

A Capacity Theory of Comprehension: Individual Differences in Working Memory

M. A. Just and P. A. Carpenter

Psychological Review, 1992, **99** (1), 122–149.

作業記憶容量による理解の制約についての理論を提出する。この理論は次のように提案する: 処理と貯蔵はともに, 活性化によって媒介される; 作業記憶内で利用可能な活性化の総量は, 個人によって異なる。言語のための作業記憶容量における個人差によって, 大学生においてみられた言語理解のいくつかの側面に関する量的・質的な差異を説明することができる。そのひとつは統語的モジュラリティである: 大きな容量を持つひとは, 統語的情報と語用論的情報を相互作用させることができ, 従って統語的過程は情報的にカプセル化されなくなる。もうひとつの側面は統語的曖昧性である: 大きな容量を持つひとは, 複数の解釈を維持できる。この理論はプロダクション・システムによって実現される。そこでは, 理解において生じる一過性の計算的・貯蔵的な需要にモデルがどれだけ適応できるかという点に, モデルにとって利用可能な活性化の量が影響する。

目次

(イントロダクション)	2
1 理論の概観	2
1.1 文脈の中での文の処理	2
1.2 作業記憶容量における個人差	2
2 容量制約の効果	3
2.1 作業記憶容量を評価する	3
2.2 統語的処理のモジュール性	4
2.3 複雑な埋め込みの処理	5
2.4 年齢に関連した差異	6
2.5 統語的曖昧性: 単一表象 V.S. 多重表象	6
2.6 外的な記憶負荷	8
2.7 距離効果	9
3 シミュレーション・モデル	10
4 一般的考察	15
4.1 認知のダイナミクス	15
4.2 資源割り当てと処理効率	15
4.3 個人差へのその他のアプローチ	16

作業記憶はすべての複雑な思考(とりわけ言語理解)において、貯蔵資源・計算資源の両面で、中心的役割を果たしている。本論文では

- 言語理解において生じる一過性の計算的・貯蔵的需要に、認知的容量がいかに適応するか(あるいは、適応に失敗するか)について検討する。
- 理解成績における個人差を、作業記憶容量の観点から説明する。

Baddeley(1986)では、作業記憶は音韻的ループと中心制御部からなる。後者については経験的にも理論的に詳しく述べられていない。いっぽう我々の理論における作業記憶は、おおまかにいって、Baddeleyのいう中心制御部のなかの言語理解に関わる部分に対応している(モダリティ特定のバッファは含まない)。

1.

理論の概観

本理論では活性化を、貯蔵と処理の両方の原動力として位置づける。

- 作業記憶内で利用可能な活性化の総量を、容量と呼ぶ。
- それぞれの表象要素(語, 主題構造, 外界の事物, etc.)は活性化レベルを持つ。それは、文章の理解, 計算, 長期記憶からの検索などによって増大し、システムでの容量の余裕がなくなると減衰する。
- プロダクション・ルールによる表象の操作によって活性化が伝播する。
- すべての過程は、(容量の範囲内で)並列的に起こる。
- 活性化が容量を超えると(e.g. 課題要求が高いとき)、維持・伝播される活性化は全体的に縮小され、計算は遅くなる(閾値が相対的にあがることになるから)。

この理論を容量に制約された理解 capacity constrained comprehension と呼ぶことにする。

1.1 文脈の中での文の処理

文章の理解にともなって増大する貯蔵への制約として、次のようなメカニズムが提案されてきた。

- 近接した・中心的な節の表象のみを保持する
- 世界知識の関連する側面のみを保持する
- 即時性原理(可能な限り早く解釈する)
- 高次な表象へと置き換える
- 文脈を用いて処理を促進する

1.2 作業記憶容量における個人差

本論文は、理解における個人差は、作業記憶容量の個人差、すなわち活性化の総量の個人差であると主張する。いっぽうに、理解における個人差の説明には次の2種類がある。

総容量説 ... 記憶容量の個人差に基づく

処理効率説 ... 心的処理の効率における個人差に基づく

この2つは互いに整合的であり、実験的には区別できない。我々の理論は前者の立場をとる。

2.1 作業記憶容量を評価する

言語のための作業記憶容量における個人差を評価するために、リーディング・スパン課題 (Daneman&Carpenter,1980) を用いる。

リーディング・スパン課題とは:

手続き 複数の無関連な文を次々に読ませたのち、各文の最後の語を再生させる。

スコア セットあたり再生個数。これをリーディング・スパンと呼ぶ。

分析 我々は次のように分類している。(大学生の場合)

– 高スパン ... 4以上

– 中スパン ... 3~3.5

– 低スパン ... 3未満で、言語能力テスト (e.g. SAT) での成績上位 50%。

知見 理解スキルと相関がある。(cf. 短期記憶課題と理解スキルとは相関がみられない。) reading-listening 間で相関がある。

以下でいう作業記憶とは、言語のための作業記憶を指している。

2.2 統語的処理のモジュール性

Fodor(1983)は、統語的処理は認知的モジュール(i.e. 高速で、領域固有で、情報的にカプセル化された処理の集合)によってなされる、と提案した。

Ferreira&Clifton(1986)の実験:

