

## 特集

「機械学習、それが人に及ぼさる理由」

## 言語獲得におけるシンボルグラウンディング

## Conditions for Language Learning to Be Symbol-Grounded

今井 むつみ

Mutsumi Imai

慶應義塾大学環境情報学部

Faculty of Environmental Information, Keio University.

imai@sfc.keio.ac.jp, <http://web.sfc.keio.ac.jp/~imai>**Keywords:** symbol-grounding, language learning, statistical learning, sensor-symbol mapping, feature extraction.

## 1. はじめに

本稿では、認知心理学、特に語意の学習とレキシコンの獲得（構築）という観点から、人間の学習の特徴について議論したい。具体的には、本特集号に寄稿して下さった人工知能研究者の諸論文の中で議論されていたキーワードの中でシンボルグラウンディング、統計学習、身体性を取り上げ、これらを軸に人の言語学習の要件について考えてみたい。

## 2. レキシコンの学習とシンボルグラウンディング問題

「シンボルグラウンディング」という言葉は慶應の同僚の古川康一氏からよく聞かされており、人工知能研究にとって非常に重要な概念であるということは知っていたが、長い間よく理解できず、最近ようやく自分の研究していること、つまり子どもがいかにレキシコン（心的語彙・概念辞書）を獲得するかということ自体がシンボルグラウンディングの問題なのだということにおぼろげながら気づいた次第である。子どもがレキシコンを構築するに際して、感覚情報（主に視覚、時として触覚情報）から環境中に存在するさまざまな対象を環境から切り出し、その対象に対してシンボル（表象）をつくり出し、そのシンボルにラベルを対応づけなければならない。シンボルは単に写真のような視覚的イメージでは不十分である。というのはそれぞれのシンボルがあるレベルで抽象化され、特定の対象の視覚イメージを超えて汎用性を伴ったものでないとラベル付けができないからである。

まず、ある環境から切り出された対象が個別性をもつ存在なのか、個別性をもたない存在なのか（つまり物体なのか、物質なのか）が判断されないと、ラベル付けが（より正確に言うとならば）できない。このことは英語のように概念の可算・不可算を文法で明示的に、かつ強制的に区別することをしない日本語話者にとってはあまり重要な区別に思えないかもしれない。しかし、対象が個別性のある物体であるか、個別性のない物質であ

るかによって、カテゴリーを決定する基準、さらにラベルを般用する基準がまったく異なる。例えば「コップ」は個別性があるので、全体の形状および機能性が「コップ」のカテゴリー成員を決定する。コップの色、素材、部分などは「コップ」の本質（内包）とはなんら関係がなく、コップが壊れた場合、そのコップのかげらの一片やコップの取っ手はもはや「コップ」ではない。他方、「粘土」を考えてみよう。粘土はさまざまな形状に成形可能である。しかし、「粘土」という概念の本質（内包）にとって形状はまったく無関係である。球形に成形した粘土の一部をちぎり取った場合、球形の残骸も、ちぎり取ったかけらも、ともに粘土なのである。このことからわかるように、個別性がある存在、個別性がない（つまり「全体」という概念をもたない）存在の区別は、カテゴリー成員決定の基準が根本的に異なる「存在論的カテゴリー区分」なのである [Quine 69]。そしてこの個別性に関する存在論的区分を理解し、さらに目の前の特定の対象がそのどちらのカテゴリーに属するのかを判断できなければ、その対象のラベル付けは不可能なのである [Imai 97]。

ある対象が個別性がある存在であることが判断できたとしても、そこで問題は終わらない。その対象が属するカテゴリーを決定するためには、ほぼ無制限に存在する可能な属性の中からカテゴリーにとって、関連ある属性を抽出しなければならないからである [Goodman 83]。しかも、概念は階層構造をもっており、カテゴリー成員の決定に際して対象のもつどの属性に注目すべきなのかは、階層構造のどのレベルのカテゴリーを問題にするかで異なる。例えば、ネコの全体的な形態（この表現は十分抽象的で、たぶん機械には理解できないだろう）は重要だが、先端部分（しっぽ）の長さ、形状はバリエーションを許す、色もバリエーションを許す、全体の大きさ、胴体の太さもある一定の範囲内でバリエーションを許す（ネコにも大型のもの、太ったものもいれば、小型のもの、細身のものもいる、しかし、トラほど大きいネコは存在しない）などという概念が伴わなければ——つまり無数に存在する視覚的な属性の中でどの属性がこの対象（の属するカテゴリー）にとって関係があるか、どの属性が無関係か、という「属性抽出」が行われなければ——「ネコ」というカテ

