

チャンネル理論でなにができるか

〒 923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
下嶋 篤

What We Can Do with Channel Theory

Atsushi Shimojima

School of Knowledge Science

Japan Advanced Institute of Science and Technology

1-1 Asahi-dai, Tatsunokuchi, Nomi

Ishikawa 923-1292 Japan

1 はじめに

チャンネル理論 (channel theory) は, Barwise と Seligman の著作 *Information Flow: the Logic of Distributed Systems* (1997) で展開された数学理論であり, 哲学者 Dretske が構想し (Dretske 1981), Barwise と Perry の状況意味論によって部分的に継承され (Barwise & Perry 1983), その後 Barwise ら (Barwise 1991, 1993, Barwise & Etchemendy 1990, Barwise et al. 1996) によって漸次的に発展させられてきた定性的情報理論 (qualitative theory of information) の最新の結果である. 本稿の目的は, この理論の特徴とポテンシャルをできるだけ明確にすることである.

そのために, 本稿では, 理論の歴史的背景の紹介, 基本的アイデアの解説, 理論のポテンシャルの検討をそれぞれ第3節, 第4節, 第5節で行う. しかし, その前に, まず身近な例を挙げて, チャンネル理論の根本的な動機を明らかにしておこう.

2 動機

「コピーキャット犯罪」という言葉をご存じだろうか. 特定の種類の犯罪が起こり, それが報道され, 同種の犯罪が別の犯人によって起こされ, 場合によっては別の被害者が出る. ここで, どのようにして, コピーキャット犯罪による被害ということが起こりうるか考えてみよう. 事例によっては, 我々はおおむね次のように説明するだろう.

ある状況 s で α という性質の犯罪が起こる. その情報がジャーナリストに伝わり, その情報がテレビで流される. ある特定の人物が, テレビを見てその情報を得る. そして, その情報をもとに, α という性質の別の犯罪を計画し, 実行する. その犯罪で, ある人が被害にあったのは, その人がたまたまテレビを見ておらず, s で起こった犯罪についての情報を得ていなかったからである.

この説明は, 情報という概念に強く依存している. 実際, この顛末を, 情報や情報の流れに言及しないで, なおかつ筋が通るように記述してみよといわれると, 多くの人は困ってしまう. コピーキャット犯罪で被害が出たのは, もとの犯罪についての情報が, 特定の人物に伝わったのに, 別の人物には伝わらなかったからである. つまり, 被害は, 情報伝播の不均衡によって起こったのである. 実際, コピーキャット犯罪が, 俗に「情報化社会が生み出した犯罪」と呼ばれるのも, 情報概念を使ったこのような説明が, 多くの人にとって自然であるからであろう.

とくに「情報化社会が云々」という修辭がつけられていない, ごく日常的な現象にも, 情報に言及しないと自然に記述できないものが多い. たとえば, 私がカレンダーを見たあと急いで出勤の支度を始めたのは, カレンダーから今日が (以外にも) 日曜でないという情報を得たからである. 出勤電車で, ほとんどすべての人がうつむいているのは, 手に持った新聞や雑誌からなんらかの情報を得ようとしているからであり, それ以外に彼らが似た姿勢をとっている事実を説明するのは難しい. 一般に, 人間であれ, その他の動物であれ, いわゆる「認知エージェント」の行動を説明する場合に, 情報の概念はきわめてパワフルであり, ほとんど不可欠にさえ思われる.

ところが, ここにジレンマがある. 我々は, 科学的な意味で, 情報とは何かを知らないのである. 「情報が伝わる」と言うが, それでは, そのときに伝わっているものはなにかと訊かれると困る. 「情報」は, これほど便利に日常の現象の説明に使っている言葉だから, なにか「情報の科学」というものがあって, 我々の日常的な説明を厳密化できるはずだとも思うかもしれないが, そのような科学はないのである. Shanon (1948) の意味での情報理論が, それにもっとも近い確立された科学であるが, 後で触れるように, これは情報の量的側面にまとを絞った科学で, 我々の「情報トーク」を厳密化できるほどには, 情報の内容的側面に立ち入らない.

このジレンマから逃れる方策は、二つ考えられる。一つは、情報に関する厳密な科学がいまだに存在しないことを重くとして、日常の情報トークを厳密化することをあきらめ、情報トークで日常的に説明されている現象に対し、情報に言及しないで済むような別の説明を与える（もしくは、それが可能だと主張する）という方策である。この立場では、日常の情報トークは、根拠のない、単なる前理論的な「ものの言い方」にすぎないと解釈される。

もう一つの方策は、情報トークによる説明の力と自然さを重くとして、その力と自然さを保存しながら、なおかつ厳密であるような現象のモデルを与えられるように、情報の科学を整備するという方策である。この立場では、情報に関する厳密な科学がこれまで存在しなかったのが、そのような科学が不可能であるからではなく、単にその試みが十分に体系的になされなかったからである。ここで注意したいのは、この立場は、第一の立場が主張する、現象の代替的説明の可能性を否定しないということである。同一の現象に複数のモデルがあっても構わない。むしろ、第二の立場の主張は、日常の情報トークの説明力からして、それを厳密化した現象のモデルもまた、代替的なモデルと異なる面で有効であろうというものである。

