

語順効果における、作業記憶に基づく文処理モデル

高橋 慶 吉本 啓

東北大学 大学院国際文化研究科
〒 980-8576 宮城県仙台市青葉区川内 41
E-mail: {kei-ta,kei}@linguist.jp

あらまし 言語現象には統語論における、構造に基づく分析では容認性の予測が困難な現象が存在する。そのような現象の中で、本稿では特に語順が影響を与えていると思われる現象について扱う。我々はこの現象を文法による問題ではなく、処理器の問題として捉え、作業記憶に基づく文処理モデルを提案することで、問題となる現象の統一的説明を試みる。そしてガーデンパス効果の表われる文についてもどのように処理されるかを議論し、文法処理に対する処理器の影響について議論する。

キーワード 文処理、作業記憶、非活性化、LFG、CCG

A Memory-based Sentence Processing of Linear Order Effect

TAKAHASHI, KEI and YOSHIMOTO, KEI

Graduate School of International Cultural Studies (GSICS)
41 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8576, Japan
E-mail: {kei-ta,kei}@linguist.jp

Abstract In the syntactic literature, there are some linguistic data which involve linear order. Such phenomena are difficult for structure-based account. Moreover, Sentences which arose problem for grammar itself. We consider that this problem should be solved not in terms of syntax, but real-time processing. Then, We propose a memory-based sentence processing model, which accounts for the sentence in problem uniformly.

Key words sentence processing, working memory, deactivation, LFG, CCG

1. はじめに

自然言語を理論的に分析を行う際、階層構造的の仮定は様々な言語現象に対し文法性を正しく予測することに成功してきた。ところが、言語現象の中には線形順序によってのみ、その容認性の予測が可能な文も存在する。これらの文は、構造を仮定することによる予測は困難である。本稿では、まず、どのような文が構造的分析による分析が困難であるかを指摘する。次に、問題となるデータは語順に関する一定のパターンに従うことを観察する。そして、当該の現象は文法における問題ではなく、処理器における問題であることを示す。その上で、作業記憶に基づく文処理モデルを提案する。短期記憶による文処理モデルは Gibson (1990) などがあるが、本モデルは「非活性化」という概念を用いることによる現象の説明を試みるという点において異なるものであると考える。次に、本モデルによる、本稿で扱う言語現象に対する説明を試み、処理器の文法処理に与える影響について combinatory categorial grammar (CCG; Steedman 2000) を用いることにより議論する。

2. データ

2.1 Lexical Functional Grammar (LFG) による分析
Kaplan and Bresnan (1982), Bresnan (2000), Falk (2001) において主題化によって文の容認性が変化する例が観察された。これは、移動に基づく文法をはじめとする文法での説明は困難である。

- (1) a. [That he was sick], we talk about for days.
b. *We talk about [that he was sick] for days.
c.cf. We talk about [the fact [that he was sick]] for days.
- (2) a. [That languages are learnable] is captured by this theory.
b. *This theory captures [that languages are learnable].
c.cf. This theory captures [the fact [that languages are learnable]].

(1a-b) において、filler-gap 関係において同一の範疇であるという制約を課す理論 (GB/MP, HPSG) では、主題化された節の範疇は、本来 head からの統語的制約によって排除されるべき項であるために正しく差を予測することができない。また、(2) のような受動文に関しても同様である。そこで、LFG では、filler-gap のような統語的機能ではなく、文法機能 (Grammatical Function; GF) に関するメカニズムによって (1a-b)、(2a-b) に見られる非対称性を正しく予測することに成功した。LFG においては、前置された項の持つ文法機能と、されていない項の持つ文法機能が異なる。項が前置されている場合は文法機能 TOP へマップされる一方、されていない場合 (canonical position) の文法機能は OBJ となる。^(注1)標準的 LFG においての (1) に対する説明は以下のようなものである: (1a) においては、*that* 節は TOP という文法機能にマップされ、また、*about* の目的語である OBJ の値は functional uncertainty (Kaplan and Zaenan 1989) により TOP と共有される。一方、(1b) においては、OBJ の値が空となるが、これは completeness condition (それぞれの attribute に対する値は空であってはいけない) に違反するために非文法的となる (図 1)。(2a-b) についても同様である。

