

■原著

PET による仮名文字の意味処理過程の検討

櫻井靖久*, 百瀬敏光**, 岩田誠*, 佐藤俊哉***, 石川尚志*

要旨: $H_2^{15}O$ -PET を用いて, 3文字の無意味仮名文字列, 仮名单語音読課題の activation study を行った。無意味仮名文字列, 仮名单語課題とも共通して両側後頭葉内側面・外側面, 左側頭葉後下部を賦活した。仮名单語課題では更に右の側頭葉後下部も賦活された。これらの賦活領域における平均局所脳血流の変化を比較したところ, 後頭葉内側面・外側面では仮名单語, 無意味仮名文字列ともほとんど差がなかったが, 側頭葉後下部では特に左において仮名单語が無意味仮名文字列より多く局所脳血流を増大させた。このことより左側頭葉後下部は文字の形態処理以外に意味処理も行っていることが示唆された。

神経心理学 9; 202~208

Key Words: 仮名, 漢字, 側頭葉後下部, PET, activation study

Kana, Kanji, posterior inferior temporal area, positron emission tomography, activation study

I はじめに

1990年より我々は, tracer として $H_2^{15}O$ を用いた PET (positron emission tomography) により, 文字の読字過程の activation study を行ってきた。3文字の無意味仮名文字列(以下, 無意味仮名と略), 3文字の仮名单語, 2文字の漢字単語の黙読課題を同一の被験者に行きつて賦活部位を比較したところ, 仮名单語が無意味仮名, 漢字単語より多くの領域を賦活し, また仮名单語課題で左優位の縁上回の賦活が4名中2名に見られた(Momose et al, 1992; 櫻井ら, 1992)。その後我々は, 漢字単語音読課題を同一の被験者に3回繰り返して負荷し, 30の関心領域をとって賦活部位を定量的に評価した(Sakurai et al, 1992)。有意に賦活されたの

は, 両側(左優位)側頭葉後下部, Broca 野, 両側基底核, 左視床, 右上側頭回後部, 左Heschl回であった。側頭葉後下部は顔(Haxby et al, 1991; Sergent et al, 1992)や形(Corbetta et al, 1990; Gulyás et al, 1991)の弁別課題で両側とも同程度に賦活されることから, 我々はここで文字の複雑な形態処理が行われていると考えた。側頭葉後下部の賦活が漢字にのみ見られるものかどうか, またこの過程が同時に意味処理を伴うものかどうかを明らかにするため, さらに仮名单語, 無意味仮名について, 同様の activation study を行った。

なお結果の一部はすでに発表しており(Sakurai et al, 1993), 重複する部分があることをお断りしておく。

1993年5月20日受理〔共同研究者 渡辺俊明〕

Positron Emission Tomographic Studies on the Semantic Process in Kana Word Reading

*東京大学医学部脳研究施設神経内科, Yasuhisa Sakurai, Makoto Iwata, Takashi Ishikawa: Department of Neurology, Institute for Brain Research, University of Tokyo School of Medicine

**東京大学医学部放射線科, Toshimitsu Momose, Toshiaki Watanabe: Department of Radiology, University of Tokyo School of Medicine

***統計数理研究所, Toshiya Sato: Institute of Statistical Mathematics

表1A 無意味仮名音読時の局所脳血流 (カッコ内にSDを示す) (ml/100g/min, n=15)

