Neural Correlates of Lexical Access during Visual

Word Recognition

J. R. Binder, K. A. McKiernan, M. E. Parsons, C. F. Westbury,
E. T. Possing, J. N. Kaufman, and L. Buchanan
Journal of Cognitive Neuroscience 15:3, pp. 372–393 (2003)

Introduction

- ➤ 語彙の使用や意味の処理は、単語や文章理解を基本とする多くの機能的神経画像研究で長く検討されてきた
- これらの研究は単語の意味の検索に関連する脳の領域を検討しているが、幾つかの欠点がある
 - ▶ 意味へのアクセスを要求しない統制条件との比較
 - ◆ 意味の分類や意味の関連性判断(実験条件)
 - 意味へのアクセスが要求される課題
 - ◆ 大文字・小文字のマッチング、大きさの区別、音素の検出、音節のカウント、 リズムの判断(統制条件)
 - 知覚的なアクセスや音韻的な情報のみが要求される統制課題
 - ▶ 統制条件の刺激の選択
 - ◆ 統制条件の刺激は基本的に非単語
- ▶ 同じ教示下での単語や非単語への反応を比較する必要がある
 - 刺激が単語であるか非単語であるかを分類すると言った語彙判断のパラダイム
- ▶ 単語と非単語は幾つかの特徴の違いがあるため、語彙判断は複数の決定基準がパフォーマンスに影響する複雑なプロセスである(Grainger & Jacobs, 1996; Stone & Van Orden, 1993; Posner & Carr, 1992; Seidenberg & McClelland, 1989; Waters & Seidenberg, 1985; Balota & Chumbley, 1984; Shulman, Hornak, & Sanders, 1978; James, 1975)
 - ▶ 馴染みのない文字列で構成される非単語
 - ◆ 正字的な親近性のみで語彙判断が起こる(James, 1975)
 - ▶ 馴染みのある文字列で構成される非単語
 - ◆ 正字的な親近性+音韻的な親近性での語彙判断(Waters & Seidenberg, 1985)
 - ▶ 実在する単語
 - ◆ 正字的な親近性+音韻的な親近性+単語の意味へのアクセスでの語彙判断

- ▶ 単語認識のモデル
 - ➤ 特定の単語規則を含む内的な用語集の存在を仮定(McClelland & Rumelhart, 1981; Coltheart, Davelaar, Jonasson, & Besner, 1977; Morton, 1969)
 - ➤ 実在する単語に類似した非単語でも単語規則はある程度活性化する(例えば、 MAVE は HAVE や MODO を活性化する)
- ▶ 近傍性を操作することで、単語規則の活性化の調査を行う
 - ▶ 実在する単語の近傍性の例
 - ◆ 近傍性が高い単語(Coltheart et al., 1977)
 - 一字違いの単語が多い単語 ("HOUSE"; "HORSE"、"POUSE")
 - ◆ 近傍性が低い単語
 - 一字違いの単語が少ない単語 ("GEESE")
- ▶ 多くの類似単語を持つ非単語は、少ない類似単語を持つ非単語よりも判断に時間がかかる(Forster & Shen, 1996; Grainger & Jacobs, 1996; Sears, Hino, & Lupker, 1995; Andrews, 1989, 1992; Coltheart et al., 1977)
 - ➤ 正字的な類似の活性化は、刺激を単語として受け入れることを促進する(Andrews, 1989)
- ➤ 類似語は低い親近性の単語の認知において、しばしば促進効果を持つ(Carreiras, Perea, & Grainger, 1997; Forster & Shen, 1996; Huntsman & Lima, 1996; Sears et al., 1995; Andrews, 1989, 1992)