材料 ガーデンパス文("reduced 関係節"。たとえば *who was* が省略されている)。

a. *The evidence examined by the lawyer shocked the jury.*

b. *The defendant examined by the lawyer shocked the jury.*

従属変数 *by the lawyer* の first-pass 注視時間。

要因 {Unreduced/Reduced}; 主語が {a. 無生/b. 有生}

結果 Figure 1 (左)。有生/無生の差がない。統語的処理は情報的にカプセル化されている。

しかし我々は、もっと良い説明として、容量の制約が情報のカプセル化をもたらす、と提案する。すなわち、作業記憶が小さいひとは、統語的計算をしているときに非統語的情報を維持できないので、結果的に統語的処理がカプセル化されることになる。このように、モジュール性の程度は、モジュール間の構造的分離ではなく作業記憶容量に依存する。

われわれの実験: Ferreira&Clifton(1986)と同様

要因 {Unreduced/Reduced}; 主語が {有生/無生}; リーディング・スパン {高群/低群}

結果 Figure 1 (右)。

- 高群では Unreduced/Reduced どちらでも有生 > 無生。高群のみが、統語的処理に語用論の手がかりを利用している。
- Unreduced/Reduced の差は高群/低群で共通。どちらの群も、統語的手がかりを利用している。

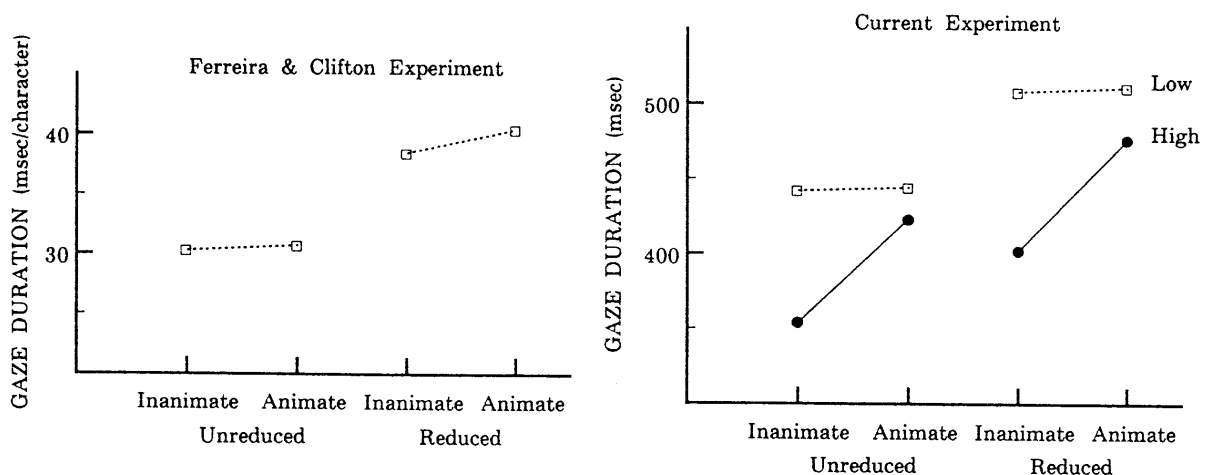


Figure 1. First-pass reading times on *by* phrase for the untested subjects of Ferreira and Clifton (1986) on the top and for high and low span subjects in the present study on the bottom. (The slope for the high span subjects between the inanimate and animate conditions indicates that their processing is faster if the grammatical subject of the sentence is inanimate; in contrast, the lack of difference between the inanimate and animate conditions indicates a negligible influence for Ferreira and Clifton's subjects and the low span subjects in the present experiment.)

2.3 複雑な埋め込みの処理

作業記憶容量への要求が多い統語構造の古典的な例は、目的格関係節の中央埋め込み文である。このような文の理解が困難である理由は、

1. 主節が中断されているので、作業記憶に保持・再活性化しなければならない。
2. 主節の主語が埋め込み節では目的格である。

我々のモデルは、それぞれの文タイプにおける理解の困難さは作業記憶の容量によって決まると予測する。従って、容量の小さいひとのほうが、主格関係節より目的格関係節で理解が困難になる度合いが大きいはずである。

King&Just(1991)の実験:

材料 中央埋め込み文。

- a. *The reporter that the senator attacked admitted the error.*
- b. *The reporter that attacked the senator admitted the error.*

従属変数 語の読み時間 (self-paced moving windows paradigm)

要因 {a. 主格/b. 目的格} 関係節; リーディング・スパン {高群/低群}

結果 Figure 2。

- 目的格関係節では *admitted* で群間の差が開き、低い群ほど読み時間が長くなる。
- 主格関係節では、群間の差が小さい。 処理要求が容量を超えないときは、作業記憶の制約は表面にあらわれない。個人差を特定の操作 (e.g. 語彙アクセス) の速度に帰することはできない。