PRED	‘talk about’((↑ SUBJ)(↑ OBJ _{about} OBJ))’
SUBJ	[PRED ‘we’]
TENSE	PRES
OBL _{about}	[PCASE OBL _{about} OBJ —]
MOD	[PRED ‘for days’]

図 1 (1b) の f-structure

2.2 問題点

標準的 LFG では、構造ではなく文法機能を仮定することにより移動ベースの文法にとって困難である現象の説明に成功したが語順情報が容認性に影響を与えていると思われる例について正しく予測することが困難である。(3) は目的語の等位接続であり、(4) は Right Node Raising (RNR) における例である。

- (3) a. *Ken was thinking about [that he was stupid], and [his girlfriend].
 b. Ken was thinking about [his girlfriend], and [that he was stupid].
- (4) a. *Ken denied, but Mary agreed with [that Mike was wrong].

- b. Mary agreed with, but Ken denied [that Mike was wrong].

これらの例に対し、標準的 LFG では (3)、(4) それぞれにおいてその容認性の非対称性を説明することが困難である。なぜなら、LFG では等位接続構造は単一集合として扱われるために、どのように目的語が等位接続されているかという線形順序に関する情報は保持されないためである (図 2)。

PRED	‘think about’((↑SUBJ)(↑OBL _{about} OBJ))
SUBJ	[PRED ‘john’]
TENSE	PAST
OBL _{about}	[PCASE about OBJ { [PRED ‘his girlfriend’] [PRED ‘that ...’] }]

図 2 (3a-b) の f-structure

これらの問題は、LFG による文法機能による分析に対する問題点のみならず、(1) 同様に構造に基づく文法全体に関する問題である。たとえば、HPSG では、filler と gap に対し、SLASH 素性により同一範疇を要求するが、線形順序に関する情報は扱われていないために非対称性を説明することができない。

3. 一般化

語順が容認性に対し影響を与えていると考えられる (1)-(4) より共通して観察できることは、head は統語的制約をより近い項に対して課しており、遠い項に対しては必ずしも制約を課していないということである。この観察により、上で挙げられている例について統一的な説明が可能である。(1a) においては argument である *that* 節が head に対して遠い位置にあるために head である *about* が統語的制約を十分に課していないために容認される。一方、(1b) では *that* 節が head に対し十分に近い距離にあるために統語的制約を課せられる。等位接続の例においても同様である。(3a) が容認されないのはより近い argument である *that* 節が head からの制約を受け、明らかに違反しているからである。一方、(3b) では、第一 conjunct は head からの制約を受けるが違反していない。一方、第二 conjunct である *that* 節は、制約違反しているが、head からの距離があるために制約を受けない。Right Node Raising (4a-b) においても同様である。

より近い argument に対し制約がかかるという一般化は Moosally (1998)、Sadock (1998) においても述べられている。しかし、Sadock (1998) では一致パターンを観察するとどまっており、また、Moosally (1998) においては Ndebele という言語の一致パターンを HPSG 上で stipulate するとどまっている。特に HPSG では上でも述べられている通り、filler-gap 間において同一範疇を要求するために (1) の説明に失敗する。また、文法理論の改訂を行ったとしても上記で述べたような語

(注1): それぞれの項がどの文法機能にマップされるかは LMT (Lexical Mapping Theory) によって定義されている。

順の効果を文法化することは困難であり、統一的説明を試みる
ことが難しい。そこで我々は一連の問題は、統語の問題として
の解決ではなく、実時間処理、即ちパーサーによる問題だと考
える。このような仮定は以下のような、ポーズや挿入句が head
と argument の間に介在している例によっても支持される。

- (5) a. *Ken was thinking about that he was stupid.(=1b)
b. ?Ken was thinking about (PAUSE) that he was
stupid.
c. Ken was thinking about, by the way, that he was
stupid.