本稿の主題であるチャンネル理論は、この第二の立場をとる。そして、「情報をはこぶ」という表現で日常的に記述される現象の数学モデルを提出し、それを軸に、推論、表現、コミュニケーションといった認知的行為についての情報トークが、科学的に厳密な形で展開できることを示そうとする。

3 背景

ことの起こりは、哲学者 Fred Dretske の著作 *Knowledge and Information Flow* (1981) である。その中で、Dretske は、伝統的な情報理論・コミュニケーション理論は「情報の量を取り扱い、その量をもって流れている情報そのものは、間接的で含意

による以外では、取り扱わない」(p. 3)とし「情報源から通信路を通じて送られる特定のメッセージ、特定の内容、すなわち、情報に関心をもつ」意味論的な情報理論 (semantic theory of information) を対比する。Dretske によると、情報は何らかの認知エージェントの頭の中にあるものではなく、むしろ、認知エージェントによる解釈過程を経なくても産出され、伝達され、受容される「客観的な財 (objective commodity)」(p. vii) である。そして、情報を対象にした科学理論にも、一般の科学理論に期待すべきこと、すなわち、「我々が関心をもっている諸現象の底にある実体やプロセスについての、多かれ少なかれ完全で、正確で、体系的な記述」(pp. 45-47) を期待すべきであるという。

情報の量的側面ではなく、内容的側面に着目する定性的情報理論の構想は、その後、Barwise と Perry の状況意味論により部分的に受け継がれた (Barwise & Perry 1983)。そこでは、自然言語文の発話の解釈も、ある状況が他の状況についての情報を運ぶという一般的な現象の例であると主張され、したがって、自然言語意味論は「情報の流れに関する一般理論のなかで言語がどのように位置づけられるかを説明しなければならない」(p. 41)。Barwise と Perry は、この目的を達成する言語的意味の関係理論 (relational theory of linguistic meaning) の建設をめざし、その過程で、Dretske が構想した定性的情報理論の一形態である状況理論 (situation theory) を展開する。実際、後に本稿で取り上げる、チャンネル理論のテーマの二つ (重層的な規則性、規則性に対する同調) は、すでにこの段階で、情報の一般理論が避けて通ることのできない問題として認識されていた。

その後、Barwise らは状況理論の整備という形で、徐々に定性的情報理論の整備を進めたが (Barwise 1989, Barwise & Etchemendy 1990)、その過程で、のちに述べる「情報同型写像 (infomorphism)」の原型である「情報リンク (information link)」や、「連結 (connection)」、「チャンネル (channel)」といった概念が理論の中心に置かれるようになる (Barwise 1991, 1993, Barwise, Gabbay, Hartonas

1995). 本稿で紹介するチャンネル理論は、この理論的伝統に属する、もっとも体系的な定性的情報理論の定式化である。

4 基本的アイデア

4.1 分類域

周知のように、論理学では、言語 L に対して「 L -構造」と呼ばれる集合論的構成物の集合を定義し、 L の文がある L -構造において真であるという関係 \models を定義する。ここで、それぞれの L -構造 M は、ある可能なあり方をした世界をモデルしており、したがって、ある L の文 ϕ と L の分の集合 Γ について、 Γ の要素のすべてが真であるようなあるゆる L -構造において ϕ が真であるということは、 ϕ が Γ の帰結であるということを表す。

これに対し、状況意味論では、ここでいう L -構造が可能世界ではなく、その一部、言い換えれば、ある可能なあり方をした状況 (situation) をモデルしており、したがって、任意の L -構造 M と L の文 ϕ について、 M が ϕ かその否定のどちらかを真にするという保証はない。 ϕ が M のモデルする世界の部分とはちがった部分を記述する文である場合には、 M は ϕ か ϕ でないかという問題について中立だからである。

さらに、状況意味論では、 L の文 ϕ は、もはや紙に書いたり発話したりできる対象としての文を表さない。むしろ、 ϕ は状況のあり方そのものをモデルする数学的对象であって、状況のあり方を記述する文を表すのではない。誤解をさけるため、状況意味論では、 ϕ はもはや「文」とは呼ばれず、状況タイプ (situation type) と呼ばれたり、 ϕ が L の原子文もしくはその否定にあたる場合には、インフォン (inphon) と呼ばれたりする。したがって、かつて文と世界の間には存在する「 \sim が \sim で真である」という関係をモデルしていた \models は、状況意味論では、状況と状況の可能なあり方の間に存在する「 \sim が \sim で成立している (hold in)」という関係をモデルすることになる。

チャンネル理論は、さらに一般化を進めて、状況のみならず、火星、エッフェル塔、下嶋、下嶋の右親指など、世界の部分と呼べるあるゆるものと、それらの可能なあり方との関係をモデルするために \models を用いる。そこで、 \models の左辺にくる対象の集合は、一般的にトークン (token) の集合と呼ばれ、右辺にくる対象の集合はタイプ (type) の集合と呼ばれる。ただし、たとえば、人間にをあてはまるようなタイプが必ずしも有意味に天体にあてはまるとは限らないから、チャンネル理論では、あるトークンの集合に対し、それにあてはまるような特定のタイプの集合を特定して、分類域 (classification) と呼ばれる領域を形成するとされる。