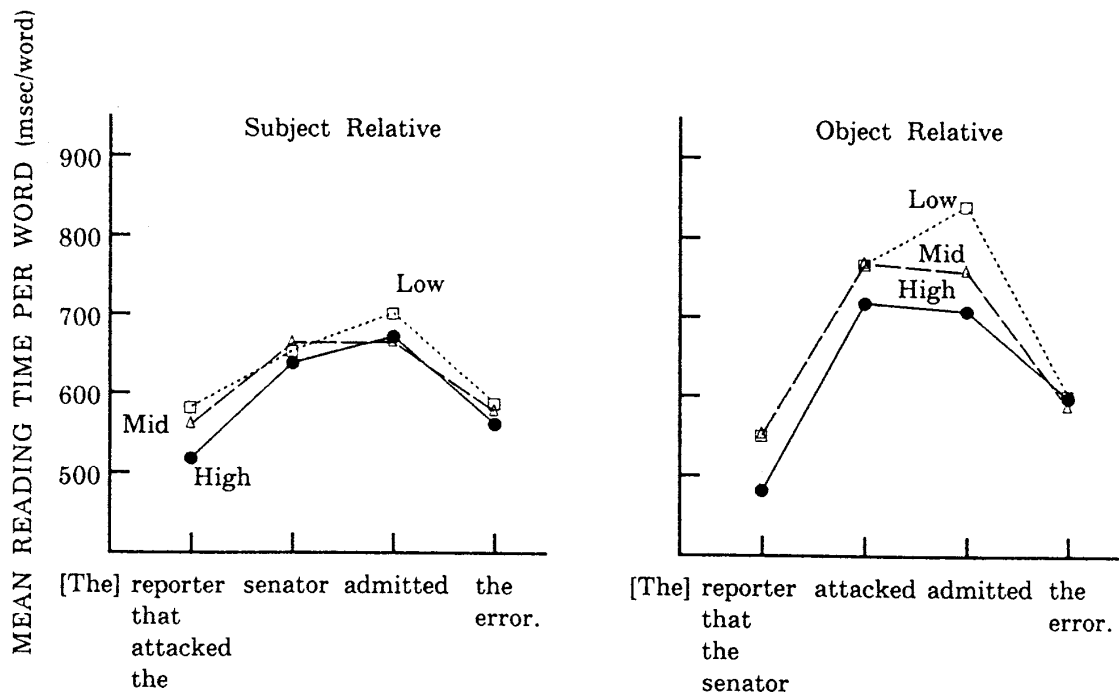


Figure 2. Reading time per word for successive areas of subject- and object-relative sentences, for high, medium (Mid), and low span subjects. (The differences among the span groups are larger for the more difficult object-relative construction, which is the more complex sentence. The differences are particularly large at the verbs, which are points of processing difficulty that are expected to stress memory capacity. The reading times for parenthesized words are not included in the plotted points.)

2.4 年齢に関連した差異

加齢による理解成績の低下には、一般的なものでもないし、特定の言語的な計算が失われるせいでもない。(c.f. 逐語的情報についての課題では成績はあまり下がらない。)

Kemper(1986)の実験:

課題 文を与え、その構造を模倣した別の文をつくらせる。

従属変数 困難さ

要因 文のタイプ, 年齢({70-89/30-49})

結果 高齢者群は

- 作業記憶要求が大きい文(e.g. 文頭埋め込み文, 文末埋め込み文)の処理が特に困難。
- 作業記憶要求が小さい文(e.g. 節が短い埋め込み文)の処理では若齢群と差がない

成績の低下は作業記憶要求が大きい時に著しい。このことは、年齢に関連した差異が、作業記憶容量と関連していることを示唆している。

2.5 統語的曖昧性: 単一表象 V.S. 多重表象

読み手が曖昧な文に出会ったときには:

- とりあえずひとつの解釈を選択する
- あとで曖昧性が解消できるようになるまで2つの解釈を保持する

という2つの見解がある。

我々のモデルでは、最初は多重表象がつくられ、それらを保持する程度に作業記憶容量が影響すると仮定することで、この2つの見解を調和する。

MacDonald, Just, & Carpenter(1992)の実験:

材料 統語的曖昧文/非曖昧文。

a. *The experienced soldiers warned about the dangers before the midnight raid.*

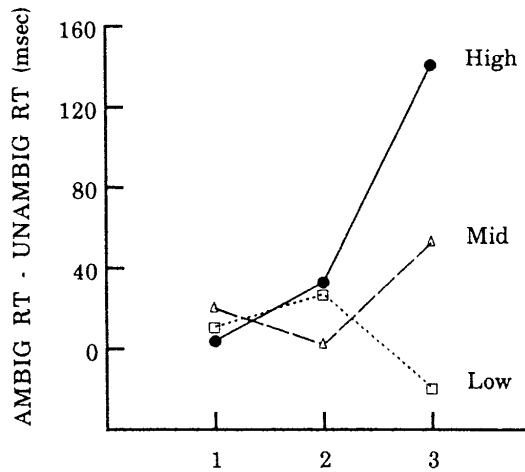
b. *The experienced soldiers spoke about the dangers conducted the midnight raid.*

従属変数 語の読み時間. (self-paced moving windows paradigm)

要因 {a. 曖昧文/b. 非曖昧文}; リーディング・スパン {高群/低群}

結果 **Figure 3.** 高群でのみ、曖昧文の読み時間が長い(特に *raid*で)。

リーディング・スパンが大きい読み手は、曖昧文の2つの解釈を、解決されるまで保持する。(i.e. *The experienced soldiers warned about the dangers conducted the midnight raid.* ならば、有利になる。)