ゴリーを形成することは不可能である。しかし、「ネコ」ではなくて「ロシアンブルー」というネコの低位カテゴリの成員を決定する場合には、毛の長さや色がとても重要になるし、形状も「ネコ」の場合よりもかなりバリエーションが小さくなる。これが「ペット」という上位カテゴリになれば、もはや知覚属性はまったく役に立たない。ネコ、イヌ、ウサギなどの四足の小動物のみならず、ヘビあり、サカナあり、鳥あり、このような中から共通の知覚属性など見いだしようがない（しかも、すべてのサカナ、すべてのヘビ、すべてのネコ、すべてのイヌがペットというわけではない！）。

機械学習の場合、ほとんどのケースでは属性は人間が与え、物理的な感覚入力からの属性抽出は扱わない。が、それでもなお、目的や視点に応じて柔軟に抽象化の程度を変化させた概念を学習することは大きなチャレンジである [有村 03, 古川 03, 原口 03]。岩橋氏の研究は、感覚信号から属性抽出をし、シンボルをつくり出すという画期的な試みであるが、異なる階層構造に対応した概念のカテゴリ化については今のところ扱っていない。

ひとたび人間の子どもの目を転じると、子どもはもちろん、離散的な属性に分割されていない、ナマの感覚情報を入力として受け取り、そこから属性抽出をし、カテゴリをつくり、ラベルに対応づける、ということを行っている。しかし、子どもがことばと対象（概念）を対応づけること、つまり語意を学習することは、大きなパラドックスを含む問題である。クワインが有名な「ガヴァーイ問題」で指摘するように、一事例からの帰納では、その事例において無限に存在する知覚的、あるいは非知覚的属性の中から当該のことばに関連する属性を抽出し、語意を推論することは論理的に不可能であるからである [Goodman 83, Quine 69]。それにもかかわらず、子どもがことばと概念を学習し、レキシコンを構築していく過程には目をみはるものがある。子どもは生後 16 ~ 18 か月くらいで語意爆発という時期を迎え、その時期には一日に 5 ~ 10 語の割で新しいことばを語彙に加えていると言われている [Carey 78]。また、子どもが聞いたことがない新奇なことばを導入してそのことばを般用させる実験からは、ことばに対応する概念と一語で表されることばを通常もたない概念（例えばイヌと犬がすきなもの）を区別し、ことばに対応しない概念には新奇ラベルを般用しないこと [Imai 94]、初めて聞くことばを状況に応じて柔軟に、概念の階層関係の異なるレベルのカテゴリに対応づけることができること [Haryu 02, Imai 01] などがわかっている。

このことから一般的に子どもの語意の学習は何らかの形で制約されており、制約が存在することによって、ガヴァーイ問題に直面しない、つまりそもそも論理的には生成可能な無限数の意味の中から一つ一つの可能性を取りあげ、吟味するようなことはしない、と考えられている [今井 97, Markman 89]。ただし、子どもの語意学習が制

約されているということは研究者の間で合意が得られているものの、具体的に「何が」語意学習を制約しているのかという問題に関して、また、制約の起源、つまりそれが生得的に組み込まれているものなのか、生後の環境入力から「学習」されたものなのかという問題については決着がついていない [今井 00]。本稿では以下、統計的学習と身体性の観点からこの問題について考えてみたい。