Definition 1 (classification) 分類域 $A = \langle \text{tok}(A), \text{typ}(A), \models_A \rangle$ は次の三つの構成要素から成る。

1. A のトークンと呼ばれる、分類される対象の集合 $\text{tok}(A)$.
2. A のタイプと呼ばれる、トークンを分類するために使われる対象の集合 $\text{typ}(A)$.
3. $\text{tok}(A)$ と $\text{typ}(A)$ との間の二項関係 \models_A .

4.2 局在論理

論理学で、ある言語の文の間の帰結関係を議論するのと同じように、チャンネル理論では、ある分類域のタイプの間での帰結関係について議論する。局在論理 (local logic) という概念はそのために用いられる。

いま、 A が分類域であるとすると、 A のタイプの集合 Γ, Δ の対 $\langle \Gamma, \Delta \rangle$ は A のシークエントと呼ばれる。また、 A のトークン $a \in \text{tok}(A)$ について、 Γ に属するすべてのタイプが a にあてはまれば、 Δ に属する少なくとも一つのタイプが a にあてはまるという条件が満たされるとき、 a はシークエント $\langle \Gamma, \Delta \rangle$ を満足する (satisfy) と言われる。これらを前提に、ある分類域についての局在論理は次のように定義される。

Definition 2 (local logic) 局在論理 $\mathcal{L} = \langle \text{tok}(\mathcal{L}), \text{typ}(\mathcal{L}), \models_{\mathcal{L}}, \vdash_{\mathcal{L}}, N_{\mathcal{L}} \rangle$ は次の三つの構成要素から成る .

1. 分類域 $\text{cla}(\mathcal{L}) = \langle \text{tok}(\mathcal{L}), \text{typ}(\mathcal{L}), \models_{\mathcal{L}} \rangle$.
2. 分類域 $\text{typ}(\mathcal{L})$ のシーケントの集合 $\vdash_{\mathcal{L}}$ (集合 $\vdash_{\mathcal{L}}$ の各要素は \mathcal{L} の制約 (constraint) と呼ばれる .)¹
3. $\text{tok}(\mathcal{L})$ の部分集合 $N_{\mathcal{L}}$ (ただし , $N_{\mathcal{L}}$ の各要素は , $\vdash_{\mathcal{L}}$ に属するすべてのシーケントを満足し , \mathcal{L} の正常なトークン (normal tokens) と呼ばれる .)

定義からも明らかなように , 一つのカテゴリについて , 複数の局在論理が存在する . カテゴリ A についての局在論理 \mathcal{L} は , A のすべてのトークンが \mathcal{L} の正常なトークンであるとき (すなわち , $\text{tok}(\mathcal{L}) = N_{\mathcal{L}}$ であるとき) , 健全である (sound) と言われ , A のすべてのトークンが満足するシーケントが $\vdash_{\mathcal{L}}$ に属するとき , 完全である (complete) と言われる . カテゴリ A についての局在論理は , 多くの場合 , 健全でも , 完全でもない .

逆に , カテゴリ A から出発して , A のトークンの集合 $\text{tok}(A)$ を正常なトークンの集合とし , A のすべてのトークンが満足するシーケントの集合を制約の集合とするような局在論理が構成できる . この論理は , $\text{Log}(A)$ と書かれ , A から生成される (generated) と言われる . $\text{Log}(A)$ は , 当然 , A について健全で完全である .

4.3 情報同型写像

Definition 3 (infomorphism) カテゴリ A からカテゴリ C への情報同型写像 $f : A \rightleftharpoons C$ とは次の条件を満たす関数の対 $\langle f^{\wedge}, f^{\vee} \rangle$ である .

- $f^{\wedge} : \text{typ}(A) \rightarrow \text{typ}(C)$.

¹局在論理の制約の集合 $\vdash_{\mathcal{L}}$ には , さらに , 正規である (regular) という条件が課される . 正規性は , たとえば , $\vdash_{\mathcal{L}}$ が weakening や cut に対して閉じていることを保証する . 詳細については , Barwise & Seligman (1997) の第 9 講 「正規な理論」を参照 .

- $f^{\vee} : \text{tok}(C) \rightarrow \text{tok}(A)$.
- すべてのトークン $c \in \text{tok}(C)$ とすべてのタイプ $\alpha \in \text{typ}(A)$ について ,

$$f^{\vee}(c) \models_A \alpha \Leftrightarrow c \models_C f^{\wedge}(\alpha)$$

が成り立つ (図 1 参照) .