[The soldiers] warned/ spoke about the dangers before the raid. the midnight

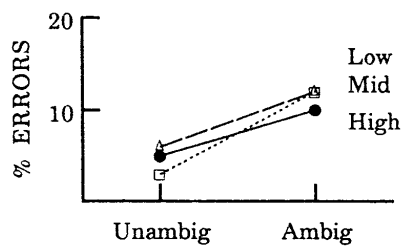


Figure 3. The differences between the ambiguous (AMBIG) and unambiguous (UNAMBIG) sentences in the average reading time (RT) per word for the three regions of the sentences for the high, medium (Mid), and low span subjects. (The high span subjects take additional time on sentences with structurally ambiguous verbs, such as “warned,” than those with unambiguous verbs, such as “spoke.” This result is consistent with the hypothesis that high span subjects maintain the ambiguity in working memory for a longer period than do medium or low span subjects. The error rates are indicated in the bottom panel.)

2.6 外的な記憶負荷

作業記憶の利用可能な容量は、外的な操作 (e.g. 単語・数字の保持) によって操作できる、と考えられる。

King&Just(1991)の実験 (前出):

従属変数 理解の正確さ

要因 {主格/目的格}関係節; リーディング・スパン {高群/低群}; 並行して単語を保持 {なし/1-2語}

結果 Figure 4.

- 目的格関係節で、両群に並行課題が影響。
- 主格関係節では、低群に並行課題が影響。
- {作業記憶容量が小さいとき、言語的に複雑なとき、外的記憶負荷があるとき}に、理解の正確さが減。

Carpenter & Just (1989) の実験:

課題 リーディング・スパン課題に類似。

要因 材料文が(語彙的・統語的に)理解 {困難/容易} リーディング・スパン {高群/中群/低群};

結果 Figure 5。被験者のスパンの限界に近くなると、成績に困難さが影響する。

一般に、知覚的過程ならびに経験を積んだ過程は、競合課題の影響を受けない (Cohen, Dunber, & McClelland, 1990)。また、

- 単語の符号化に要する時間は記憶負荷の影響を受けない (Carpenter & Just, 1989)。
- 事例のカテゴリへの所属の判断は記憶負荷の影響を受けない (Baddeley, 1986)。

いっぽう上記の知見は、文の理解と外的課題とが資源を共有していることを示している。

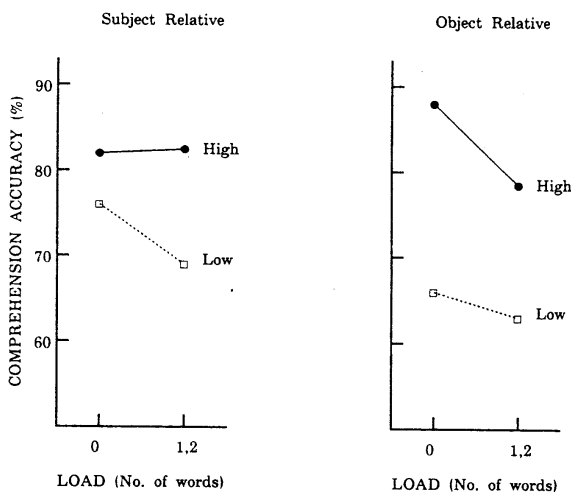


Figure 4. Comprehension accuracy for subject-relative and object-relative sentences in the absence or presence of an extrinsic memory load for high and low span reading groups. (Comprehension accuracy is lower for the low span subjects, for the more complex object-relative clause sentences, and when subjects are simultaneously retaining a load.)

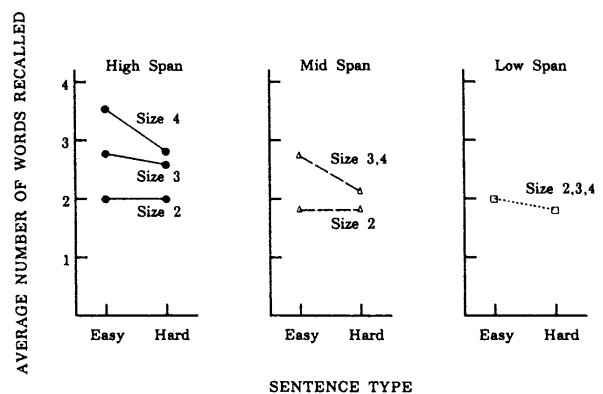


Figure 5. The average number of load words that are recalled after a subject reads a set of sentences that are either hard, because they contain difficult vocabulary, or easy. (Recall primarily decreases when the subject is at or near his or her capacity and the sentence is hard.)