## 2. 統計情報を計算する能力があれば、ことばの学習は可能か？

先述のように、ある対象について、その対象の個別性の有無（つまり物体か物質か）を判断し、それぞれの場合で異なる基準を用いてカテゴリ成員を決定しなければならない、という知識はレキシコンの学習の前提であり、この知識がないと、語意の推論ができない。そしてこの知識は英語のように可算・不可算文法によって、明示的に事物の個別性を指標しなければならない言語を母語とする子どものみでなく、日本語のように物質名と物体名を文法的に区別しない言語を母語とする子どもでも、子どもが遅くとも 24 か月の時点でこの知識をもつことが確認されている [Imai 97]。しかしこの知識が生得的に備わっていなければならないか、生得的な制約を想定しなくても学習できるものなのか、という点について大きく意見が分かれている [Colunga 03, Imai 03b, Soja 91]。L. Smith たちは、コネクショニストの立場から、日常の環境で子どもが遭遇する事物（物体と物質をともに含む）に対する視覚的な経験（つまり事物がどのような視覚的特徴をもっているか）を観察し、それらの事物に対応づけられるラベルがどのような知覚属性によって般用されるかを統計的に学習することによって子どもは物体と物質の存在論的区別は学習可能であると主張する。この主張を裏づけるため、彼女たちは子どもが語彙に含む物質名と物体名を網羅的に集め、それぞれの語について、「そのカテゴリ成員は形によって決まるか?」、「そのカテゴリ成員は素材によって決まるか?」、「そのカテゴリ成員は堅固性があるか?」などの質問を大人に対して行った。そしてその結果に基づいてそれぞれの事物に形、素材、堅固性の値を入力した。Smith は、単純なコネクショニストネットワークが、堅固性のあるモノに付与されたラベルは波形で般用され、堅固性のないモノに付与されたラベルは素材で般用される、という知覚次元の間の関係性を学習したことを示し、この結果によって、個別性に関する存在論的認識は生得的な知識ではなく、ことばの学習の過程で知覚次元の相関関係を学習することによって——つまり、堅固なモノにつけられるラベルは形で般用され、堅固性のないモノにつけられるラベルは素材によって般用されるということを統計的に学習することによって——創発するものである、と主張している。

単純なネットワークが知覚次元の間の相関関係を学習

し、ことばには形で般用される語と素材で般用される語があり、その区別はモノの堅固性によってなされる、ということを経験したこと自体はたいへん興味深い。人間の子どもは、生後7～8か月で統計的な遷移確率をインプットから抽出する能力があることが知られており [Saffran 96]、この能力をもってすれば、レキシコンの学習においても上記のような法則性をインプットから抽出することは十分可能であるように思われる。

しかし、問題なのは、このモデルではすでに **Solidity**, **Shape**, **Material** という属性次元があらかじめ設定している、という点である。つまり、実際には感覚情報は連続的で、属性は無制限に切り出すことが可能であるにもかかわらず、このモデルでは個別性に関する存在論的区別に関係する属性次元のみが切り出され、抽出されているのである。しかも堅固性の次元に至っては、堅固性がある・ない、の2値で表現されている。もちろん実世界では、堅固性は2値的ではなく、連続的に変化する。さらに、「素材 (material)」という感覚次元は存在しない。「素材」というのは多分視覚と触覚（ときには臭覚）が組み合わさった抽象的な概念である。Smith のモデルが、「形」、「素材」、「堅固性」という属性を使っていること自体、存在論的認識を前提としている、と反論されてもしかたがないのではないかと、いう気がするのである。

ここでまさにシンボルグラウンディング問題の振出しに戻る。人はいったいどうして、形、素材、堅固性といった知覚次元が抽出できるのだろうか？ 生態における感覚情報処理の制約（例えばニューロンのしきい値など）だけで十分なのか、それともそれ以上の生得的な「表象」のようなものを想定する必要があるのだろうか？

この問題を考えるためには、岩橋氏のように感覚情報（現在は聴覚情報と視覚情報に限られてはいるが）を直接に入力としているシステムで、何が学習可能で何が不可能か、どのような制約条件を入れれば不可能だったものが学習可能になるか、という観点が非常に重要である。現在、感覚情報を入力とし、物体と物質の両方を含めてラベルの学習を試みている研究はないと思われるが、はたしてこのようなシステムが形状、素材、堅固性という属性を抽出でき、堅固性あり→形に注目、堅固性なし→素材に注目、という規則を抽出できるのか、非常に注目される。ちなみに、切り出した属性を入力に用いた Smith のコネクショニストモデルでは形による語の般用は堅固性のある事物に限定されることを学習した。しかし、ナマの視覚情報を入力として扱い、ロボットに言語学習をさせようと試みている Roy [Roy 02] は、逆にこのバイアス次元へ注目するようなバイアスを最初から組み込まないとラベルの学習はできないとして、最初からこのバイアスを入れ込んでいる。