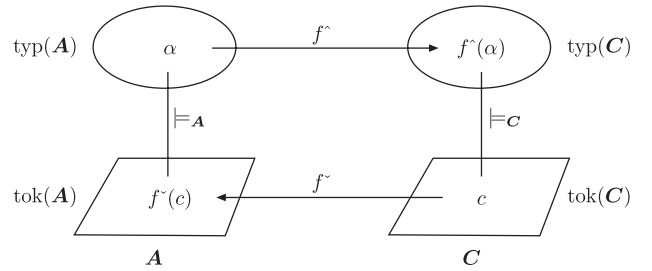


図 1 情報同型写像

以下では , この定義中の三番目の属性を情報同型写像の等価性と呼ぶことにする . この属性により , 情報同型の二つのカテゴリ A と C は , その \models 関係に関して , ほぼ等価なふるまいをする . ここで 「ほぼ」と言うのは , この属性が保証する等価性は関数 f^{\wedge} の定義域と値域にあるタイプと f^{\vee} の定義域と値域にあるトークンに限られるからである . すなわち , f^{\vee} の値域の外にある A のトークンのふるまいと , f^{\wedge} の値域の外にある C のタイプのふるまいは , カテゴリ A と C の同型性の域外にある . 情報同型写像 f の保証する同型性がこのように部分的であるという点は , チャンネル理論の技術的な構成にとって , きわめて重要である .

4.4 チャンネル

次の定義に見られるように , Barwise と Seligman の言うチャンネル (channel) とは , 一つの核に向かう情報同型写像の集まりである .

Definition 4 (channel) チャンネル C は , 情報同型写像の指標つきファミリー $\{f_i : A_i \rightleftharpoons C\}_{i \in I}$ である . カテゴリ C はチャンネル C の核 (core) と

呼ばれる．核 C のトークンは連結 (connection) と呼ばれ，連結 c は $i \in I$ であるような諸々のトークン $f_i^\wedge(c)$ を連結していると言われる．指標集合 $\{0, \dots, n-1\}$ をもつチャンネルは n 項のチャンネルと呼ばれる．

たとえば，図 2 は，情報同型写像 $f_0 : A_0 \rightleftharpoons C$ と $f_1 : A_1 \rightleftharpoons C$ とから成る 2 項のチャンネル $\{f_i : A_i \rightleftharpoons C\}_{i \in \{0,1\}}$ を描いており，分類域 C がこのチャンネルの核である．また， C のトークン c は， A_0 のトークン a と， A_1 のトークン b とを連結している．さらに，以下では末端分類域という表現を使って，チャンネルで結ばれている分類域（この例では， A_0 と A_1 ）を指すことにする．

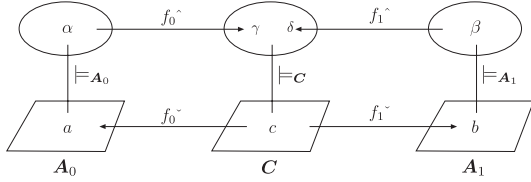


図 2 チャンネルの例

チャンネルという概念の面白さは，異なる分類域で成立する事実の帰結関係をモデルできるところにある．たとえば， $C = \{f_i : A_i \rightleftharpoons C\}_{i \in \{0,1,2,3,4,5,6,7\}}$ という八項チャンネルを考え，さらに， $a_7 \models_{A_7} \alpha_7$ という A_7 上の条件が， $a_3 \models_{A_3} \alpha_3$ と $a_4 \models_{A_4} \alpha_4$ と $a_5 \models_{A_5} \alpha_5$ という， A_3, A_4, A_5 上の条件の帰結であるとしよう．チャンネル理論では，このことを次のような条件が成立していることとしてモデルできる．

1. 核 C のあるトークン c が a_7, a_3, a_4, a_5 を連結している．
2. $\{f_3^\wedge(\alpha_3), f_4^\wedge(\alpha_4), f_5^\wedge(\alpha_5)\} \vdash_{\text{Log}(C)} f_7^\wedge(\alpha_7)$ ．

（ここで， $\vdash_{\text{Log}(C)}$ はタイプの集合間の関係であるから，第 2 の条件中の $f_7^\wedge(\alpha_7)$ は， $\{f_7^\wedge(\alpha_7)\}$ と書くのが正しいが，読みやすさのために，制約の記述においては単位集合の $\{ \}$ は省略することにする．

実際に，条件 1,2 と $a_3 \models_{A_3} \alpha_3$ と $a_4 \models_{A_4} \alpha_4$ と $a_5 \models_{A_5} \alpha_5$ を前提すれば， $a_7 \models_{A_7} \alpha_7$ が帰結

することは容易に確かめられる．まず，条件 1 により， $f_3^\wedge(c) = a_3$ である．すると，情報同型写像 f_3 の等価性により， $a_3 \models_{A_3} \alpha_3$ という前提から， $c \models_C f_3^\wedge(\alpha_3)$ が導かれる．同様にして， $a_4 \models_{A_4} \alpha_4$ と $a_5 \models_{A_5} \alpha_5$ という前提から， $c \models_C f_4^\wedge(\alpha_4)$ と $c \models_C f_5^\wedge(\alpha_5)$ が導かれる．ところで，条件 2 により，核 C のあらゆるトークンについて，もしそれがタイプ $f_3^\wedge(\alpha_3), f_4^\wedge(\alpha_4), f_5^\wedge(\alpha_5)$ であれば，それはタイプ $f_7^\wedge(\alpha_7)$ である．したがって，とくに， c がタイプ $f_7^\wedge(\alpha_7)$ であることが導かれる．ところが，条件 1 により， $f_7^\wedge(c) = a_7$ であるから， f_7 の等価性により， $a_7 \models_{A_7} \alpha_7$ が得られる．