(5a-b) が示していることは、head-complement 間にポーズ、
もしくは修飾句が挿入されることで容認性が向上するというこ
とである。ポーズや *by the way* などの修飾句は構造に基づく文
法理論においては文構造に影響を与えないことから、文法ベー
スの分析では (5) の説明に失敗する。語順効果についてより一
般化した形式として以下に述べる。

- (6) 語順効果：
head より課される統語的制約は線形順序において head に
十分に近い argument に対して有効である

次節では語順効果 (6) のモデル化を試みる。

4. 作業記憶に基づく文処理モデル

前セクションにおいて観察されたことは、一連の言語現象は
文法による説明ではなく、語順、実時間処理、処理器による説
明が妥当であるということである。我々は観察の一般化 (6) に
基づき、以下のような、作業記憶に基づく文処理モデルを提案
する。

- (7) 統語情報の非活性化：
統語情報は以下の条件下で非活性化する
(条件 i) 処理器が semantic predicate-argument structure
が完成したと仮定したとき
(条件 ii) 処理時間との関連で計算量的負荷が掛かるとき

(条件 i) は、すなわち意味内容が得られたと仮定された段階で
統語情報を急速に非活性化させるという意味である。この仮定
は、統語情報は意味内容を得るために利用されるという心理的
事実に基づいている。一方 (条件 ii) は、作業記憶の容量は厳
しく制限されているという心理的事実に基づく。また、(条件 i)
と (条件 ii) の差は、非活性化度合の差にある。意味内容が得ら
れた時点において、統語情報は急激に減衰するが、処理中であ
る場合は意味内容が得られた時点での減衰度合に比べ緩やかで
あるという仮定に基づく。これらの条件は、効率的に文処理を
行うという側面から考慮しても妥当なものと考えられる。しかし、
人間の文処理において処理困難な文に遭遇した場合、再分析が
行われる。そこで我々は再分析は非活性化した統語情報を再び
活性化させることであると考え、以下のようなメカニズムを仮
定する。

- (8) 統語情報の再活性化：
predicate-argument structure 構築不可能な場合に限り作
業記憶容量の範囲で統語情報の再活性化が行われる

(8) において、「作業記憶容量の範囲」という制約は parsing
breakdown に対し説明可能にするものである。parsing break-
down とは文法的でありながら、処理困難なために容認不可能
と判断される現象をいう。Gibson (1990) では短期記憶におけ
る負荷計算量を構造複雑性に基づいて計算することによって
parsing breakdown についての説明を試みている。しかし、(5)
のような構造に影響を与えない文についての容認性の差を説明
することが困難であり、それは統語情報が非活性化されるとい
う本モデルとの差によるものと考えられる。また、(8) において再
活性化が仮定されているが、(7) において定義されているよう
に、再活性化によって意味内容が得られた場合統語情報は非活
性化される。また、再活性化により統語処理を行う際に領域計
算量が作業記憶容量を超えた場合は容認不可能として parsing
breakdown が起こる。

本モデル下において、文は以下のように処理される。文の最
初の語が処理器に入力されると、処理器はその語に基づいて部
分木を作る。^(注2)そして同時に処理器による先読み処理により
次に入力されるであろうと予測される品詞情報に基づいた構造
が作られる。もし入力語が head であった場合、先読み処理に
より argument のノードも同時に作られ、統語的、意味的制約
がまだ実際には入力されていない argument ノードに対して課
される。^(注3)そして、argument にあたる語が入力された場合、
品詞情報をはじめとする文法情報のチェックが行われ、その時
点で意味内容が得られたと処理器が判断した場合、統語情報は
急激に減衰する。