人の子どもの言語学習において統計的学習は疑いもなく非常に重要である。子どもが新奇な語の意味を推論する際に制約として用いる形状類似バイアス、相互排他性

バイアスなどの形成にも統計学習は深く関わっているに違いない。しかし、統計学習のみでは二つの重要な点について説明が難しい。第一に、上述の、感覚入力からの属性抽出の問題である。理論的にはどのようにも恣意的に切り分けられる感覚入力からどのように特定の属性を抽出しているのかという点が筆者の知識の範囲でのコネクショニストモデルでは説明されていない。Elman たちは [Elman 96] 脳のハード面の制約である構造的制約 (architectural constraints) と時系列的制約 (chronotopic constraints) という二つの制約があり、統計学習の学習アルゴリズムがあれば発達の非常に早期から存在し、一見「生得的」に存在するかのように見える能力の出現を、生得的な表象という制約をもち出さなくても説明できる、と主張している。筆者は基本的にこの考え方に賛成である。しかし、生得的な知識表象を仮定する必要性を真に否定するためには、システムにおいてシステム設計者が恣意的に属性を決定するのではなく、感覚情報からどのように属性が抽出されるかについての機構も明示する必要がある。

第二に、バイアスやルールの制御はどのようにされているのか、という問題がある。一般に一つのバイアス、ルールの創発は統計学習により説明できる場合が多い。しかし、言語学習においてはバイアスは無制限に適用されてはかえって学習が妨げられる。複数のバイアスが柔軟に制御され、話者の視線や文脈情報のような社会的手掛り、概念知識など組み合わせられることによって初めてレキシコンの獲得が可能になるのである。麻生氏が指摘されるように [麻生 03]、統計的学習は主に独立した単機能のタスクを対象とした場合に成功を収めているが、このような、複数のリソースの柔軟な制御メカニズムは統計的学習のアプローチ（主にコネクショニストアプローチ）だけで説明するのは難しいのではないだろうか。そもそも、人間の言語学習において最も特徴的なのは、ルールと知識が互いにブートストラップするような関係にあることである。生得的な知識がルール（バイアス）の形成に必要なかどうかという問題はひとまず脇に置いておいても、ひとたびバイアスが形成されれば、幼児は急激に語彙を増やし、知識を増加させる。同時にその知識によってバイアスを柔軟に制御し、バイアス自体を自己生成的に成長させる（これについては [今井 03a] で詳しく議論したので、そちらを参照していただきたい）。このようなルールバイアスの制御とバイアスと知識のブートストラッピングの現象は統計学習のみで説明するのは難しいように思われる。そもそも統計学習では学習された「知識」をどのように扱うのだろうか？

### 3. シンボルグラウンディングに身体性は必要か

前章では、感覚入力からどのように言語で必要なカテゴリーに関連する属性を抽出するのか、という問題に触

れた。最初から組み込まれた何らかの制約を想定しない  
とこの属性抽出の問題は解決できないように思われる。  
前述のように、それが視覚、聴覚など感覚的なカテゴリー  
を形成していくうえでの生理学的に組み込まれた制約  
だけでよいのか、一部の研究者が主張するように「存在  
論的知識」のような知識が生得的にあることを想定しな  
ければならないのかに関しては、今のところ明らかでは  
ない。しかし、いずれにしても、このプロセス、つまり感  
覚入力から学習者が言語カテゴリーの形成に必要な属性  
抽出を自ら行う、ということはシンボルグラウンディング  
に必須なことなのかもしれない。この意味で浅田氏がお  
っしゃっている、アイコン、インデックス、シンボルの階  
層構造という概念はたいへん示唆に富むものである。浅  
田氏は「上位は下位を内包する形で定義され、シンボル  
がそれ自身では存在し得ない…シンボルは下位の感覚  
運動系の連合学習を踏まえた抽象化過程を内包するこ  
とでシンボルたり得る。また逆に、上位からの具象化  
過程も含まれ双方向の処理過程が自在になされるこ  
とで、シンボルがグラウンドする可能性が見いだされ  
る」と主張されているが、これはまさに的を射た洞察  
であるという気がする。