			凝視点固視	音読課題	平均 (課題—固視) #	t-値
小 脳	R		75.75 (6.59)	76.87 (9.94)	1.12	1.64
	L		76.75 (6.56)	80.81 (9.51)	4.06	4.98*
眼 窩 回	R		50.84 (3.60)	49.94 (3.19)	-0.90	-1.38
	L		51.06 (4.55)	50.84 (4.59)	-0.22	-0.25
側頭葉後下部	R		50.32 (3.54)	51.60 (3.82)	1.28	1.22
	L		49.46 (2.61)	52.32 (2.93)	2.86	3.52**
下前頭回後部	R		56.61 (10.71)	60.30 (10.03)	3.70	4.06**
	L		56.53 (8.43)	60.05 (8.22)	3.53	2.69*
基 底 核	R		61.35 (4.70)	61.97 (5.30)	0.62	0.79
	L		55.18 (4.76)	58.94 (3.28)	3.76	4.64**
視 床	R		55.40 (4.05)	57.88 (3.17)	2.48	2.46*
	L		56.16 (4.32)	57.13 (2.62)	0.97	1.30
上側頭回後部	R		58.31 (2.04)	58.60 (4.22)	0.29	0.28
	L		58.84 (4.07)	60.80 (4.62)	1.96	2.18
後頭葉外側面	R		47.80 (5.50)	53.93 (5.50)	6.14	9.14**
	L		46.52 (4.29)	51.61 (5.67)	5.09	9.43**
前 頭 前 野	R		52.32 (3.20)	52.12 (2.69)	-0.20	-0.27
	L		52.60 (3.80)	52.68 (4.82)	0.08	0.11
Heschl 回	R		66.18 (6.24)	68.86 (5.75)	2.68	3.32**
	L		64.65 (3.15)	67.75 (4.37)	3.10	4.07**
後頭葉内側面	R		59.14 (5.28)	63.83 (5.66)	4.68	4.98**
	L		58.97 (5.49)	63.73 (4.85)	4.76	4.73**
帯状回前部	R+L		62.63 (3.56)	63.88 (4.27)	1.25	1.77
縁 上 回	R		54.01 (3.50)	51.96 (2.67)	-2.05	-2.61*
	L		51.00 (2.11)	49.34 (2.25)	-1.66	-2.80*
角 回	R		47.04 (3.00)	46.27 (2.81)	-0.77	-1.15
	L		48.43 (3.01)	47.06 (4.05)	-1.37	-2.55*
補足運動野	R		64.72 (5.80)	68.59 (3.49)	3.87	3.51**
	L		64.91 (4.20)	68.73 (4.50)	3.83	3.02*
上頭頂小葉	R		64.22 (6.60)	63.60 (5.88)	-0.62	-0.54
	L		62.19 (6.31)	62.78 (5.90)	0.59	0.81

*p<0.05 **p<0.01 (繰り返しを許した対応のあるt-検定による。以下同様)

個々の音読課題からその前の固視課題を引いた値の平均を表す。

各脳回に置いた関心領域は、OMslice level で下から順に並べてある。

II 被 験 者

日本人の文学部学生で強度の右利きと判定された者 (Edinburgh Handedness Inventory [Oldfield, 1971] で, laterality quotient が 89以上), 10人 (男6人, 女4人)。年齢分布は18歳から22歳。プロトコルは東京大学医学部医学研究倫理委員会の承認を得ており, 検査内容をあらかじめ被験者に十分説明したうえで, 被験者の同意を得てから検査を行った。被験者を無意味仮名音読群と仮名单語音読群とに5人ずつ分けた。

III 方 法

全体的なデザインは漢字単語音読課題 (Sa-

kurai et al, 1992) の時と同様である。被験者は1.4m前方の黒いスクリーン上に投影された白抜き視覚刺激を凝視または音読するよう教示された。課題内容は, 1) スクリーンの中央に映し出された凝視点の固視, 2) 縦に並べた3文字の無意味仮名または仮名单語の音読, である。刺激呈示時間は300ms, 刺激間隔は1700msで, 1 scan の間に全部で80の刺激を連続して呈示した。凝視点固視課題, 仮名音読課題を交互にそれぞれ3回ずつ, 計6回行い, 各課題の間に20分の休止時間をおいた。無意味仮名は連想価 (秋田, 1967) の低いものどうしを組み合わせて作成し, 仮名单語は熟知価の高いもの (小柳, 1959) を選んだ。刺激呈示開始はPET scanning の60秒前とし, 刺激呈示は90

表1B 仮名単語音読時の局所脳血流 (カッコ内に SD を示す) (ml/100g/min, n=15)