このように，チャンネルの概念を用いれば，様々な事実について，それらが異なる領域に属する，異なった仕方で分類される対象に関わるものであることを尊重しながら，なおかつ，それらの間の帰結関係をモデルすることができる．

4.5 情報内容

もっとも，一つのチャンネル $C = \{f_i : A_i \rightleftharpoons C\}_{i \in I}$ が提供する帰結関係は，ただ一つしかない．すなわち，核 C から生成される健全で完全な局在論理 $\text{Log}(C)$ によって決定されるものだけである．しかし，先に見たように，一般に，一つの分類域について，複数の局在論理が存在する．したがって，とくに，核 C についても複数の局在論理が存在するから，帰結の概念をチャンネルだけではなく，チャンネルとその核の局在論理の一つに相対化して定義することによって，一つのチャンネル上に複数の帰結関係を定義することができる．

簡単のために，条件が二つである場合に限って，そのような帰結の概念を定義しておこう．

Definition 5 (consequence) $C = \{f_i : A_i \rightleftharpoons C\}_{i \in \{i,j,\dots\}}$ がチャンネルであり， \mathcal{L} が核 C についての局在論理であるとせよ．さらに， $a \models_{A_j} \alpha$ が成立しているとせよ．次のような場合に， $b \models_{A_i} \beta$ という情報が， C と \mathcal{L} に相対的に， $a \models_{A_j} \alpha$ という事実の帰結であるといわれる．

1. トークン a と b を連結するような, \mathcal{L} の正常なトークン c が存在する (すなわち, $f_i^{\sim}(c) = a$, $f_j^{\sim}(c) = b$ であるような $c \in N_{\mathcal{L}}$ が存在する.)
2. $f_i^{\wedge}(\alpha) \vdash_{\mathcal{L}} f_j^{\wedge}(\beta)$.

ここで言う局在論理 \mathcal{L} は $\text{Log}(C)$ と一致しないこともあるから, \mathcal{L} に相対的に定義される帰結関係は, チャンネル C の自然な論理から逸脱することがある. とくに, \mathcal{L} が不健全な論理である場合, $\text{Log}(C)$ なら帰結関係を認めない条件の間に帰結関係を認めることがありうるし, さらに, \mathcal{L} が不完全な論理である場合, $\text{Log}(C)$ が帰結関係を認めない条件の間に帰結関係を認めることもありうる.

Barwise と Seligman の基本的な主張は, こうした緩やかな帰結の概念を前提にして, 「ある事実がある情報を運ぶ (carries), 伝達する (conveys), 含む (contains)」という表現で直観的に記述される事態はすべて, 上記の意味で, ある情報 $b \models_{A_i} \beta$ を, ある事実 $a \models_{A_j} \alpha$ の帰結にするようなチャンネル C とその核についての局在論理 \mathcal{L} が存在することとしてモデルできる, というものである. したがって, 彼らにとって, 定性的情報理論とは, チャンネルと局在論理に関する数学理論にほかならない.

5 ポテンシャル

以上の解説を基礎に, 本節では, チャンネル理論のポテンシャルの検討を行う. ただし, 以下では, 原著で示唆的にしか語られていないチャンネル理論の応用の可能性についても論じるため, Barwise & Seligman (1997) の忠実な解説をやや越えている部分があるので, 注意してほしい.

5.1 重層的な規則性の問題

ある分類域 clA についての局在論理の集合を, $A^{\mathcal{L}}$ と表すことにしよう. $A^{\mathcal{L}}$ の要素は, その「強さ」に応じて, 次のように順序づけられる.

Definition 6 (\sqsubseteq on logics) 1つの分類域 A に

についての局在論理の集合 $A^{\mathcal{L}}$ に, 次のような半順序を定義する.

$\mathcal{L}_1 \sqsubseteq \mathcal{L}_2 \Leftrightarrow \mathcal{L}_1$ のすべての制約が \mathcal{L}_2 の制約であり, かつ $N_{\mathcal{L}_2} \subseteq N_{\mathcal{L}_1}$

したがって, とくに, チャンネル C の核 C についても, このように順序づけられた複数の局在論理が存在するから, すでに見た方法で, 帰結の概念をチャンネルとその核の局在論理に相対化して定義すれば, 異なる強さをもった複数の帰結関係を一つのチャンネル上に定義することができる. すると, ここからさらに進んで, チャンネル上の一つの帰結関係を定義するために, 異なる強さをもった複数の局在論理に言及するという方針をとることもできるはずである.

