

解説



## 自然言語処理技術の最近の動向

### 超並列自然言語処理†

吉米地 英人††

#### 1. はじめに

人工知能 (Artificial Intelligence) や人工生命 (Artificial Life) の研究においては、その知的処理の母体となる人間の脳が超並列的な存在である以上、自然言語や推論、学習といったテーマを追求するにあたって処理の超並列性を問題とすることは避けられない。また最近では、コネクションマシンをはじめとするいくつかの SIMD 型の超並列マシンが商品化されつつあり、実処理システムとしての超並列アーキテクチャも現実的なテーマとなっている。また、実現されている超並列ハードウェアの特徴と自然言語処理などで必要となってくる処理の超並列性が必ずしも一致していない現実もあり、認知理論や言語理論における超並列性の必要性の明確化ならびに処理手法レベルでの超並列処理の特徴を考察することは意義深いものであろう。

超並列的に知能処理を行うためには、特にグレインサイズとノード間でやりとりされる情報量が問題となってくるが、これはベースとなる処理のモデルとハードウェアの接点となる第一義的な問題といえる。また、超並列性が理論的検証ないし実現に必要な不可欠なものであるか、単なる高速化実現手法にすぎないものであるかの判断も必要であろう。たとえばニューラルネットでは、直観的には超並列処理が前提であるが、実際の処理では、処理のグレインサイズがきわめて小さく、また層から層へのフォワード及びバックプロパゲーションによる情報伝達はシリアルであり、ベクトルプロセッサの利用や専用のチップの設計がより高い効果をあげるだろう。一方、自然言語処理の

ようにある程度抽象度の上がった制約を扱う場合においては、理論のベースが超並列的な場合、シリアルマシンでは満足な仮説検証が不可能であったり、処理が遅くなりすぎてしまう場合が多々ある。また、HPSG<sup>20)</sup>などの素性束の単一化を前提とした自然言語処理においては単一化が単調な情報の組み上げで行われる作業であるため、現在までシリアルな制約処理が一般に利用されてきており、研究段階のものを含めても、並列マシンの利用は、処理速度の高速化をねらった共有メモリマシン上での小規模な並列処理実験にとどまっている。これは、特に統語論的な制約がこれまで主として扱われてきたためであるが、意味論、語用論的制約を扱おうとすると、制約間の相互関係が非単調的であり、きわめて多数の制約がグローバルな整合性の保証なく適用されるため、超並列的な処理を前提とせざるをえなくなってくるのである。

本稿では、まず、超並列自然言語処理の現在に至る歴史的背景に触れ、また、現在の超並列自然言語処理の問題点について考察する。さらに、新たな超並列自然言語処理の考え方とその実現手法を紹介する。

#### 2. 超並列自然言語処理の歴史的背景

##### 2.1 超並列処理以前：統語論的制約処理を中心とした流れ

伝統的な自然言語処理には大きくわけて二つの流れがある。一つは Chomsky に代表される統語論的制約処理を中心とした流れ、もう一つは、Schank に代表される意味論的処理を中心とした流れである。まず、統語論を中心とした流れについてみる。Chomsky の自然言語研究に残した最大の貢献は、自然言語現象の統語論的側面に分析を絞ることにより、言語間を超えて適用可能

† Massively Parallel Natural Language Processing by Hideto TOMABECHI (Center for Machine Translation, Carnegie Mellon University).

†† カーネギーメロン大学機械翻訳センター

な普遍の原則の存在を発見し、またこれらの原則の検証法として科学的な手法を言語研究に導入したことであり、彼によればこれらの原則は生得的なものであり、したがって、人間の言語である以上、必ず確認されるものである<sup>61</sup>。Chomsky の言語理論に基づく研究では、この普遍の原則とそれに従う個々の細則の発見、更新と、パラメータとして表わされる各言語の特徴検証が仮説の生成、帰納的な検証、という伝統的な科学の手法で行われる。現在、Chomsky 言語学の流れは、MIT を中心とした GB (Government and Binding) 理論、PP (Parameter and Principles) 理論などと呼ばれている、Chomsky 本人と彼の弟子たちによる正統的な Chomsky 理論<sup>71, 82</sup> と、スタンフォード大学を中心とした素性構造の単一化を制約の記述原理としているもの (LFG 理論<sup>3)</sup>、HPSG 理論<sup>20)</sup> など) に分かれているが、普遍的な文法原則の想定、宣言的な形式化といった本質的なところでは同一である。また、言語現象の分析が基本的に文単位であり、統語論的現象以外は、言語現象としては二次的に扱われている (もしくはまったく扱われない) ことも共通である。これらの統語論的言語理論は、扱われる現象が一般に文単位であり、また、形式化が行われているために、自然言語の機械処理に利用しやすい。特に、素性構造の単一化を記述原理とした LFG (Lexical Functional Grammar)、HPSG (Headdriven Phrase Structure Grammar) などにおいては、素性構造を有向グラフとして表わすことにより、自然に計算機上の単一化処理により制約処理を行うことができる。たとえば、カーネギーメロン大学 (CMU) では LFG が利用されているし、また国内でも、日本語の記述の枠組みとして、HPSG の姉妹的存在である JPSG (Japanese Phrase Structure Grammar)<sup>13)</sup> が ATR などでも利用されている<sup>19)</sup>。一方、これらの GB、LFG、HPSG などの統語論的言語理論は分析の単位が文単位であり、また意味論的制約が事実上無視されているため、談話理解などに拡大して適用することがむずかしい。したがって、たとえば、1988 年に恐らく最初の音声入力・音声出力機械翻訳の公開デモを行った CMU の音声言語通訳プロジェクト (SpeechTrans システム<sup>77)</sup> などでは、統語論的制約処理を LFG で行い、独立して、談