▶ 仮説

- ➤ 1. 先行研究と同じ脳の領域において、単語への反応は非単語への反応よりも強い 活性化を促進する
- ▶ 2. 単語規則の活性化によって、多くの類似単語を持つアイテムは類似単語を持たないアイテムよりも強い活性化を示す
- ▶ 視覚的語彙判断において、fMRIを使用してこれらの仮説を調査
 - ▶ 参加者は提示されたターゲット文字列を単語・非単語に分類するように指示された
- ➤ 単語 (Word) と非単語 (Non) は視覚的、正字的、音韻的特徴でマッチングされた (table 1)
- ▶ 単語と非単語のセットは、それぞれ近傍性がある刺激(Hi)とない刺激(Lo)が用意 された
- ➤ 反応時間やエラー率における近傍性と語彙の効果を確認する予備実験が行われた (table1)

Table 1. Summary Statistics and Lexical Decision Performance Data for the Four Stimulus Sets, including Mean Letter Length, Orthographic Frequency per million words (OF), Mean Positional Bigram Frequency (MPBF) per million words, Orthographic Neighborhood Size (ONS), Phonological Neighborhood Size (PNS), Percent Error (%Error), and Response Time in milliseconds (RT) In the Pilot Study, and Percent Error and Response Time in the fMRI Study

	# Letters	OF	MPBF	ONS	PNS	Pilot Study		FMRI Study	
						% Error	RT	% Error	RT
Words									
HiWord	5.3 (0.5)	3.8 (2.5)	1455 (776)	7.3 (1.7)	11.1 (4.4)	7.4 (9.9)	775 (105)	5.3 (9.3)	806 (81)
LoWord	5.3 (0.5)	3.6 (2.8)	603 (748)	0.0 (0.0)	2.8 (2.4)	9.4 (12.4)	816 (135)	4.6 (7.9)	787 (76)
All	5.3 (0.5)	3.7 (2.7)	1029 (871)	3.7 (3.9)	7.4 (6.8)	8.4 (11.2)	796 (122)	5.0 (8.6)	796 (79)
Nonwords									
HiNon	5.1 (0.4)	0.0 (0.0)	1353 (765)	8.2 (1.8)	10.3 (5.4)	13.4 (9.1)	938 (85)	10.2 (12.4)	963 (84)
LoNon	5.2 (.04)	0.0 (0.0)	431 (353)	0.0 (0.0)	1.1 (2.5)	4.8 (6.0)	866 (107)	2.9 (4.8)	896 (70)
All	5.2 (0.4)	0.0 (0.0)	719 (605)	4.1 (4.3)	5.7 (5.8)	9.1 (8.8)	902 (103)	6.5 (10.0)	930 (84)
p(W-N)	ns	<.0001	ns	ns	ns	ns	<.0001	ns	<.0001
p(Hi-Lo)	ns	725	<.0001	<.0001	<.0001	<.05	ns	<.005	.0001

Numbers in parentheses are standard deviations. The p values are given for comparisons on each measure between words and nonwords (W-N) and between Hi and Lo neighborhood items (Hi-Lo). See Appendix 1 for details on calculation of OF, MPBF, ONS, and PNS.

Pilot Study

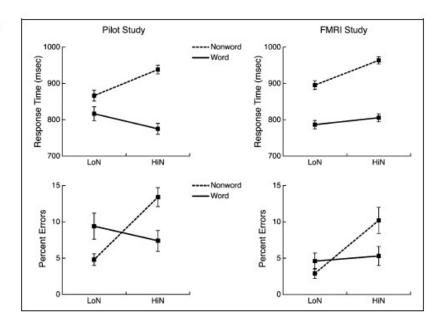
Method

- ▶ 25人の健康な右利きのウィンザー大学の学部生が参加した
- ▶ 参加者はランダムに 1 つずつ提示されるターゲット文字列が、正しい英単語であるかを「なるべく早く、なるべく正確に決定する」ように教示された
- ▶ 250msec の注視点提示後、ブランクスクリーンが 50msec 示された
- ▶ 注視点提示後、ターゲット文字列が出現し、反応があるまで表示された
- ightharpoonup それぞれの参加者の反応時間やエラー率が、アイテム分析の場合は $ightharpoonup F_1$ 、参加者分析の場合は $ightharpoonup F_2$ の表記で 2 要因の分散分析が行われた