たとえば, C の一定のシーケントについては, $C^{\mathcal{L}}$ の一つの局在論理 \mathcal{L}_i が適用するとしておいて, その他のシーケントについてはもっと弱い論理 \mathcal{L}_j が適用するとして, 二つの論理 $\mathcal{L}_i, \mathcal{L}_j$ にまたがる帰結関係を定義することができる. 一般に, C についての局在論理の集合 $C^{\mathcal{L}}$ が与えられれば, C のシーケントの集合から $C^{\mathcal{L}}$ への関数 h を定義して,

$$\Gamma \Rightarrow \Delta \Leftrightarrow \Gamma \vdash_{h((\Gamma, \Delta))} \Delta$$

とおけば, 推論の前提 Γ と結論 Δ の内容に相対的化された帰結関係 \Rightarrow を定義することができる. チャンネル理論では, 個々の局在論理は古典的である. しかし, 上記のような, 複数の局在論理にまたがって定義される帰結関係 \Rightarrow は古典的であるとは限らない. 現に, Barwise & Seligman (1997) で提案されている非単調推論のモデルは, この戦略に沿って新しい演繹の概念を定義しており, ここでは詳論しないが, 推論の前提と結論による「背景条件 (background condition)」の縮小に言及して, 特定の h を動機づけている.²

²詳細については, Barwise & Seligman (1997) の第 19 講「常識的な推論」を参照.

5.2 遠隔推論の問題

我々がある対象 b について推論するとき、 b について直接に推論を行う場合と、別の対象 a に b を表現させておいて、 a について推論を行うことで、間接的に b について推論を行う場合とがある。Barwise と Seligman は、後者の推論を遠隔推論 (reasoning at a distance) と呼ぶ。

遠隔推論の例としては、ある社会情勢について考えるために、特定の統計を取ってグラフを作り、そのグラフそのものの性質について考える場合、ある川に堤防工事を施した後の水流を予測するために、その川のモデルをつくって、モデルの性質を調べる場合、もっと身近な例を挙げれば、計算をするのに指を使う場合が挙げられる。Barwise と Seligman によると、科学者の行うモデル化も、対象となる現象についての推論を行うために、現象を一定の数学的对象でモデルしておいて、その数学的对象について推論を行う (定理を証明する) ことによって、モデルされた現象について知見を得る点で、遠隔推論の例である。

こうした遠隔推論の有効性は、表現される対象 b に関する規則や法則が、表現する対象 a に関する規則や法則によってどの程度までうまく再現されているかによって左右される。たとえば、 b に関するある規則が a に関する規則として再現されていなければ、遠隔推論は行うべき妥当な推論を逸することになるし、反対に、 b に関する規則でないものが a に関する規則として再現されていれば、遠隔推論は妥当でない推論を行うことになる。チャンネル理論では、表現する対象 a についての規則性と、表現される対象 b についての規則性との関係を、二項チャンネルで結ばれた二つの分類域を考え、それらの局在論理の対照を調べることでモデルできる。

たとえば、図3で描かれている二項チャンネル C で、 D が表現される対象を分類する分類域で、 P が表現する対象を分類する分類域であるとせよ。チャンネル C は、表現する対象と表現される対象の関係をモデルしており、分類域 P のトークン a

が C のトークン c によって D のトークン b に連結されているということは、ある遠隔推論の場面で、 a が b を表現する対象として使われているということを表す。ここで、 $\text{Log}(P)$ は、表現する対象そのものを支配する規則性をモデルする局在論理である。したがって、もし何らかの方法で $\text{Log}(P)$ を分類域 D についての局在論理に正確に「翻訳」できれば、結果する論理が D について健全であるか、完全であるかを調べることによって、 a を b の表現として用いる遠隔推論の論理的性質が分かる。

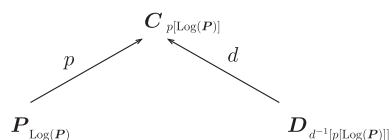


図3 表現する対象の分類域 P と表現される対象の分類域 D を結ぶチャンネル

ここでは詳論しないが、Barwise と Seligman によると、そのような翻訳は、おおむね次のようにして得られる。まず、情報同型写像 p をたどって $\text{Log}(P)$ の像をとり、分類域 C についての局在論理 $p[\text{Log}(P)]$ を得る。そのあと、さらに情報同型写像 d を逆にたどって、 $p[\text{Log}(P)]$ の逆像 $d^{-1}[p[\text{Log}(P)]]$ をとる³。こうして得られる、 D についての局在論理は、チャンネル C を通じて D に誘導された (induced) 論理と呼ばれる。大づかみな言い方をすれば、 D がこの押しつけられた論理にどこまで従った分類域であるかで、遠隔推論の有効性が大きく左右される。

5.3 規則性に対する同調の問題

状況理論では、認知エージェントが環境で成立する様々な規則性に同調 (attune) して行動するという事実にきわめて強い力点が置かれる。たとえば、雨雲が出れば雨がふるから、傘をもって出かける。カモメが群れるところには魚の群がある