			凝視点固視	音読課題	平均 (課題一固視)	t-値
小 脳	R		72.18 (2.27)	74.38 (2.05)	2.20	2.60*
	L		76.44 (5.10)	77.26 (5.21)	0.82	0.64
眼 窩 回	R		57.35 (3.44)	57.35 (3.33)	0.00	0.00
	L		57.46 (3.67)	58.66 (3.29)	1.20	1.26
側頭葉後下部	R		46.90 (4.98)	49.10 (5.57)	2.20	3.77**
	L		49.10 (3.52)	54.21 (4.30)	5.11	11.29**
下前頭回後部	R		57.00 (6.76)	59.44 (7.39)	2.44	2.66*
	L		57.76 (5.16)	61.00 (4.65)	3.24	2.24*
基 底 核	R		56.14 (5.14)	59.86 (3.02)	3.71	3.09*
	L		55.82 (4.10)	58.68 (3.29)	2.85	3.10*
視 床	R		55.21 (2.83)	58.43 (3.16)	3.22	4.28**
	L		56.74 (2.68)	57.68 (3.78)	0.93	0.97
上側頭回後部	R		57.67 (4.98)	58.14 (5.17)	0.47	1.01
	L		57.26 (3.29)	58.17 (3.03)	0.90	1.51
後頭葉外側面	R		49.73 (4.79)	54.03 (5.02)	4.31	6.26**
	L		48.89 (4.66)	54.66 (2.76)	5.77	10.45**
前 頭 前 野	R		52.83 (4.04)	52.64 (2.88)	-0.19	-2.18
	L		52.34 (3.42)	53.10 (2.42)	0.76	1.07
Heschl 回	R		64.05 (4.47)	67.27 (4.56)	3.22	3.25**
	L		64.21 (3.65)	67.37 (2.90)	3.16	3.58*
後頭葉内側面	R		59.80 (3.17)	63.33 (3.73)	3.53	5.02**
	L		62.43 (3.66)	65.27 (2.83)	2.84	2.47*
帯状回前部	R+L		63.03 (2.86)	63.21 (4.13)	0.17	0.22
縁 上 回	R		55.34 (2.64)	54.71 (2.74)	-0.64	-0.97
	L		55.71 (3.00)	55.95 (3.49)	0.24	0.35
角 回	R		54.69 (7.76)	53.28 (6.87)	-1.42	-1.79
	L		53.72 (6.40)	52.28 (5.14)	-1.45	-2.56*
補足運動野	R		64.00 (4.40)	69.27 (5.92)	5.26	3.73**
	L		63.47 (4.88)	68.46 (7.06)	5.00	4.20**
上 頭 頂 小 葉	R		60.53 (3.79)	59.56 (3.30)	-0.97	-1.18
	L		63.06 (3.67)	64.09 (2.71)	1.04	1.15

秒間の scanning が終わるまで行った。呈示した刺激は全て異なるものを用い、呈示順序は random とした。

全脳平均を40ml/100g/min として、局所脳血流 (regional cerebral blood flow, rCBF) の値を normalize した。subtraction 画像は、音読課題3回の加算平均から凝視点固視課題3回の加算平均を引いて作成した。各 scan ごとに直径16mm の円形の関心領域 (region of interest, ROI) をいくつかのスライス上に置き (計40個), rCBF を計測した。原則として設定した領域それぞれに一つの ROI を置くようにした。いくつかのスライスにまたがっている領域が賦活された場合は、subtraction 画像を参考にして最も賦活されているところに ROI を置いた。

activation scan とその直前の fixation scan

のデータの組 (5人×3回の繰り返し, 計15個) について、繰り返しのある場合の対応のある t-検定 (Appendix 参照) を用いて検討した。両側有意水準5%で賦活されたと判断した。

IV 結 果

各課題遂行時の局所脳血流の平均値 (+標準偏差) を、関心領域ごとに検定結果を含めて表1に示す。無意味仮名、仮名单語とも共通して賦活されたのは、両側後頭葉内側面・外側面 (一次視覚野および視覚連合野), 左側頭葉後下部, 両側 Heschl 回, 両側下前頭回後部, 補足運動野, 左基底核, 右視床であった。その他、無意味仮名では左小脳が、仮名单語では右側頭葉後下部, 右基底核, 右小脳がさらに賦活された。頭頂葉では、逆に有意な血流低下 (deac-