> Results

- ▶ 反応時間が 200msec 以下、或いは 3000msec 以上のものは分析から除外した♦ (全体の 1.1%の) 55 データが除外
- ▶ 全体のエラー率は 8.7%、反応時間は 841msec
- ▶ 条件ごとの平均を table1 と figure1 に示した

Figure 1. Response times and error rates in the four conditions of the pilot study (left) and the fMRI study (right). Error bars represent SEM.



▶ 反応時間の分析

- ◆ 語彙の主効果
 - アイテム分析
 - ▶ 非単語への反応より単語への反応の方が早い(F₁(1,196) = 47.22, p < .001)</p>
 - 参加者分析
 - ▶ 非単語への反応より単語への反応の方が早い(F₂(1,24) = 19.83, p < .001)</p>
- ◆ 近傍性の主効果
 - アイテム分析
 - ▶ 近傍性の主効果はなかった (F₁(1,196) = 0.96, p > .1)
 - 参加者分析
 - **)** 近傍性のあるアイテムへの反応より近傍性のないアイテムへの反応 の方が早い $(F_2(1,24) = 7.27, p < .05)$
- ◆ 語彙×近傍性のインタラクション
 - アイテム分析 (F₁(1,196) = 13.32, p < .001)
 - 参加者分析(F₂(1,24) = 21.95, p < .001)
- ◆ Bonferroni/Dunn 法を用いた多重比較
 - 事単語の反応における大きな抑制の効果 (HiNon-LoNon の有意差, p<.001)
 - 単語の反応における僅かな促進の効果(HiWord-LoWord の有意傾向,

p = .06

- ▶ エラー率の分析
 - ◆ 語彙の主効果
 - アイテム分析、参加者分析ともに見られず
 - ◆ 親近性の主効果
 - アイテム分析
 - ightharpoonup 近傍性のあるアイテムへのエラーより近傍性のないアイテムへのエラーの方が少ない $(F_1(1,196) = 5.80, p < .05)$
 - 参加者分析
 - **)** 近傍性のあるアイテムへのエラーより近傍性のないアイテムへのエラーの方が少ない $(F_2(1,24) = 20.07, p < .001)$
 - ◆ 語彙×近傍性のインタラクション
 - アイテム分析 (F₁(1,196) = 15.02, p < .001)
 - 参加者分析(F₂(1,24) = 20.07, p < .001)
 - ◆ Bonferroni/Dunn 法を用いた多重比較
 - 事単語の反応における大きな抑制の効果 (HiNon-LoNon の有意差, p<.001)
 - 単語の反応における僅かな促進の効果 (HiWord-LoWord の有意差なし)
- ▶ 語彙の操作
 - ◆ 単語への反応は非単語への反応のよりも早い
- 近傍性の操作
 - ◆ 非単語……近傍性が高いと反応を抑制する
 - ◆ 単語……近傍性が高いとわずかに反応を促進する
- ➤ これらの結果は語彙判断の多くの先行研究と一致する(Grainger & Jacobs, 1996; Andrews, 1989; Coltheart et al., 1977)

fMRI Study

- Subjects
 - ▶ 英語を母語とする 24 人(女性 15 人)の健康な右利きの参加者が fMRI 実験に参加した
 - ▶ 年齢の平均は25.2歳(範囲は18-49)
- > Task Procedures
 - ▶ 刺激は黒背景で小文字の Geneva font で示され、水平視覚野の平均は 3° だった