以上は処理器が予想した通りの処理が行われた場合の処理で
あるが、処理機の予想は裏切られる場合も存在し、等位接続構造
がそれにあたる。特に目的語の等位接続の場合、第一 conjunct
が入力された時点で semantic predicate-argument structure
は完成し、意味内容が得られるために品詞情報をはじめとする
統語情報は急激に非活性化される。しかし、*and* が入力される
ために処理器は目的語のノードを再構成する。ノードが再構成
された時点では、head からの制約は、すでに統語情報は十分に
非活性化されているために第二 conjunct に対し課されない。
よって文法のみによっては非文と判断されてしまうような文に
ついては容認可能となる。その処理について図 3 に示す。ノー
ドの再構成に関しては、ノード情報を変更するよりも再構成を
行う方がより計算的負担がかかることが心理言語学的に証明さ
れており (Sturt, Pickering and Crocker 1999) 作業記憶容量
が厳しく制限されているという側面からにおいても、我々の仮説
は矛盾しない。また、特に等位接続において、処理器は最初に
一つだけ complement のノードを作り、接続詞が入力されてか
ら complement ノードを再構成するということが実験的に証明
されている (Sturt and Lombardo 2005)。

(注2): 木を作るのは文法による処理である。

(注3): 統語的、意味的制約を課す処理は文法の役目であることに注意されたい。

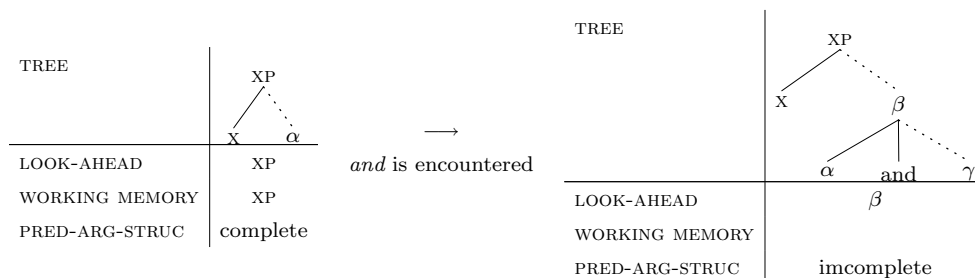


図3 等位接続における構造の再構成と作業記憶内の処理

5. 現象の処理過程

本セクションでは、文法による説明が困難な文に対し、本モデルがどのように処理するかについて示す。

5.1 主題化構文

従来の構造的に基づく文法的な分析では、filler-gap 間に同一範疇を head とする句を要求するために (1a-b) の差に対する正しい予測が困難であった。本モデルによる説明は以下のようなものである。

(1a) 最初に主題化された節 (*that the was sick*) を処理器が解析する。次に、argument である主語、head である動詞を処理する。動詞を処理した時点で先読み処理により complement のノードが作業記憶内に作られ、前置詞が入力される。この前置詞は名詞句のノードを先読み処理によって構成するが、このとき、主題化されている *that* 節に関する統語情報は非活性化している。よって、filler-gap 間においては意味制約のみがチェックされ、違反がないと判断されるので容認可能となる。しかし一方、(1b) においては、*that* 節は非活性化していない上、隣接しているために前置詞からの課される統語制約に違反する。よって容認不可能となる。(2) においても同様である。

5.2 目的語の等位接続

(3) について、文法ベースの分析では語順効果を反映できないためにその非対称性を正しく捉えることが不可能であったが、本モデルでは以下のように分析される。

(3a) において、前置詞 *about* が入力された時点で、先読み処理により、complement のノードが作業記憶内に作られる。そして第一 conjunct である *his girlfriend* が入力され、この句に対して統語制約が課される。この時点で semantic predicate-argument structure は完成したと処理器によって解釈されるため、統語情報は急速に非活性化され、意味内容が残る。これは処理の効率性という点においても妥当である。

しかし、処理器は *and* が入力されることにより complement ノードを再構成するが、この時点で統語情報は十分に非活性化されている。よって *that* 節が入力された際に *about* から課されるはずの統語制約は課されず、意味制約のみが課され、違反がないために容認可能として判断される。処理過程を図4に示す^(注4)。

一方、(3b) については、第一 conjunct が入力された時点で *about* により統語制約を課されるために容認不可能となる。

(注4): ここでは便宜上 CP と呼ぶことにする。

5.3 RNR

(4a) において、第一 conjunct が入力された際に先読み処理により *denied* の complement のノードが作られ、統語的制約が課される。この時点では NP も *that* 節も許容される。そして第二 conjunct が入力されると構造が再構成され第二 conjunct の head が処理される。この時点で第一 conjunct によって課される統語的制約は十分に非活性化されているために第一 conjunct による制約は課されず、一方で第二 conjunct による制約が課される^(注5)。しかし *with* は *that* 節と隣接しているが complement として許容されないために、(4a) は容認不可能となる。