話理解に必要な語用論的制約処理を別な処理システムで行うという手法を用いている。ただし、このような場合には、統語論と意味論、語用論は異なる言語理論、異なるモジュールで処理されているため、相互の関係はきわめて限定される。具体的には、入力文を統語論的に分析する過程で、特定の主辞と補語の組合せが許容されるか否かの意味フレームによるチェックと、出力された文単位の中間表現を談話フレームにはめ込む程度の制約間の係わりにとどまっておき、より談話環境に融合的な制約処理を行うことは不可能である。したがって、たとえば、単一化により一度組み上げられた全体情報の構成部分が処理の途中で他の制約との係わり合いから非単調的に変化するようなことはありえない。ところで、Chomsky 言語理論の流れを汲む自然言語処理のモデルを利用している意味論、語用論の処理に無理があるのは、もとなっている Chomsky 的な自然言語の考え方と機械による自然言語処理システム構築の目的の二者が本質的に異なるためである。一般に現代言語理論的分析では、言語現象を普遍的な言語的制約 (Universal Grammar)<sup>51, 6)</sup> で説明しようとする現象のみに限っており、個人の記憶や、その場の出来ごとで刻々と変わるような現象を分析の対象とはしていない。したがって、必然的に現代言語理論は統語論を主として扱っているのであり、特定の個人の経験や記憶により制約が変わるような現象は対象としてはいないのである。もちろん最近では、談話文法的な発想の言語理論もあるが、これらもあくまで、普遍的なパラメータで表わせるような制約を対象としており<sup>21, 12), 25)</sup>、個人的な差異が問題となるような記憶などは扱わない。また、意味の状況依存性などに着目して意味論的な部分制約情報をあくまで個人レベルの記憶から切り離して記述している理論<sup>1)</sup> もあるが、これらは逆に統語論的制約からも切り離されており、Chomsky 的統語論制約との融合は容易ではなく、そのまま自然言語を実際に処理するモデルにはならない。このような理論で捉えられている制約を自然言語処理で利用する場合にも、次に述べる意味論的処理を中心としたモデルの場合と同様、統語論的制約とさらには、個人の記憶に係わってくるような制約との係わり方が今後提唱されることになると思われる。

## 2.2 意味論的処理を中心とした流れ

ここで問題としたい統語論的な流れと意味論的流れの対比は言語理論的な対比によるものというより、処理の制御構造によるものである。たとえば、前述の GB, LFG, HPSG などの統語論を中心とした流れは、その処理の制御構造が制約原則や生成規則を利用した単調的な単文ごとの文の構造解析を中心にしたものにならざるをえず、その意味で、「統語論的」といえる。一方、ここでいう意味論的な流れとは、基本的な解析単位を文単位とせず、また、制約の単調的な適用を前提としていない流れである。自然言語処理に対するこのような考え方は、Quillian<sup>21)</sup>によって提唱された。彼は意味ネットワークを考案し、この意味ネットワークにおけるネットワーク全体の活性化の結果が自然言語の理解状態を表わすとした。この考え方が Fahlman の NETL<sup>10)</sup>や、ベクトルパターンによる分散表現ではなく概念を各ノードに直接対応させるローカリストと呼ばれるコネクショニスト<sup>32)</sup>による自然言語処理を生み出したわけであるが、特に、Yale 大学人工知能プロジェクトにおける Schank と彼の弟子たち (Schankian と呼ばれる) の研究は、意味論を中心とした自然言語処理の発展を大きく促したのである。1970 年代、当初 Schank は CD 理論、スクリプト理論などの記憶とは切り離されたスキーマとしての意味論を提唱していたが、1980 年代に入り、MOPs 理論<sup>24)</sup>を提唱するに至り、記憶の活性化をベースとする自然言語処理の考え方を Yale 大学で生み出した。この考え方では、自然言語は個人の記憶が自然言語の入力を受けている環境で、記憶を呼び出したり、更新したりすることによって理解されているとしている。ここで、Chomsky 的な言語研究の流れと対比されるのは、Schank にとって、自然言語処理は仮想的な個人の自然言語活動における「認知モデル」として捉えられていることであり、個人の記憶から切り離された普遍的文法規則を前提としていないことである。また、その活動は非単調的であるため、自然言語入力の分析中も各構成要素そのものの実体も環境により逐次変わるものとみられている。そういった意味では、Yale における考え方は当時主流であった、Frege<sup>11)</sup>、Montague<sup>17)</sup> 的な全体意味を部分構成要素の単調的な組み上げの結果とする見方に代わるパラダイ

ムであったわけである。といっても当初、Yale 大学人工知能プロジェクトにおける各システムの処理は宣言的かつシリアルな意味制約処理を行っていたにすぎず、実質的には統語規則の代わりに、格文法的な意味文法を利用して構文解析処理をしていたにすぎない。しかし、1980 年代半ばから 1980 代後半にかけ、Quillian の意味ネットワーク上のマーカ伝播の手法が Yale 大学人工知能プロジェクトにおいて処理手法として導入されることにより、モデルとしては非単調な超並列処理を前提とした、超並列的な意味ネットワーク上での活性伝播を利用した意味論駆動型の自然言語処理が提唱されるに至った。Yale ではこのモデルをダイレクトメモリアクセス (DMA) 手法と名付け、意味理解、談話処理、機械翻訳のモデルとして提唱した<sup>22), 26)</sup>。また、この流れはその後の Yale の事例ベース推論型自然言語処理プロジェクト<sup>16)</sup>と CMU における DM プロジェクト<sup>28)</sup>に引き継がれたが、特に、CMU ではその後、SIMD 型の超並列マシンであるコネクションマシンや電総研の IXM2 連想記憶マシン上でのインプリメンテーションが達成されており<sup>15)</sup>、次章で述べるような問題点が未解決のままとはいえ、限られた文パターンについて超高速な意味論処理が達成されている。このように現在、超並列自然言語処理といえば、意味論駆動型の超並列活性伝播による自然言語処理を一般に指すようになってきている。

## 3. 現在の超並列自然言語処理モデルの問題点

### 3.1 伝播情報量の限界

一般に意味論を中心とした自然言語処理のモデルでは、その制御の中心を意味論的制約処理に置くことにより、意味論駆動型の処理が行われるが、意味論そのものが、膨大な知識のネットワーク上での相互補完的な存在論を前提としているため、超並列的な処理が不可欠である。したがって、現在、既存の超並列マシンでの実現可能性を考慮したモデル化が行われているが、ここでボトルネックとなってくるのが各プロセッシングユニット間でやりとりされる情報の量である。現在、超並列マシンは一般に SIMD アーキテクチャをとらざるをえず、ユニット間で交わされる情報はせいぜい何ワード程度かのものであり、またユニットごとの処理能力も限定されている。これ