筆者は以前から幼児における母語の学習と、大人にな  
ってからの外国語の学習は何が違うのかという問題に興  
味をもっていた。シンボルグラウンディングという観点  
から考えると、母語は明らかにシンボルが接地してい  
るのに対し、外国語は多くの学習者にとって接地してい  
ないのではないか。例えば、ある程度英語を学習した  
人なら「物体や数えられるモノの名前は可算名詞で、一  
つのときには“a”をつけ、複数のときには語尾に“s”  
をつける。砂や水のように数えられないモノの名前は  
不可算名詞で、単数・複数の区別をしない」というル  
ールは知っている。しかし実際にはそれぞれの事例に  
ついて、それが可算名詞で指示されるべきか、不可算  
名詞で指示されるべきかと判断をすることは容易では  
ない。具体的な事物の場合でも、スパゲティやうどん  
は可算か不可算か、豆や米は可算か不可算かが判断  
できない人が多いのではないかと（ちなみにスパゲ  
ティは不可算、うどんは可算、豆は可算で米は不可  
算である）。ましてや抽象名詞になるとお手上げで、  
多くの日本人はなぜ“idea”は可算なのに“evidence”  
は不可算なのか、理解に苦しむだろう。英語のネイ  
ティブスピーカーでも「なぜ」と聞かれて明確に言語  
化して答えられるひとはほとんどいない。しかし、彼  
らは確実にそれぞれの事例について正しく判断するこ  
とができるし、仮にまったく新しい概念が登場した  
場合、その語が可算なのか、不可算なのかが「直感  
的に」わかる。これは「なぜ」ということを明示  
的に言語化できなくても、判断を可能にする暗黙の  
抽象的な知識をもっているからである [Wisniewski  
96]。この暗黙の知識をもち、「直感」がある、とい  
うことが言語において「シンボルが接地している」  
ということなのではないだろうか。外国語において  
はシンボル、つまりことばの意味や文法カテゴリーに

関する知識は、母語の場合のように感覚情報から学  
習者が自ら抽象化して獲得されるものではなく、す  
でに切り出された属性が外的に教えられたり（例  
えば可算、不可算文法の場合なら、「堅固性に注  
目して、堅固なものは可算、堅固性がなければ  
不可算と考えよ」と教師から教えられる）、す  
でに母語でもっているシンボルを経由して外国語  
におけるシンボルを理解しようとする（例  
えば“come”という英語の動詞を辞書で引き、  
「来る」と書いてあるので「来る」と翻訳して理  
解する）場合が多い。よって、シンボルとして  
は知っていてもシンボルが感覚的な経験や当該  
外国語のレキシコンに関するもろもろの知識に  
「接地していない」ので、可算・不可算のど  
ちらかということを実際として知らない名詞に  
遭遇したときに、その名詞が可算か不可算か  
ということ判断できないし、“come”という  
動詞を正しく使うことができない（“come”  
と「来る」では前提とする視点の取り方が異  
なるので、「来る・行く」の直接的な翻訳で  
“come/go”を用いると英語としては誤り  
になる）。大人になってから学習した外国語  
では母語のような「直感」が働かず、知識  
として知っているきまり文句しか言えない、  
というのはシンボルが感覚を内包する階層  
構造の中に位置付けられていないからなの  
かもしれない、ということを読んだ次第であ  
る。

ただし、シンボルが感覚に接地していれば言語  
発達のすべてが説明できる、ということでは  
もちろんない。というより、このこと自体は、  
前章で述べた、なぜ子どもは母語の学習にお  
いて感覚入力から当該の言語を獲得する  
うえで、無関係な属性は無視して重要な属  
性のみを抽出できるのか、という問いに  
対する答えにはならないことは強調してお  
かなければならない。