- ➤ 4 つの刺激タイプ (HiWord、LoWord、HiNon、LoNon) がランダムに提示され た
- ▶ 試行間でスクリーンの中央に注視点が提示され、参加者はこの刺激に焦点を合わせるように促された
- ➤ 試行は注視点が消え、刺激が 1000msec 提示され、その後、再び注視点が出現するまでであった
- ▶ 反応は左手のキーパットで操作され、1つのキーは"word"、もう1つは"nonword" を意味した
- ▶ 予備実験のエラー率が高かったため、教示は正確さを強調したものだった
- ▶ 参加者は「なるべく早く、間違えないように」と教示された

Results

- > Task Performance
 - \diamond それぞれの参加者の反応時間やエラー率が、アイテム分析の場合は F_1 、参加者分析の場合は F_2 の表記で 2 要因の分散分析が行われた
 - ◆ 反応時間が 200msec 以下、或いは 3000msec 以上のものは分析から除外した● (全体の 0.5%の) 22 データが除外
 - ◆ 予備実験と比較して、エラー率は減少し(t = 5.33, p < .0001)、反応時間は長くなった(t = 2.13, p < .05)
 - 教示において正確さをより強調した影響
 - ◆ 条件ごとの平均を table1 と figure1 に示した
 - ◆ 反応時間の分析
 - 語彙の主効果
 - ▶ アイテム分析
 - ◆ 非単語への反応より単語への反応の方が早い(F₁(1,196) = 146.52, p < .001)</p>
 - ▶ 参加者分析
 - 非単語への反応より単語への反応の方が早い($F_2(1,23) = 23.46$,p < .001)
 - 近傍性の主効果
 - ▶ アイテム分析
 - ◆ 近傍性のあるアイテムへの反応より近傍性のないアイテムへの 反応の方が早い(F₁(1,196) = 15.50, p < .001)</p>
 - ▶ 参加者分析
 - ◆ 近傍性の主効果はなかった $(F_2(1,23) = 2.49, p > .1)$

- 語彙×近傍性のインタラクション
 - ▶ アイテム分析 (F₁(1,196) = 4.92, p < .05)</p>
 - > 参加者分析では見られなかった $(F_2(1,23) = 0.75, p > .1)$
- Bonferroni/Dunn 法を用いた多重比較
 - 非単語の反応における大きな抑制の効果 (HiNon-LoNon の有意差, p<.001)
 - ➤ HiWord-LoWord の比較は有意差なし

◆ エラー率の分析

- 語彙の主効果
 - ▶ アイテム分析と参加者分析ともに見られず
- 近傍性の主効果
 - ▶ アイテム分析
 - ◆ 近傍性のあるアイテムへのエラーより近傍性のないアイテムへのエラーの方が少ない(F₁(1,196) = 9.87, p < .01)</p>
 - ▶ 参加者分析
 - ◆ 近傍性のあるアイテムへのエラーより近傍性のないアイテムへのエラーの方が少ない ($F_2(1,23) = 15.23, p < .001$)
- 語彙×近傍性のインタラクション
 - ▶ アイテム分析 (F₁(1,196) = 4.92, p < .05)</p>
 - ▶ 参加者分析 (F₂(1,24) = 10.05, p < .01)
- Bonferroni/Dunn 法を用いた多重比較
 - 非単語の反応における大きな抑制の効果(HiNon-LoNon の有意差, p<.001)
 - ➤ HiWord-LoWord の比較は有意差なし
- ◆ 予備実験と一貫した結果
 - 語彙の操作
 - ▶ 単語への反応は非単語への反応のよりも早い
 - 近傍性の操作
 - ▶ 非単語……近傍性が高いと反応を抑制する
- ◆ fMRI 実験と予備実験との僅かな違い
 - 予備実験:単語・高い近傍性……僅かに反応を促進する
 - fMRI 実験:単語・高い近傍性……僅かに反応を抑制する
- ◆ この違いは fMRI 実験では正確さを強調したために起こったと考えられる