2.7 距離効果

関連している2つの構成素 (e.g. 先行詞-代名詞; カテゴリ-成員) が文章中で離れていると, エラーの確率が高くなり, 統合過程にかかる時間が長くなることが知られている。

Daneman&Carpenter(1980) の実験:

材料 文間の代名詞照応を含む文章。

従属変数 代名詞の指示対象を問う理解課題の成績。

要因 代名詞を含む文と, 指示対象を含む文との間にある文の数; リーディング・スパン

結果 Figure 6. 正解できる距離の限界を, リーディング・スパンによって予測できる。

Yuill,Oakhill,&Parkin(1990) の実験:

被験者 7-8才の子ども

材料 2つの情報の統合が必要な文章 (e.g. 弟はダイエット中 ... 兄が弟にお菓子を分けて叱られる)。

従属変数 理解課題の成績。

要因 2つの情報間の距離; リーディング・スパン

結果 スパンの小さな子どもは, 距離が大きいために成績低。

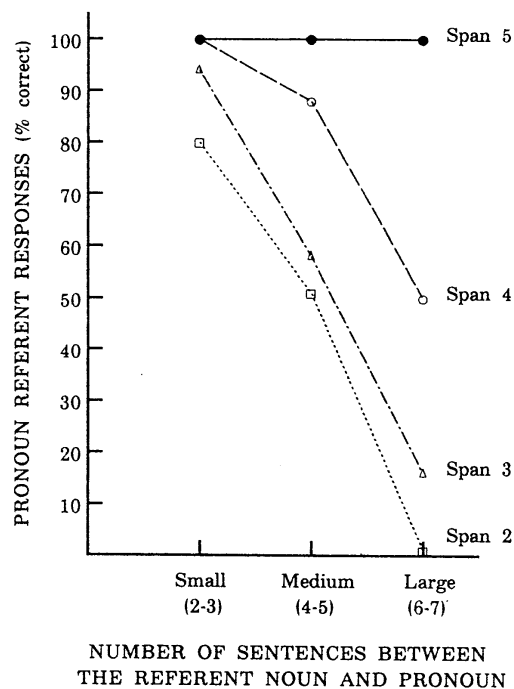


Figure 6. Correct interpretation of a pronoun as a function of its distance from the preceding anaphoric reference for high, medium, and low span reading groups. (The subjects with the highest span [5 words] have no difficulty interpreting a pronoun, even if its referent occurred six or seven sentences before. By contrast, the subjects with the lowest span [2 words] cannot interpret such pronouns and are only moderately successful if the referent occurred two or three sentences earlier.)

これまでに述べた実験の諸側面のコンピュータ・シミュレーションを行った。

CAPS シミュレーションに用いたアーキテクチャCAPSは、プロダクション・システムとコネクショニスト・システムのハイブリッドである。

- プロダクションに従い、活性化がソース要素からターゲット要素へと伝播する。
- プロダクションは並列的にはたらく。
- 活性化の伝播はターゲット要素がある閾値に達するまで反復される。

CC READER シミュレーションはパーシング・モデルREADER(Thibadeau,Just,&Carpenter,1982)の改訂版CC READER (Capacity Constrained READER)を用いて行われた。その特徴は:

1. 各作業記憶要素は、活性化レベルと呼ばれる実数を伴う。これはその要素の強度をあらわし、それがなんらかの閾値を越えたときに、プロダクションの前件が満たされる。
2. 作業記憶要素のほとんどは(概念 :関係 概念)形 または(概念 [implicit :isa] 概念)形の命題であり、諸要素がひとつのネットワークを構成する。
3. プロダクションの発火によって、ある作業記憶要素(ソース)の活性化が、ある因子(重み)でかけ算されて、別の作業記憶要素(ターゲット)に流れる。
4. 全てのプロダクションが作業記憶に対してマッチングされ、前件が満たされたプロダクションがすべて発火することを、1処理サイクルと定義する。
5. 長期的な知識は、作業記憶とは分離された宣言的データベースからなっている。

CC READERが主に扱うのは、埋め込み節を含む単文についての統語的な処理である。その目的は、容量への制約が変われば成績も変わる、心理学的にもっともらしい理解システムを示すことである。

作業記憶容量 作業記憶容量への制約は、

- 作業記憶内に要素を維持するために利用可能な活性化と、
- 処理にともなって他の要素に伝播させることが可能な活性化の、

総量における限界というかたちをとる。従って、活性化の欠乏は、作業記憶要素の忘却と処理の低速化をもたらす(両方が同じ割合で割り引かれる)。なお、

- 置換による忘却は、古い要素の活性化水準の減衰として実現される。
- 要素が多いと忘却が起こりやすい。ただし、どの程度から起こりやすくなるかは、場面・人によって異なる。

CC READERのプロダクション CC READERは57のプロダクションによって構成されている (TABLE 2)。

Table 2
Categories of Productions in CC Reader

Category	Number	Subcategory
Initialization	3	Initializing system and getting next word
Lexical access	3	Accessing lexicon
Syntactic parsing	10	Parsing noun phrases
	16	Parsing verb phrases
	7	Handling transitions between subjects, predicates, and direct objects
Semantic analysis	12	Handling embedded clauses
	6	Handling verb voice and agent-patient assignment

- [初期化] 1. 文を読む前にシステム全体を初期化する。
 2. 単語を読む前の初期化を行う。
 3. いま読んだ単語を符号化する。
- [語彙アクセス] 1. いま読んだ単語に対応する語彙項目のトークンを作業記憶に挿入し、語彙アクセスが起きているというフラグを立てる。辞書内での活性化レベル(=頻度の対数)と同じ活性化が与えられる。
 2. アクセスフラグのついているトークンの活性化レベルを増大させる。閾値に達するまで繰り返し発火する。
 3. 閾値に達したトークンのアクセスフラグを除去する。
- [統語的パーシング] 主語を修飾する埋め込み節を扱うことに焦点をあてた、ごく限定的なパーサ。Figure 7参照。構成素ごとに目標を活性化する (e.g. 主語 述語)。
- [意味的分析] 格役割を付与する、節の能動/受動を区別するための、ごく限定的な分析。プロダクションの例: 「有生頭部名詞を含む by 前置詞句が受動態の動詞を修飾していたら、その頭部名詞がその動詞の動作主であるという命題を活性化させる」。

シミュレーション CC READER は一般に、人間と非常によく似た挙動(速度, エラー)を示す。さらに、活性化総量の限界の大小による違いは、人間におけるスパンの大小による違いを再現している。

- 統語的曖昧性(2.5) ... Figure 8. (cf. Figure 7.)
- 統語的複雑性(2.3) ... Figure 9.
- 統語的処理への語用論的影響(2.2) ... Figure 10.