一方、(4b) において、(4a) と同様に第一 conjunct における head の統語情報は第二 conjunct の head が入力された時点では十分に非活性化していると考えられる。この場合、head である *denied* と *that* 節は隣接しており、*denied* からの統語的制約を受けるが違反していないため容認される。

5.4 挿入句

(5a-c) に見られるような容認性の差は構造上反映されないような文法に基づく分析では正しい予測が困難である。本モデルにおいて、(5b) は処理時間が長くなるために統語情報が時間とともに非活性化されていくために起こる現象であると考えられる。また、ポーズの長さ按比例して容認性が上がることも確認されている。一方、(5c) は overt な句を処理しているために処理器に対する負荷も (5b) に比べ大きい。(5b) と (5c) の容認性の差はこの処理負荷の差を反映しているものと考えられる。

5.5 ガーデンパス効果

ガーデンパス効果とは、文法的でありながら処理困難な状態に陥る効果が観察される現象であり、入力語によって曖昧性が解消された際に心的有意差として観察される。ガーデンパス文には被験者が認識可能な文と認識不可能だが心理実験結果として効果が観察できる文がある。例として以下の有名な例を取り上げる。

(9) The horse raced past the barn fell.

本モデルに基づく、*barn* を処理した時点で統語情報は急速に非活性化する。よって、*fell* を処理すると *fell* までの入力語に基づいて構築された意味内容を再構築する必要があるが、その際統語情報が十分に非活性化している。一般にはバックトラック

(注5): 第二 conjunct の head の統語情報の方がより活性化しているためと考えられることも可能である。

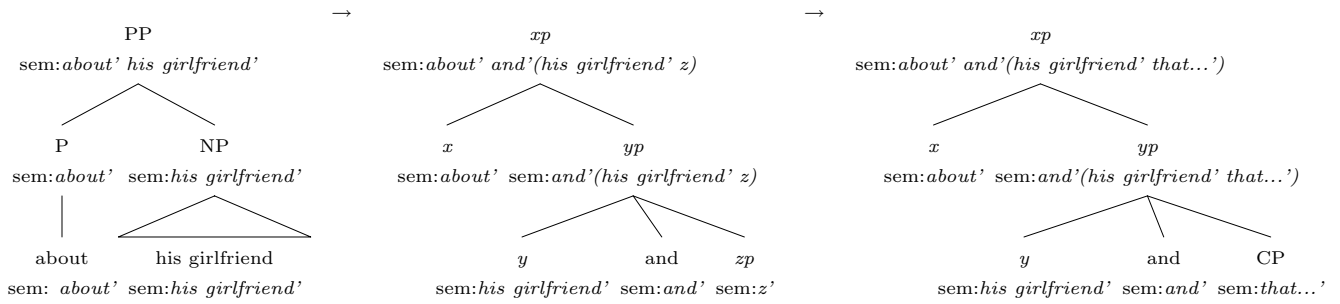


図 4 (3a) における等位接続節の処理過程

することによって再処理を行い predicate-argument structure の再構築を行うということが行われる. 本モデルによる説明としては, *fell* を入力した時点で predicate-argument structure 構築に失敗し統語情報の再活性化が起こる. そこで *fell* による統語制約が主語 NP に課されるため, 正しい意味内容が得られ, 再び統語情報が非活性化する. 非活性化した統語情報を再活性化させ再び非活性化させる作業は一見余計な作業に見えるが, 実時間処理における処理の効率性の観点から妥当と考える.