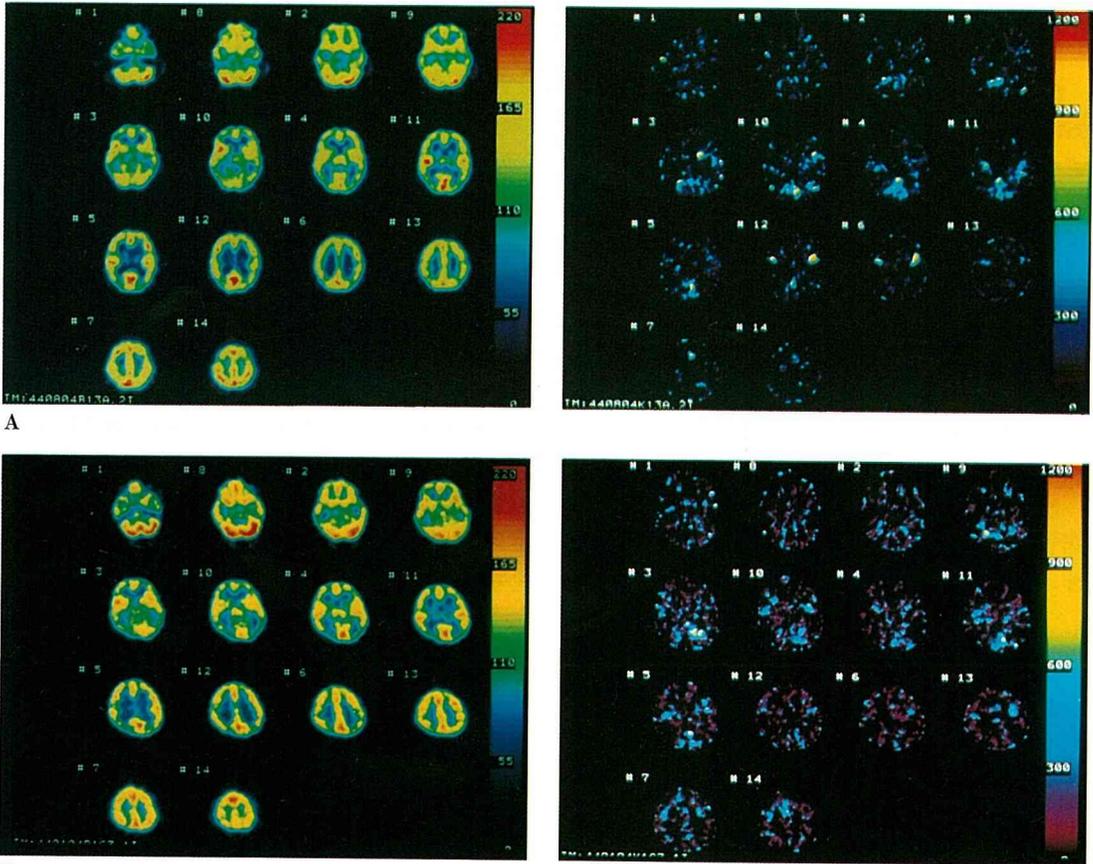


図1 音読課題遂行時の activation 画像 (1 scan; 左) および subtraction 画像 (音読課題3回の加算平均から擬視点固視課題3回の加算平均を引いて作成; 右)
 向かって右が被験者の左である。subtraction 画像の表示スケールは、最大 (1200) が16ml/100g/min に相当する。主な賦活領域は以下の通り。

- A. 無意味仮名課題：両側側頭葉後下部 (#9, 3, 10), 左基底核, Broca 野 (#3, 10), 両側後頭葉内側面・外側面 (#10, 4, 11, 5, 12), 両側 Heschl 回 (#11), 両側中心前回 (口唇領域; #12, 6), 補足運動野 (#7)
 - B. 仮名单語課題：両側 (左優位) 側頭葉後下部 (#9, 3), 両側 (左優位) 下前頭後部, 両側基底核 (#10, 4, 11), 両側後頭葉内側面・外側面 (#10, 4, 11, 5), 右 Heschl 回, 両側視床 (#11), 両側中心前回 (口唇領域; #5, 12, 6, 13), 補足運動野 (#13, 7, 14), 両側上・中前頭後部 (#7, 14)
- 仮名单語課題の方が無意味仮名課題に比べ、賦活される領域が広範に及んでいることがわかる。ただし仮名单語課題でも賦活領域が少ない例が少数ながらある。

tivation) が見られた。すなわち、無意味仮名, 仮名单語とも左角回の血流が低下し、無意味仮名ではさらに両側縁上回も血流が低下した。図1に無意味仮名課題および仮名单語課題の遂行時の画像と subtraction 画像の例を示す。

V 考 察

ここでは我々が先に行った仮名・漢字黙読課題 (Momose et al, 1992; 櫻井ら, 1992), 漢字単語音読課題 (Sakurai et al, 1992) の結果を含めて、仮名单語と無意味仮名, また仮名と漢字の賦活領域および rCBF の増加量を

比較検討することにする。

1. 仮名, 漢字の賦活領域

無意味仮名も仮名单語もともに両側後頭葉内側面・外側面, 左側頭葉後下部を含む広範な領域を賦活した。仮名单語はさらに右側頭葉後下部も賦活した。一方, 我々が先に行った漢字単語課題では賦活領域が両側側頭葉後下部に局限していた (Sakurai et al, 1992)。このように後方領域では, 仮名单語課題が無意味仮名, 漢字単語課題より多くの領域を賦活した。冒頭で述べたように, この傾向は後方領域に限らず, 仮名・漢字黙読課題 (Momose et al, 1992; 櫻井ら, 1992) でも確認されている。