#### 4. ことばの学習における「身体性」の意味

ここで改めて筆者の考える「身体性」とは何か  
ということを明確に定義しておきたい。とい  
うのは、この語はさまざまな研究者がそれ  
ぞれ異なる意味で使っており、どのような  
意味で「身体性」というのかを明示してお  
かないと收拾がつかなくなってしまうから  
である。筆者は「感覚経験から学習者が自  
ら属性抽出を行い、シンボルをつくり上げ  
る」という意味でシンボルが感覚に連結さ  
れていることが、言語学習におけるシン  
ボルグラウンディングに非常に重要だと考  
える。これを「身体性」と呼んでもよいか  
もしれない。しかし、「身体性」ということ  
ばをあえて使うなら、筆者の意味する「身  
体性」は必ずしも、「運動感覚」という意  
味ではないことは明記しておきたい。一般  
に「身体性」という語は「運動感覚」とい  
うイメージで受け取られる場合が多い。言  
語獲得の分野でも、ことばの学習におい  
て、対象に直接触れ、その機能を体験する  
ことが意味と結びついていると主張する  
研究者もいる [Nelson 73]。子どもは  
ボールを「投げる」という動作に結びつけ、

「投げるもの」として「ボール」の意味を理解するという考えである。本特集でも古川氏がモータスキルの学習のメカニズムの解明が言語学習のそれにブレイクスルーをもたらす可能性がある、と述べられているが [古川 03]、筆者はその考えには必ずしも同意しない。古川氏は「幼児は、単に母親に言われたこと、および目や耳に届いた情報のみを利用するだけでなく、積極的に手で触って、情報を入手している」とおっしゃっている。確かにそのとおりで、子どもは何にでも触りたがる。しかし、対象を直接手でさわって、経験することがことばの学習にとって（特に、個々のことばの意味を学習するうえで）クリティカルかというところではないように思われる。子どもは非常に早期から絵本やテレビ、ビデオなどからことばを学習する。つまり、対象に対して直接運動経験をしなくても、対象に付随するラベルの意味を推論し、学習しているわけである。実際、生後 14 か月の乳児が、対象をモニタに視覚提示され、それと同時に言語音声（ラベル）を聞かされるだけで、特におとなの側から **scaffolding** を与えなくても（つまり、大げさなジェスチャや大げさな抑揚でことばと対象のマッピングを強調しなくても）対象とラベルの連合関係を学習してしまうことを示した研究がある [Werker 98]。

筆者は、言語の学習と運動の学習の間に何らかの共通点があるであろうことは否定しないが、本質的には両者は別個に考える必要があると考えている。両者の最大の違いは、モータスキルの学習は、新しいスキルを学習する度に学習者が実際に身体的経験をすることであるが言語の学習ではその必要がない、という点である。自転車に乗るところをいくら観察していても自分で乗ってみなければ自転車に乗れるようにならない。また、自転車に乗れるようになって一輪車に乗ろうと思ったらまた身体を使って練習をしなければならない。それに対して、ことばの学習の特徴は、語一つ一つの意味を学習するのにそれぞれの対象について身体体験をもたなくてもよいというところにこそあるのではないだろうか。

ことばの学習に直接的な身体経験がまったく必要ない、あるいは役に立たない、と主張するつもりはもちろんない。例えば、先に述べた物体と物質の存在論的区別に重要な「堅固性」や「素材」のような属性次元を抽出するためには、触覚と視覚のリンクを学習することが必要で、当初は実際にいろいろなものを触わり、触覚とモノの振舞い方のリンクを学習し、さらに触覚と視覚情報とのリンクを学習する必要がある。しかし、ひとたびそれらのリンクを形成し、属性抽出ができれば、子どもは初めて見たものに対して、わざわざ触れて確かなくても視覚情報のみからその対象が物体であるか、物質であるかを判断できる [Imai 97]。さらに、物体は形状の類似性したものに般用される、ということをひとたび学習すれば、子どもは一つ一つの事物について直接触って経験をしなくても、その事物の機能を知らなくてもとりあえずその事物につけられた