により、現在意味論駆動型のモデル（最近はメモリベースという呼び名が定着しつつある）の制御構造はマーカ伝播型にならざるをえず、意味ネットワーク上を何種類かのマーカをノードの活性化にともない超並列的に伝播するという手法がとられている<sup>4), 15), 22), 26), 28)</sup>。この処理のモデルは、Quillian や DMA で提唱されている活性伝播 (spreading activation) によるグローバルな知識の整合性の前提がない超並列的な自然言語の認識をそのまま実現することに成功しているが、一方、扱える制約がきわめて限定されるため、構造的に複雑な制約や2ノード以上遠方に伸びるような制約を扱うことができない。このため、一方で伝統的な統語論を中心とした自然言語処理では不可能であった非単調的な意味論処理の可能性が高まりながら、他方で、現代言語理論的な統語論制約処理が不可能となっている。過去に伝統的な統語論を中心とした自然言語処理と超並列的な意味論駆動の処理を融合する試みがいくつか報告されているが、どれも、双方の制御構造を同時に維持し限定的な係わり合いを実現する提案であり、それぞれの制御構造が本質的に違うものであるため、成功とみられる提案はまだない。これらの提案に共通しているのは、意味論駆動型超並列処理のボトルネックが既存の超並列マシンのハードウェアの限界であるため、統語論的処理はあくまで独立したシリアルなモジュールで行っており<sup>27)</sup>、このためモジュール間の制御構造が異質となりインタラクションが限定されてしまっていることである。あえていうならば、ハードウェアの限界が認知理論の限界を定義してしまっているわけである。

### 3.2 別な方向性

ノード間の伝達情報量の問題は現在の超並列ハードウェアでは内因的なものであるが、処理の超並列性にとって本質的なものではなく、現在のマシンアーキテクチャの技術的要因に依存しているものである。したがって、超並列自然言語処理の実現手法の研究において、伝達情報量のボトルネックをはずして考えてみるのも意義深いものであるはずである。特に脳の自然言語処理メカニズムの考察にあたって現在のマシンアーキテクチャの限界が壁をつくってはならないし、近い将来、伝達情報量が飛躍的に増大した超並列マシンが実現される可能性がないわけでもない。このような

考え方から、次章で紹介する超並列制約伝播による自然言語処理のモデル<sup>31)</sup>を実現するために、超並列的に有向グラフを伝播するモデル、すなわち、超並列グラフ伝播機構 (Massively-Parallel Graph Propagation Architecture) が提唱された<sup>30)</sup>。これにより、統語論と意味論にそれぞれ固有の制御構造をもたせることをやめ、基本的に一つの制御構造のみで伝統的な統語論中心の制約処理と超並列的な意味論処理の融合的な実現が試みられている。また、ベクトルからグラフへ、グラフからベクトルへの変換を利用することにより、記号の情報と非記号的 (準記号的) 情報とのやりとりも融合的に行う試みがされるに至っている。後にみるように、このモデルでは、各ノード間において有向グラフという形で構造をもった制約が超並列的に伝播されるわけであるが、現存する超並列マシンには自由な有向グラフを送るほどのノード間での情報伝達能力はなく、また、送られた有向グラフが時に巨大な仮想的個人の記憶空間への特定の場所を指すことがあり、これは、現在の分散記憶型の超並列マシンでは実現不可能である。このようにここで紹介するモデルは、現在のハードウェアテクノロジーではいまだ実現されていない計算能力を前提としているということをここで確認したい。しかしながら、超並列に行われる処理そのものは有向グラフの超並列的な伝播と融合という均一的なものであり、ノード間で送られる情報量が大きくなり、また共有メモリへの高速なアクセスが可能になれば、十分実現可能である。また、無数の仮想プロセッシングユニットを並列プロセスとして実現することにより、既存の共有メモリ型の並列マシン上でシミュレート可能であるため、64 CPU 程度までの並列度の並列マシン上の実システムとして実現も可能である。ちなみに ATR 自動翻訳電話研究所では、MONA-LISA プロジェクト<sup>31)</sup>において、密結合共有メモリ型の並列マシンである Sequent/Symmetry 上において、同モデルを高速知識表現システム<sup>18)</sup>と並列 Common Lisp 上の軽量プロセスを利用することによって実現しており、低並列度の共有メモリマシンと汎用ネットワーク表現システムを利用した超並列処理の一つの方向性を示している。

## 4. 新たな考え方

### 4.1 超次元制約空間, 超並列制約伝播

近年提唱されているモデルでは, 超次元制約空間の考え方を導入している. ここでいう次元とは, ベクトル空間における次元である. このベクトル空間とは仮想的な個人の脳内の信号レベルでのベクトル空間である. これは, たとえばニューラルネットによる非記号的なベクトル空間などであり, また, 記号的レベルにおいては, 従来単一化文法や論理式において表現されてきた素性束などの構造表現そのものをその抽象化とみなすことのできる仮想的個人の脳内のベクトル状態である. 言ってみれば, 視覚, 聴覚, 触覚などのプリミティブな信号処理のニューラルネットにおける自己組織的ベクトル学習をより高次からさらに自己組織化するような, より高度なベクトル空間における連続写像状態の記号的抽象化である. 単純に言えば, 記号論的存在を脳内のベクトル状態の抽象化による表現論的存在とみなすことにより仮定されるベクトル空間である. たとえば, 意味論ネットワークの表現論で従来記述されてきた概念ネットワークや, 記憶ユニット, 談話ネットワークなど, また統語論的素性構造で表現される制約も, それぞれベクトル空間の抽象化による表現論的存在としてみる事ができる. こうして, 自然言語の入力による言語の理解状態の遷移は巨大で複雑なベクトル空間上での軌跡となる. もちろん記号的制約レベルのみでも, 統語論的な写像遷移のみならず刻一刻と変わる入力と記憶ネットワークにおける遷移がきわめて次元の高い複雑な軌跡をつくっていくわけである. このようなベクトル空間を, 超次元制約空間 (Hyper-Dimensional Constraint Space) と名付けている. また, この超次元制約空間でのベクトル計算機構を, 超次元制約計算機構 (Hyper-Dimensional Constraint Computation Machinery) と名付けている. したがって, 超次元制約計算機構とは仮想的個人の脳内の認知処理を仮想的ニューラルネットレベルで直接計算するベクトル計算機構である. もちろん, これはあくまで考え方であり, いわば, 人工的な脳の一つの定義にすぎず, その人工脳のアーキテクチャのベクトルレベルにおける具体的提唱がなされているわけでも, また, 実際に抽象化された記