漢字単語課題で, 何故両側後頭葉内側面が賦活されなかったのか疑問であるが, 後頭葉内側面の rCBF は, 左が1.93, 右が1.54 (ml/100g/min) (Sakurai et al, 1992; 櫻井ら, 1992) と, 左が右をわずかに上回って増加している (ただし, すでに述べたように, 検定の結果左右とも有意ではなかった)。本来, 一次視覚野は視覚刺激に対して左右同程度に賦活されるはずであるが, 両側とも賦活されず, しかも左でもせいぜい凝視点固視時の3%の血流増加にとどまったことは, すでに視覚情報が視覚連合野における処理の段階に入っており, 言語に関する何らかの処理が行われていることを示唆する。このわずかな血流増加は, 一次視覚野以外に隣接した内側の視覚連合野の影響が部分容積効果として入り込んでいるためと思われる。恐らく漢字単語課題で置かれた ROI が OM line 上, 幾分低く設定されたために, このようなことが起こったのであろう (Sakurai et al, 1993)。

賦活領域の分布から仮名, 漢字の読字における情報処理過程を推測すると, 仮名文字情報は一次視覚野から後頭葉内側・外側をびまん性に伝わっていき (分散処理), 一部は側頭葉後下部に達するのに対し, 漢字文字情報は後頭葉内側から側頭葉後下部に達する (集中処理) のが主要な情報処理の流れのように思われる。

Lawら (1991) は, 我々と同様, 漢字, 仮名の音読の activation study を行い, 我々の結果とは全く逆に, 視覚連合野 (後頭葉外側

面) の賦活が仮名より漢字で相対的に強かったと報告している。彼らは, 刺激文字を横に呈示しており, しかも漢字, 仮名いずれも文字数を一定にしていないので, 我々の結果とのくいちがいはこのような呈示条件の差に基づくものであろう。

2. 後頭葉内側面・外側面, 側頭葉後下部における局所脳血流

無意味仮名と仮名单語, また仮名と漢字とで賦活領域に若干差があることが明らかとなったが, つぎにこれらの賦活部位における rCBF の増加量を定量的に比較した (表1の平均 (課題一固視) の項参照)。その結果, 仮名单語は無意味仮名に対して, 左後頭葉外側面での rCBF の増加量が +0.68 (ml/100g/min) とほとんど差がなく, 後頭葉内側面, 右後頭葉外側面では逆にマイナスの値を示した。漢字単語では1で述べた通り, これらの領域で有意な血流増加が得られていない。一方, 側頭葉後下部では, 仮名单語課題が無意味仮名課題より多く rCBF を増加させた。この傾向は左において +2.25 と特に著しかったが, 右においても +0.93 と増加が見られ, そのため仮名单語課題で右側頭葉後下部に有意な血流増加をもたらす結果となった。漢字単語課題でも, 血流増加は左優位であるが, 左右差は著明ではない。

以上の事実より次のような推論が可能であろう。まず, 仮名单語と無意味仮名とを比較すると, 後頭葉内側面・外側面ではほとんど血流増加に差がなかったが, 後頭葉後下部において仮名单語での血流増加が特に左で著しかった。この理由として第一に考えられるのは, 仮名单語の意味的屬性が側頭葉後下部をさらに左優位に賦活させたのではないかということである。すなわち, 左側頭葉後下部で文字の意味処理過程が行われている可能性が, 示唆される。もう一つの可能性は, 無意味仮名が逐字的 (letter by letter) に認知されるのに対し, 仮名单語は語全体として, いわば Gestalt 的に認知されるために, それが血流増加の差となって現れたのではないかということである。しかしながら, 語全体としての形 (word form) に対し

てのみ反応したのなら、これは形態処理と考えられるので、左右同程度に賦活されるはずである。実際は、仮名单語でむしろ左右差が開いたわけであるから、この可能性は低い、あるいは少なくともこれが主たる機序ではないと考えられる。

冒頭で述べた通り、側頭葉後下部は複雑な形態処理も行っていると考えられる。このことも考え合わせると、左側頭葉後下部は、読字の形態処理、意味処理を同時に行っているものと思われる。

また、側頭葉後下部において漢字が仮名に比べ血流増加の左右差が著明でなかった。これは漢字が仮名より形態的に複雑なため、漢字の読みに形態処理がより多く関わっていることを反映したものであろう。