➤ fMRI Data

- ♦ Words versus Nonwords
 - 語彙の効果が非単語(HiNon+LoNon)と単語(HiWord+LoWord)に対する脳の反応の比較
 - ▶ 左脳半球が非単語よりも単語で強い反応を示した(figure2の赤)
 - ▶ 前頭葉の領域が単語よりも非単語で強い反応を示した(figure2の青)

♦ Neighborhood Size Effects

- 近傍性効果が多くの近傍性(HiWord+HiNon)をもつアイテムと近傍性を 持たないアイテム(LoWord+LoNon)に対する脳の反応の比較
 - ▶ いくつかの領域が近傍性のないアイテムで強い反応を示した (figure3)
- この結果は2つの点において予想外の結果である
 - ▶ 単語規則の活性化の仮説では予測できない結果である
 - ▶ 影響を受けた多くの領域の多くが正字や語彙のプロセスに関連しない領域である
- 追加的に、単語であった場合と非単語であった場合のそれぞれの活性化 の比較
 - ➤ 非単語での高い近傍性を持つアイテムと近傍性のないアイテムの比較(HiNon LoNon の比較)
 - ◆ 非単語の近傍性の効果は内側の構造において見られた(figure4)
 - ◆ 全ての領域が近傍性のないアイテムで強い活性化を示した (LoNon > HiNon)
 - ▶ 単語での高い近傍性を持つアイテムと近傍性のないアイテムの比較 (HiWord – LoWord の比較)
 - ◆ 単語の近傍性の効果は左側に分化し、外側の領域に広く関わっていた(figure5)
 - ◆ 非単語とは領域とは異なったパターンを示した
 - 単語と非単語の比較で示された多くの領域と一致
 - ◆ 全ての領域が近傍性のないアイテムで強い活性化を示した (LoWord > HiWord)

Discussion

- ▶ 単語と非単語の処理における脳の領域の違いに有意な差が見られた
- ▶ 単語と非単語の処理において、近傍性による複雑な影響が確認された

- ▶ 以下の議論は、単語と非単語の処理を先行研究と比較して、本研究の結果のより細かな解釈を示す
- > Visual Word Recognition and Lexical Decision
 - ▶ 課題の行動データに関して先行研究と比較して議論を行う
 - ▶ 単語認知の中心的な理論
 - ◆ 単語や単語のような刺激の処理
 - 複数の比較的目立つ表象や規則の活性化に関連している(Carr & Pollatsek, 1985)
 - ▶ 例えば、視覚的単語の処理は正字的、音韻的、意味的規則に関連するだろう
 - ▶ 問題は近傍性が単語の処理を促進するか抑制するかである
 - ◆ 先行研究のデータは幾つかの条件で促進的であり、他では抑制的であった (Pollatsek, Perea, & Binder, 1999; Andrews, 1989, 1997; Grainger, O' Regan, Jacobs, & Segui, 1989; Grainger & Jacobs, 1996; Sears et al., 1995; Johnson & Pugh, 1994; Snodgrass & Mintzer, 1993; Stone & Van Orden, 1993)
 - ▶ 最低3つの変数が近傍性の効果の方向を決めている
 - ◆ 近傍性の高い単語は、近傍性が低い単語より親近性が高いため、単語としてより早く受け入れられる
 - ◆ スピードが強調されたとき、近傍性の増加は単語への反応を促進し、正確さ を強調したとき、抑制した
 - スピードが強調された条件下:正字的規則に依存した
 - 正確さを強調された条件下:語義的、意味的規則に依存した
 - ◆ 語彙規則間が互いに抑制性の接続をするといったモデル
 - 親近性の高い規則は、初期にターゲット単語の規則より強く活性化し、 そこでターゲット規則の活性化を遅らせるとても強力な抑制を算出する
 - ターゲットの語彙的、意味的情報へのアクセスが遅くなる(Pollatsek et al., 1999; Carreiras et al., 1997; Grainger et al., 1989; Grainger & Jacobs, 1996; Huntsman & Lima, 1996)
- ➤ Lexicality Effect on Brain Activation
 - > Activations Favoring Words
 - ◆ 左脳半球の領域が単語の時に非単語よりも強く活性化した
 - 単語と関連した表象の活性化が引き起こした