(以上の分析では、単語ごとの処理サイクル数を指標としている。)

モデルについての検討

- 活性化の消費: もうひとつの処理指標として、各単語の処理が終わった時点で消費されている活性化の総量を用いることができる(それまでの処理の結果の量に相当)。Figure 3. 処理中に活性化総量が限界に達した場合、文終了後に結果の一部を破棄しなければならない(高次な表象に取り替える、など)。
- その他の割り当てスキーム: 活性化総量が限界に達した場合、貯蔵と処理を等しく縮小するのではなく、貯蔵または処理をより縮小する、というスキーム(処理優位ないし貯蔵優位スキーム)を考えることもできる。これらの違い(バイアス・パラメータ)は、速度-正確さトレードオフを実現するメカニズムとみなすことができる。

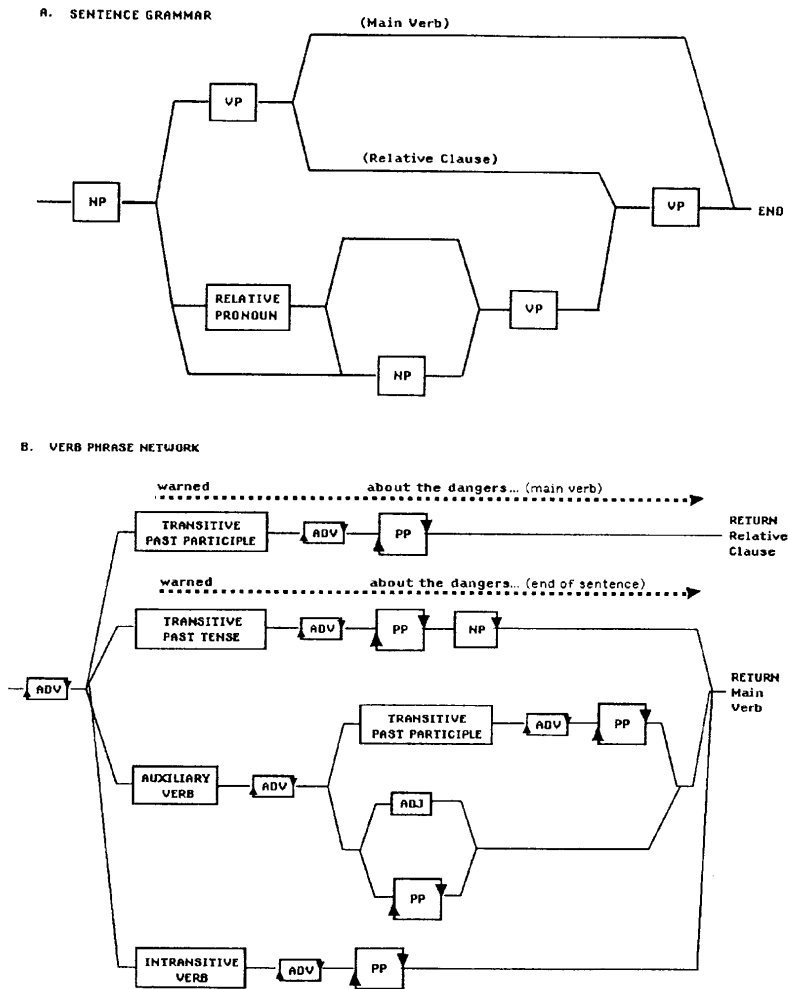


Figure 7. The sentence grammar, on the top, and the verb phrase network, on the bottom, that are used by the syntactic productions. (The ambiguity between main verb sentence and the reduced relative clause sentence is indicated in the verb phrase network by indicating that the phrase "warned about the dangers" is compatible with two branches of the network. VP = verb phrase; NP = noun phrase; ADV = adverb; PP = prepositional phrase; ADJ = adjective)