6. 処理器の文法処理への影響

セクション 3 において我々は語順が容認性に影響を与える例について文法では説明困難であることを指摘し, 文法ではなく実時間処理によって説明されるべきであると指摘した. しかし, 同時に我々は文法による処理レベルにおいても処理器の特性が影響を与えると考える. 理由としては, 文法が厳しい制約に基づいて分析したと仮定しても作業記憶の容量の制限, 処理の効率性から必ずしも文法のみによる文解析が行われているとは言えず, 結果として (1)-(5) といった文法では説明困難な文が容認されるという事実による. そこで本セクションでは処理器が文法知識を用いた処理に対する影響について議論する. また, フレームワークとして, 線形処理が可能であり記述力の高い combinatory categorial grammar (CCG; Steedman 2000) を用い, 例として目的語の等位接続を扱う.

線形順序に基づいて文法処理を行っていく際に, CCG においては本モデルにおける分析と同様, 第一 conjunct を処理した時点で文法処理が終了する (図 5). 以下に例で用いられているメカニズムの定義を示す.

- (10) a. $X/Y \ Y \Rightarrow X (>)$
 b. $X/Y \ Y/Z \Rightarrow X/Z (> B)$
 c. $X \ CONJ \ X' \Rightarrow X'' (< \Phi >)$

これは予想通りの解析結果である. 本モデルにおいて, 処理器が意味内容を得たと判断した時点で一旦処理を終了し, 統語情報を非活性化されるため, 処理器の特性を反映した解析結果と言える.

この時点で統語情報が非活性化されるが, *and* が入力されるために等位接続構造が再構築される. その際, head である *of* 及び, 第一 conjunct である *his girlfriend* の統語情報は非活性

化されているために, *Ken was thinking about* の統語カテゴリーは S/xp となる^(注6). また, このカテゴリーは文処理が依然終了していないことを示唆する. このカテゴリー変化は文法メカニズムによるものではなく, 処理器の影響によるものである.

and が入力されると, CCG ではそれぞれの conjunct が同一カテゴリーであることを要求される. しかし, 第一 conjunct は変数 (*yp*) である. よって *that* 節 (S_{+cp}) と単一化し, 同様に S/xp と単一化することで処理が完了する. ただし, それぞれの処理過程において意味制約は十分に課される. 等位接続詞入力後の処理を図 6 に示す.

7. まとめ

語順が容認性に影響を与える例を取り上げ, それらは文法ではなく実時間処理によって説明されるべき現象であるということを示した. その上で, 作業記憶に基づく文処理モデルを仮定することで統一的に説明を与えることが出来ることを示した. また, ガーデンパス文に対する説明を試み, 文法処理に与える影響について議論した. しかし, 本稿においてはモデルの形式化は十分に行われているとは言えず, 今後の課題として挙げられる. また, 非活性化, 再活性化についても, どの統語情報がどのような関数のもとで非活性, 再活性するかについて定義されておらず, この問題については文の容認性の検証を含め, 心理実験により検証する予定である. 一方, 現行モデルでは説明不十分な現象も残る. 例えば, 等位接続について, *that* 節とはいかなる代名詞も等位接続することを容認されない事が分かっている. この現象については再活性化が起こっていることによると考えられるが実験による検証が急がれる. ガーデンパス文については, 構造的, 語数の変化がない状態においても起こる例があり, 語の意味的関係性も関連していると考えられる. そういった例に対し現行モデルでは正しく予測することが困難である. また, 統計的に人間の文処理について説明を試みているモデルとして Nayanaran and Jurafsky (2004) が挙げられる. 統計的手法は緩いガーデンパス効果が表われる文の説明に対し有用と考えられ, 統計的情報を取り入れたモデルの緻密化も必要であると考えられる. 文法との関係についても本稿では CCG を用いたが, それは可能性の一つに過ぎず, 他の記述力の高い文法 (Tree Adjoining Grammar, Dynamic Syntax など)