ラベルの般用ができるようになるのである [今井 97]。

## 5. 言語学習をする機械をつくるには

自然言語が「理解」できる、あるいは人間と自然言語で「対話」ができる機械をつくるために子どもの言語学習のメカニズムを取り入れる必要があるかどうか、ということは人工知能研究者ではない筆者にはわからないが、たぶんどどのレベルでの「対話」が必要か、ということによるのだろうと考える。例えば、ある限定された領域を対象に（例えば、道案内やホテルやコンサートのチケット、航空券の予約など）開発された自動化システムのインタフェースをヒューマンフレンドリーにするために自然言語での対話を導入するような場合や、「植木に水をやって」、とか「ペットに 5 時にエサをやって」とか、「リビングの掃除をして」、といったように決まった仕事を自然言語で言いつけることができるお手伝いさんロボットを開発するというような状況では、そこで使われる語彙も文型も、そこで必要な背景知識（フレーム）も限られているだろう。このような場合は、学習などさせずに必要な語彙、文型、フレーム情報などを最初から入れ込んだほうがコストパフォーマンスとしてはずっとよいだろう。

他方、人間と同等の知性を持ち、特定の分野に限定されず人間が人間に対するのと同じように自然に対話ができるようなアトムのような（！）究極のヒューマノイドロボットをつくることを目指すのなら、人の子どもが言語と知識を学習するように機械にも学習させないとシンボルは接地しないだろう。これは、松原氏が将棋のトッププロに勝つシステムをつくるには将棋のトッププロが暗黙にもつ膨大な知識の構造化のされかた、その知識の検索のしかた（つまり「直感」はどこからどのように生まれるのか）を明らかにし、そのうえでそれを学習できるような機構を組み込んだ機械を設計しなければならない、という考え [松原 03] と同じである。

では、言語を理解する究極のヒューマノイドロボットをつくるために何が必要か。言語がシンボルグラウンディングするためには感覚情報からダイレクトに属性抽出を行い、そこからシンボルを形成し、さらに異なる抽象化のレベルを含むシンボルの階層をつくり上げていくことが重要なのではないかと前章で述べた。3 章であげた外国語の例のように、感覚情報から切り離されてすでに切り出されたシンボルから始めた言語学習では結局はシンボルは接地されないのかもしれない。しかし一方で子どもは単にそれぞれの語を一つ一つ時間をかけ、身体経験に基づいて学習するのではなく、語の般用規則に関するメタ知識（つまり語意学習バイアス）をつくり上げ、それを文脈情報、話者の意図などの社会的手掛り、概念に関する知識などさまざまなリソースと組み合わせることによって、複雑な階層構造をもつ、膨大なサイズのレキシコンを効率良く学習している。このようすはまさに松原氏の

「人間は呼吸するように常に学習し続ける, 問題解決をしている間も知識は付け加えられたり, 並べ替えられたり, 再編成されたりしている」という表現そのものである。言い換えれば, インプットから言語学習に必要な属性を抽出し, 同時に複数の語意学習バイアスを形成し, さらにそれらのバイアスを制御し, 概念知識を深めつつバイアス自身も成長させていくのである。このような柔軟かつ自己生成的な学習過程が具体的にどのような内部メカニズムによって生み出されてくるのか, どのような機構が生得的に組み込まれていなければならないのか, それが表象のレベルで必要なのか, それとも感覚情報処理上の生理学的制約とアルゴリズムの制約なのか。学習された知識がどのように表象され, 構造化されるのか, どのように推論や問題解決に適用され, その結果, その知識がどのように変化するのか。これらの問題が行動レベル, 脳神経レベルをつなげる形で明らかにされなければならない。

## 謝 辞

本稿を執筆するにあたっては, 2 回にわたる「人間の学習と機械の学習」座談会に大いに触発された。座談会出席者の方々に深く感謝する。また, 麻生英樹氏には貴重なコメントをいただき, 特に統計学習についてご教示いただいた。