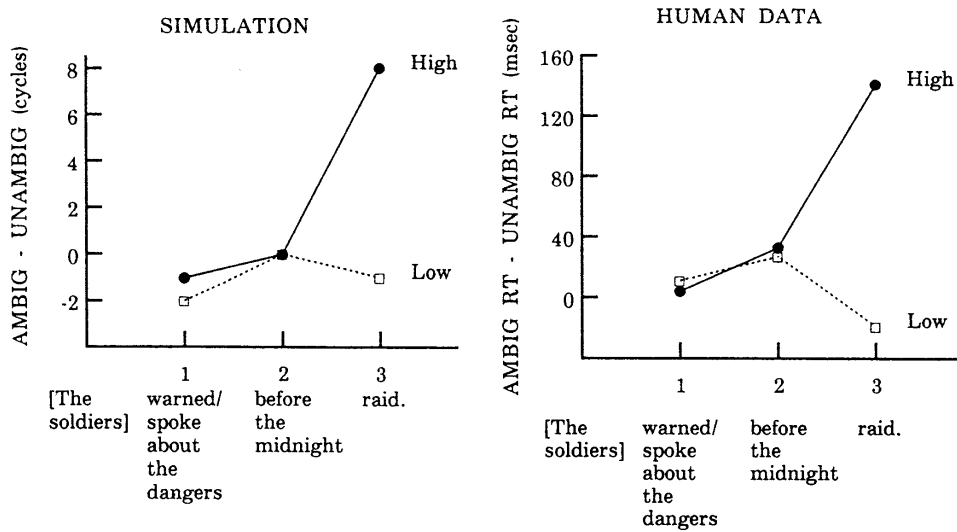


Figure 8. The top graph presents the difference in the number of cycles needed to process the ambiguous (AMBIG) and unambiguous (UNAMBIG) sentences when the simulation, CC READER, is operating with more working memory capacity, to simulate the high span subjects, or less, to simulate the low span readers. (The bottom graph presents the human data for comparison with the simulation. RT = reading time.)

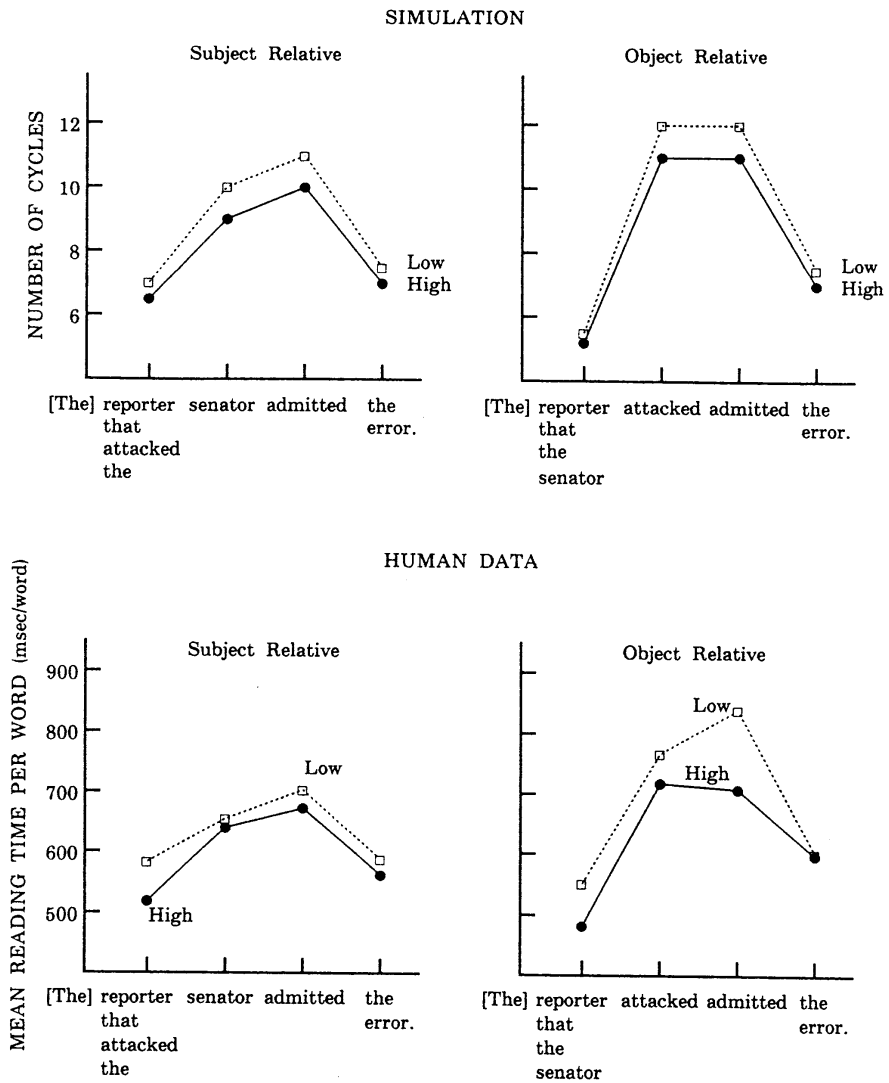


Figure 9. The number of cycles expended on various parts of the subject-relative sentences (on the left) and object-relative sentences (on the right) when the simulation, CC READER, is operating with more or less working memory capacity. (The bottom graph presents the human data for comparison with the simulation.)