号的超並列ネットワークの状態と超次元制約空間のベクトル状態を結び付ける数理的手法が提唱されているわけでもない. 将来, 数理科学的努力により, そのような提唱がなされるかもしれない. ただ, この見方が自然言語処理の新しい基本的枠組みとなりうるのは, 記号的制約処理を仮想的脳の実際の超次元計算の抽象化表現とみなし, また, この表現的抽象度の上げ下げが自由に (また無意識に) できることを仮想脳の先天的能力と仮定することにより抽象度の異なる制約が混在し影響し合う自然言語処理のモデル化が可能だからである. また, このモデルは脳が認知の実現主体であるということとも矛盾しない. たとえば, いわゆるバックプロパゲーション・ニューラルネット (BP ネット) を利用した信号処理 (たとえば, 音声認識など) は超次元計算の抽象度の低い処理の一つの疑似的な計算とみなすことができる. これにより, 一般にシンボル・グラウンディングと人工生命研究の分野で呼ばれている記号のニューラルネット信号への結び付け問題を単純に抽象度の問題とみなして, 信号処理デバイス, BP ネット, 記号表現の各レベルでの認識をアルゴリズム的に結び付けることにより, 物理的世界から認知的世界までをスムーズに結び付けるグラウンディングモデルを実際に作ることもできる. カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA) の Dyer らはこのような方向の研究を記号的神経工学 (Symbolic Neuro-Engineering) と呼びいくつかの先駆的成果をあげているが<sup>9)</sup>, 本稿で紹介する枠組みでも, 抽象度の上下にともなう記号的制約と非記号的 (準記号的) 制約の係わり合いを, ベクトルからグラフなどへの表現手法の変換により一部実現しており<sup>10)</sup>, 新しい自然言語処理研究の一つの方向性を示している. またこれらの方向性は自然言語処理に限らず記号処理, ニューラルネット (PDP) のそれぞれの伝統からは外れた方向性でもある. 一般に伝統的な人工知能研究の主流であった知識処理 (たとえば, 自然言語処理) の考え方はデカルト的な記号世界のみにおける処理を前提としており, また, 利用される知識のみならず, 知識獲得や学習もあくまでカント的なアプリアリな推論の域を出ていなかった. したがって, 認知的活動においては記号論的な推論活動がすべてであったため, 超高速な推論マシンの製作が人工知能の実現

につながると考えられていたわけである。一方、いわゆる PDP といわれるニューラルネットの主流派的考え方では、知識はすべて非記号的なベクトルパターンで分散表現されており、記号的レベルの表現主体は脳の現実と合わないとして記述されることはなかった。したがって、現在でも、あくまで個々のニューロンの非線形関数のダイナミックスの巨大な総和としての学習（たとえば、BP ネットなど）でトレーニング（荷重調整）により意味ヒエラルキを学習させたり、統語論的制約をリカレントネットに学習させたりする試みは行われているが、抽象度の高いレベルにおける記述（つまり、プリミティブなニューロンレベルのダイナミックスをより高次から自己組織したレベルでの記述）は考えられてはおらず、ローカリスト的な記述さえも PDP 主流派からは退けられている。たとえば、ハードコアな PDP 主流派は何億ベクトルポジションもあるような多層ニューラルネットと超高速 BP アルゴリズムがあれば自然言語処理などの認知活動はおのずから獲得されるものでありと現在も説いており、実際超高速 PDP マシンの研究においても既存の BP 手法のハードウェアによる高速化のみが追求されている場合も多いようである。もちろん、そのようなハードにより、音声認識などが超高速化されることは明らかであるが、自然言語処理などの認知活動が実現されるとは考えられない。

超次元制約計算の考え方においては、仮想脳の超次元ベクトル状態を抽象化する制約表現主体を自由に設定可能であるとみなし（つまり、超次元ベクトル表現の状態から自由なレベルの抽象化表現状態への変換とその逆の変換能力が脳に先天的に備わっているとみなし）、そうした抽象度の上げられた制約処理のメカニズムとして超並列制約伝播機構 (Massively-Parallel Constraint Propagation Architecture) を提唱している。この方式においては、抽象化された制約が超並列的な制約空間の中で伝播され、ぶつかりあい、また時に融合したり変化したりすることにより認知処理がなされしていると主張されている。また立場としては、伝統的二派のどちらにも属さず、あくまで非記号的（物理的）な制約から記号的制約まで連続的に存在（変換）しうる表現論を前提としているのであり、物質論的表象主義に近い立場をとっている

と言える。

ところで、現時点における超並列制約伝播のモデルにおける中心的な処理のレベルは記号的レベルである。これは言語理論などで現在捉えられている制約が記号的であり、制約の記述レベルとしてふさわしいからである。また、現在記号的レベルにおける表現手法としては有向グラフを選択している。これは現代言語理論が一般に素性構造を利用した制約の記述手法をとっており素性構造は有向グラフで直接表現可能であり、また、伝統的な論理式や、意味ネットワークなどの人工知能研究で用いられている手法が一般に有向グラフで表現可能であるからである。さらに、現時点における超並列制約伝播における自然言語処理では処理のメカニズムとして有向グラフで表現されている制約の超並列的な活性伝播と有向グラフの単一化のみに限っている。これは、現代言語理論で捉えられている制約処理を確保しながらも処理の均一性を保証できるからである。たとえば、HPSG 理論による制約の処理は素性束の単一化のみであり、したがって、HPSG を言語理論的制約の記述枠組みとして採用した場合、有向グラフの伝播とグラフの単一化を実現することにより、既存の意味ネットワーク上に超並列有向グラフ伝播と単一化を導入すれば、HPSG による言語理論的制約処理と Schank 的な超並列活性伝播意味ネット処理が融合的に実現可能となる<sup>30)</sup>。このように超並列制約伝播の抽象度を記号レベルにおくことにより、自然に Chomsky 的な自然言語処理と Schank 的な自然言語処理を融合したモデルが実現する。さらに、ベクトル情報の記号化により、ニューラルネットとのやりとりも可能になるのである。