本稿は科研費 15300088, 慶應義塾大学学事振興資金の補助を受けた。

## ◇ 参 考 文 献 ◇

- [麻生 03] 麻生英樹: 機械の学習と人間の学習—統計的学習の立場から—, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 526-530 (2003)
- [Carey 78] Carey, S. and Bartlett, E.: Acquiring a single new word, *Papers and Reports on Child Language Development*, Vol. 15, pp. 17-29 (1978)
- [Colunga 03] Colunga, E. and Smith, L.: A connectionist account of the object-substance distinction in early noun learning, Unpublished manuscript. Available at <http://www.indiana.edu/~cogdev/labwork/currentpapers.html> (2003)
- [Elman 96] Elman, J., Bates, E., Johnson, M., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D. and Plunkett, K.: *Rethinking Inmates: A Connectionist Perspective on Development*, MIT Press. (1996); 乾敏郎, 今井むつみ, 山下博志 訳: 認知発達と生得性, 共立出版 (1998)
- [古川 03] 古川康一: 帰納論理プログラミングによる幼児の言語獲得のモデル化, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 542-545 (2003)
- [Goodman 83] Goodman, N.: *Fact, Fiction, and Forecast*, Cambridge, MA: Harvard University Press (1983)
- [Haryu 02] Haryu, E. and Imai, M.: Reorganizing the lexicon by learning a new word: Japanese children's interpretation of the meaning of a new word for a familiar artifact, *Child Development*, Vol. 73, pp. 1378-1391 (2002)
- [Imai 94] Imai, M., Gentner, D. and Uchida, N.: Children's theory of word meanings: The role of shape similarity in early acquisition, *Cognitive Development*, Vol. 9, pp. 45-75 (1994)
- [Imai 97] Imai, M. and Gentner, D.: A crosslinguistic study of early word meaning: Universal ontology and linguistic influence, *Cognition*, Vol. 62, pp. 169-200 (1997)
- [今井 97] 今井むつみ: ことばの学習のパラドックス, 共立出版 (1997)
- [今井 00] 今井むつみ 編: こころの生得性: 言語・概念獲得に生得的制約は必要か, 認知科学の探究シリーズ, 共立出版 (2000)
- [Imai 01] Imai, M. and Haryu, E.: Learning Proper nouns and common nouns without clues from syntax, *Child Development*, Vol. 72, pp. 787-802 (2001)
- [今井 03] 今井むつみ, 針生悦子: レキシコンの獲得における制約の役割とその性質, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 31-40 (2003)
- [Imai 03b] Imai, M. and Mazuka, R.: Re-evaluation of linguistic relativity: Language-specific categories and the role of universal ontological knowledge in the construal of individuation, In D. Gentner and S. Goldin-Meadow (Eds.), *Language in Mind: Advances in the Issues of Language and Thought*, pp. 430-464, MIT Press. (2003)
- [Markman 89] Markman, E. M.: *Categorization in Children: Problems of Induction*, Cambridge, MA: MIT Press, Bradford Books (1989)
- [松原 03] 松原 仁: いつも学習し続けるシステムを目指して, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 564-567 (2003)
- [Nelson 73] Nelson, K.: Some evidence for the cognitive primacy of categorization and its functional basis, *Merill-Palmer Quarterly*, Vol. 19, pp. 21-39 (1973)
- [Quine 69] Quine, W. V.: *Ontological Relativity and Other Essays*, New York: Columbia University Press (1969)
- [Roy 02] Roy, D. and Pentland, A.: Learning words from sights and sounds: A computational model, *Cognitive Science*, Vol. 26, pp. 113-146 (2002)
- [Saffran 96] Saffran, J. R., Newport, E. L. and Aslin, R. N.: Statistical learning by 8-month-old infants, *Science*, Vol. 274, pp. 1926-1928 (1996)
- [Soja 01] Soja, N. N., Carey, S. and Spelke, E. S.: Ontological categories guide young children's inductions of word meaning: Object terms and substance terms, *Cognition*, Vol. 38, pp. 179-211 (1991)
- [Werker 98] Werker, J. F., Cohen, L. B., Lloyd, V. L., Casasikam, M. and Stager, C. L.: Acquisition of word-object associations by 14-month-old infants, *Developmental Psychology*, Vol. 34, pp. 1289-1309 (1998)
- [Wisniewski 96] Wisniewski, E., Imai, M. and Casey, L.: On the equivalence of superordinate concepts, *Cognition*, Vol. 60, pp. 269-298 (1996)

2003 年 7 月 3 日 受理

## —— 著 者 紹 介 ——

今井 むつみ (正会員) は前掲 (Vol. 18, No. 1, p. 40) 参照。