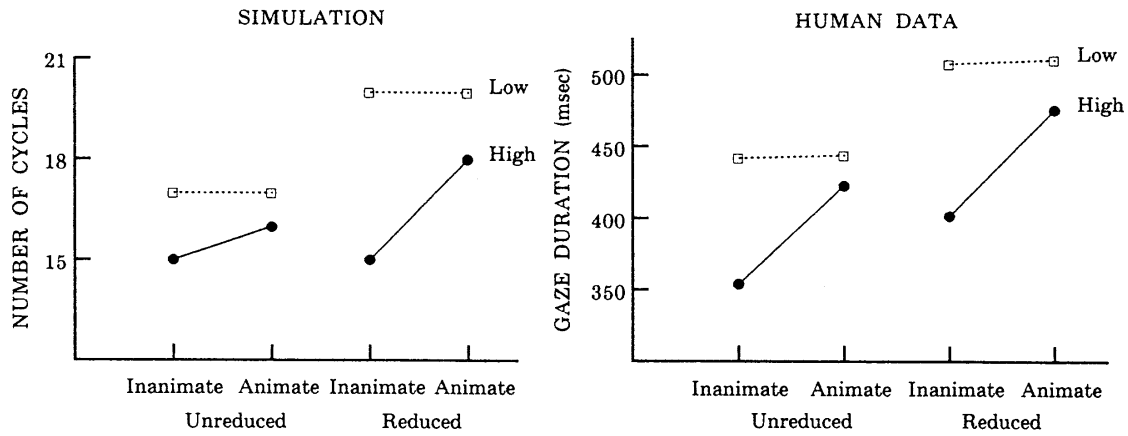


Figure 10. The number of cycles expended on the *by* phrase for sentences containing inanimate and animate grammatical subjects when the simulation is operating with more or less working memory capacity. (The bottom graph presents the human data for comparison with the simulation)

Table 3
Total Consumption of Activation After Successive Words of a Sentence

Reading capacity	Units of activation consumed								
	The reporter that the senator attacked admitted the error.								
Low	9.2	16.2	16.3	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0
High	9.2	16.2	16.3	31.0	38.1	53.0	53.0	53.0	53.0

4.1 認知のダイナミクス

容量理論の示唆によれば、下位システム間の相互作用は容量に依存する(相互作用もまた資源を必要とするから)。すなわち、アーキテクチャによって相互作用が許容されることは必要条件ではあっても十分条件ではない。このように、モジュールの自律性は容量に依存している。

より一般的にいえば、アーキテクチャということばが家の設計のアナロジ(部屋に分かれている)を呼び起こすのに対して、資源依存的な活動に焦点をあてることは、川のようなダイナミック・システムのアナロジを呼び起こす。

そのほかの認知的領域 言語理解以外の認知的領域について、以下のことが示唆される。

- ある種の課題における成績の個人差は、その大部分が作業記憶容量によって説明できるかもしれない。e.g. Reven Progressive Matrices Test (Carpenter,Just,&Shell,1990)
- どんな課題でも、課題要求が作業記憶容量を十分に消費するならば、成績に大きな個人差があらわれるだろう。
- 思考には、正確さや速度のほかに、強さという軸がある(消費される活性化の総量に対応)。
- 注意に関する研究でも同様の容量理論があるが(Kahneman,1973など)、容量とはなにかが明確でなかった。いっぽう本理論は容量を活性化の観点から定義している。
- 本理論はモジュールの自律性に関して新しい視点を提供している。

ひとつの容量か、たくさんの容量か? 本論文で述べた実験結果は、言語理解に伴う多様な側面が、単一の作業記憶容量に制約されていることを示した。しかし、すべての言語過程がそうであるとは限らない。たとえば、文の穴埋め課題の成績はリーディング・スパンと相関しない(Daneman & Green, 1986)。処理資源にはたくさんあり、ある課題領域ではその一部しか使われない、と考える方がよいだろう。

4.2 資源割り当てと処理効率

資源割り当てスキーマ 一般に、資源が足りないときには、多様な入力が必要とする処理(e.g. 相互作用的処理)は実行されにくくなるだろう。

全体的容量と効率 成績の個人差は、全体的容量の個人差と処理効率の個人差の両方を反映しているのだろう。ここで次の2通りの想定が可能である。

- 課題の要求が利用可能な資源を上回ると、容量の制約が処理効率に影響する。
- 全体的容量は、いろいろな処理の実行に広く影響する。処理効率自体の変化は、個別の処理に特定の(例、訓練による変化)。

この2つの説明は相互排他的ではない。しかし、本論文で述べた実験結果に関しては、前者の説明がよりあてはまるだろう。

4.3 個人差へのその他のアプローチ

ある特定の過程を個人差の原因とみなす これまでの多くの研究が、理解の個人差はなんらかの下位過程における個人差に起因している、と想定してきた。その候補として、以下の過程が挙げられてきた:

- 単語の知覚 (Hunt,1978; ほか)
- 単語の符号化速度 (Cunningham,et.al,1990;Frederujseb,1981)
- 高次な理解過程。 e.g. 聞き取り理解能力。

いっぽう本理論は、遅い or エラーの多い過程は、作業記憶容量を多く消費するので、全体的な容量の個人差につながる、と想定する。

語彙サイズ 理解と語彙サイズには強い相関があることが知られている。これは、効率よい理解過程と語彙獲得に同一の過程が関与しているからだと考えられている。容量理論は、この共通の要因が作業記憶容量である、と示唆する。

動機づけの個人差 成績の個人差は動機づけ的要因のせいにされることもある。しかし、

- こうした説明では、低スパンな被験者が複雑な文の理解に時間をかけることが説明できない。
- 集団間の違いは説明できても、細かい操作による成績の変化を説明できない。

おわり