#### 4.2 活性化マーカ伝播と超並列制約伝播

既存の超並列自然言語処理では、マーカ伝播の考え方が一般に利用されているが、制約伝播はこれに取って代わるものである。マーカ伝播とは、超並列的な意味ネットワーク上での活性伝播を行う場合に起こる変数束縛問題 (binding problem) の解決法として採用されている手法である。ここで、変数束縛問題とは、なんらかの論理式をネットワークで表現したときに、その論理式の認識をノードの集合体の活性化で表現する、現在の超並列ネットワークを利用した人工知能の知識表現手法において、単なる活性化の伝播では変数束縛を

表現しえない、という問題である。たとえば、**読む**(?ひと、?本)という(スコーレム化された)論理式は「読む」を表わすノードが「ひと」と「本」を表わすノードにリンクをはることで表現可能であるが、「太郎が哲学の本を読む。」という入力文がこれら三つのノードを活性化させる場合、概念ネットワーク上でそれぞれ「太郎」と「ひと」、「哲学の本」と「本」の間には(isa 関係の)距離がある(それぞれの間にいくつかの中間的な抽象度の概念が入り得る)ため、たとえば、「太郎」から発せられた活性化が「ひと」に到達した時点で活性化の元のノードを特定することができないという問題がある。これは、「太郎」はその文脈環境で決められる特定の太郎(トークン、またはインスタンスとしての太郎)であり、この太郎のトークンアイデンティティが「ひと」の正体にならないといけないわけであり、**読む**(?ひと、?本)が、**読む 001**(**太郎 005**, **哲学の本 008**)として認識されなければならないのに、活性化を伝播するだけではそれができないという問題である。この問題の解決としてマーカとして、活性化の発信ノードのインスタンスに対してのポインタを活性化とともに伝播する手法がマーカ伝播手法である。そのほかにも発信に周波数をもたせフェーズロッキングなどによりトークンとしてのアイデンティティをもたせる手法<sup>20), 20)</sup>などが提唱されているが、一般にはマーカ伝播が広く利用されている。さらに、Yale, CMU におけるDM (DMA) の流れでは、トークンアイデンティティとしてのマーカのほかに概念の表層的(時間的)な並びを示すマーカも導入されており、たとえば、「ひと」、「本」、「読む」の順番で日本語では入力による活性化がされるなどの、言ってみればナイーブな表層的な統語論的制約を「ひと」が活性化されると「本」に予想マーカを伝播するといった手法で表現することも行われている。このようにマーカ伝播とは、超並列的にネットワークを活性化するモデルにおいて、活性の発信ノードや活性化の方向を制御する一つの制御構造といえる。つまり、意味論駆動型の自然言語処理のパラダイムが「自然言語は入力文を表現する概念(記憶)サブネットワークを見つけだすことにより理解される」とするドグマを提唱しており、その実現手法として編み出されたのがマーカ伝播であ

るということができる。この意味でマーカ伝播は知識ネットワークの超並列的な探索手法ともいえる。しかしながら、この考え方の問題は、あくまで特定の自然言語入力に対するサブネットワークがアプリアリに存在していることを前提としなければならないことである。これは、自然言語の無限の生成可能性を主張する Chomsky 的言語観に対してあくまでも記憶が先にあり、自然言語理解は過去の記憶を「思い出している」(reminding)にすぎないとする魅力的ではあるが危険ともいえる Schank 的信念をパラダイムの底流にもっているからである。しかしながら、この考え方は、何万、何十万という言語運用のパターンとそれぞれに対応する意味ネットワークの形をあらかじめ用意しておき、入力から超並列的な探索を行えば自然言語理解は達成できる(また同様に、対訳を用意しておけばそれだけで機械翻訳は達成される)といった、意味の環境依存性、構文の構造依存性を無視した発想につながりやすい。現実の自然言語発話においては、特定の構文構造の選択と語彙選択、意味単位の選択は発話環境と常に相互依存的であるため、たとえば特定の単語の意図されている意味そのものが、その時々、談話環境と作りかけられている構文構造それぞれとお互いに作用し合いながら決まっていくわけであるから、たとえ、せいぜい50通り程度の再帰的な構文規則しかなかったとしても語彙と発話環境との組合せは無限になるわけであり、これらの可能パターンを文脈ごとに用意しておくのは機械処理のモデルとして現実的ではないし、認知のモデルとしてはまったくふさわしくない。実際、いくつかの文章を分析してみると、特定の単語を、用意したパターンに当てはめ込むために、当てはめ込むに必要な特徴抽出をしようとしても全体の構文構造と意図される意味が漠然としてでも掴めなければ、たとえば、品詞や意味カテゴリなどの特徴でさえも特定できないことが多い。したがって、膨大な量のパターンを用意しても、曖昧性が高まるだけで、当てはまるパターンを見つけだすことはできない。多くの場合、当てはまる全体としてのパターンがあらかじめ分かっていると、各パターンに当てはめるための個々の部分の特徴抽出ができないという自己矛盾を生み出すのである。もちろんこのような手法も、たとえば、機械翻訳システムの精

度向上などのために統計的工夫と組み合わせる利用することなどの利用をするならば成果も期待しうるが<sup>23)</sup>、そのまま独立して自然言語処理のパラダイムとするのには無理があろう。

### 4.3 超並列制約伝播の実現手法

超並列制約伝播においては超並列ネットワーク上での制御構造は、マーカ伝播ではなく制約伝播である。これには、統語論的制約、意味論的制約すべてが含まれる。具体的には、入力により活性化されたノードに付随するすべての制約が制約空間で活性化され伝播されていくことにより他の制約と融合しながら入力の表現状態を制約空間に作り上げていくという考え方である。また、このような制約にはトークンアイデンティティや構造的制約も含まれるため、マーカ伝播で伝えられる情報も当然含まれてくる。しかしながら、マーカ伝播は入力文をアプリアリに表わすネットワークの部分の探索手法である一方、制約伝播は入力から制約空間における表現論的存在をアポステリオリに築き上げていく過程であるという本質的な違いがある。もちろん超並列制約伝播機構そのものが仮想脳の超次元計算の抽象化であるというパラダイムとしての意味付けも大きく異なる。