謝辞：本稿作成に当たり、御指導を賜った東京大学医学部脳研究施設神経内科 金澤一郎教授に深謝いたします。

Appendix：繰り返しがある場合の対応のある t-検定

データは5人の被験者について activation scan とその直前の fixation scan の rCBF を3回繰り返し測定した。測定が1回だけであれば、通常の対応のある t-検定を用いればよいが、ここでは3回の繰り返しを考慮した検定を説明する。

i 番目の被験者について、 j 回目の繰り返しの activation scan と fixation scan の rCBF の差を x_{ij} で表す。各被験者について rCBF の差は分散 σ^2 が被験者によらず一定で、平均 μ_i が異なる正規分布に従うと仮定する。我々が知りたいのは「全ての被験者について同方向の差がある (全ての $\mu_i \geq 0$ または $\mu_i \leq 0$)」かどうかであり、この仮説に対して「全ての被験者について rCBF の差は0 (全ての $\mu_i = 0$)」という仮説を検定する。15個のデータ全体の平均値を M とすると、「rCBF の差は0」という仮説が正しい時、 M は平均0、分散 $\sigma^2/15$ の正規分布に従う。 σ^2 は、

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (x_{ij} - M_i)^2}{15-5}$$

で推定できる (ただし M_i は各被験者の3回の

繰り返しの平均値) ので、結局、

$$T = \frac{\sqrt{15} M}{S}$$

が自由度 $15 - 5 = 10$ の t-分布に従うことから、p 値を求めることができる。

文 献

- 1) 秋田清：数字、アルファベット、日本語各1文字刺激に対する1字連想。心理学研究 38；215-232, 1967
- 2) Corbetta M, Miezin FH, Dobmeyer S et al : Attentional modulation of neural processing of shape, color and velocity in humans. Science 248 ; 1556-1559, 1990
- 3) Gulyás B, Roland PE : Cortical fields participating in form and colour discrimination in the human brain. NeuroReport 2 ; 585-588, 1991
- 4) Haxby JV, Grady CL, Horwitz B et al : Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. Proc Natl Acad Sci USA 88 ; 1621-1625, 1991
- 5) 小柳恭治, 石川信一, 大久保幸郎ら：日本語三音節名詞の熟知価。心理学研究 30；49-57, 1959
- 6) Law I, Kanno I, Fujita H et al : Left supra-marginal/angular gyri activation during reading of syllabograms in the Japanese language. J Neurolinguistics 6 ; 243-251, 1991
- 7) Momose T, Sakaki Y, Sakurai Y et al : Functional studies with $H_2^{15}O$ PET. Biomedical Research 13 (suppl 1) ; 77-82, 1992
- 8) Oldfield RC : The assessment and analysis of handedness : the Edinburgh inventory. Neuropsychologia 9 ; 97-113, 1971
- 9) Sakurai Y, Momose T, Iwata M et al : Kanji word reading process analysed by positron emission tomography. NeuroReport 3 ; 445-448, 1992
- 10) 櫻井靖久, 百瀬敏光, 岩田誠ら：漢字および仮名文字の読字過程——PET による activation study——。神経心理 8 ; 176-181, 1992
- 11) Sakurai Y, Momose T, Iwata M et al : Semantic process in kana word reading : activation studies with positron emission

tomography. *NeuroReport* 4 ; 327-330, 1993
 12) Sergent J, Ohta S, Macdonald B : Functional neuroanatomy of face and object proces-

sing. A positron emission tomography study. *Brain* 115 ; 15-36, 1992

Positron emission tomographic studies on the semantic process in kana word reading

Yasuhisa Sakurai*, Toshimitsu Momose**, Makoto Iwata*,
Toshiya Sato***, Takashi Ishikawa*

*Department of Neurology, Institute for Brain Research, University
of Tokyo School of Medicine

**Department of Radiology, University of Tokyo School of Medicine

***Institute of Statistical Mathematics

Positron emission tomography was used to study changes in regional cerebral blood flow during Japanese kana word or kana non-word reading aloud tasks. Both kana word and kana non-word tasks activated bilaterally the medial and lateral occipital gyri and the left posterior inferior temporal area. The kana word task also activated the right posterior inferior temporal area. Comparison of the mean regional cerebral blood flow increases revealed that the

medial and lateral occipital gyri on both sides were symmetrically activated by kana word and kana non-word tasks, while the left posterior inferior temporal area was more activated by the kana word task than by the kana non-word task. The result suggested that the posterior inferior temporal area plays the role of semantic process as well as the morphological one in word reading.