(注6): case checking は第一 conjunct が処理された時点で完了していると考える

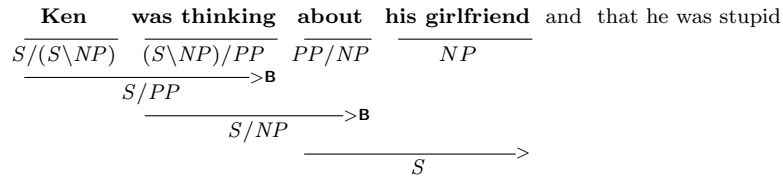


図 5 predicate-argument structure が完成したと仮定されるまでの (3b) の処理

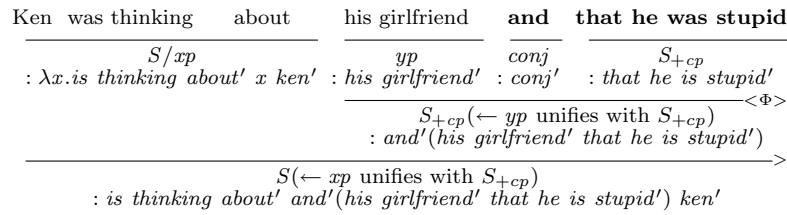


図 6 predicate-argument structure 完成と仮定され非活性化された後の (3b) の処理

において本モデルとの組み合わせによりどのように処理されるか検証する必要がある。以上が今後の課題である。

謝辞 本研究は一部、東北大学 21 世紀 COE プログラム「言語・認知総合科学戦略研究教育拠点」および東北大学学際科学国際高等研究センタープログラム研究からの研究経費の支援を受けて行われている。また、石川 潔 (法政大学)、大竹 隼 (東北大学) 諸氏の助言に感謝する。

文 献

- Bresnan, Joan. 2000. *Lexical-Functional Syntax*. Oxford: Blackwell.
- Falk, Yehuda N. 2001. *Lexical-Functional Grammar: An Introduction to Parallel Constraint-Based Syntax*. Stanford: CSLI Publications.
- Gibson, Edward. 1990. Memory Capacity And Sentence Processing. *ACL 1990*. 39–46.
- Hawkins, John. 1994. *Preference Theory of Order and Constituency*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaplan, Ronald M., and Joan Bresnan. 1982. Lexical-Functional Grammar: A Formal System for Grammatical Representation. *The Mental Representation of Grammatical Relations*, ed. Joan Bresnan, 173–281. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kaplan, Ronald M., and Annie Zaenen 1989. Long-Distance Dependencies, Constituent Structure, and Functional Uncertainty. *Alternative Conception of Phrase Structure*, ed. Mark R. Bartin and Anthony S. Kroch, 17–42, Chicago: University of Chicago Press.
- Kaplan, Ronald M. 1995. The Formal Architecture of Lexical-Functional Grammar. *Formal Issues in Lexical-Functional Grammar*, eds. Mary Dalrymple, Ronald M. Kaplan, John T. Maxwell and Annie Zaenen. 7–27. Standord: CSLI Publication.
- Keller, Frank. 2000. *Gradience in Grammar: Experimental and Computational Aspects of Degrees of Grammaticality*. PhD Thesis, University of Edinburgh.
- Moosally, Michel J. 1999. Subject and Object Coordination in Ndebele: An HPSG Analysis. *WCCFL 18*, eds. S. Bird, A. Camnie, J.Haugen, P. Norquest, 379–392. MA: Cascadilla Press.
- Narayanan, S., and Jurafsky, D. 2004. Bayesian models of human sentence processing. unpublished manuscript, available on <http://www.icsi.berkeley.edu/snarayan>
- Quirk, R et. al. 1995. *Longman Dictionary of Contemporary English, 3rd ed.* Harlow: Longman.
- Sadock, Jerrold M. 1998. Grammatical Tension. *CLS 34: The Panels*, 179–198.
- Sturt, Patrick, and Vincenzo Lombardo. 2005. Processing Coordinated Structures: Incrementality and Connectedness. *Cognitive Science 29*, 291–305.
- Steedman, Mark. 2000. *The Syntactic Processes*. MA: MIT Press.
- Takahashi, Kei, and Kiyoshi Ishikawa. 2004. An Adjacency Constraint on Argument Selection. *PACLIC 18*. eds. Hiroshi Masuichi, Tomoko Ohkuma, Kiyoshi Ishikawa, Yasunari Harada, and Kei Yoshimoto. 23–34. Tokyo: The Logico-Linguistic Society of Japan.