ところで、具体的に超並列伝播を実際に処理可能なモデルとするためには、いくつかの工夫が必要となってくる。

まず第一に、制約空間を表現論理にどう具体化するかの工夫である。超次元ベクトル空間の抽象化としてのオントロジとしては伝統的な統語論、意味論、語用論といった区分けが無意味ではあるが、アプリアリな表現主体として利用される演繹的分析は言語理論、認知理論の現存する仮説である。したがって、これらの表現論としては、それらの理論の表現手法として直接的であるのが望ましい。超並列制約伝播のモデルでは、前述したように、有向グラフを表現手法として採用している。これは、ほぼすべての現代言語理論の分析が包摂順序グラフと呼ばれる情報内容の大小関係を表わす有向グラフで表現可能であり、また、意味論を中心とした手法で基本となる意味ネットワークがすべて有向グラフで表現可能であるからである。また、これらの有向グラフで表現される制約の処理手法は単一化と呼ばれるグラフ間の融合処理のみに限定した。これもまた、現代言語理論の枠組

みにおける分析と伝統的意味処理（論理式やフレームなど）の枠組みにおける分析が単一化を利用して捉えることができるからである。

第二の工夫は既存の意味ネットワークの利用である。本来、超次元制約空間のレベルでは意味論的制約空間と統語論的制約空間の区別は無意味であるが、Quillian 以来利用されている意味ネットワーク、概念ネットワーク、記憶ネットワークなどと呼ばれている宣言的かつ先験的な意味論的ネットワークを一つの抽象度のレベルにおける情報の捉え方とすれば、既存の人工知能システムや自然言語システムのこれらの膨大な知識ネットワークを利用することも可能である。当然このような抽象化により失われる可能性のある制約もあるわけである。一つめは、統語論的情報が異なる抽象度の情報となることによる意味論と統語論の分離により失われるものである。たとえば、意味論的性格と統語論的性格の両方を強くもった制約などは、意味論的レベルの制約空間を分離することにより、本来のスムーズな制約処理がむずかしくなるはずである。場合によっては、Chomsky と Schank の分離と変わらなくなってしまう危険性もあるわけである。そこで、このような意味論的情報と統語論的情報のモジュール化を防ぐため、意味論的制約空間と統語論的制約空間を直交させすべての表現論的存在が同時に意味論的な制約を充足しなければ活性化しないような考え方を導入している。二つめは、非記号的及び準記号的な情報とのやりとりにおいて失われるものである。たとえば、ニューラルネットでは、非記号的規則性などは、記号レベルを超並列制約伝播の抽象度として選ぶことにより意味論的制約や統語論的制約とのやりとりがむずかしくなる。そこで、異なる抽象度の情報間のやりとりを表現手法の変換をとおして実現することになる。たとえば、ATR の MONA-LISA プロジェクトでは、リカレントニューラルネットの中間層のベクトル状態をグラフ化し記号化するなどの工夫を行っている<sup>31)</sup>。このように、記号的レベルを超並列制約伝播の抽象度として選び、また、意味論ネットワークとしての抽象化を維持し、有向グラフとしての表現手法を利用することにより、また、もともと非記号的な情報は明示的にその部分情報をグラフ化し記号化することにより、既存の知識ネット



ワークを利用して、伝統的な記号論的制約処理と、ある程度のソフトな（準記号的な）制約処理が実現されている。ここで、意味論的制約以外の制約はすべて記号化されたグラフとして意味論平面からより高次の制約空間に突出（直交）する存在として表現される。具体的には、統語論を表わす制約グラフや語用論を表わす種々の談話制約グラフを意味論平面（空間）上の超並列活性化ノードに意味論平面（空間）の外側にむけて付随させ、活性化にともない伝播させることにより処理を実現する。

最後に、第三の工夫であるが、これは、特に現代言語理論を利用するために導入されている一つの手法であり、意味論空間と統語論空間の分離により必要となった手法である。これは、ヘッド（主辞）とサブカテゴリゼーションの概念の採用である。ヘッド（厳密には語彙ヘッド）とは句全体の統語論的な特徴を決定する語である<sup>14)</sup>。これらのヘッドを表現するノードでは付随する制約グラフにヘッドの特徴情報（head feature）を記述する。また、これらのヘッドノードがサブカテゴリ化する（補語の）語彙ノードより伝播された制約グラフと自身の制約グラフを融合（単一化）する超並列的活動を活性化時に自律的に行うように定義する。ここで、サブカテゴリゼーションとは、それぞれのヘッドが自身の取り得る補語の数と種類によって分類（サブカテゴリ化）されることにより名付けられた現象であり、特定のヘッドと他の語句との結び付きを決定する制約である。このサブカテゴリゼーションの制約的充足活動をヘッドであるノードに固有の自律的な超並列的活動として定義することにより、別個の統語論処理モジュールやいわゆるパーザを他に利用することなく、超並列制約伝播活動中に統語論的制約処理を明示的に行わせることが可能となった。これらヘッドの概念とサブカテゴリゼーションの概念は、共に現代言語理論で一般に受けいられている概念であり、特に新しい考え方ではない。ただ、両概念共に Chomsky 的な考え方であり、いわゆる Schank 的な意味論を中心とした自然言語処理では採用されていない。これは、ヘッド、サブカテゴリゼーション共に、統語論的なオントロジをベースにしたものであり、概念や記憶のユニットで表現されるような既存の意味論ネットワー