³翻訳の詳細については、Barwise & Seligman (1997) の第13講「遠隔推論」と第14講「局在論理の表現」を参照のこと。

から、そこで漁をする。ヒバリがさえずる付近はなわばりだから他のヒバリは近づかない。音がすると獲物が逃げるから、フクロウは羽音を立てずに飛ぶ。ある見え方をするモンシロチョウは雌だから雄はそちらに向かう。「クマ注意」の看板があるとその付近にクマがいるから、クマよけの鈴をもって歩く。地震のあとのラジオで「津波の心配がない」と放送されれば、津波はこないのだから、避難しない。わたしのバックパックがカチャカチャ鳴っていると、研究室の鍵は中に入っているのだから、そのまま出勤する。頭の丸い蛇は毒がないから、林で会っても急いで逃げない。黄色に黒い縞模様の昆虫は毒のあるハチだから鳥は狙わない。

状況理論では、ある規則性「 p なら q 」に対する認知エージェント a の同調が、「 a が事実 p を反映した状態にあるとき、 a は事実 q を反映した状態にある」という規則性が a について成立していることとしてモデルされる。このモデルは、 a が事実 p を反映する内的な表象をもっていて、 p を内的に操作して q という別の内的表象を導くという表象主義的なモデルにコミットしていない。必要なのは、 a が p や q を反映する表象をもつことではなく、より一般的に、 a が p や q を反映した状態になることだけである。このため、このモデルは、ある知覚内容に対する反射行動という低次の活動から、発話や記号の意味解釈、特定の事実からの推論といった高次の活動まで、幅広い認知活動を共通の基盤でモデルするための手がかりになる。Dretske (1981) が構想したように、「シグナルを解釈し、信念を持ち、知識を獲得するための資源をもった真の認知システム」を「低次の、純粋に物理的な情報処理メカニズム」(p. vii) との連続性の中でとらえるポテンシャルをもっているのである。ところが、残念なことに、このモデルは状況理論が提供する数学理論に正式に組み入れられることはなかった。

これに対し、チャンネル理論では、認知エージェントの状態についての局在論理と、環境で成立する諸条件についての局在論理の照応という形で、環境の規則性に対する認知エージェントの同調とい

う現象がモデルできる。このことを少し詳しく見てみよう。

たとえば、図4の下部に描かれているチャンネル $C = \{f_0, f_1\}$ が、ある環境をモデルしているとせよ。すると、核 C についての自然な局在論理 $\text{Log}(C)$ は、 C の末端分類域 A_0, A_1 で成立する条件の間の帰結関係を決定する。次に、図の右上部の分類域 P が、下嶋という認知エージェントの異なる時間での状態を分類しているとせよ。すなわち、 P のトークンは、異なる時間での下嶋であり、 P のタイプは、下嶋がとりうる様々な状態であるとする。すると、 $\text{Log}(P)$ は、下嶋という認知システムについての、様々な条件間の帰結関係をモデルした局在論理である。さらに、図4の全体で描かれている、三項のチャンネル $C' = \{d \circ f_0, d \circ f_1, p\}$ と、その核 C' についての特定の局在論理 \mathcal{L} が、 P で成立する条件による、 A_0 と A_1 に関する条件の「反映」の関係を表しているとせよ。たとえば、このモデルでは、環境についての条件 $a \models_{A_0} \alpha$ が、 C' と \mathcal{L} において、下嶋についての条件 $t \models_P \alpha'$ の帰結であるということが、後者が前者を反映しているという事態を表している。

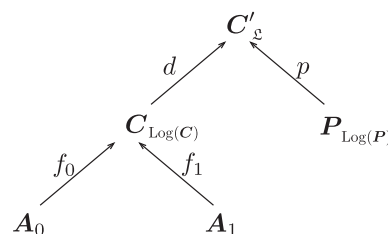


図4 環境の規則性に対する認知エージェントの同調をモデルするチャンネル

すると、下嶋という認知システムが、環境で成立する規則性にどの程度まで同調しているかは、局在論理 $\text{Log}(C)$ と局在論理 $\text{Log}(P)$ とを比較すれば分かる。たとえば、 C' と \mathcal{L} において、下嶋についての条件 $t \models_P \alpha'$ および $t \models_P \beta'$ と、環境内の条件 $a \models_{A_0} \alpha$ および $b \models_{A_1} \beta$ との間に、それぞれ反映の関係があるとし、さらに、局在論理 $\text{Log}(C)$ において、シーケント $\{\{f_0(\alpha)\}, \{f_1(\beta)\}\}$ が制約でないのに、局在論理 $\text{Log}(P)$ において、シー