◆ 単語認識の理論

- メンタルな単語リストや語彙から成る特定の音韻的、正字的単語規則を 仮定する
- 活性化はこれらの単語規則から意味規則へと広がり、単語の意味に相当 する意味表象を活性化させる

◆ 本研究の単語と非単語の比較

- 音韻的、正字的単語規則より意味規則の活性化に対応するだろう
 - ▶ 単語規則の活性化である場合、非単語よりも単語の方が強い活性化 を示す理由がない
- ◆ (単語と非単語の比較における) 先行研究と本研究の類似点
 - Binder et al. (1999)の研究
 - ▶ 聴覚的な単語の意味判断課題と音素の検出課題の比較 (figure6 (A))
 - ◆ 左脳半球における意味課題中のより強い活性化
 - 本研究の単語・非単語の比較と著しく類似
 - 意味的な課題と音韻的な課題の比較(Roskies et al., 2001; Poldrack et al., 1999; Mummery et al., 1998; Price et al., 1997)
 - ▶ 6 つの先行研究と本研究の結果は強く一致(figure7)
 - ◆ 本研究の単語と非単語の活性化の違いが、意味規則の程度の違いを示しているという議論を支持する結果

Activations Favoring Nonwords

- ◆ 幾つかの前頭葉の領域が単語より非単語に対して強い反応を示した(figure2)
 - 単語の書記素-音素のマッピング処理に起因している
 - ▶ 非単語の場合、遭遇したことのない書記素の結合に遭遇する(新しいマッピングの必要性)
 - ▶ 解釈の問題点
 - 免行研究:書記素-音素マッピングは左脳半球に側性化(Fiez & Petersen, 1998)
 - 本研究:両脳半球に関与(figure2の青)

> Effects of Neighborhood Size on Brain Activation

- ▶ 近傍性の仮説は非単語の反応時間における効果を予測した
 - ◆ 近傍性の高い非単語は反応時間が遅くなる
 - 事単語の持つ単語に類似した規則が、ポジティブな反応に向かうバイア

スをかけるため

- ▶ 近傍性の操作は脳の活性化においても頑健な効果を生み出したが、予期しない結果であった
 - ◆ 高い近傍性を持つアイテムよりも、近傍性がないアイテムでの強い活性化
- ▶ このことは2つの大きな疑問を生み出す
 - ◆ 近傍性のない条件において、何がより強い脳の活性化を導くのか
 - ◆ 何故、期待された方向性とは違うのか
- ▶ 単語の場合と非単語の場合で近傍性の比較による活性化の領域は大きく異なる (figure4 と 5)
 - ◆ 単語の場合
 - 主に単語-非単語の比較において、単語で強い反応を見せたものと多くの同じ領域を含んだ左脳半球の活性化(figure5)
 - これらの領域は多くの先行研究において、意味処理を反映している (Figure7)
 - ▶ 近傍性が低い場合
 - ◆ 正字的な親近性の低さから、より広範囲な意味アクセスを必要 とする
 - ▶ 近傍性が高い場合
 - ◆ 高い正字的な親近性がポジティブな反応へバイアスをかけるため、相対的に意味的な活性化が小さくなる
 - ◆ 非単語の場合
 - 近傍性の高低に関わらず小さな意味的な活性化しか起こらない
 - ▶ 従って、左脳半球に偏った活性化は見られない (figure4)
 - ◆ 腹側中前頭前皮質(figure4、figure5、最右の左中~左下)と後部帯状皮質 (figure4、figure5、最右の右中)における近傍性の効果には別の説明が必要 となる
 - これらの領域の活性化は、反応時間とおおよそ反比例している
 - ▶ 刺激への注意の処理によって発火するため、課題時間に反比例する という解釈
- ▶ また、高い近傍性を持つアイテムが多くの単語規則を活性化させるなら、本研究の結果とは逆の結果が得られるはずである
 - ◆ 特定の単語規則と特定の神経、或いは脳の神経グループの間は一対一の関係 ではないという解釈