ク上の存在とは異質な存在（情報）であるため、これらの制約を意味論ネットワークに導入することができなかったためである。また、Schank がこのような統語論的制約を使うことをせずに意味論だけで自然言語理解は可能であると一貫して主張してきたことも理由の一つである。ただし、外部節の主語や目的語が内部節の主語と同じものを指示する現象（制御（control））や、構文構造に依存して代名詞などの名詞句の照応可能性が制約される現象（束縛（binding））などの現象をはじめとするいくつかの重要な言語現象が、意味論とオントロジを異にする独立した統語論的制約なしには記述不可能であるという見方が現在主流であり、実際、既存のマーカ伝播を利用した意味論主導の処理では、このような言語現象を扱うことは不可能である。制約伝播の考え方を導入することにより、このような統語論的現象も意味論的制約処理を維持しながら一般的に扱うことが可能となる。

以上、超並列制約伝播による自然言語処理の考え方を紹介したが、基本となっている主張は、まず第一に、このモデルが、抽象度が上がったレベルでの仮想脳の認知モデルとして主張されていることである。したがって、あくまでも仮想個人の記憶（personal memory）における認知活動のモデルとして考えられているわけであり、個人の記憶から切り離された制約充足活動とはみられていないということである。第二に、同時に、現代言語理論的な分析やアプリオリな世界知識も明示的に制約として活用すべきであるという考え方を主張していることである。これは PDP 的な考え方、統語論に対するメモリベース的な考え方とは対照的である。統語論の原則に関しては、Chomsky は生得的としてこのような考え方をとっており、また概念的知識（世界知識）に関しては伝統的 AI では、当然のごとくこの立場をとってきているわけであるが、このモデルでは、仮想的超次元制約空間の抽象としてその存在論を前提としているのである。いわば、人工知能・人工生命が発生した時点におけるアプリオリな知識としてのロボット認識論（robot epistemology）の立場をとっているのである。第三に、超並列制約伝播としての抽象度は、便宜的に記号レベルで選ばれているということである。つまり、制約記述を、現存する知識記

述を利用するのに都合のよい記号レベルで行っているということであり、場合によっては、より高度なインテリジェンスにより、さらに抽象度の高いレベルで記述されていても、また逆に、より物理世界に近いレベルで記述されていても構わないということである。たとえば、エネルギーのレベルやクォークのレベルで記述されていても抽象度の異なる同じ超次元制約空間での出来ごとの記述としてみなされるという主張である。第四に、これらの、抽象度の異なる記述間での表現方式の置換を可能とすれば、処理する外界情報や内部情報に合わせて自由に抽象度の異なる制約を混在可能であるという主張である。たとえば、視覚情報を物理的レベルに近いレベルで記述し、他の制約とは抽象度の変換により相互作用させることができる枠組みであるという主張である。このような意味で超並列制約伝播の考え方は、異なる抽象度、アプリオリシティ、モーダルチャンネルにおける情報を融合的に利用して自然言語処理・知能処理を行っていく一つの枠組みとして主張されているのである。

## 5. あとがき

自然言語処理は人工知能 (AI) や人工生命 (AL) 研究の一つの重要な分野であるが、おそらく他の AI/AL 分野以上に方法論やパラダイム間の差異が大きいのと思われる。これは、計算機科学や脳神経医学といった分野での成果が人工知能・自然言語研究に影響を与え始めるより遥か以前から、言語学者たちや哲学者たち、また心理学者たちが研究成果をあげてきたからであり、さらに、それらの分野での成果が力任せの機械的処理で得られてきている言語現象のシミュレーションに比べ、遥かに説得力のある分析を示しているからである。したがって、自然言語処理研究をどのような伝統的学問分野の影響下で行うか、また、どのような目的で行うかにより、方法論とパラダイムの両レベルで種々の信念が生まれてくるわけである。本稿では、方法論として超並列処理の枠組みで、現代言語学者の分析と人工知能の意味ネットワークの手法の実現を両立させる有向グラフの超並列伝播の手法と、パラダイムとしての、超次元制約空間の抽象化としての超並列制約伝播の意味付けを紹介した。

また、現在主流となってきた PDP をはじめとするニューラルネット研究が、あくまで神経回路網のダイナミクスを最新の脳神経科学の客観的な分析をもって徐々に解明していくことにより、数理学の力で人間の認知解明をいずれ達成できるとの信念をもっているのに対して、自然言語の立場から、情報内容としての抽象化された制約記述なしにはむずかしいとの考え方から作られたモデルとしてみることもできる。Chomsky 的な言語観ではこれらの制約は多分に生得的な情報内容であり、その意味で遺伝的に神経回路網の構造的な部分でアプリオリなものであり、したがって、情報内容 (抽象度の高い制約内容) を利用せずしてこれに対応する神経構造機構を高次にダイナミズムのみから捉えることはむずかしいという見方としても理解できる。また、一般的には、抽象度の高いレベルで記述されるべき制約をあえて物理的ダイナミズムで捉えることの意義が乏しいとする立場である。これに対して制約伝播の考え方は、情報内容に見合った抽象度での制約記述を狙うことにより自然言語処理をはじめとする知能処理を行おうという提案である。また、脳の物理的実体がある以上、脳の物理的レベルに近い抽象度で記述すべき制約はそのレベルで捉え、表現論の置換により他の制約と融合していこうという提案である。この意味では、あくまでデカルト的な認知と脳の切り離しを主張する伝統的 AI の考え方とは異質なものである。

将来的な展望であるが、先験的な統語論原則や、本能的な制約情報とみられる知識、またロボット認識論としてアプリオリにすべき世界知識などをすでに獲得している制約ネット (グラフ) やニューラルネットの設計情報を DNA 情報として進化させていったり、他の分野で成長した制約ネットと交配していくなどの試みも重要であろう。また、記号的制約を一部ニューラルネットレベルまで抽象度を上げて、ニューラルレベルの単一化などにより融合していく試みも必要であろう。特に、視覚、聴覚、触覚の各モーダルチャンネルに係わる部分のニューラルネット化がマルチモーダルなトータル自然言語処理系の構築に効果をあげよう。たとえば、視覚ニューラルネットの認識と聴覚ニューラルネットの認識とシンボルグラウンディングされた記憶と記号レベルの推論が

協調しながら自然言語を処理していくようなシステムの構築などが考えられよう。

最後になるが、超並列的な有向グラフの伝播をハードレベルで実現するような超並列マシンの設計、構築もまた一つの将来的な展望である。すでにCM5のように有望とみられるマシンも実現しつつあり、また周波数変調ニューラルネット<sup>29)</sup>やホログラフィックマシンなどいろいろな可能性が将来考えられると思われる。人間の知的処理の母体である脳が超並列的である以上、人工知能・人工生命の知的処理の母体も超並列的になっていくのは疑いのないことであると思われる。