クエント $\langle \{\alpha'\}, \{\beta'\} \rangle$ が制約であるとせよ．ここで， $a \models_{A_0} \alpha$ が現実に成立し，それを見た下嶋 t が状態 α' になり，その事実を反映したとせよ．どのようなことが起こるのであろうか．まず，シークエント $\langle \{\alpha'\}, \{\beta'\} \rangle$ が局在論理 $\text{Log}(P)$ の制約であるため，下嶋 t はこの段階で，状態 β' にならなければならない．言い換えると， t は，下嶋という認知システムを支配する制約により，環境 c に関する条件 $b \models_{A_1} \beta$ を反映する状態にならなければならないのである．ところが，シークエント $\langle \{f_0(\alpha)\}, \{f_1(\beta)\} \rangle$ は，局在論理 $\text{Log}(C)$ でないから，条件 $b \models_{A_1} \beta$ は条件 $c \models_C f_0(\alpha)$ の帰結ではなく，実際，現実に成立していないかもしれない．しかし，下嶋はすでにその情報を反映した状態にあるので，それに従った行動をとってしまう．いわば，環境の規則性に対する下嶋の同調は，この点において不健全 (unsound) なのである．

環境の規則性に対する下嶋の同調の不完全さ (incompleteness) も，同じようにして，局在論理 $\text{Log}(C)$ と局在論理 $\text{Log}(P)$ とを対照することでモデルできる．ただし，この場合は，あるシークエントが $\text{Log}(C)$ の制約であるのに，対応する特定のシークエントが $\text{Log}(P)$ の制約でないという事態によってモデルされる．

6 おわりに

以上，チャンネル理論の動機，歴史的背景，基本的なアイデア，そして理論のポテンシャルについて述べた．その過程で，チャンネルと局在論理という二つの主要概念が相互に作用するところに，チャンネル理論の主要なパワーがあることを見た．とくに，Barwise & Seligman (1997) では，次の二つの特徴が際だっており，それらを利用して，重層的な規則性，遠隔推論，規則性に対する同調といった現象にアプローチできることが分かった．

- チャンネルの核 C についての複数の局在論理によって，チャンネル上に重層的な帰結関係を定義できること．

- ある分類域 D と別の分類域 P をつなぐチャンネルを考え， D の局在論理と P の局在論理を対比できること．

本稿では，できるだけチャンネル理論の全体を鳥瞰して，細かな点の補充を原著に任せるというアプローチを取ったつもりである．ただし，原著では，分類域の和という概念を導入して，局在論理の移動先をすべてそちらにもっていく形で，かなりエレガントな「情報システム (information system)」の理論が展開されているが (第 15 講)，限られた紙数でそこまで理論を組み立てるのは，数学者でない私の力の及ぶところではなかった．また，原著では，いわゆる状態空間を分類域の特殊事例としてモデルし，チャンネルによる規則性のモデルと，実数上の方程式で表現される法則のモデルとの統合を計っているが (第 16 講)，ここでは，状態空間に関する一連の議論も割愛せざるをえなかった．原著にあたって欠損を埋めることを読者にお願いしたい．

それでは，チャンネル理論は，Dretske の構想し定性的情報理論の最終的な実現であらうか．答えはもちろん，チャンネル理論でなにができるかによって左右される．言い換えると，本稿で示したようなチャンネル理論の道具立てを使って，どこまで壮大な情報トークを展開でき，それによって，どこまで認知エージェントの行動を説明できるかにかかっている．本稿での検討が，この点についてのチャンネル理論のポテンシャルを少しでも明らかにできたことを願う．

参考文献

- Barwise, J. (1989). *The Situation in Logic*. Stanford: CSLI Publications.
- Barwise, J. (1991). Information Links in Domain Theory. In S. Brooks, M. Main, A. Melton, M. Mislove, & D. Schmidt (Eds.), *The Mathematical Foundations of Programming Semantics Conference* (pp. 168–192). Berlin: Springer Verlag.

Barwise, J. (1993). Constraints, Channels, and the Flow of Information. In P. Aczel, D. Israel, Y. Katagiri, & S. Peters (Eds.), *Situation Theory and Its Applications, Volume 3* (pp. 3-27). Stanford: CSLI Publications.

Barwise, J., & Etchemendy, J. (1990). Information, Infons, and Inference. In R. Cooper, K. Mukai, & J. Perry (Eds.), *Situation Theory and Its Applications* (pp. 33-78). Stanford: CSLI Publications.

Barwise, J., Gabbay, D., & Hartonas, C. (1996). Information Flow and the Lambek Calculus. In D. Westerstål & J. Seligman (Eds.), *Language, Logic and Computation, Volume I* (pp. 49-64). Stanford: CSLI Publications.

Barwise, J., & Perry, J. (1983). *Situations and Attitudes*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Barwise, J., & Seligman, J. (1997). *Information Flow: the Logic of Distributed Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Dretske, F. I. (1981). *Knowledge and the Flow of Information*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Shannon, C. (1948). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana-Champaign, IL: The University of Illinois Press.

問い合わせ先

〒 923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1 - 1
北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
下嶋 篤
電話 : (0761) 51-1741
ファックス : (0761) 51-1149
電子メール : ashimoji@jaist.ac.jp

著者略歴

兵庫県明石市生まれ。1985年に同志社大学文学士，1988年に文学修士。1990年に渡米，1996年にインディアナ大学 Ph.D. 1996年より1998年までATR 知能映像通信研究所奨励研究員。1998年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究助教授。専攻は，哲学，認知科学，論理学。現在の研究テーマは，知識の外的表現の有効性，対話の情報論的モデル。