◆ 同様に、全ての単語の表象が同じ領域を通るが、活性化は異なるといったパターンであるとも考えられる

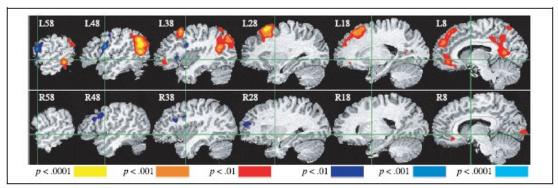


Figure 2. Word—nonword contrast. The thresholded, group-average activation map is superimposed in color on serial sagittal slices from a representative brain. The color scale refers to uncorrected *p*-values. Positive values are shown in red—yellow and indicate stronger activation by words. Negative values are shown in blue—cyan and indicate stronger activation by nonwords. Left—right (*x*) stereotaxic coordinates are given at the upper left of each slice. Green lines indicate the stereotaxic anterior—posterior (*y*) and inferior—superior (*z*) axes.

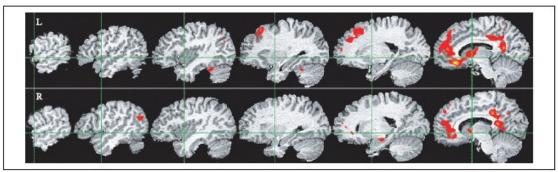


Figure 3. Neighborhood contrast with formatting as in Figure 2. There were no foci with stronger activation by large neighborhood items. Positive values (red-yellow) indicate stronger activation by items with no neighbors.

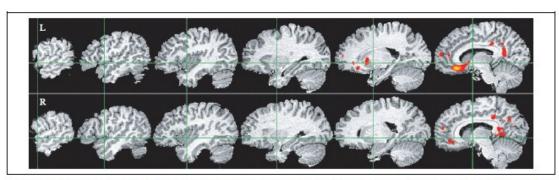


Figure 4. Neighborhood contrast for nonwords with formatting as in Figure 2. There were no foci with stronger activation by large neighborhood items. Positive values (red-yellow) indicate stronger activation by items with no neighbors.

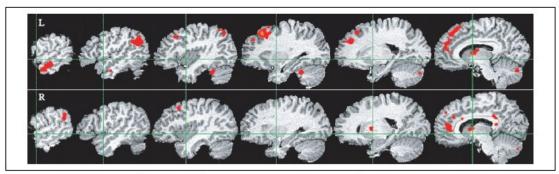


Figure 5. Neighborhood contrast for words with formatting as in Figure 2. There were no foci with stronger activation by large neighborhood items. Positive values (red-yellow) indicate stronger activation by items with no neighbors.

Figure 6. Comparison of left hemisphere activations associated with (A) performance of a semantic task compared with a phonologic task in the study by Binder et al. (1999), and (B) word > nonword activation in the current study. Formatting is as in Figure 2, except that slice locations begin at L50 and proceed in 10-mm steps to L10.

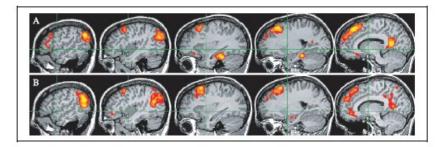


Figure 7. Summary of seven neuroimaging studies of semantic processing. Yellow regions represent areas of word > nonword activation during lexical decision in the current study. Colored dots represent the principal activation peaks from sk previous studies in which semantic tasks were contrasted with phonologic tasks. Red = Démonet et al. (1992); orange = Price et al. (1997); green = Mummery et al. (1998); magenta = Binder et al. (1999); dark blue = Poldrack et al. (1999); light blue = Roskies et al. (2001).