### 参考文献

- 1) Barwise, J. and Perry, J.: *Situation and Attitudes*, MIT Press (1983).
- 2) Brennan, E., Friedman, W. and Pollard, C.: A Centering Approach to Pronouns, In *Proceedings of 25th Annual Meeting of ACL* (1987).
- 3) Bresnan, J. and Kaplan, R.: Lexical-Functional Grammar: A Formal System for Grammatical Representation, In Bresnan, J. (ed.), *The Mental Representations of Grammatical Relations*, MIT Press (1982).
- 4) Charniak, E.: Passing Markers: A Theory of Contextual Influence in Language Comprehension, *Cognitive Science*, Vol. 7 (1983).
- 5) Chomsky, N.: *Aspects of the Theory of Syntax*, MIT Press (1965).
- 6) Chomsky, N.: *Reflections on Language*, New York, Pantheon (1975).
- 7) Chomsky, N.: *Lectures on Government and Binding*, Foris, Dordrecht (1981).
- 8) Chomsky, N.: *Barriers*, MIT Press (1986).
- 9) Dyer, M.: Symbolic Neuro Engineering for Natural Language Processing: A Multilevel Research Approach, In Barnden, J. and Pollack, J. (eds.), *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory*, Ablex Publishing Co. (1991).
- 10) Fahlman, S.: *NETL: A System for Representing and Using Real-World Knowledge*, MIT Press (1979).
- 11) Frege, G.: On Sense and Reference, In Greach, P. and Black, M. (eds.), *Translations from the Philosophical Writings of Gottlob Frege*, Oxford Basil Blackwell (1952).
- 12) Grosz, B., Joshi, K. and Weinstein, S.: Towards a Computational Theory of Discourse Interpretation, Draft (1986).
- 13) Gunji, T.: *Japanese Phrase Structure Grammar*, D. Reidel Publishing Co. (1987).
- 14) Jackendoff, R.: *X-Bar Syntax: A Study of Phrase Structure*, MIT Press (1977).
- 15) Kitano, H. and Higuchi, T.: Massively Parallel Memory-Based Parsing, In *Proceedings of IJCAI-91* (1991).
- 16) Martin, C.: Case-Based Parsing, In Riesbeck, C. and Schank, R. (eds.), *Inside Case-Based Reasoning*, Lawrence Erlbaum Associates (1989).
- 17) Montague, R.: English as a Formal Language, Reprinted in Thomason, R. (ed.), *Formal Philosophy: Selected Papers of Richard Montague*, Yale University Press (1974).
- 18) Nyberg, E.: HyperFrame User's Guide, Cognitive Research Laboratories (1989).
- 19) Morimoto, T., Suzuki, M., Takezawa, T., Kikui, G., Nagata, M. and Tomokiyo, M.: A Spoken Language Translation System: SL-TRANS 2, In *Proceedings of COLING-92* (1992).
- 20) Pollard, C. and Sag, I.: Information-Based Syntax and Semantics Vol. I, Lecture Notes, CSLI (1987).
- 21) Quillian, M.: Semantic Memory, In Minsky, M. (ed.), *Semantic Information Processing*, MIT Press (1968).
- 22) Riesbeck, C. and Martin, C.: Direct Memory Access Parsing, Report 35, DCS, Yale University (1985).
- 23) Sato, S.: Example-Based Machine Translation Doctoral Dissertation, Kyoto University (1991).
- 24) Schank, R.: *Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computer and People*, Cambridge University Press (1982).
- 25) Sidner, C.: Focusing in the Comprehension of Definite Anaphora, In Brady, M. and Berwick, R. (eds.), *Computational Models of Discourse*, MIT Press (1983).
- 26) Tomabechi, H.: Direct Memory Access Translation, In *Proceedings of IJCAI-87* (1987).
- 27) Tomabechi, H. and Tomita, M.: The Integration of Unification-Based Syntax/Semantics and Memory-Based Pragmatics for Real-Time Understanding of Noisy Continuous Speech Input, In *Proceedings of AAAI-88* (1988).
- 28) Tomabechi, H., Mitamura, T. and Tomita, M.: Direct Memory Access Translation for Speech Input: A Massively Parallel Network of Episodic/Thematic and Phonological Memory, In *Proceedings of FGCS-88* (1988).
- 29) Tomabechi, H. and Kitano, H.: Beyond PDP: The Frequency Modulation Neural Network Architecture, In *Proceedings of IJCAI-89* (1989).
- 30) Tomabechi, H.: A Graph Propagation Architecture for Massively-Parallel Processing of Natural Language, In *Proceedings of the 13th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci-91)* (1991).
- 31) Tomabechi, H.: MONA-LISA: Multimodal Ontological Neural Architecture for Linguistic Interaction and Scalable Adaptations: A Massi-

vely Parallel Architecture for Symbolic and Subsymbolic Interactions, In *Proceedings of the International Workshop on Fundamental Research for the Future Generation of Natural Language Processing (FGNLP-91)* (1991).

- 32) Waltz, D. and Pollack, J.: Massively Parallel Parsing: A Strongly Interactive Model of Natural Language Interpretation, *Cognitive Science*, Vol. 9 (1985).

(平成 4 年 4 月 30 日受付)



宮米地英人

1959 年生. 1983 年上智大学外国語学部卒業(言語学). 1987 年 Yale 大学理学部計算機科学科フルブライト奨学生として博士前期課程修了(人工知能). 1985 年より 1987 年まで Yale 人工知能プロジェクト助手. 1989 年カーネギーメロン大学博士候補生資格取得(計算言語学). 現在, 同大学機械翻訳センターならびに計算言語学研究所所員. 1990 年と 1991 年に 6 カ月ずつ ATR 自動翻訳電話研究所滞在研究員. 主な研究テーマは, 超並列自然言語処理, 超並列人工知能, 人工生命, 計算言語理論, 理論言語学, 分析哲学, ACL, Cognitive Science Society, AAAI 各会員.

