908, 1988.
- [18] 茂木 勇, 伊東 光弘: 微分幾何学とゲージ理論, 共立出版, 1986.